



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**SVILUPPO E TEST SU PANNELLI INNOVATIVI
PER PARETI AUTO – OMBREGGIANTI E
RIFLETTENTI: CALCOLO STRUTTURALE E
PRESTAZIONI TERMICHE**

**Design and testing of innovative panels for self-shading and
reflective façades: structural calculation and thermal
performance**

Relatore:

Prof.ssa Ing. Francesca Stazi

Laureanda:

Marica Calvaresi

Correlatore:

Prof. Ing. Costanzo Di Perna

Ing. Claudio Speranza

Anno Accademico 2022/2023

Indice

| | |
|---|-----|
| ABSTRACT | 5 |
| 1. INTRODUZIONE | 6 |
| 2. STATO DELL'ARTE..... | 8 |
| 2.1 Fattori che influenzano la facciata ventilata | 8 |
| 2.2 Studio della tecnologia..... | 14 |
| 3. FASI E METODI..... | 20 |
| 3.1 Fasi di studio..... | 20 |
| 3.2 Sistema di aggancio | 21 |
| 3.3 Metodi analitici..... | 25 |
| 3.3.1 Metodi di modellazione e calcolo strutturale..... | 25 |
| 3.3.2 Metodi di valutazione ombreggiamento | 39 |
| 3.4 Metodi sperimentali | 50 |
| 3.4.1 Sperimentazione su prototipi..... | 50 |
| 4. RISULTATI..... | 64 |
| 4.1 Sollecitazioni e verifiche strutturali | 64 |
| 4.2 Sperimentazione del comportamento termico..... | 73 |
| 4.2.1 Incidenza ombreggiamento | 74 |
| 4.2.2 Incidenza forma..... | 80 |
| 4.3 Progetto di una sperimentazione in situ | 90 |
| 5. DISCUSSION | 94 |
| 6. CONCLUSIONI | 98 |
| 7. APPENDICI..... | 99 |
| Appendice A – Scheda tecnica Tassello Würth | 99 |
| Appendice B – Scheda tecnica barra metallica inferiore..... | 101 |
| Appendice C – Mappe di temperatura acciaio zincato..... | 103 |
| Bibliografia..... | 107 |

| | |
|---------------------------|-----|
| Indice delle figure..... | 109 |
| Indice delle tabelle..... | 112 |

ABSTRACT

L'obiettivo di questa tesi è di dare un contributo ad un problema aperto che riguarda le facciate ventilate; queste seppur performanti da un punto di vista energetico, non sono una soluzione largamente adottata a causa di un problema di costi. È stato dato supporto a tale problema attraverso la progettazione di un modulo di facciata ventilata auto – ombreggiante e che non abbia bisogno della classica sottostruttura metallica in montanti e traversi per essere installata.

Per questo motivo sono stati studiati ombreggiamento e sistema di aggancio. È stato effettuato uno studio analitico orientato al calcolo strutturale e sperimentale che ha previsto il contemporaneo confronto di diversi prototipi di pannelli metallici per facciate ventilate variando le diverse combinazioni di forma (sagomata, piana) e dispositivi di schermatura orizzontale, per valutarne il comportamento estivo.

I risultati analitici hanno dimostrato il soddisfacimento delle verifiche strutturali, mentre quelli sperimentali hanno mostrato che l'ombreggiamento prodotto dalla forma progettata e la presenza di dispositivi di schermatura orizzontali permettono di ridurre notevolmente le temperature superficiali rispetto alle soluzioni non schermate.

1. INTRODUZIONE

Il risparmio energetico è una priorità assoluta nei paesi sviluppati. Il settore edile è responsabile del 40% del consumo energetico e del 36% delle emissioni di CO₂ in Europa. L'involucro edilizio è l'elemento costruttivo che ha il maggiore impatto sul consumo energetico complessivo dell'edificio.

La ricerca sull'involucro edilizio è, quindi, focalizzata sulla minimizzazione del fabbisogno energetico, adottando due diverse tipologie di approcci: l'approccio attivo che prevede l'utilizzo di sistemi meccanici efficienti (ad esempio sistemi HVAC e fotovoltaici), mentre l'approccio passivo consiste nell'ottimizzazione delle risorse naturali (ad esempio orientamento, ombreggiatura e isolamento).

Tra le soluzioni passive, oggi l'architettura moderna si è orientata molto verso l'utilizzo di facciate ventilate per diversi tipi di edifici, climi e configurazioni progettuali.

Oltre che per ridurre il consumo energetico, ci sono altri motivi per utilizzare una facciata ventilata, come l'incremento della durabilità della struttura, la prevenzione della condensa, la protezione da pioggia e vento e scopi estetici che orientano il processo di progettazione dell'involucro.

Una facciata ventilata tradizionale è costituita da due strati opachi distanziati tra loro a formare un'intercapedine di aria intermedia. Lo strato esterno assorbe la radiazione solare diretta riscaldando l'aria all'interno dell'intercapedine; ciò crea un moto d'aria convettivo all'interno dell'intercapedine stessa, favorendo così il cosiddetto "effetto camino", ovvero la dissipazione di calore verso l'alto.

Tale dissipazione viene influenzata anche dalla configurazione del giunto del paramento esterno che può essere aperto o chiuso. Quando il giunto è chiuso, il flusso ascensionale è continuo, omogeneo e simmetrico lungo la parete, quando è aperto si determinano discontinuità localizzate del flusso che diventa disomogeneo e asimmetrico, influenzando la velocità dell'aria. Un altro vantaggio delle facciate ventilate è la possibilità di controllare l'umidità, evitando la formazione della condensa.

Le prestazioni termiche di una facciata ventilata sono principalmente influenzate dalla progettazione dei suoi componenti, come la distanza tra i due strati, la tipologia dei giunti del rivestimento esterno e il materiale dello stesso che solitamente è composto da pannelli modulari di vario materiale (metallico, ceramico, lapideo, composito) installati a secco.

Tipicamente, la tecnologia utilizza una sottostruttura metallica, composta da elementi verticali e orizzontali, a sostegno del rivestimento esterno.

Lo studio in esame ha l'obiettivo di progettare una facciata ventilata innovativa, da incorporare sia in ristrutturazioni che in nuove costruzioni, priva della sottostruttura metallica tipica, facilitando le operazioni di montaggio in maniera tale da ridurre tempi e costi di installazione. Da qui la necessità di ideare un pannello di forma particolare che aggiunge anche il vantaggio di auto ombreggiare la facciata stessa.

L'interesse è stato posto anche sulla ricerca dei materiali da costruzione a partire da quelli attualmente più utilizzati in tale ambito e analizzandone diversi aspetti, quali leggerezza, prestazioni meccaniche, costi.

Per verificare l'efficienza della tecnologia sia dal punto di vista energetico che meccanico, sono state svolte due sperimentazioni:

- un confronto tra pannelli di diverso materiale e forma;
- una valutazione su facciata reale, tenendo presente che la facciata rappresenta l'interfaccia tra i fattori ambientali esterni (che variano continuamente) e le esigenze interne degli occupanti (pressoché costanti).

2. STATO DELL'ARTE

Lo studio effettuato nasce dalla ricerca e dall'analisi della letteratura scientifica nazionale ed internazionale riguardo l'ambito di interesse. L'attenzione è stata posta inizialmente su quanto ormai noto, cioè le tipologie di facciate ventilate tradizionali, i materiali di rivestimento esterni, il comportamento termo-fisico in funzione dei parametri da cui questo dipende.

Successivamente ci si è focalizzati sui limiti e sulle tematiche rimaste ancora "aperte", arrivando agli ambiti inerenti all'innovazione, quali eliminazione della sottostruttura metallica, ricerca di una forma architettonica e funzionale, la scelta di un materiale in grado di garantire un buon rapporto costi-benefici.

2.1 Fattori che influenzano la facciata ventilata

Quando si parla di facciata ventilata si intende una parete su cui è installato a secco un sistema di rivestimento esterno che crea un'intercapedine di aria tra questo e la parete stessa. Uno degli obiettivi principali di questa soluzione è quello di evitare l'eccessivo riscaldamento degli ambienti interni e di conseguenza minimizzare i consumi energetici e migliorare le condizioni di comfort indoor. Questo è raggiunto grazie al moto convettivo dell'aria che si viene a creare all'interno dell'intercapedine per effetto della differenza di temperatura tra le due superfici che delimitano l'intercapedine. Infatti, la temperatura dell'interfaccia esterna è maggiore di quella interna in quanto la prima aumenta per effetto della radiazione solare diretta incidente.

A riguardo sono stati svolti numerosi studi, molti dei quali approfondiscono il discorso del risparmio energetico analizzando il comportamento termico delle facciate ventilate e come questo varia al variare dei parametri climatici esterni e delle caratteristiche della facciata stessa. Tra i fattori che influenzano la performance della facciata ventilata rientrano il colore, lo spessore, il tipo di materiale e la rugosità del rivestimento esterno, così come la dimensione del canale di ventilazione. Inoltre, il comportamento del sistema è correlato anche alla stratigrafia della struttura su cui viene installata la facciata.

Ana Picallo-Perez et al. [1] hanno effettuato un ulteriore passo nella ricerca analizzando le facciate ventilate attraverso la prima e la seconda legge della termodinamica fornendo sia bilanci energetici che bilanci exergetici sulla facciata interna ed esterna di una facciata. In termodinamica, per exergia si intende la massima frazione di energia di prima specie (meccanica, potenziale, cinetica) che può essere convertita in lavoro meccanico mediante macchina reversibile ed è un concetto utilizzato per definire i fenomeni termodinamici senza introdurre il concetto di entropia. Per fare questa analisi, è stato effettuato un test sperimentale nel periodo invernale, durato sei giorni, su una facciata ventilata forzata semplice costituita da una lamiera di acciaio zincato, una camera d'aria e un pannello sandwich con anima in poliuretano. Nello strato metallico è stata notata una ripetuta variazione di energia interna a causa della sua bassa inerzia termica e dell'elevata diffusività termica del materiale, mentre all'interno dell'intercapedine gli sbalzi di calore sono risultati maggiormente smorzati a causa della sua bassa densità e dimensioni. Quindi, quasi tutta la variazione di energia interna è dovuta allo strato di pannello sandwich.

L'analisi dell'exergia mostra le stesse tendenze, ma su scala molto più piccola, con la differenza che, in termini energetici, il pannello sandwich è lo strato più influente in termini di variazione di energia interna accumulata nei materiali, mentre per l'exergia è la lamiera seguita dal pannello sandwich per via delle elevate variazioni di temperatura rispetto allo stato di riferimento.

Uno dei limiti di questa analisi è la mancanza di familiarità con l'uso della proprietà exergia nelle applicazioni edilizie, quindi i risultati così ottenuti non sono facili da interpretare, l'altro è la dipendenza dell'exergia dallo stato di riferimento scelto che nell'analisi di un edificio varia al variare delle condizioni ambientali, richiedendo un approccio dinamico e, di conseguenza, molti dati spesso difficili da ottenere.

Anche Stefano Fantucci et al. [2] hanno svolto un'analisi sulle prestazioni delle caratteristiche della facciata e l'influenza delle condizioni al contorno esterne attraverso una campagna sperimentale su una facciata orientata a sud-ovest in condizioni estive valutandone diverse configurazioni.

Tali configurazioni sono state confrontate con una facciata di riferimento in mattoni non ventilata. Dai risultati sperimentali è possibile concludere che tutte le caratteristiche della facciata studiata, ad esempio il colore esterno, l'altezza dei canali, le griglie di ventilazione hanno un impatto sostanziale sulle prestazioni energetiche della stessa.

In particolare, il colore della superficie esterna è la caratteristica che più colpisce la prestazione energetica estiva. Per le migliori prestazioni termiche estive sono sempre preferibili i colori chiari rispetto ai colori più scuri; è altresì da notare che i colori più scuri hanno raggiunto temperature estremamente elevate (fino a 66 °C) e questo aspetto potrebbe essere rilevante per la durabilità dei materiali di rivestimento esterno e per il comfort termico esterno. Al contrario, per la configurazione con intercapedine d'aria chiusa in condizioni invernali, la facciata con colori più scuri potrebbe fornire una quantità maggiore di guadagni termici. La riduzione dei carichi/guadagni termici giornalieri rispetto alla facciata di riferimento è stata rispettivamente dell'80% e del 31% per una facciata chiara e per una scura.

L'impatto del rapporto di apertura delle griglie è moderato e la tipologia delle griglie di aerazione che assicurano le migliori prestazioni è quella caratterizzata da un maggior rapporto di aperture. Tuttavia, un'osservazione importante è che grandi aree di apertura possono determinare intrusioni esogene.

Un altro parametro che ha un impatto significativo sulla velocità dell'aria all'interno del canale di ventilazione è l'altezza della facciata. Nel caso in esame la velocità dell'aria, per esempio, passa da 0,4 a 0,68 m/s passando da 237 a 456 cm di altezza della facciata con un incremento circa del 70%. Le facciate più alte mostrano migliori prestazioni termiche estive rispetto alle facciate più basse. Tuttavia, questa differenza è moderata e le facciate più alte potrebbero soffrire di prestazioni non omogenee lungo l'altezza del canale.

Per quanto riguarda le condizioni climatiche esterne, il parametro meteorologico che incide maggiormente sulle prestazioni energetiche estive è la temperatura dell'aria esterna: le facciate ventilate mostrano le migliori prestazioni termiche estive a basse temperature estive ed elevato irraggiamento solare verticale. Per questo motivo questa soluzione risulta più performante se applicata in clima temperato e subtropicale rispetto a un clima caldo e umido.

Data l'importanza della portata d'aria nell'intercapedine per le prestazioni termiche delle facciate ventilate, Mohammed Rahiminejad et al. [3] hanno effettuato uno studio in cui sono specificati i fattori effettivi sul tasso di ricambio d'aria dietro i comuni rivestimenti esterni, hanno rivisto l'effetto camino e l'effetto vento.

Inoltre, hanno cercato di colmare la panoramica ancora incompleta riguardo le perdite di carico delle portate d'aria analizzandone la rete idraulica lungo l'intercapedine muraria studiata. Mohammed Rahiminejad et al. [3] hanno descritto anche le varie correlazioni per i

fattori di perdita di carico, ad esempio la presenza di aperture di sfiato, curve (perdite di carico per flessione), configurazioni a giunti aperti, attrito, cambiamento del flusso d'aria direttamente all'uscita, listelli ventilati (scossalina metallica) che costringono il flusso di aria a piegarsi quando entra o esce dalla cavità.

Tra i fattori esterni che incidono sul comportamento termo-idrodinamico ci sono la velocità del vento esterno e la radiazione solare, che inducono un gradiente di temperatura sia in direzione orizzontale che verticale. La portata d'aria nel canale può essere prevista risolvendo teoricamente e numericamente una rete idraulica, insieme a simulazioni complesse.

Per definire l'intervallo di velocità dell'aria o il tasso di ricambio d'aria all'ora dietro i tipi comuni di rivestimenti ventilati utilizzati negli edifici (mattoni, cemento e stucco, legno, ceramica), sono stati raccolti i tassi di ventilazione dietro vari tipi di spazi aerei con diverse geometrie e in diverse condizioni.

Secondo la letteratura, nelle pareti di mattoni è stata osservata un'ampia gamma di velocità dell'aria nelle cavità, la velocità massima dell'aria è stata registrata dietro il rivestimento in legno, seguita da quella dietro una facciata di cemento, mentre la velocità più bassa è stata ottenuta utilizzando pannelli in ceramica.

Nonostante molteplici studi eseguiti in questo campo, la maggior parte delle pubblicazioni non ha considerato l'effetto della permeabilità all'aria dell'esterno materiale di rivestimento il meccanismo di ricambio d'aria causato da un rivestimento non rigido sotto un flusso di vento turbolento.

Anche Rosa Francesca De Masi et al. [4] hanno studiato le diverse caratteristiche dell'intercapedine e dalle sollecitazioni esterne che possono influenzare l'effetto camino tipico delle facciate ventilate. Lo studio proposto si concentra su un'analisi in clima mediterraneo per un periodo stagionale, a differenza di altri studi, basati solitamente su brevi campagne di monitoraggio. Sono state analizzate due diverse configurazioni di griglie: canale semichiuso, con velocità di apertura (\ddot{y}) di 0,12 e canale aperto con $\ddot{y} = 0,78$.

Anche questo studio dimostra che è possibile combinare le principali variabili esterne come la velocità del vento, la temperatura dell'aria e la radiazione solare con altri parametri per confrontare diversi tipi di tecnologie.

I risultati suggeriscono che tra tutti i parametri esterni, la radiazione solare sembra essere il più importante per l'attivazione della convezione naturale mentre valori più elevati di temperatura dell'aria potrebbero causare fenomeni di stratificazione all'interno del canale. La velocità del vento ortogonale alla parete influenza la distribuzione del campo termico principalmente nella parte inferiore della cavità e nel caso di bassi valori di vento, la configurazione semichiusa è solitamente svantaggiata. Considerando una tipica giornata calda con elevato irraggiamento solare, il monitoraggio della velocità dell'aria indica che il canale aperto è caratterizzato da valori più elevati per ogni condizione esterna, con un valore massimo di 4,21 m/s; il valore massimo registrato è 0,85 m/s con la configurazione semichiusa. La distribuzione globale dei valori monitorati indica che la velocità dell'aria nel canale aperto è più spesso nell'intervallo 1,2–0,2 m/s, mentre la configurazione chiusa ha un intervallo di variabilità più ristretto tra 0,4 m/s e 0,2 m/s. Per lo stesso scenario, durante le ore di maggiore irraggiamento solare, la temperatura superficiale sugli isolanti varia tra 32,1°C e 38,2°C nella configurazione aperta e tra 37,4°C e 43,7°C nell'altra configurazione. Questi andamenti indicano che il flusso d'aria all'interno della configurazione con $\dot{\gamma}$ pari a 0,78 garantisce migliori condizioni operative per la parete di fondo. Lo strato isolante, infatti, è sottoposto a minori stress termici che ne preservano le caratteristiche; inoltre, la minore differenza di temperatura indica che il flusso di calore conduttivo in ingresso è ridotto rispetto all'altro canale. Questo è un altro effetto positivo della facciata ventilata durante il periodo estivo.

Un altro studio di Rosa Francesca De Masi et al. [5], effettuato per un periodo annuale su clima mediterraneo, ha dimostrato come il comportamento della parete ventilata vari al variare della stratigrafia della parete stessa mantenendo immutate le condizioni climatiche esterne. Le situazioni confrontate sono tre:

- parete non isolata (Figura 1(A)) costituita da blocchi in calcestruzzo cellulare aerato, intonaco cementizio e uno strato esterno di finitura a base di calce e cemento, con uno spessore complessivo di 12 cm;
- parete ventilata opaca a giunto aperto (Figura 1(B)), composta da 14 cm di pannelli isolanti in legno, un'intercapedine d'aria di 10 cm e piastrelle di cemento per uno spessore di 2,5cm, montata sulla base della parete non isolata precedentemente descritta;

- parete composta dalla stessa stratigrafia non isolata e da pannelli isolanti sottovuoto (Figura 1(C)) (VIP con nucleo di silice microporosa pressata all'interno di un involucro di alluminio), un'intercapedine d'aria chiusa, i pannelli in fibrocemento e un rivestimento esterno in quarzo.

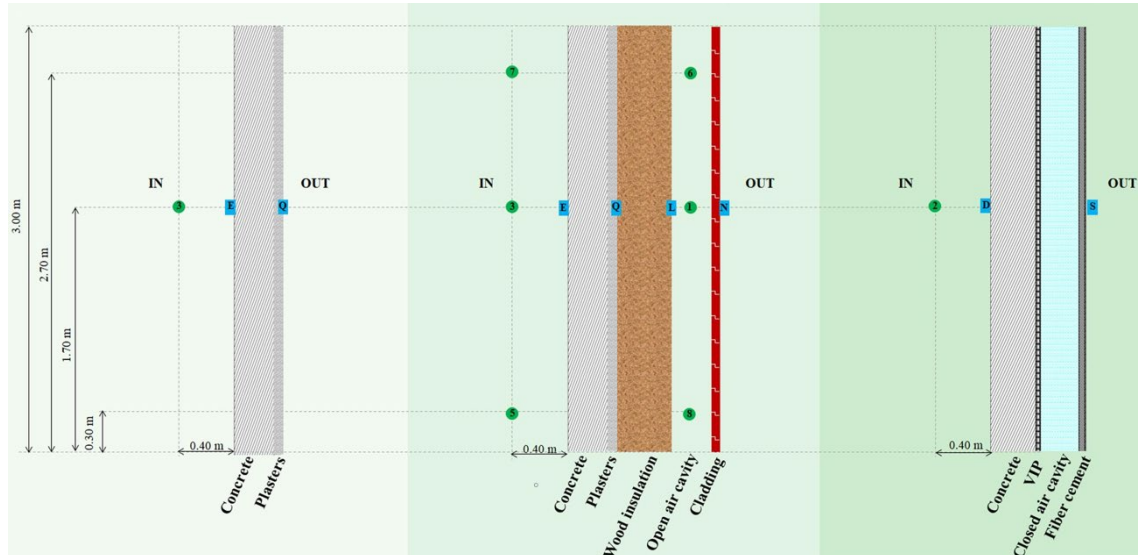


Figura 1 - Stratigrafie pareti: parete non isolata (A), parete ventilata opaca a giunto aperto (B), parete con VIP (C).

I componenti principali della soluzione con la facciata ventilata (isolamento e rivestimento) sono realizzati con materiali riciclati da costruzione e rifiuti di demolizione. L'attività di monitoraggio dimostra che la facciata ventilata opaca a giunti aperti progettata può ridurre la trasmittanza termica in campo e il flusso di calore durante la stagione invernale, dell'85%; la temperatura della superficie interna è più stabile con valori molto prossimi alla temperatura dell'aria ambiente, o superiori (18% delle osservazioni) anche nel periodo invernale (fino a 2,7 °C), raggiungendo le condizioni di comfort termico con ridotta attivazione del sistema di riscaldamento.

Anche le proprietà inerziali sono migliorate con una riduzione del valore medio del fattore di decremento di circa il 64% e un incremento del valore medio del time-shift di circa 5h. Considerando la parete in Figura 1(C), con pannelli isolanti sottovuoto, la trasmittanza termica può essere ulteriormente ridotta di circa il 37% a parità di parametri dinamici. L'analisi giornaliera indica che durante l'inverno l'intercapedine d'aria funge da ulteriore strato isolante perché la ventilazione è davvero limitata, mentre durante l'estate la ventilazione è inferiore al previsto.

Infine, la valutazione del ciclo di vita indica che la facciata ventilata progettata consente una riduzione del 26% del potenziale di riscaldamento globale e di oltre il 50% per le altre categorie di impatto, rispetto a una parete con pannelli isolanti sottovuoto.

2.2 Studio della tecnologia

Dalla letteratura è possibile notare che oggi si stanno svolgendo molti studi in merito a nuove tecnologie che permettono di svincolarsi dalla classica struttura delle facciate ventilate in montanti e traversi, dai rivestimenti di forma regolare e dai materiali tradizionali.

Un esempio di facciata ventilata che presenta un rivestimento con forme particolari è quella progettata da Ester Pujadas-Gispert et al. [6] per un edificio sito a Dubai.

Questo studio è finalizzato alla progettazione di una facciata che possa essere rapidamente montata, smontata e conservata in container per un facile trasporto successivo. Questa è formata da pannelli di forma triangolare e materiale riciclato.

Oltre a garantire un buon comportamento termico, questa forma evita il contatto della pioggia con la struttura sottostante e impedisce alla sabbia di rimanere incastrata all'interno della facciata stessa.

Per quanto riguarda i materiali utilizzati nei rivestimenti delle facciate ventilate, oggi trovano largo impiego sia materiali tradizionali che innovativi, passando dai lapidei, ceramici, metallici, ai fibrorinforzati. Lo studio è stato centrato sui materiali metallici e sui fibrorinforzati.

Nel caso dei fibrorinforzati, Payam Sadrolodabae et al. [7] hanno progettato pannelli di rivestimento per facciate in fibre sintetica naturali e/o riciclate (circa 80% di fibre vegetali e 20% di fibre di poliestere, immerse in pasta di cemento realizzata con cemento Portland) garantendo resistenza meccanica, durabilità, costruibilità, estetica, capacità di isolamento e resistenza al fuoco. In particolare, è stata migliorata la resistenza a flessione e l'assorbimento di energia.

Un altro studio sui pannelli realizzati con fibre riciclate annegate in una matrice di cemento Portland è quello sviluppato da Heura Ventura et al. [8]. In tal caso però si tratta di fibre corte di scarto tessile tecnico ricavate dalle divise giornaliere dei vigili del fuoco che hanno una composizione di 93% di fibre meta-aramidiche, 5% di fibre para-aramidiche e 2% di fibre antistatiche. Le lastre composite così ottenute hanno presentato un comportamento di incrudimento con un'elevata resistenza alla flessione (~15 MPa) e tenacità (~3,5 kJ/m²) e resistenza alla frattura. Il composito ha mantenuto il comportamento di incrudimento dopo

essere stato sottoposto ad invecchiamento umido/secco, con una leggera diminuzione dell'energia specifica di frattura di circa il 23%, a conferma dell'adeguata durabilità del materiale sviluppato.

Tra le altre sperimentazioni in cui si trattano fibre riciclate, rientra quella di Arslan Akbar et al. [9] che utilizza fibre di carbonio riciclate. Da questo studio è stato determinato che le fibre di carbonio sono chimicamente inerti e, di conseguenza, non subiscono il deterioramento della resistenza nell'ambiente cementizio. Inoltre, la resistenza a flessione e trazione, le prestazioni a fatica, il comportamento post fessurazione dei composti cementizi possono significativamente migliorati aggiungendo il tipo e la quantità appropriati di fibre di carbonio, mentre la resistenza a compressione non migliora in maniera significativa.

Passando invece ai pannelli realizzati in materiale metallico.

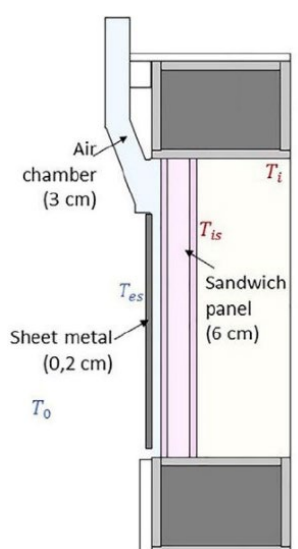


Figura 2 - Stratigrafia parete

Alcuni studi in letteratura come quello di Ana Picallo-Perez et al. [1] studiano il comportamento di facciate ventilate con rivestimento in leghe metalliche leggere.

Nel caso specifico è stata testata, durante il periodo invernale, una parete semplice costituita da una lamiera di acciaio zincato da 2mm, un'intercapedine e pannello sandwich con anima in poliuretano da 6cm (Figura 2).

L'energia interna della facciata difficilmente partecipa allo scambio energetico a causa della bassa inerzia e dell'elevata diffusività termica dello strato metallico. La variazione di energia interna dello strato metallico mostra maggiori fluttuazioni poiché si carica e scarica rapidamente a causa della sua bassa capacità termica. Lo segue il pannello sandwich e, infine, la camera d'aria che è lo strato che smorza maggiormente gli sbalzi di calore per la sua bassa densità e dimensioni.

Un altro studio riguardante una facciata ventilata con rivestimento metallico è stato eseguito Anche T.Colinart et al. [10]. La parete in esame è un elemento prefabbricato costituito da pannelli sandwich e rivestimento in metallo nero.

Infine, C. Marinosci et al. [11] hanno studiato sperimentalmente il comportamento termico delle facciate ventilate in condizioni tipiche dell'estate mediterranea. Lo strato esterno di tali facciate è un rivestimento in pietra o alluminio a giunti aperti e separato dalla parete interna dall'intercapedine d'aria ventilata. Nella parte superiore e inferiore della cavità si trovano le griglie di ventilazione. L'obiettivo principale è stato quello di quantificare la riduzione del flusso di calore attraverso la parete interna, dovuta allo scarico entalpico legato al flusso d'aria che si instaura all'interno dell'intercapedine della parete ventilata durante una tipica giornata estiva.

Durante il periodo estivo, la pelle esterna della facciata ventilata capta la radiazione solare incidente che aumenta la temperatura di parete dell'intercapedine e la temperatura laterale dell'intercapedine: questo valore influenza la velocità media dell'aria all'interno dell'intercapedine a causa dell'effetto di galleggiamento migliorato. Inoltre, la velocità dell'aria in cavità è correlata anche al valore della velocità del vento esterno, quindi il valore finale della portata d'aria attraverso l'intercapedine si ottiene come effetto combinato del vento e della radiazione solare che varia la temperatura della parete della cavità.

Al fine di studiare l'impatto di questi diversi aspetti sulle prestazioni termiche delle pareti ventilate, sono state studiate dieci diverse configurazioni per la facciata ventilata (Figura 3, Tabella 1).

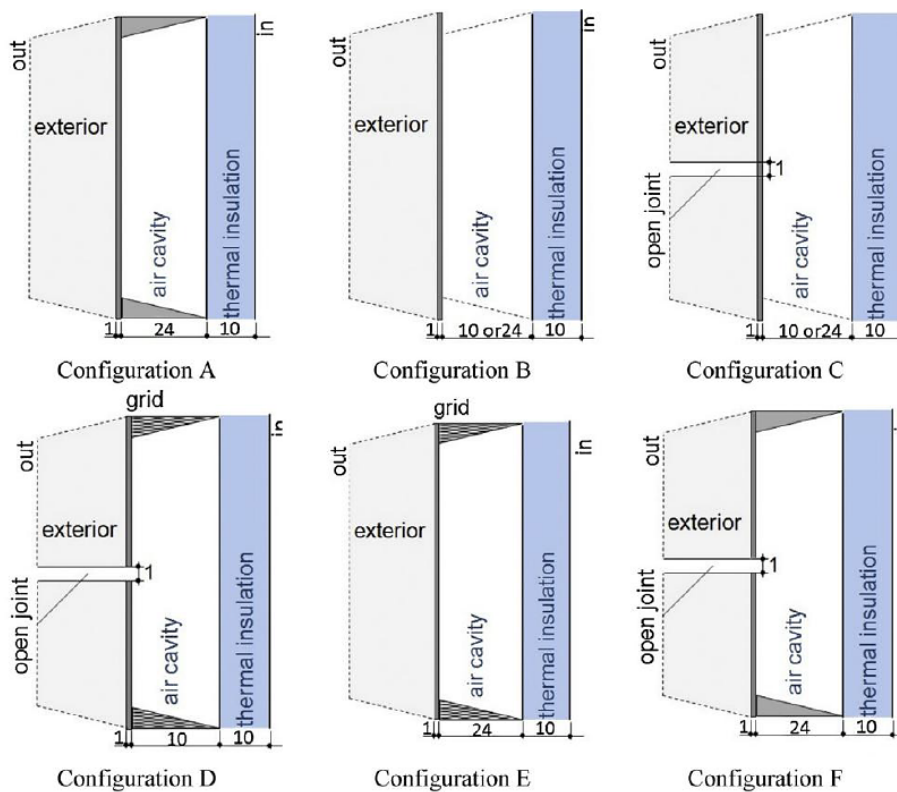


Figura 3 - Configurazioni facciata ventilata

Tabella 1 - Configurazioni facciata ventilata

| Configurazione | Modello | Orientamento | Intercapedine d'aria (cm) | Griglie di ventilazione | Giunti | Finitura esterna | Pelle esterna |
|----------------|---------|--------------|---------------------------|-------------------------|--------|------------------|------------------------|
| UN | AW-24d | ovest | 24 | Completamente vicino | Vicino | Buio | Rivestimento in pietra |
| B | BS-10b | Sud | 10 | Completamente aperto | Vicino | Luminoso | Rivestimento in pietra |
| | BW-24b | ovest | 24 | Completamente aperto | Vicino | Luminoso | Rivestimento in pietra |
| C | CS-10d | Sud | 10 | Completamente aperto | Aprire | Buio | Alluminio |
| | CW-24d | ovest | 24 | Completamente aperto | Aprire | Buio | Rivestimento in pietra |
| D | CS-10b | Sud | 10 | Completamente aperto | Aprire | Luminoso | Alluminio |
| | DS-10d | Sud | 10 | Parzialmente aperto | Aprire | Buio | Alluminio |
| E | DW-10b | ovest | 10 | Parzialmente aperto | Aprire | Luminoso | Rivestimento in pietra |
| | ES-24b | Sud | 24 | Parzialmente aperto | Vicino | Luminoso | Rivestimento in pietra |
| F | FW-24d | ovest | 24 | Completamente vicino | Aprire | Buio | Rivestimento in pietra |

I risultati sperimentali, dunque, hanno evidenziato che la riduzione del flusso termico è fortemente correlata alla finitura esterna del parapiooggia, alla presenza di giunti aperti e griglie di ventilazione e allo spessore dell'intercapedine d'aria della facciata.

I dati sperimentali hanno evidenziato anche che la capacità della parete ventilata di ridurre i carichi estivi dipende dalla capacità del sistema di limitare il valore della temperatura all'interno dell'intercapedine. Ciò può essere ottenuto riducendo le perdite di carico lungo l'intercapedine al fine di aumentare la portata d'aria e minimizzando il contributo radiativo a onde lunghe all'interno della cavità, quindi riducendo il coefficiente di assorbimento solare della pelle esterna.

In letteratura sono presenti anche studi che riguardano l'eliminazione della sottostruttura metallica tipica delle facciate ventilate. Uno di questi è quello effettuato da J. Hegger et al. [12] il cui scopo è il progetto di un pannello di facciata ventilata in TRC (Textile Reinforced Concrete) di grandi dimensioni, che si sviluppasse da un piano a quello successivo e che permettesse la riduzione dei costi per il trasporto e l'installazione degli elementi.

A causa del sottile spessore della lastra (30 mm), è stato necessario predisporre un sistema di controventatura sul retro della lastra, cioè, due nervature in calcestruzzo, che ospitavano anche i dispositivi di fissaggio (Figura 4): sulla parte superiore della soletta, la larghezza delle nervature è stata allargata per posizionare correttamente l'ancoraggio del pannello prefabbricato e il bullone distanziatore. Nella parte sottostante sono state poste delle ancore antivento per sopportare le forze dovute all'aspirazione del vento.

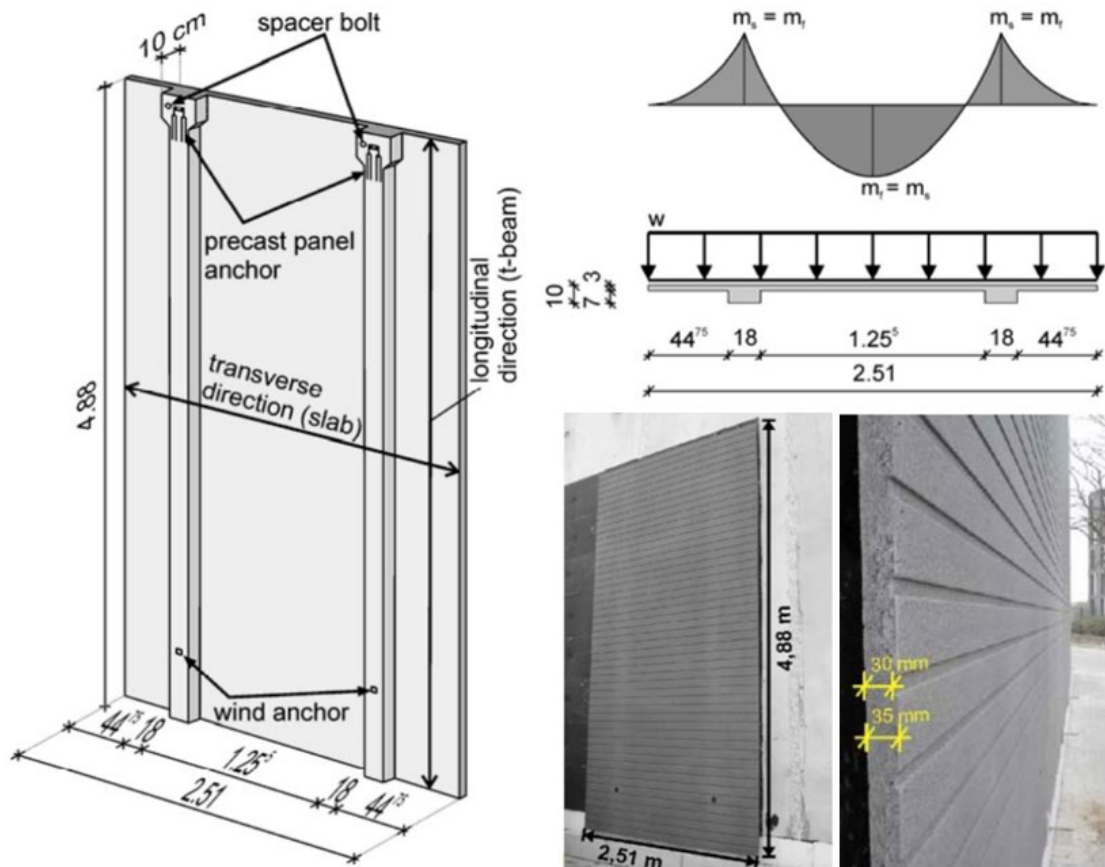


Figura 4 - Retro del pannello di facciata di grandi dimensioni con nervature in calcestruzzo; sezione trasversale con flessione; foto pannello reale.

La posizione delle nervature di calcestruzzo è stata determinata in modo che sotto un carico uniforme il momento di flessione al supporto e il momento di flessione nel campo fossero uguali.

Un altro studio riguardante un ulteriore sviluppo tecnologico è stato messo a punto da T.Colinart et al. [10]. La facciata studiata è costituita da elementi prefabbricati, ogni elemento è costituito da una struttura a telaio in legno in cui la parte opaca è costituita, dall'interno all'esterno, da 12 cm di lana di vetro, pannello OSB, 12 cm di lana di vetro, membrana parapiovvia, cavità ventilata e rivestimento in metallo nero. Questa facciata, utilizzata nella ristrutturazione di un edificio scolastico è stata oggetto di un monitoraggio biennale allo scopo di verificarne le prestazioni in termini di isolamento termico, resistenza alla diffusione del vapore e tenuta all'aria.

I risultati sperimentali mostrano che la resistenza termica misurata in situ degli elementi prefabbricati per facciate ventilate può essere valutata in modo affidabile solo durante il

periodo invernale e che è superiore a quella di progetto; l'applicazione dell'isolamento termico esterno non porta a gravi patologie legate all'umidità sull'involucro dell'edificio adattato. In prossimità del materiale igroscopico possono esistere solo piccoli rischi di formazione di muffe in relazione alla radiazione solare. Infine, è stato osservato che il comfort igrotermico viene raggiunto per la maggior parte del tempo di insegnamento, mentre la concentrazione di CO₂ supera ogni giorno i livelli di soglia critici.

3. FASI E METODI

3.1 Fasi di studio

L'iter progettuale è stato lungo e complesso mantenendo il focus su *performance mock-up (PMU)* e *visual mock-up (VMU)*. I mock-up sono strumenti estremamente utili nella fase di progettazione, poiché consentono di visualizzare l'idea di un prodotto, nonché il prodotto stesso, in modo più concreto e realistico.

Per quanto riguarda il *performance mock-up* le prestazioni richieste alla parete sono:

- facilità di montaggio;
- riduzione di tempi e costi di installazione;
- ottimizzazione del tiraggio all'interno dell'intercapedine;
- resistenza meccanica in ambito statico e dinamico (vento, sisma, urto).

Per il *visual mock-up*, invece, l'obiettivo è la ricerca di una forma che risponda ai canoni estetici dell'architettura moderna e che allo stesso tempo sia funzionale in merito alle prestazioni termiche da garantire.

Per arrivare alla soluzione finale si susseguono vari step di progettazione, valutazioni che passano per la scelta dei materiali, lo studio del sistema di aggancio, la modellazione e il calcolo strutturale e la definizione della forma con la relativa analisi solare per verificare l'efficienza dell'auto – ombreggiamento del pannello progettato.

3.2 Sistema di aggancio

Uno degli obiettivi di tale tesi è quello di progettare dei pannelli per pareti ventilate che si possano installare senza la tipica sottostruttura metallica. Questo porterebbe ad un vantaggio in termini di tempi e costi in quanto:

- si eliminerebbe il costo di produzione della sottostruttura;
- si eliminerebbe il costo per la manodopera prevista per il montaggio della sottostruttura;
- si ridurrebbe il tempo complessivo di montaggio della facciata ventilata.

Tale obiettivo è stato raggiunto attraverso la progettazione di un sistema di aggancio ispirato alla modalità di installazione dei pensili da cucina.

Infatti, sul retro dei pannelli metallici sono state progettate delle piastrine di dimensione pari a 60x60 mm poste ai vertici superiori del pannello, mentre ai vertici inferiori le piastrine le dimensioni sono di 60x70 mm. Nelle due superiori è stata progettata un'asola che permette di appendere il pannello stesso a dei connettori fissati direttamente sulla parete, mentre nelle due inferiori è previsto un intaglio di aggancio ad una barra metallica installata precedentemente sulla parete.

Di seguito, in Figura 5 e Figura 6 si riportano gli elaborati progettuali del pannello, cioè, pianta, prospetti, sezioni e “spianato”; quest'ultimo è un elaborato grafico che rappresenta il pannello sagomato ma come se fosse aperto su superficie piana.

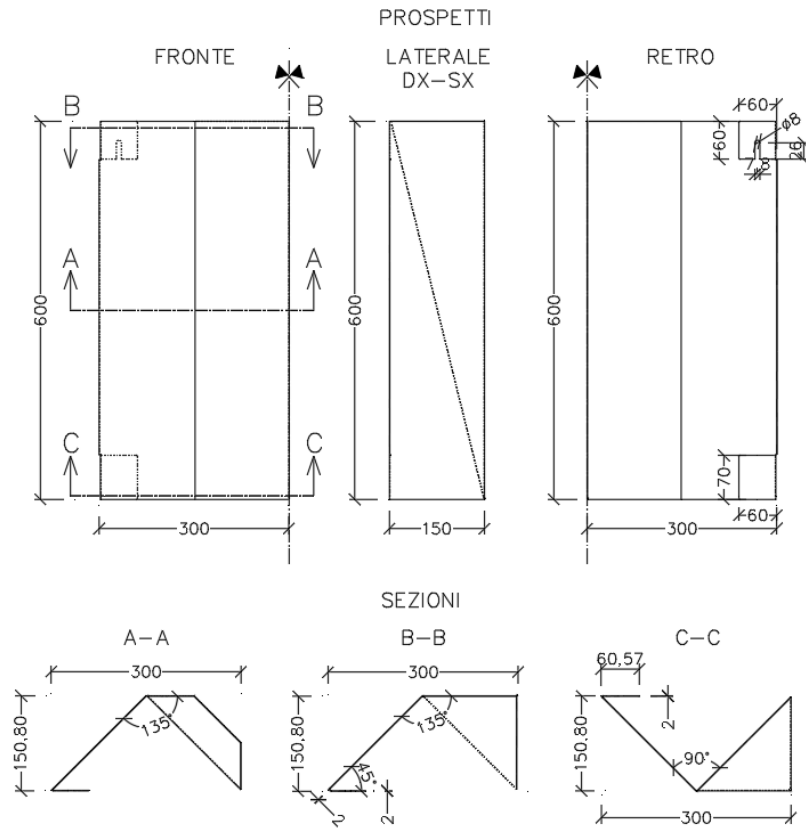


Figura 5 - Elaborati grafici pannello sagomato: prospetti e sezioni

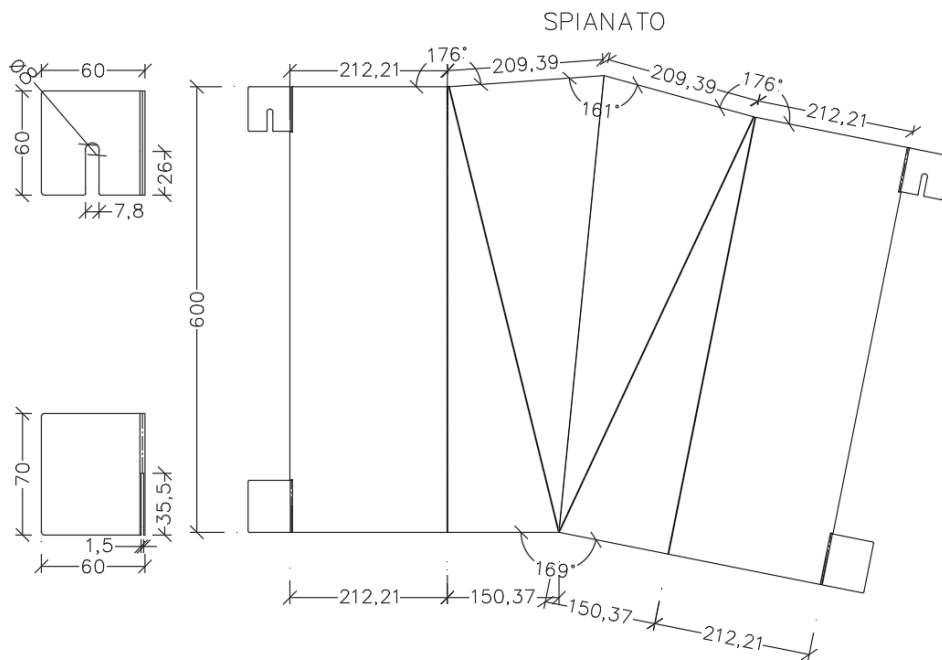


Figura 6 - Elaborato grafico pannello sagomato: spianato con dettaglio piastrene

Per quanti riguarda i tasselli utilizzati per i fissaggi puntuali superiori, la scelta è stata prettamente legata al sottofondo pensato per la sperimentazione. Infatti, andando ad usare un pannello di AquaBoard sono stati necessari dei tasselli per pareti vuote, cioè quelli tipicamente utilizzati su lastre in cartongesso. Di seguito si riporta in Figura 7 una sezione orizzontale del pannello installato su lastra in AquaBoard con il dettaglio del tassello necessario.

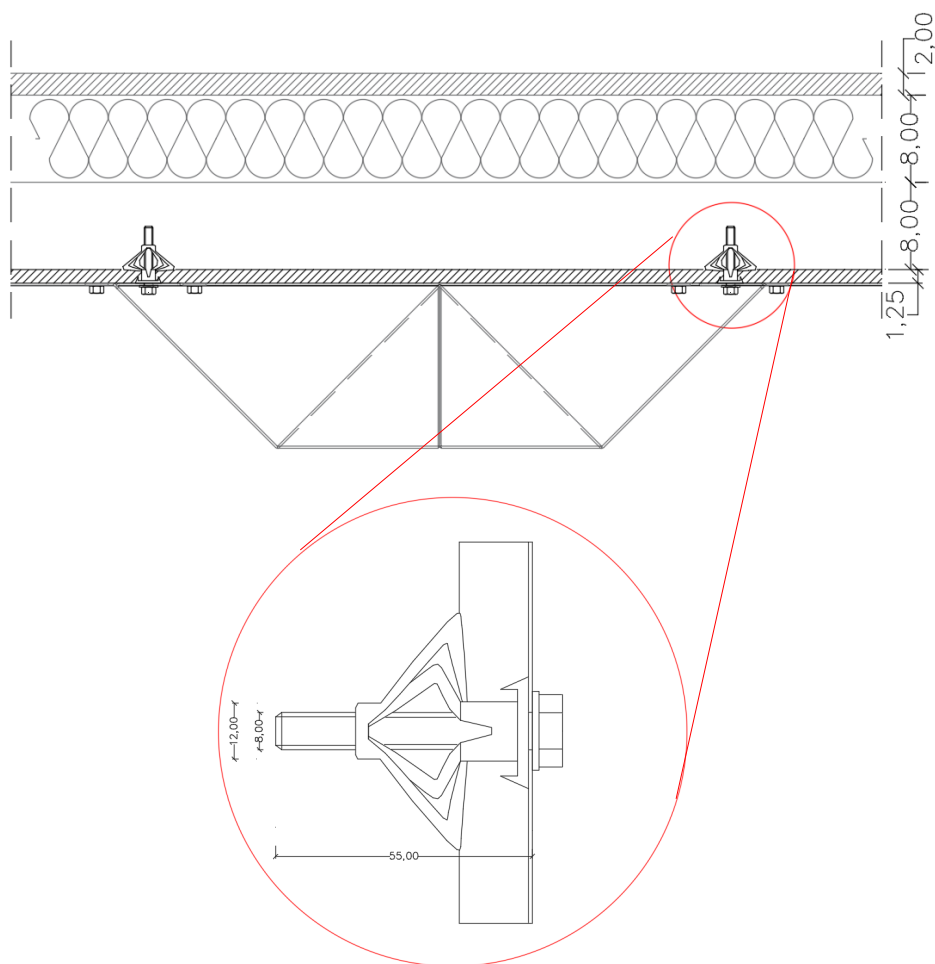


Figura 7 - Sezione orizzontale installazione tipo con dettaglio tassello superiore

I tasselli utilizzati presentano un bullone a testa esagonale che facilita le operazioni di montaggio possibili da effettuare soltanto dall'alto in quanto la forma stessa del pannello ne impedisce il serraggio diretto e frontale. Il bullone utilizzato ha diametro $\Phi 8$ e classe di resistenza 8.8 come riportato in scheda tecnica presente in Appendice A – Scheda tecnica Tassello Würth.

Nel caso del fissaggio inferiore viene inizialmente ipotizzato l'utilizzo di una barra piana perforata in acciaio zincato di spessore pari a 1,5 mm e di altezza pari a 30 mm installata

sulla parete con tasselli di diametro $\Phi 8$ come quelli utilizzati superiormente. Successivamente alle verifiche strutturali riportate nel Capitolo 4.1, è stato necessario aumentare l'altezza della barra a 35,50 mm mantenendo invariato lo spessore. Quindi la barra realmente utilizzata nella sperimentazione è quella riportata in Figura 8.

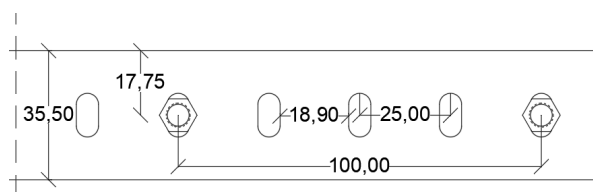


Figura 8 - Barra in acciaio zincato per il fissaggio inferiore

I dettagli tecnici della barra sono riportati in Appendice B – Scheda tecnica barra metallica inferiore.

Con tale sistema di aggancio le operazioni di posa si sono semplificate notevolmente.

Di seguito si riportano le immagini esplicative (Figura 9) di una ipotetica sequenza di montaggio del pannello sagomato utilizzando superiormente fissaggi per pareti vuote $\Phi 8$, inferiormente fissaggi per pareti vuote $\Phi 6$ e barra in acciaio zincato piana perforata.

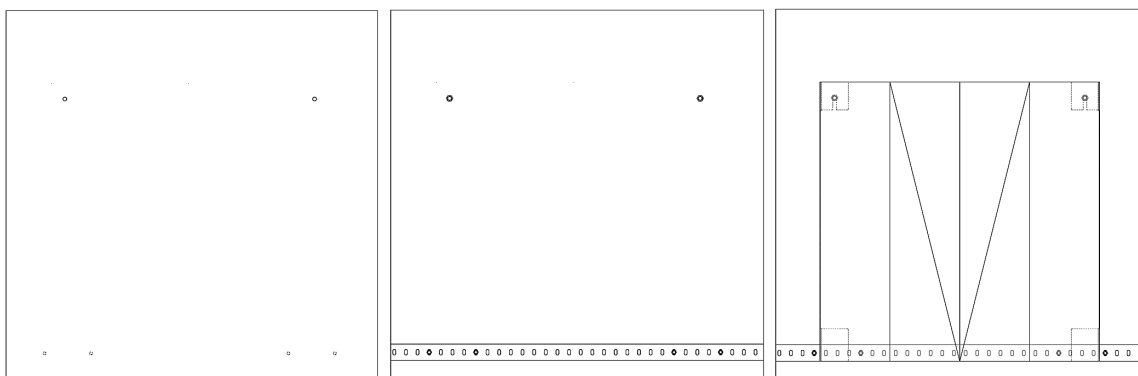


Figura 9 - Sequenza fasi di montaggio

Come si vede dall'immagine sopra riportata le fasi di montaggio sono:

- Preparazione del sottofondo e predisposizione dei fori con l'utilizzo di dima;
- Fissaggio della barra metallica forata inferiore con appositi connettori e predisposizione dei connettori superiori;
- Posizionamento del pannello e serraggio dei connettori superiori.

Ovviamente lo studio dei connettori utilizzati per il fissaggio è strettamente legato alla sperimentazione, ma tale sistema può essere comunque applicato a qualsiasi sottofondo utilizzando semplicemente il fissaggio adatto.

3.3 Metodi analitici

Nel seguente paragrafo vengono approfondite le modalità di progettazione del pannello per facciata ventilata ipotizzando che sarà realizzato in acciaio zincato.

In primo luogo, è stata effettuata un'analisi dei carichi, necessaria anche per il calcolo dell'azione del vento. Successivamente è stata effettuata la modellazione del pannello e del sistema di aggancio previsto, attraverso l'utilizzo di software e infine sono state valutate le verifiche necessarie per il sistema di aggancio e per il pannello stesso.

3.3.1 Metodi di modellazione e calcolo strutturale

Il primo passo effettuato per la progettazione del pannello è stata l'analisi dei carichi per stabilire il peso proprio del pannello e il peso portato che di fatto è solo il carico del vento perché ogni pannello porta solo il peso di sé stesso e non gravano l'uno sull'altro.

ANALISI DEI CARICHI

PESO PROPRIO G1 DEL PANNELLO

Peso specifico acciaio: 7860 kg/m³

Superficie del pannello in acciaio zincato: 4882 cm²

Spessore del pannello in acciaio zincato: 2 mm

Peso del pannello in acciaio zincato G1: 7,67 kg

AZIONE DEL VENTO

Il carico del vento è stato calcolato secondo delle azioni statiche equivalenti orizzontali secondo il Capitolo 3.3 delle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 [13].

È stata calcolata la velocità base di riferimento v_b che è il valore medio su 10 minuti, a 10 m di altezza sul suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II (Tabella 4 - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione), riferito ad un periodo di ritorno $T_R = 50$ anni. In mancanza di specifiche e adeguate indagini statistiche, v_b è data dall'espressione:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a$$

$v_{b,0}$ è la velocità base di riferimento al livello del mare, assegnata nella Tabella 3 in funzione della zona in cui sorge la costruzione;

c_a è il coefficiente di altitudine fornito dalla relazione:

$$c_a = 1 \text{ per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \text{ per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

dove:

a_0, k_s sono parametri forniti nella Tabella 2 in funzione della zona in cui sorge la costruzione;

a_s è l'altitudine sul livello del mare del sito ove sorge la costruzione.

Tabella 2 - Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s

| Zona | Descrizione | $v_{b,0}$ [m/s] | a_0 [m] | k_s |
|------|---|-----------------|-----------|-------|
| 1 | Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste) | 25 | 1000 | 0,40 |
| 2 | Emilia Romagna | 25 | 750 | 0,45 |
| 3 | Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria) | 27 | 500 | 0,37 |
| 4 | Sicilia e provincia di Reggio Calabria | 28 | 500 | 0,36 |
| 5 | Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena) | 28 | 750 | 0,40 |
| 6 | Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena) | 28 | 500 | 0,36 |
| 7 | Liguria | 28 | 1000 | 0,54 |
| 8 | Provincia di Trieste | 30 | 1500 | 0,50 |
| 9 | Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto | 31 | 500 | 0,32 |

Per altitudini superiori a 1500 m sul livello del mare, i valori della velocità base di riferimento possono essere ricavati da opportuna documentazione o da indagini statistiche adeguatamente comprovate, riferite alle condizioni locali di clima e di esposizione. Fatte salve tali valutazioni, comunque raccomandate in prossimità di vette e crinali, i valori utilizzati non dovranno essere minori di quelli previsti per 1500 m di altitudine.

Quindi, nel caso in esame la velocità base di riferimento $v_b = 27 \cdot 1 = 27 \text{ m/s}$.

La velocità di riferimento v_r è il valore medio su 10 minuti, a 10 m di altezza dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II (Tabella 3), riferito al periodo di ritorno di progetto T_R . Tale velocità è definita dalla relazione:

$$v_r = v_b \cdot c_r$$

v_b è la velocità base di riferimento

c_r è il coefficiente di ritorno, funzione del periodo di ritorno di progetto T_R .

In mancanza di specifiche e adeguate indagini statistiche, il coefficiente di ritorno è fornito dalla relazione:

$$c_r = 0,75 \sqrt{1 - 0,2 \times \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right]}$$

dove:

T_R è il periodo di ritorno espresso in anni.

Ove non specificato diversamente, si assumerà $T_R = 50$ anni, cui corrisponde $c_r = 1$. Per un'opera di nuova realizzazione in fase di costruzione o per le fasi transitorie relative ad interventi sulle costruzioni esistenti, il periodo di ritorno dell'azione potrà essere ridotto come di seguito specificato:

- per fasi di costruzione o fasi transitorie con durata prevista in sede di progetto non superiore a tre mesi, si assumerà $T_R \geq 5$ anni;
- per fasi di costruzione o fasi transitorie con durata prevista in sede di progetto compresa fra tre mesi ed un anno, si assumerà $T_R \geq 10$ anni;

In questo caso il valore della velocità di riferimento $v_r = 27 \cdot 1 = 27 \text{ m/s}$.

Le azioni del vento sono costituite da pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici, sia esterne che interne, degli elementi che compongono la costruzione.

L'azione del vento sui singoli elementi che compongono la costruzione va determinata considerando la combinazione più gravosa delle pressioni agenti sulle due facce di ogni elemento.

Nel caso di costruzioni di grande estensione, si deve inoltre tenere conto delle azioni tangenti esercitate dal vento.

L'azione d'insieme esercitata dal vento su una costruzione è data dalla risultante delle azioni sui singoli elementi, considerando come direzione del vento quella corrispondente ad uno degli assi principali della pianta della costruzione; in casi particolari, come ad esempio per le torri a base quadrata o rettangolare, si deve considerare anche l'ipotesi di vento spirante secondo la direzione di una delle diagonali.

La pressione del vento è data dall'espressione:

$$p = q_r c_e c_p c_d$$

q_r è la pressione cinetica di riferimento

c_e è il coefficiente di esposizione;

c_p è il coefficiente di pressione;

c_d è il coefficiente dinamico.

La pressione cinetica di riferimento q_r è data dall'espressione:

$$q_r = \frac{1}{2} \rho v_r^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 27^2 = 455,63 \text{ N/m}^2;$$

dove

v_r è la velocità di riferimento del vento;

ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Esprimendo ρ in kg/m^3 e v_r in m/s , q_r risulta espresso in N/m^2 .

Il coefficiente di esposizione c_e dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di $z = 200 \text{ m}$, esso è dato dalla formula:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \quad \text{per } z \geq z_{min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \quad \text{per } z < z_{min}$$

dove

k_r, z_0, z_{min} sono assegnati in Tabella 3 in funzione della categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione;

c_t è il coefficiente di topografia.

Tabella 3 - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

| Categoria di esposizione del sito | K_r | z_0 [m] | z_{min} [m] |
|-----------------------------------|-------|-----------|---------------|
| I | 0,17 | 0,01 | 2 |
| II | 0,19 | 0,05 | 4 |
| III | 0,20 | 0,10 | 5 |
| IV | 0,22 | 0,30 | 8 |
| V | 0,23 | 0,70 | 12 |

La categoria di esposizione è assegnata nella Figura 10 in funzione della posizione geografica del sito ove sorge la costruzione e della classe di rugosità del terreno definita in Tabella 4. Nelle fasce entro 40 km dalla costa, la categoria di esposizione è indipendente dall'altitudine del sito.

Il coefficiente di topografia c_t è posto generalmente pari a 1, sia per le zone pianeggianti sia per quelle ondulate, collinose e montane.

Nel caso di costruzioni ubicate presso la sommità di colline o pendii isolati, il coefficiente di topografia c_t può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione.

Tabella 4 - Classi di rugosità del terreno

| Classe di rugosità del terreno | Descrizione |
|--------------------------------|---|
| A | Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m |
| B | Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive |
| C | Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D |
| D | a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla costa); b) Lago (con larghezza massima pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla costa) c) Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate,) |

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Si può assumere che il sito appartenga alla Classe A o B, purché la costruzione si trovi nell'area relativa per non meno di 1 km e comunque per non meno di 20 volte l'altezza della costruzione, per tutti i settori di provenienza del vento ampi almeno 30°. Si deve assumere che il sito appartenga alla Classe D, qualora la costruzione sorge nelle aree indicate con le lettere a) o b), oppure entro un raggio di 1 km da essa vi sia un settore ampio 30°, dove il 90% del terreno sia del tipo indicato con la lettera c). Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, si deve assegnare la classe più sfavorevole (l'azione del vento è in genere minima in Classe A e massima in Classe D).

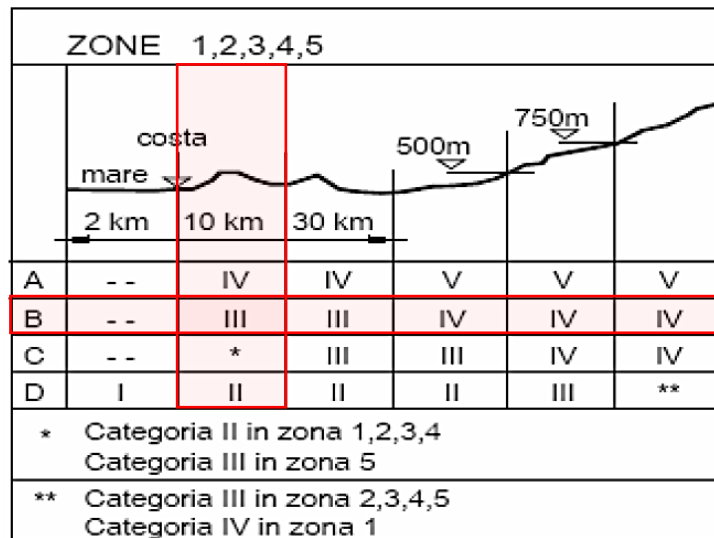


Figura 10 - Definizione delle categorie di esposizione

Quindi la pressione del vento risulta pari a $p = 455,63 \cdot 14,70 \cdot 1,6 \cdot 1 = 10716,42 \text{ N/m}^2$.

L'azione tangente per unità di superficie parallela alla direzione del vento è data dall'espressione:

$$p_f = q_r c_e c_f = 455,63 \cdot 2,90 \cdot 0,001 = 1,32 \text{ N}$$

v_r è la velocità di riferimento del vento;

ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Esprimendo ρ in kg/m^3 e v_r in m/s , q_r risulta espresso in N/m^2 .

Dopo aver definito le azioni è stata effettuata la modellazione del pannello sagomato in acciaio zincato, effettuata utilizzando il software Ftool. Il pannello è stato modellato semplificandolo come un'asta verticale incastrata in testa e appoggiata alla base, assegnando il peso proprio nel baricentro del pannello stesso e il carico del vento lungo il suo sviluppo in altezza. Tali carichi sono stati considerati pari alla metà, in quanto sia in testa che alla base, gli appoggi saranno due, mentre l'asta considerata nella modellazione rappresenta metà pannello.

Di seguito, in Figura 11, si riportano le immagini relative alla modellazione del pannello dove sono visibili i carichi applicati e le sollecitazioni ottenute.

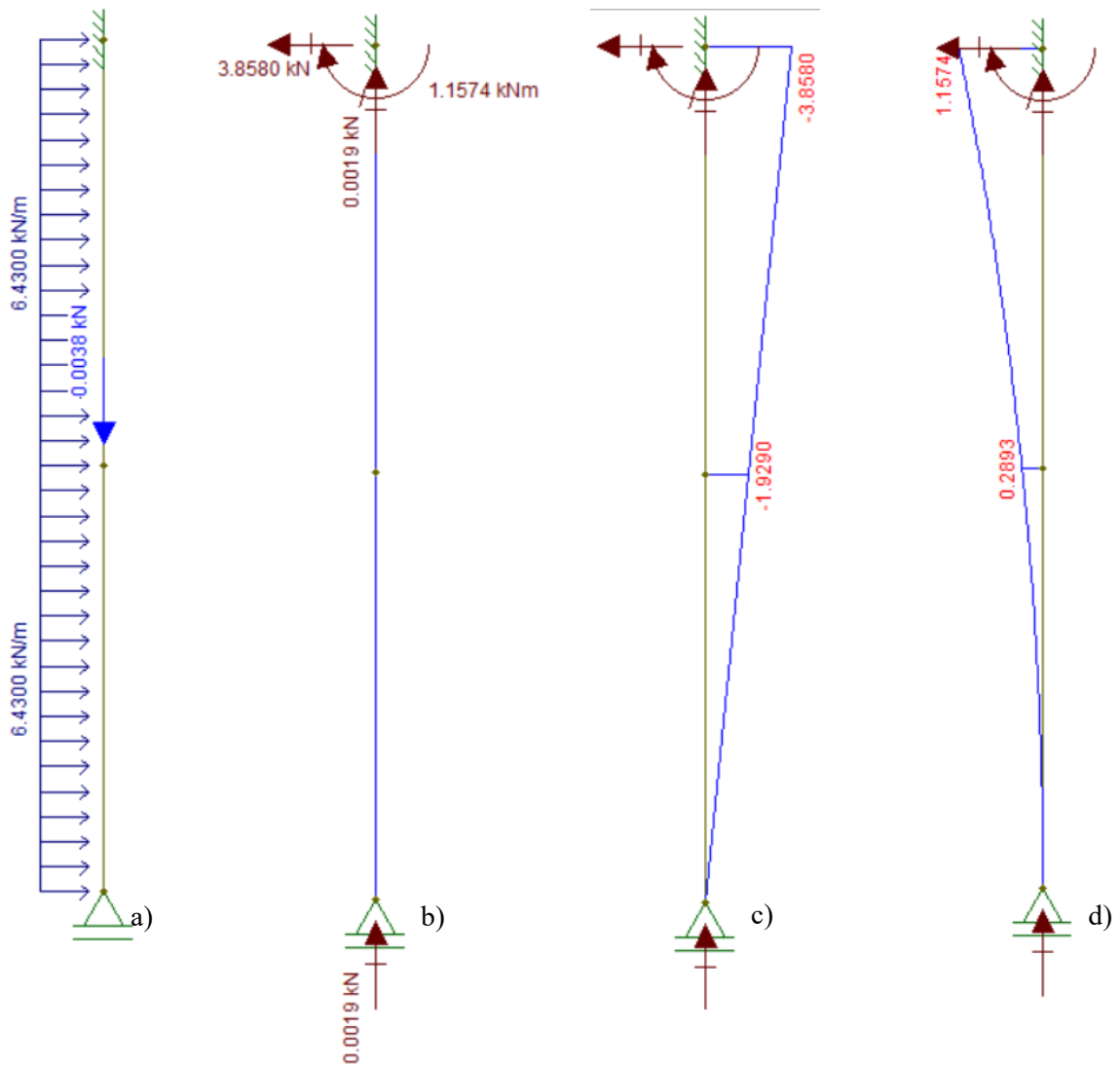


Figura 11 - a) Carichi applicati sull'asta; b) Sforzo assiale; c) Azione tagliante; d) Azione di flessione;

Successivamente è stata modellata la barra inferiore utilizzata per il fissaggio mediante il software SAP2000 schematizzandola come un'asta e assegnando al frame la reale sezione e il materiale scelto (Figura 12). Anche tale barra è in acciaio zincato.

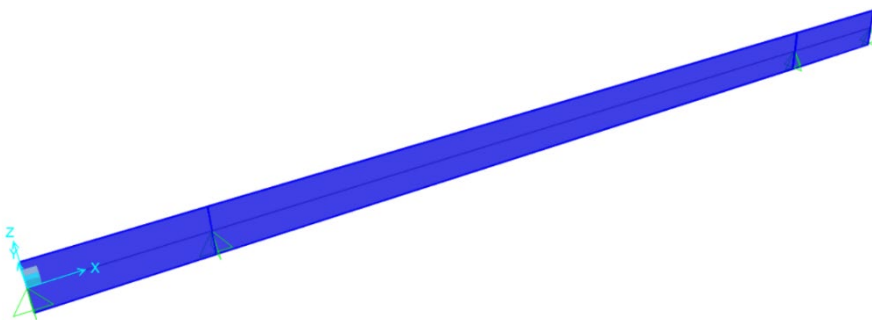


Figura 12 - Modellazione 3D barra inferiore

I tasselli utilizzati per connettere la barra al supporto sono stati modellati come cerniere. In seguito, sono stati applicati i carichi relativi al peso proprio del pannello (in direzione z) (Figura 13) e al vento (in direzione y) (Figura 14). In entrambi i casi i carichi sono stati divisi a metà e applicati come distribuiti solo in corrispondenza delle tasche in quanto zone di appoggio effettive.

Si riportano le immagini relative alla modellazione della barra con i rispettivi carichi applicati

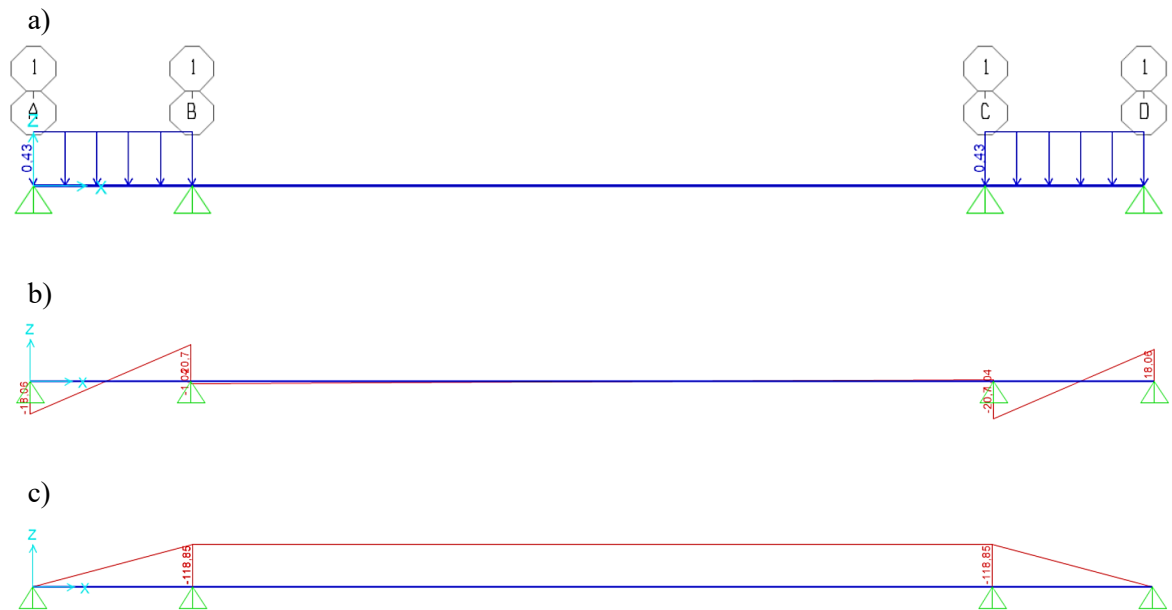


Figura 13 - a) Carichi applicati sull'asta in z; b) Azione tagliante; c) Azione di flessione;

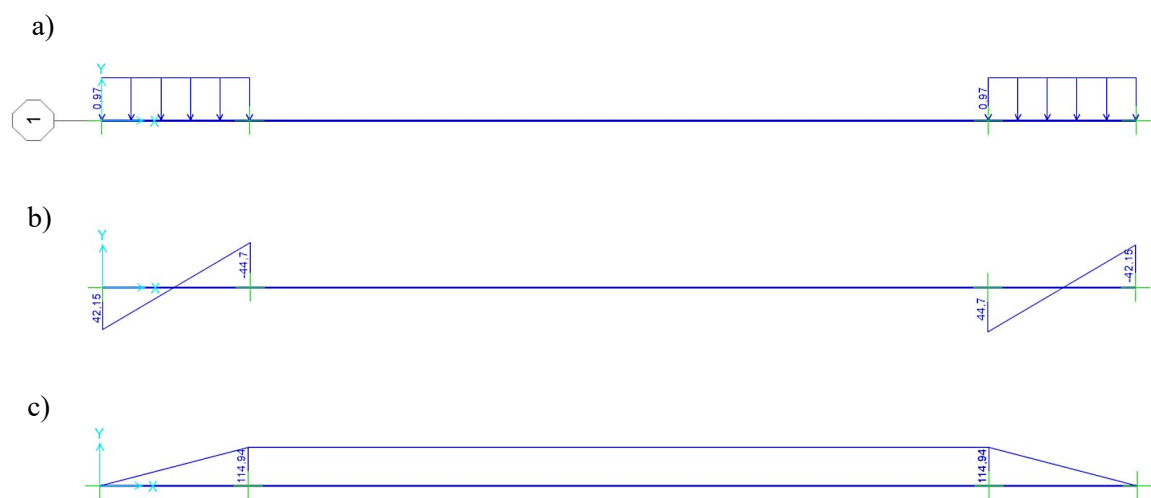


Figura 14 - a) Carichi applicati sull'asta in y; b) Azione tagliante; c) Azione di flessione;

In seguito alla modellazione sono state effettuate le verifiche su tutti i dispositivi utilizzati per ancorare il pannello alla parete retrostante.

Le normative di riferimento sono le NTC 2018 [14], l'EC3 [15] cioè, quelle relative alle unioni bullonate.

Per il calcolo della resistenza delle viti, delle saldature, delle piastre collegate e della forza di precarico dei bulloni si adottano i fattori parziali di sicurezza indicati in Tabella 5 - Coefficienti parziali di sicurezza

Tabella 5 - Coefficienti parziali di sicurezza

| Categoria | CPS | Val. |
|---|-------------------|------|
| Resistenza di bulloni, saldature e a rifollamento | γ_{M2} | 1.25 |
| Resistenza allo scorrimento SLU | γ_{M3} | 1.25 |
| Resistenza allo scorrimento SLS | $\gamma_{M3,ser}$ | 1.1 |
| Serraggio bulloni alta resistenza | γ_{M7} | 1.1 |

Prima di procedere alle verifiche è stato necessario tener conto della riduzione della sezione del gambo per effetto della filettatura. La normativa (UNI-EN 20898-1) definisce per ciascun diametro d un valore dell'area resistente, A_{res} , minore dell'area nominale A .

In prima approssimazione si può assumere $A_{res} = 0,75 \cdot A = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$.

Si osserva che nel caso delle verifiche a trazione si deve sempre considerare l'area resistente A_{res} . Nel caso delle verifiche a taglio si considera l'area resistente A_{res} solo quando il piano su cui agisce il taglio interessa la parte filettata della vite, altrimenti si considera l'area totale A .

Naturalmente per le verifiche è necessaria anche la tensione di snervamento del bullone che dipende dalla classe del bullone stesso (Tabella 6), definita nella scheda tecnica in Appendice L – Scheda tecnica Tassello Würth.

Tabella 6 - Classificazione dei bulloni

| Classe | 4.6 | 5.6 | 6.8 | 8.8 | 10.9 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| f_{yb} (N/mm ²) | 240 | 300 | 480 | 649 | 900 |
| f_{tb} (N/mm ²) | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 |

dove

f_{yb} è la tensione di snervamento del bullone;

f_{tb} è la tensione di rottura del bullone.

Le verifiche necessarie sono:

- *verifica a taglio del bullone* $\rightarrow F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$

La resistenza di calcolo dei bulloni, per ogni piano di taglio che interessa il gambo, può essere assunta pari a

$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}}$ per bulloni di classe 4.6, 5.6 e 8.8, quando il piano di taglio riguarda la parte filettata del gambo;

$F_{V,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}}$ per bulloni di classe 6.8 e 10.9, quando il piano di taglio riguarda la parte filettata del gambo.

in cui f_{tb} è la resistenza caratteristica a rottura del materiale che costituisce il bullone e $\gamma_{M2} = 1,25$. Tali valori vanno moltiplicati per il numero di piani di taglio che interessano il gambo.

È stata calcolata anche la tensione di taglio agente sulla sezione del bullone $\tau_b = \frac{F}{A_{res}}$.

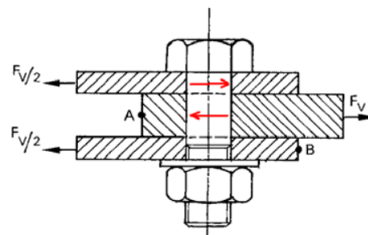


Figura 15 - Rottura a taglio del bullone

- *verifica a rifollamento della piastra* $\rightarrow F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$

Nel meccanismo di rottura per rifollamento, il collasso dell'unione avviene a causa della plasticizzazione del foro di una delle lamiere collegate. Quando l'acciaio nell'intorno del foro si è completamente plasticizzato, si assume che la distribuzione delle tensioni sia costante e pari al valore caratteristico a rottura f_{tk} .

La resistenza di calcolo a rifollamento della lamiera può essere calcolata mediante la relazione:

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

dove

- d è il diametro del gambo del bullone;
- t è lo spessore della lamiera collegata;

- α e k sono due coefficienti che tengono conto degli effetti della redistribuzione plastica degli sforzi nella lamiera e sono funzione delle distanze e degli interassi dei fori secondo le relazioni:

$$\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{(3d_0)}; \frac{f_{tb}}{f_{tk}}; 1 \right\} \text{ per bulloni di bordo nella direzione del carico applicato;}$$

$$\alpha = \min \left\{ \frac{p_1}{(3d_0)} - 0,25; \frac{f_{tb}}{f_{tk}}; 1 \right\} \text{ per bulloni interni nella direzione del carico applicato;}$$

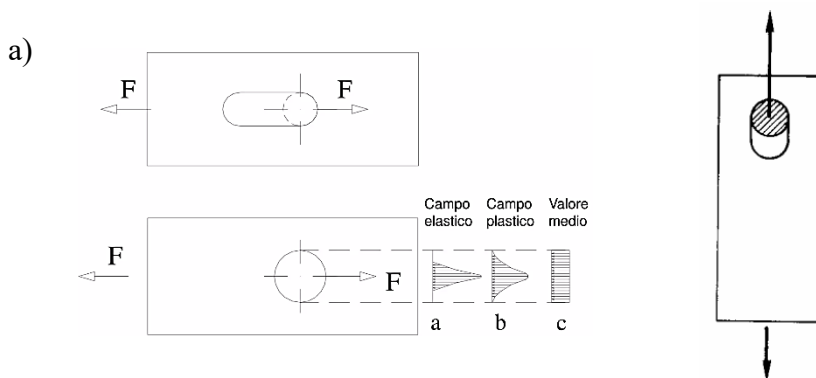
$$k = \min \left\{ 2,8 \frac{e_1}{(d_0)} - 1,7; 2,5 \right\} \text{ per bulloni di bordo nella direzione ortogonale al carico;}$$

$$k = \min \left\{ 1,4 \frac{p_2}{(d_0)} - 1,7; 2,5 \right\} \text{ per bulloni interni nella direzione ortogonale al carico.}$$

Si osserva che il coefficiente k è funzione solo dei parametri di posizione (Tabella 7) in direzione ortogonale alla forza di taglio, e tiene conto che, a causa della diffusione dei flussi tensionali, la plasticizzazione riguarda una porzione di lamiera maggiore dell'area di contatto. Tale coefficiente è generalmente amplificativo (cioè maggiore di uno), anche se non può eccedere il valore 2,5.

In coefficiente α , invece, è funzione dei parametri di posizione in direzione parallela alla forza di taglio (Tabella 7) e dei parametri meccanici f_{tb} (resistenza caratteristica di rottura del bullone) e f_{tk} (resistenza caratteristica di rottura della lamiera). Tale coefficiente riduce la resistenza a rifollamento quando la distanza dal margine e_1 e il passo p_1 nella direzione parallela alla forza di taglio siano inferiori a certi valori limite (Figura 16 - b). La resistenza è anche ridotta quando si utilizzano bulloni o chiodi la cui resistenza a rottura sia inferiore a quella delle lamiere collegate.

È stata calcolata anche la tensione di rifollamento agente sulla lamiera $\sigma_{rif} = \frac{F}{dt}$.



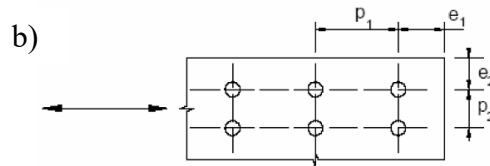


Figura 16 – a) Rottura a rifollamento della piastra; b) Interasse tra i fori

Tabella 7 - Posizione dei fori per unioni bullonate e chiodate

| Distanze e interassi (Fig. 4.2.3) | Minimo | Massimo | | |
|--------------------------------------|-----------|--|--|--|
| | | Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali | Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali | Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (EN10025-5) |
| e_1 | $1,2 d_0$ | $4t+40\text{mm}$ | - | $\max(8t;125\text{mm})$ |
| e_2 | $1,2 d_0$ | $4t+40\text{mm}$ | - | $\max(8t;125\text{mm})$ |
| p_1 | $2,2 d_0$ | $\min(14t;200\text{mm})$ | $\min(14t;200\text{mm})$ | $\min(14t;175\text{mm})$ |
| $p_{1,0}$ | - | $\min(14t;200\text{mm})$ | - | - |
| $p_{1,i}$ | - | $\min(28t;400\text{mm})$ | - | - |
| p_2 | $2,4 d_0$ | $\min(14t;200\text{mm})$ | $\min(14t;200\text{mm})$ | $\min(14t;175\text{mm})$ |

- *verifica della resistenza complessiva della singola unione a taglio*

$$F_{c,Rd} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd})$$

La resistenza del collegamento è la minore tra quella del bullone e quella della lamiera.

La verifica è soddisfatta se risulta

$$F_{c,Rd} \geq F_{v,ED}/n_b$$

dove n_b è il numero di bulloni che costituisce il collegamento.

- *verifica della resistenza dell'unione a trazione* $F_{b,Sd} \leq \min(F_{t,Rd}; F_{p,Rd})$

La resistenza di calcolo dell'unione, quindi, è la più piccola tra $F_{t,Rd}$, e $F_{p,Rd}$, mentre $F_{b,Sd}$ è la sollecitazione di calcolo di trazione agente su un bullone.

La resistenza di calcolo a trazione di un bullone può essere assunta pari a

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}}$$

in cui

f_{tb} è la resistenza caratteristica a rottura;

A_{res} è l'area del gambo in corrispondenza della filettatura;

$\gamma_{M2} = 1,25$ è il coefficiente parziale di sicurezza.

Nelle unioni bullonate soggette a trazione è anche necessario verificare la lamiera a *punzonamento*. In questo caso, la resistenza di calcolo è data dalla relazione

$$F_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}}$$

dove:

d_m è il minore tra il diametro del dado e quello medio della testa del bullone;

t_p è lo spessore della lamiera;

f_{tk} è la resistenza caratteristica a rottura della lamiera.

- *verifica combinata a taglio trazione* $\rightarrow \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1$

Tale formula di interazione lineare può essere applicata nel caso di presenza combinata di trazione e taglio, con la limitazione $\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$, dove $F_{v,Ed}$ e $F_{t,Ed}$ sono le sollecitazioni di taglio e di trazione agenti sul collegamento, $F_{v,Rd}$ e $F_{t,Rd}$ sono le resistenze a taglio e a trazione del collegamento.

- *verifica della rottura per strappamento della piastra*

$$2\tau \left(2m - \frac{1}{4}\right) \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m = \frac{\sigma_{rif}}{2\tau} + \frac{1}{4}$$

Imponendo che la rottura per strappamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si calcola il valore di m e si definisce di conseguenza se la verifica risulta soddisfatta per tale valore.

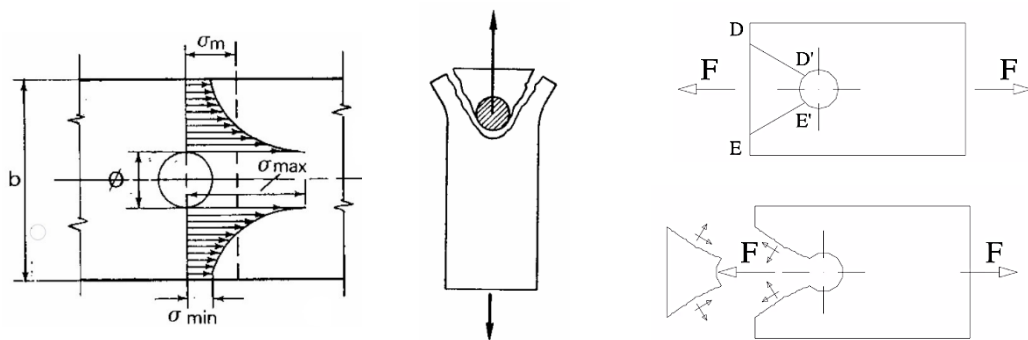


Figura 17 - Rottura della piastra per strappamento

- *verifica di tranciamento della piastra*

$$2\sigma' \frac{2}{3} m' \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m' = \frac{3\sigma_{rif}}{4\sigma'}$$

$$\sigma' = \frac{F}{e_1 \cdot t}$$

Imponendo che la rottura per tranciamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si calcola il valore di m e si definisce di conseguenza se la verifica risulta soddisfatta per tale valore.

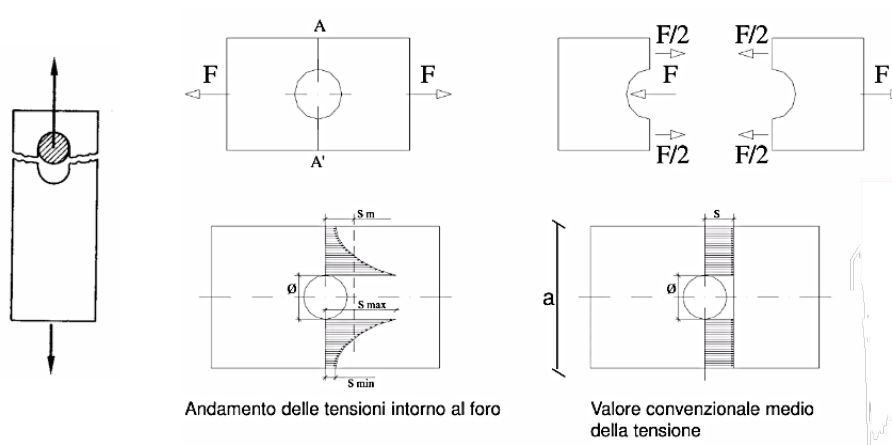


Figura 18 - Rottura della piastra per tranciamento

3.3.2 Metodi di valutazione ombreggiamento

Uno degli obiettivi principali del pannello è quello di auto – ombreggiarsi per cui è stata svolta un’analisi accurata e approfondita delle zone di ombra che si creano grazie alla configurazione sagomata del pannello.

Questa valutazione è stata effettuata principalmente utilizzando il software Autodesk Revit che permette di impostare il percorso solare definendo il giorno e il luogo di interesse.

Per tale studio è stato preso in considerazione il giorno 21 giugno in cui il sole, nell'emisfero boreale, raggiunge il punto di massima altezza rispetto all'orizzonte illuminando una parte del pianeta per più ore rispetto a tutti gli altri giorni, prima di ricominciare a scendere.

Questo, infatti, fa sì che l’ombra abbia un’estensione maggiore e quindi permetta di definire il massimo vantaggio che la forma apporterebbe.

Di seguito si riportano le immagini relative al percorso solare di alcuni orari significativi del giorno precedentemente citato (Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24). Grazie a questo è possibile apprezzare sia visivamente che quantitativamente le ombre prodotte dalla sagoma stessa.

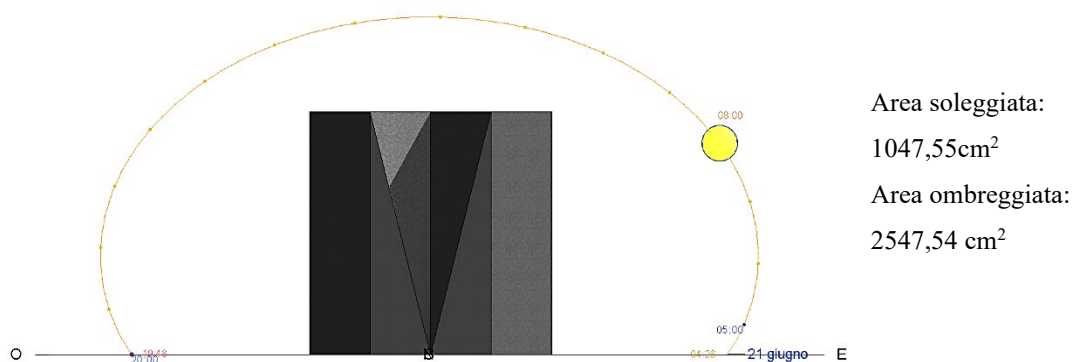


Figura 19 - Pannello ombreggiato ore 08:00

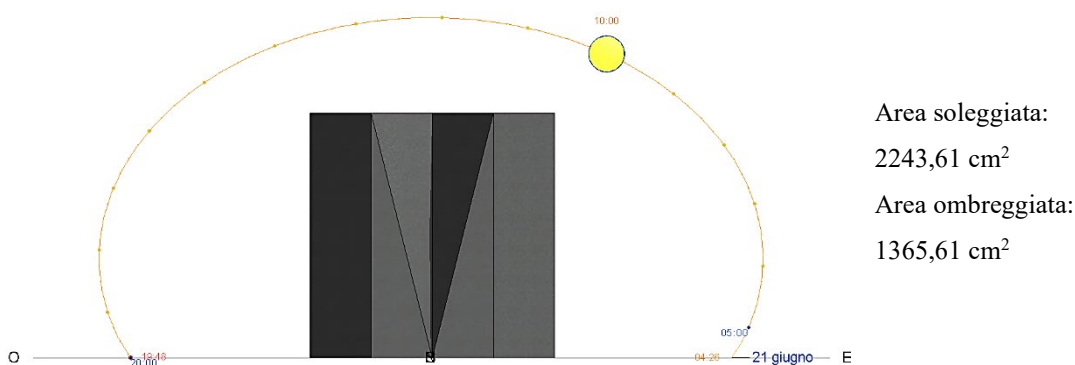


Figura 20 - Pannello ombreggiato ore 10:00

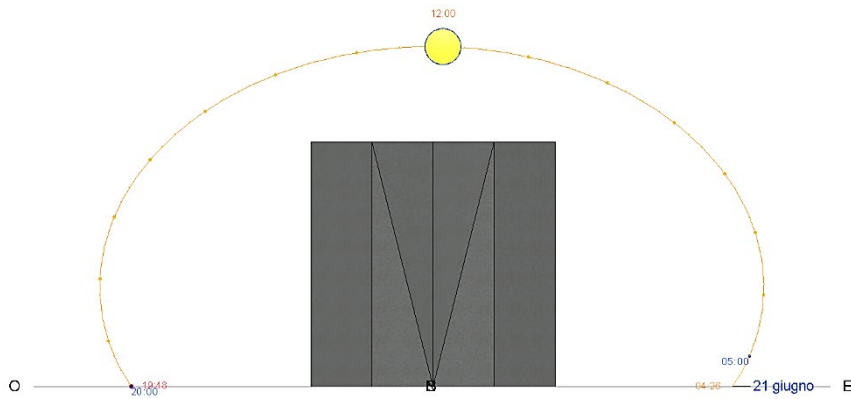


Figura 21 - Pannello ombreggiato ore 12:00

Area soleggiata:
3600 cm²
Area ombreggiata:
0 cm²

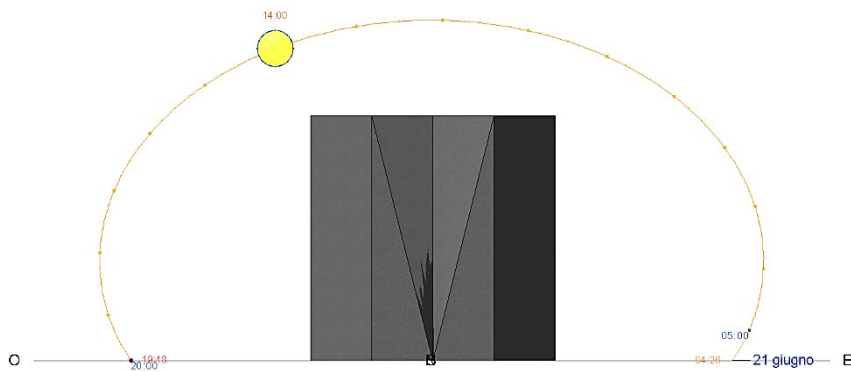


Figura 22 - Pannello ombreggiato ore 14:00

Area soleggiata:
2622,92 cm²
Area ombreggiata:
963,87 cm²

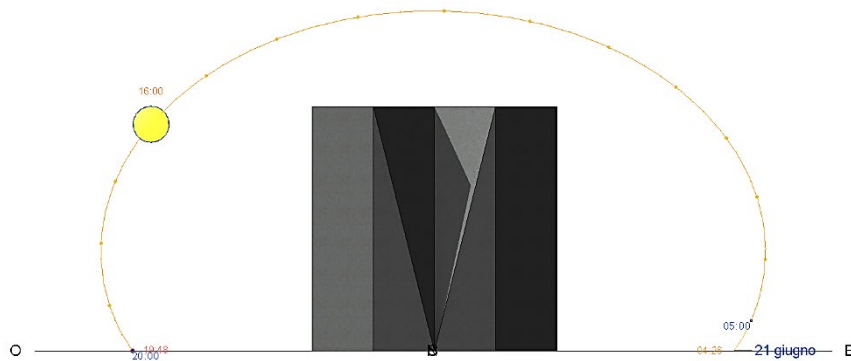


Figura 23 - Pannello ombreggiato ore 16:00

Area soleggiata:
1090,47 cm²
Area ombreggiata:
2537,36 cm²

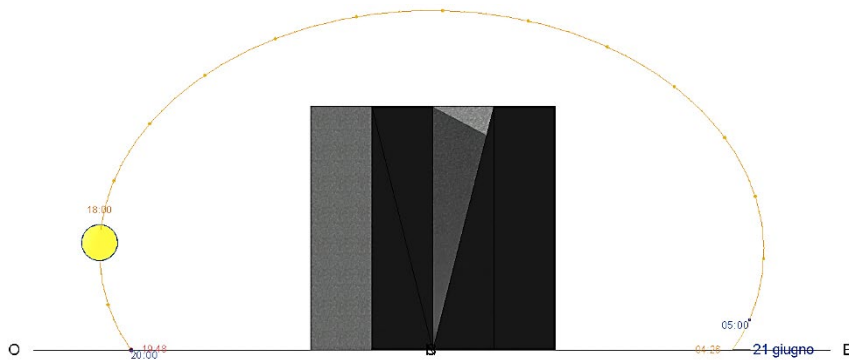


Figura 24 - Pannello ombreggiato ore 18:00

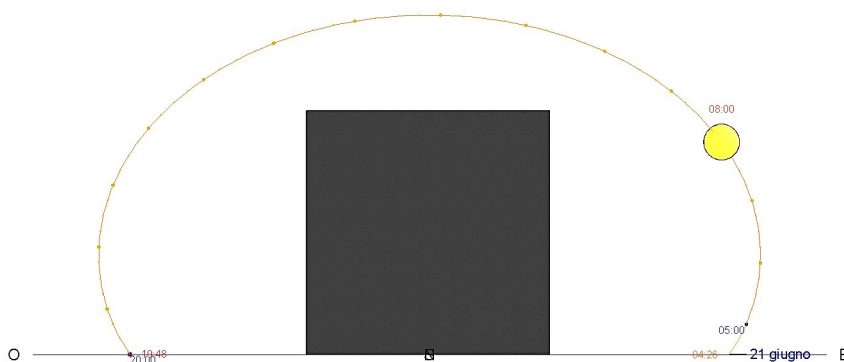
Area soleggiata:
976,00 cm²
Area ombreggiata:
2648,37 cm²

Inoltre, i valori delle aree prima riportate sono stati espressi in termini percentuali in maniera tale da vedere a colpo d'occhio il rapporto tra l'area soleggiata e quella ombreggiata agli orari predefiniti (Tabella 8).

Tabella 8 - Valori percentuali aree soleggiate - ombreggiate

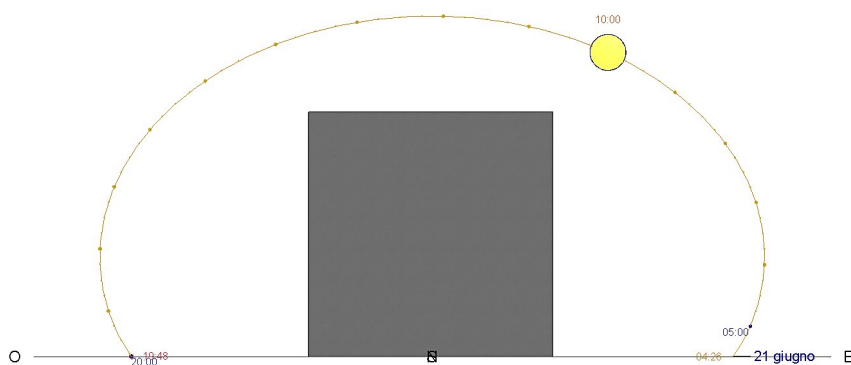
| Ore | Area soleggiata (%) | Area ombreggiata (%) |
|-------|---------------------|----------------------|
| 08:00 | 29,10 | 70,80 |
| 10:00 | 62,20 | 37,80 |
| 12:00 | 100,00 | 0,00 |
| 14:00 | 72,90 | 27,10 |
| 16:00 | 29,50 | 70,50 |
| 18:00 | 27,00 | 73,00 |

Dai valori percentuali riportati in tabella è facile notare che l'area soleggiata prevale su quella ombreggiata per cui potrebbe sembrare che il pannello non sia così vantaggioso, ma facendo la stessa analisi su un pannello di uguali dimensioni ma piano, anziché sagomato, è evidente che il vantaggio è notevole. Infatti, dalle immagini che seguono (Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30) si dimostra che nelle ore centrali si ha sempre il 100% di area soleggiata.



Area soleggiata:
0 cm²
Area ombreggiata:
3600 cm²

Figura 25 - Pannello piano ore 08:00



Area soleggiata:
3600 cm²
Area ombreggiata:
0 cm²

Figura 26 - Pannello piano ore 10:00

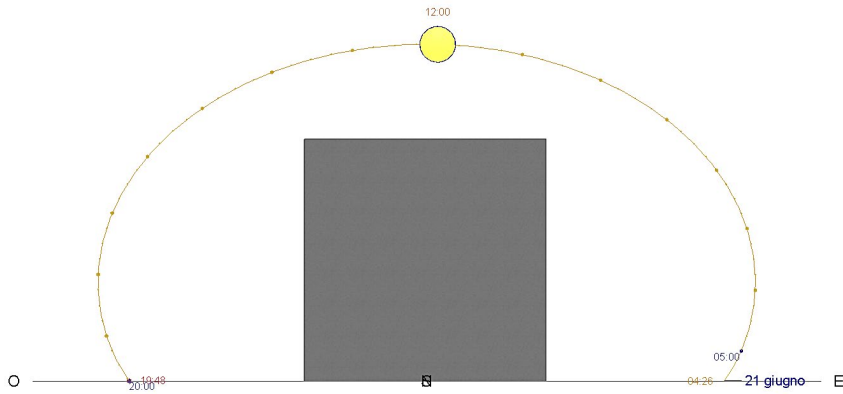


Figura 27 - Pannello piano ore 12:00

Area soleggiata:
3600 cm²
Area ombreggiata:
0 cm²

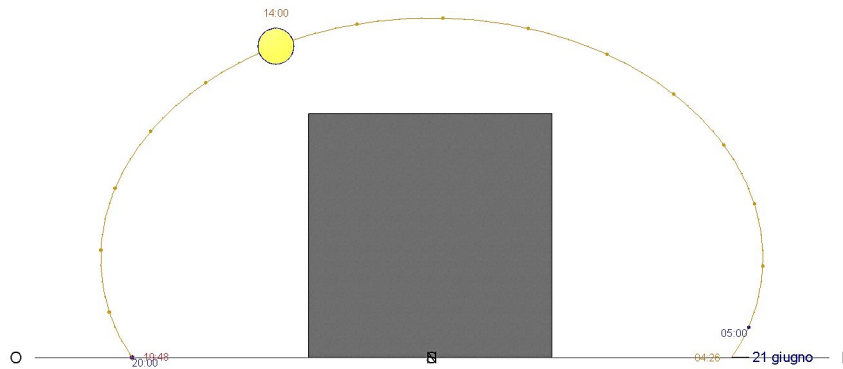


Figura 28 - Pannello piano ore 14:00

Area soleggiata:
3600 cm²
Area ombreggiata:
0 cm²

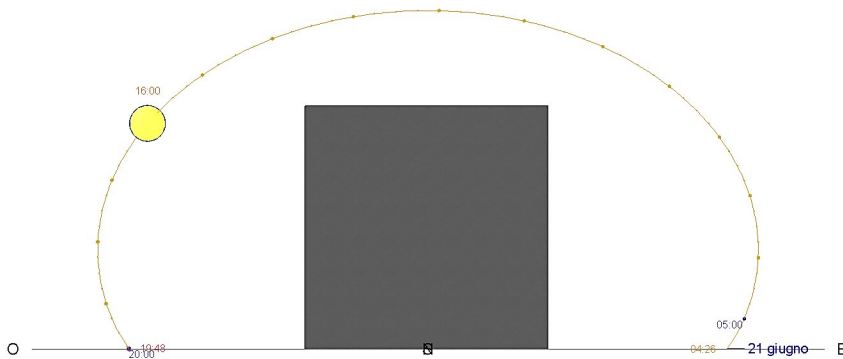


Figura 29 - Pannello piano ore 16:00

Area soleggiata:
3600 cm²
Area ombreggiata:
0 cm²

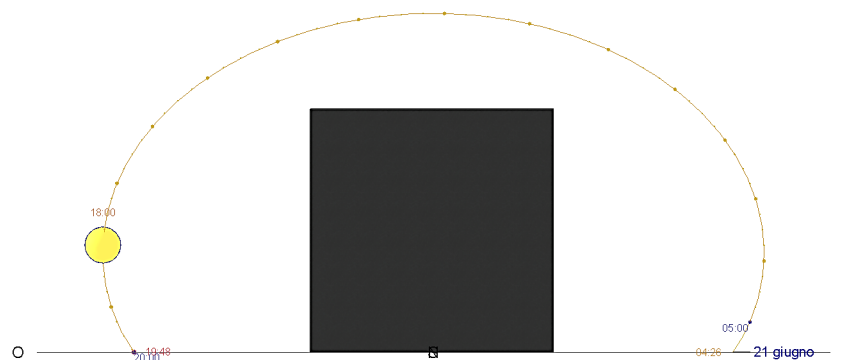


Figura 30 - Pannello piano ore 18:00

Area soleggiata:
0 cm²
Area ombreggiata:
3600 cm²

Dopodiché come per il pannello sagomato, i valori delle aree sopra riportate sono stati espressi in forma percentuale in maniera tale da vedere a colpo d'occhio il rapporto tra l'area soleggiata e quella ombreggiata agli orari predefiniti (Tabella 9).

Tabella 9 - Valori percentuali aree soleggiate - ombreggiate

| Ore | Area soleggiata (%) | Area ombreggiata (%) |
|-------|---------------------|----------------------|
| 08:00 | 0,00 | 100,00 |
| 10:00 | 100,00 | 0,00 |
| 12:00 | 100,00 | 0,00 |
| 14:00 | 100,00 | 0,00 |
| 16:00 | 100,00 | 0,00 |
| 18:00 | 0,00 | 100,00 |

Dai valori in tabella è chiaro che l'area soleggiata è quasi completamente prevalente su quella ombreggiata per cui si capisce facilmente che il pannello sagomato presenta notevoli vantaggi in termini di ombreggiamento.

Inoltre, anche se alle ore 08:00 e alle ore 18:00 il pannello piano sembra totalmente ombreggiato, ma si tratta solo di un limite del software. Infatti, in quegli orari, il sole si trova in una posizione molto più bassa rispetto a quella delle ore 12:00, per cui i raggi colpiscono la superficie con un angolo tale che questa non risulti né totalmente ombreggiata né totalmente soleggiata.

Dopo aver dimostrato che la forma del pannello sagomato funziona per l'auto – ombreggiamento, l'analisi solare è stata estesa ad una porzione tipo di parete ventilata per valutarne il comportamento globale.

Nella parete tipo, i pannelli sono stati ipotizzati affiancati a formare righe che si ripetono in altezza sfalsate di mezzo modulo rispetto alla sottostante. Questa disposizione favorisce l'ombreggiamento reciproco tra i pannelli e la formazione di canali d'aria continui e connessi tra loro.

Di seguito si riporta l'immagine (Figura 31) dell'analisi solare della parete tipo, sempre del giorno 21 giugno 2023, alle ore 12:00 cioè, la fascia oraria che ha rappresentato la situazione più sfavorevole nel caso del pannello singolo.

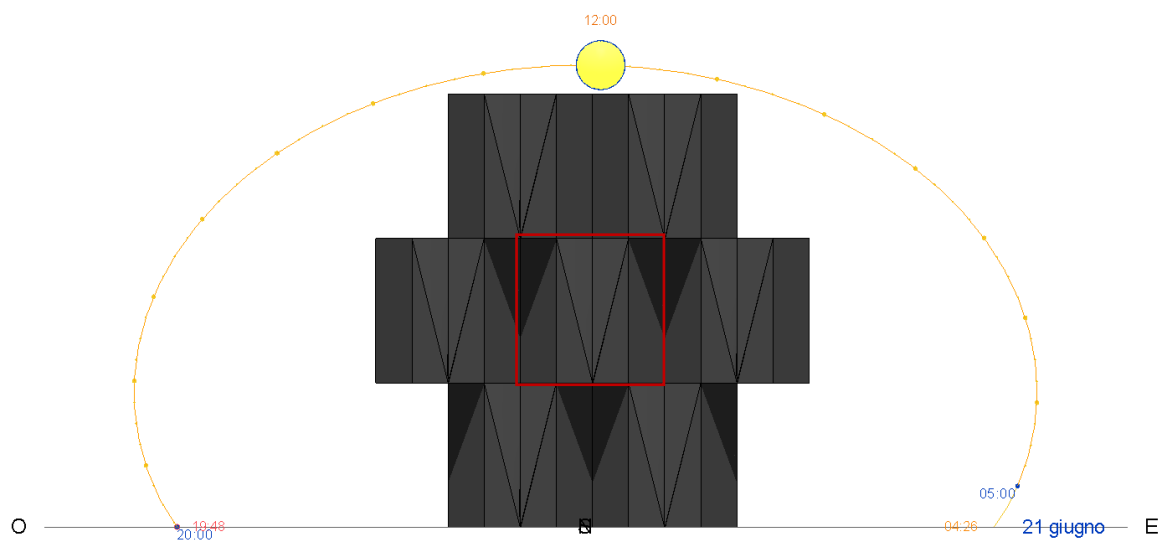


Figura 31 - Facciata ventilata tipo ore 12:00

Da tale valutazione è evidente che il singolo modulo (cerchiato in rosso in figura) inserito in un contesto più ampio, anche se in minima parte (circa il 17% dell'area totale), risulta ombreggiato dai pannelli adiacenti presentando una superficie ombreggiata di 602,02 cm² contro i 2997,98 cm² di area soleggiata.

Dopo aver visto la situazione più svantaggiosa si riportano invece le immagini di due orari diversi (Figura 32, Figura 33) in cui si può notare che la facciata è effettivamente ben auto-ombreggiata.

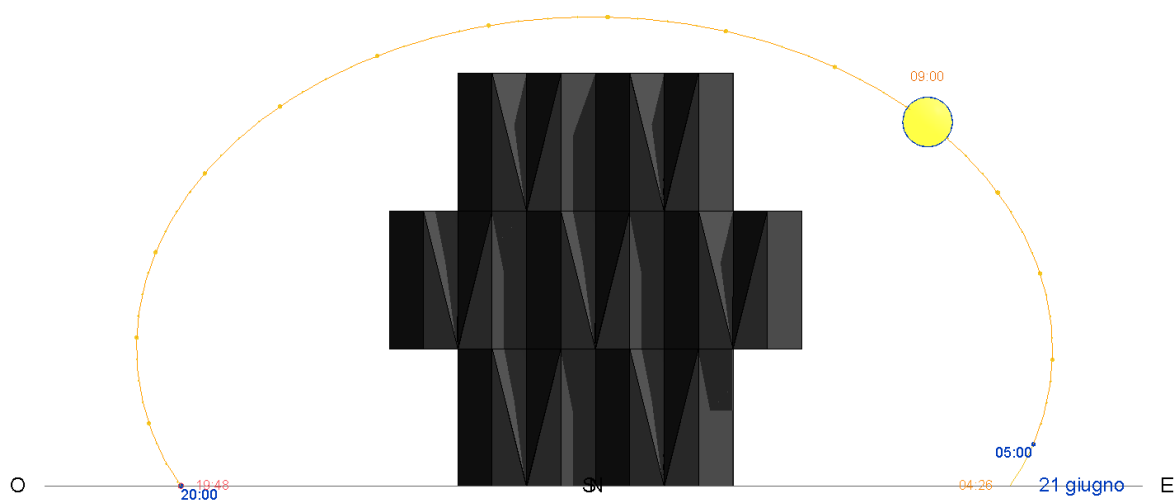


Figura 32 - Facciata ventilata tipo ore 9:00

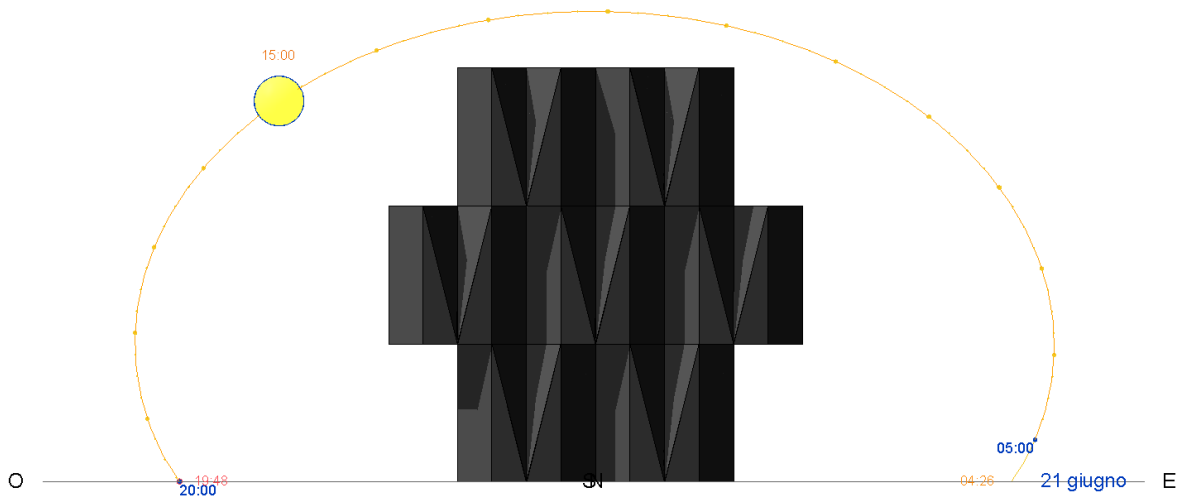


Figura 33 - Facciata ventilata tipo ore 15:00

Nonostante che la forma particolare del pannello progettato offra già dei notevoli vantaggi in senso di ombreggiamento, non è comunque performante a tutte le ore del giorno, presentando dei limiti proprio nelle fasce orarie centrali, cioè quando la radiazione solare è maggiore.

Per tale ragione sono state valutate ulteriori alternative come l'aggiunta di un elemento orizzontale in testa, la diversa inclinazione dei pannelli o la diversa disposizione degli stessi, al fine di valutare se una di queste soluzioni potesse produrre un miglioramento significativo.

La prima alternativa valutata è stata quella di inclinare i pannelli rispetto alla verticale, partendo da un'inclinazione minima di 10° . Questa idea nasce dal tentativo di creare zone di ombra nelle fasce orarie in cui il pannello sagomato non ne presenta. Infatti, inclinando i pannelli rispetto alla verticale, la parte superiore del pannello è più sporgente rispetto alla parte inferiore per cui questo produrrebbe ombra nella parte bassa del pannello nelle ore in cui il sole si trova nella posizione più alta.

Ancora una volta, quindi, è stato cercato di sfruttare la forma.

Come si vede in Figura 34 questa è stata una scelta fallimentare in quanto in termini di ombreggiamento la situazione peggiora notevolmente e, inoltre, è stato perso il concetto di facciata ventilata in quanto vengono meno i canali continui che si dovrebbero creare i pannelli e la parete retrostante.

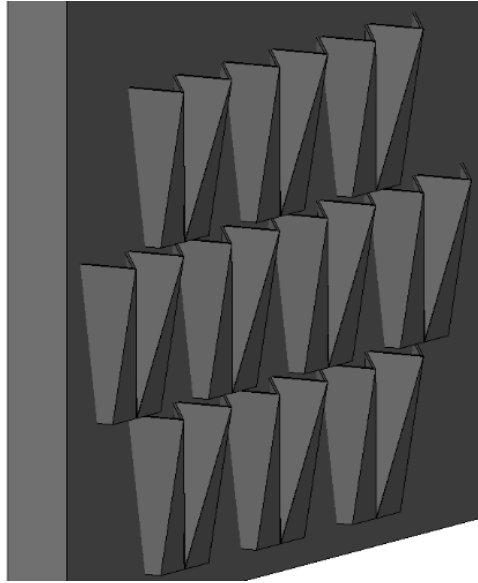


Figura 34 - Alternativa pannelli inclinati

La seconda alternativa (Figura 35) consiste nel realizzare la parete semplicemente capovolgendo i moduli lasciando invariata la configurazione. A prescindere dall'ombreggiamento che è rimasto invariato rispetto alla conformazione di partenza, tale soluzione è fallimentare come la precedente in quanto i fori che dovrebbero funzionare da riprese di aria esterna, in tal caso sono rivolti verso l'alto e andrebbero a favorire l'ingresso di acqua piovana.

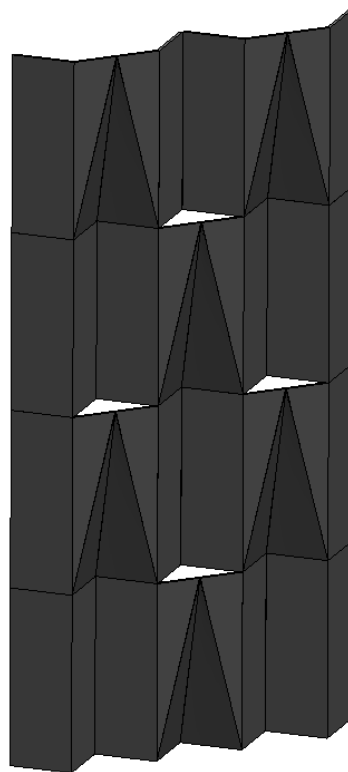


Figura 35 - Alternativa pannelli capovolti

Un'altra opzione presa in considerazione per modificare la parete ancora una volta è stata la variazione della disposizione dei pannelli, disponendoli regolarmente sia in verticale che in orizzontale, capovolgendo i pannelli a righe alternate (Figura 36).

Tale scelta ha portato ad una parete con canali di aria divisi, diversi da quelli connessi che si ottenevano con la configurazione originale.

In termini di ombreggiamento invece, non c'è stato alcun miglioramento.

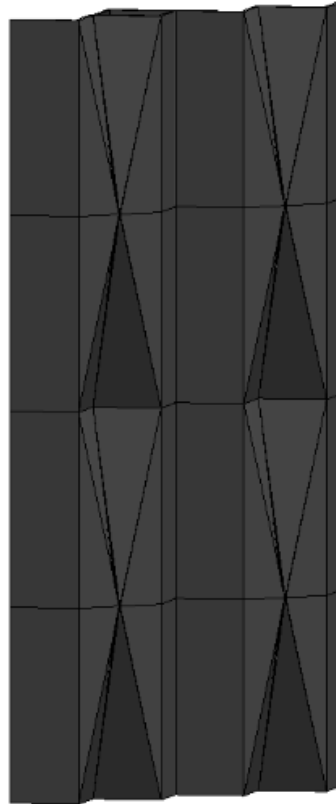


Figura 36 - Alternativa canali separati

Dato che qualunque possibile variazione di forma non ha portato a miglioramenti significativi sono state valutate due nuove soluzioni andando ad implementare un elemento di schermatura orizzontale. Tale elemento viene posto alla base di ciascun pannello con lo scopo di ombreggiare il pannello sottostante.

La scelta di metterlo sotto è stata dettata da più fattori:

- la praticità nella realizzazione del collegamento che in questo modo avviene in una zona piuttosto lineare rispetto a quella che si avrebbe in testa al pannello;
- la facilità di installazione del pannello stesso in quanto si necessita di lasciare libero accesso dall'alto per il serraggio dei tasselli di ancoraggio;

- la chiusura della ripresa d'aria esterna del canale di ventilazione per aumentare la velocità del flusso d'aria al suo interno.

Sono state valutate due diverse configurazioni dell'elemento di schermatura orizzontale, una che segue la forma del perimetro del pannello stesso (Figura 37 - b) e l'altra più regolare (Figura 37 - a).

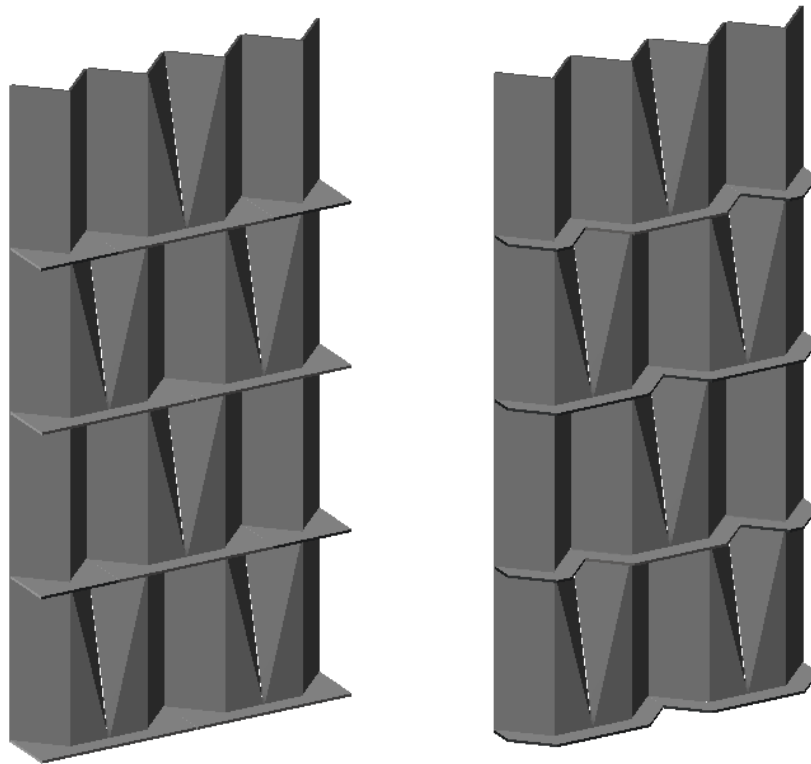


Figura 37 - a) Alternativa schermatura orizzontale regolare; b) Alternativa schermatura architettonica

Dall'analisi solare fatta sulle due soluzioni, di cui si riporta il fotogramma delle ore 12:00, orario in cui la situazione è più sfavorevole, è evidente che la soluzione con la schermatura orizzontale della Figura 38 - b, seppur esteticamente più gradevole, è meno performante, quindi è stata portata avanti la soluzione con schermatura orizzontale regolare.

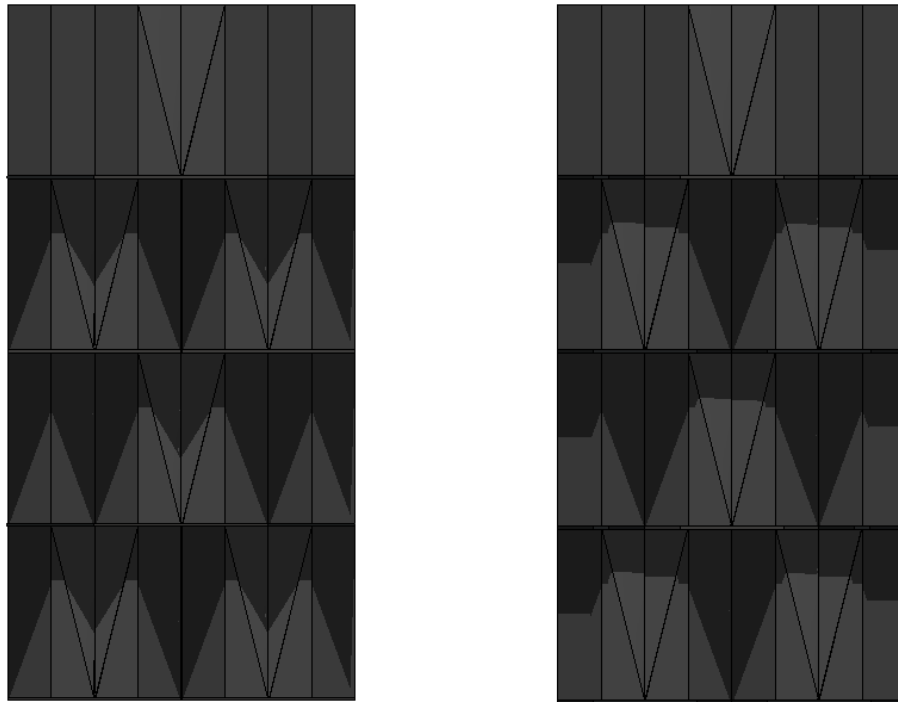


Figura 38 - Analisi solare ore 12:00. a) Alternativa schermatura orizzontale regolare; b) Alternativa schermatura architettonica

Di seguito si riporta l'esecutivo finale del pannello e dell'elemento di schermatura orizzontale con la posizione della linea di saldatura in colore rosso (Figura 39).

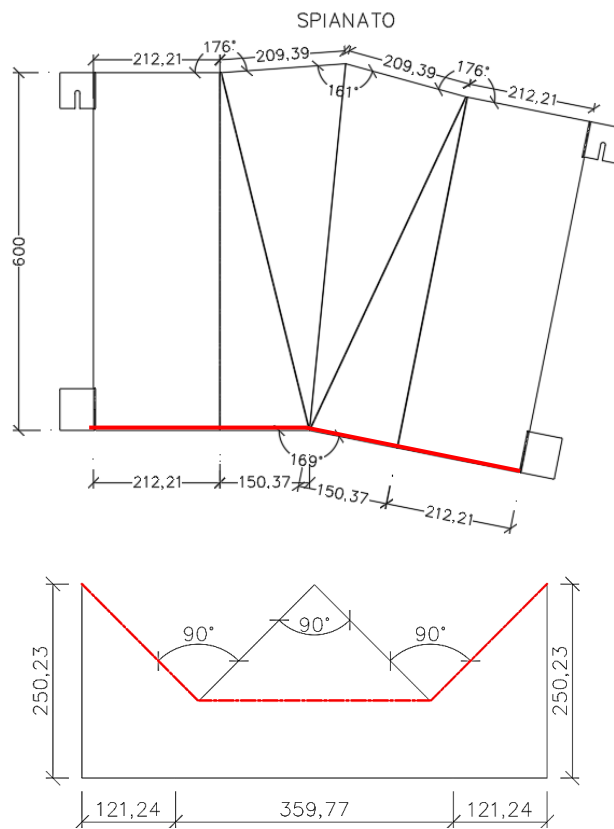


Figura 39 - Elaborati progettuali elemento orizzontale di schermatura

3.4 Metodi sperimentali

Una delle fasi di maggiore importanza per una tesi di tipo sperimentale è quella del monitoraggio e proprio per questo necessita di un vero e proprio progetto, atto a delineare quali grandezze si vogliono misurare, quali sono gli strumenti più idonei per farlo e dove questi vanno collocati in sito. L'acquisizione dei rispettivi parametri delle condizioni esterne, quali la temperatura, l'umidità relativa, l'irraggiamento, la velocità e direzione del vento, delle temperature superficiali, ci permettono di comprendere quale è l'effettivo comportamento di vari pannelli.

Infatti, una prima sperimentazione ha come obiettivo confrontare i comportamenti in fase estiva di pannelli che si differenziano per forma e materiale per valutare l'efficacia del pannello progettato come modulo per pareti ventilate. Una seconda futura sperimentazione sarà svolta confrontando due porzioni di facciate ventilate su scala reale, una realizzata con pannelli sagomati e una realizzata con pannelli classici piani. Lo scopo di questa seconda sperimentazione è quello di monitorare il flusso di aria nel canale di ventilazione.

3.4.1 Sperimentazione su prototipi

La sperimentazione è stata svolta sul terrazzo della facoltà Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, ad Ancona (43°35'13''N 13°30'53''E). Gli elementi oggetto di studio sono stati esposti a sud, montati su un supporto fissato su una struttura metallica con montanti e traversi. Tale supporto è un pannello di Aquaboard, con uno spessore di 1,25 cm, cioè una lastra a base di gesso da esterno, composta da un rivestimento idrofugo e da un cuore densificato e completo di specifici additivi che le conferiscono un'eccezionale resistenza all'acqua, agli agenti atmosferici e allo sviluppo di muffe.

Il monitoraggio è stato articolato in più fasi ed è stato svolto, complessivamente, dal 20 luglio 2023 al 21 settembre 2023:

- dal 21 luglio al 31 luglio è stato studiato il solo pannello sagomato in acciaio zincato (SF) al fine di valutare gli eventuali vantaggi portati dalla forma del pannello stesso, le variazioni ottenute al variare della dimensione dell'elemento di schermatura orizzontale posto al di sopra del pannello e la corrispondenza tra ciò che è la realtà e la modellazione nel software;

- dall'8 agosto al 27 agosto è stata effettuata la sperimentazione di quattro pannelli diversi, uno in acciaio zincato piano (SP), uno in acciaio zincato piano verniciato con vernice nanotecnologica (SPC), uno in alluminio piano (AP) e uno in acciaio zincato sagomato (SF);
- dal 7 al 11 settembre è stata portata avanti la sperimentazione sostituendo il pannello in acciaio zincato piano (SP) con quello in alluminio piano verniciato (APC), sempre con la stessa vernice nanotecnologica precedentemente citata e quello in alluminio piano (AP) con quello in alluminio sagomato verniciato (AFC);
- dal 14 al 21 settembre è stata effettuata la valutazione di soli pannelli sagomati, introducendo il pannello in Alucobond (MFC) al posto dei due piani (AP, APC).

Tutte le attività di monitoraggio sono state condotte in accordo con la normativa UNI EN ISO 7726:2002 [16].

Dopo aver stabilito i parametri da monitorare e la strumentazione da utilizzare è stata effettuata la fase di calibrazione degli strumenti, che serve per assicurarsi che ogni sonda sia perfettamente funzionante e settata correttamente.

Prima di procedere con il monitoraggio effettivo è necessario impostare un progetto di monitoraggio per individuare la tipologia, il numero di sensori da installare e il posizionamento più idoneo per ottenere tutti i valori necessari allo studio.

In particolare, per analizzare il comportamento termo-fisico dei pannelli per tecnologie ventilate sono state acquisite:

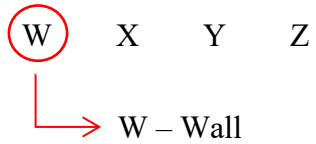
- le condizioni climatiche esterne (temperatura, umidità relativa, radiazione solare, velocità e direzione del vento);
- la temperatura superficiale interna del pannello;
- la temperatura superficiale sul lato esterno della parete.

Per quanto riguarda le condizioni climatiche esterne è stata utilizzata una *centralina meteo* collocata sopra la struttura metallica su cui sono montati i pannelli.

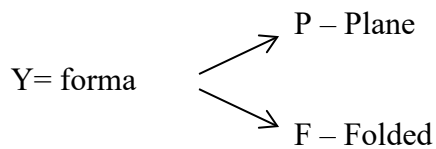
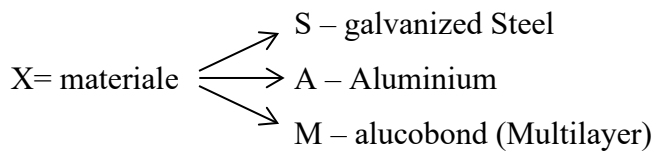
Per tutte le altre misurazioni sono state utilizzate *termoresistenze superficiali* per la misurazione della temperatura superficiale esterna della parete e della temperatura superficiale interna dei pannelli.

Prima di entrare nello specifico del progetto di monitoraggio si riporta uno schema esplicativo delle sigle utilizzate per identificare i vari pannelli oggetto di sperimentazione e le relative pareti retrostanti.

Nomenclatura pannelli e pareti



dove:



Z= rivestimento → C - Coated

Di seguito si riportano gli elaborati progettuali delle varie fasi del monitoraggio (Figura 40, Figura 41, Figura 42).

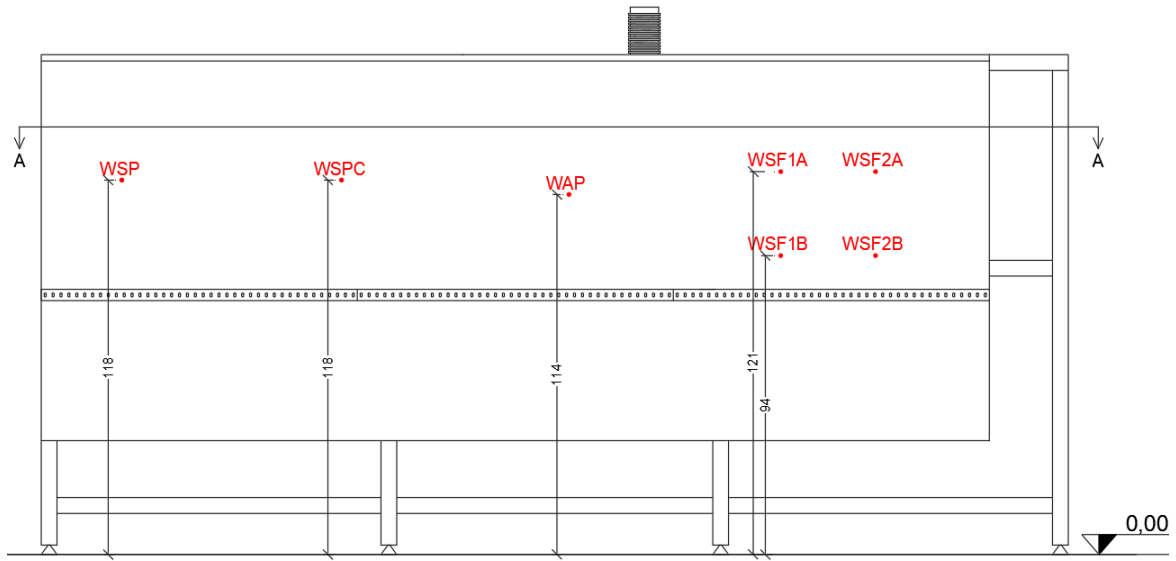


Figura 40 - Disposizione termoresistenze su pannello di AquaBoard

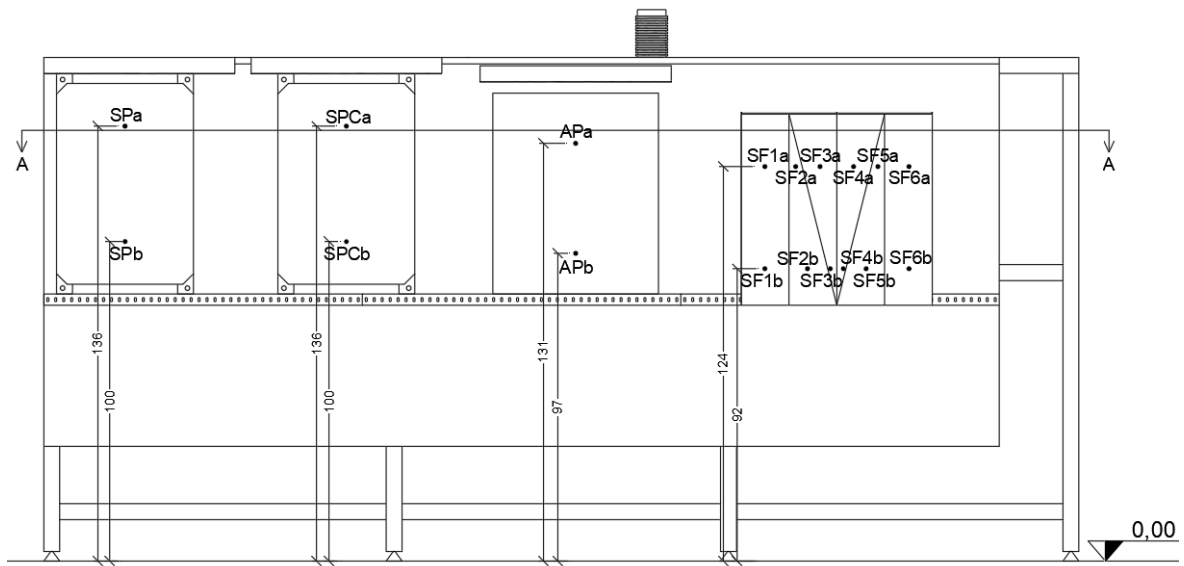


Figura 41 - Disposizione termoresistenze su pannelli metallici

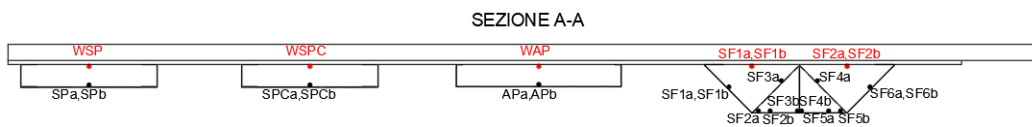


Figura 42 - Sezione orizzontale: disposizione termoresistenze

Come si nota dall'immagine precedente, in ciascuno dei pannelli piani sono state posizionate due termoresistenze sul retro, centrate in larghezza, una in alto e una in basso a 15 cm di distanza dalle rispettive estremità (Figura 40). Per registrare la temperatura della superficie esterna della parete posta sul retro dei pannelli stessi è stata installata una termoresistenza al centro della proiezione di ogni pannello metallico (Figura 41).

Nel caso del pannello sagomato (Figura 41), sono state utilizzate dodici termoresistenze, sei in alto, a 13 cm dal bordo superiore e sei in basso, a 10 cm dal bordo inferiore. In tal caso è stato scelto di impiegare un gran numero di sensori per poter apprezzare meglio gli eventuali vantaggi portati dall'auto-ombreggiamento offerto dalla forma particolare progettata. Nella parete retrostante, invece, le sonde sono state poste ai quattro vertici della proiezione del pannello sagomato, ad una distanza dalle estremità pari a 10 cm.

In questa prima fase, sopra ai pannelli sono state posizionate delle schermature metalliche di profondità pari a 12 cm, cioè 5 cm più profonde dei pannelli, meglio visibili dalla modellazione tridimensionale, sempre realizzata con il software Autodesk Revit (Figura 43).

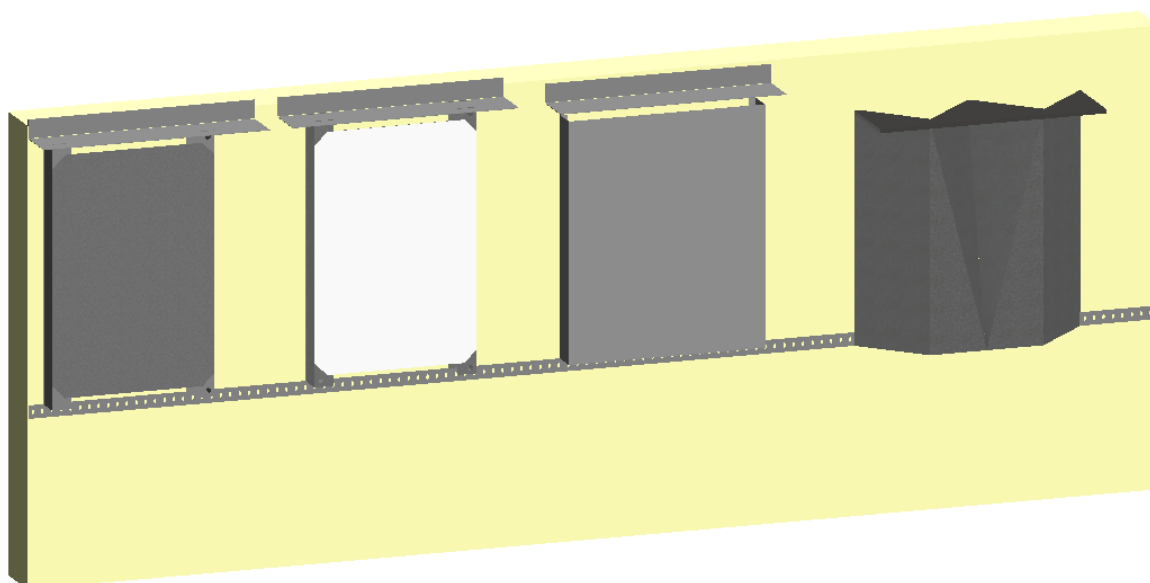


Figura 43 - Modello 3D: seconda fase di monitoraggio

Di seguito si riportano le foto delle superfici interne dei pannelli installati con le termoresistenze già posizionate (Figura 44) e la foto relativa ai pannelli installati sulla lastra in AquaBoard (Figura 45).

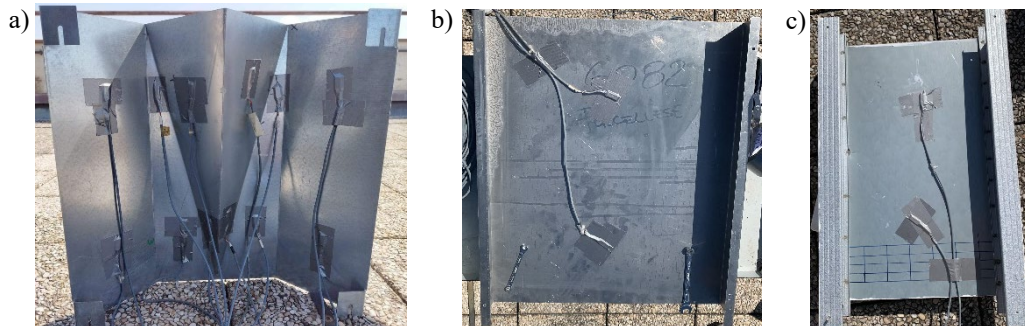


Figura 44 - Foto disposizione termoresistenze: a) Pannello in acciaio zincato sagomato; b) Pannello in alluminio piano; c) Pannello in alluminio in acciaio piano verniciato/non verniciato

Dato che il pannello piano in acciaio zincato verniciato e il pannello piano in acciaio zincato non verniciato sono uguali e le termoresistenze si trovano nelle medesime posizioni, è stata riportata soltanto la foto di uno dei due (Figura 44 - c).



Figura 45 - Foto pannelli sperimentazione seconda fase

Come anticipato, nel terzo periodo di sperimentazione (Figura 47), sono stati sostituiti due pannelli piani (SP, AP) al cui posto sono stati installati un pannello di alluminio piano verniciato (APC) e uno in alluminio sagomato verniciato (AFC).

Come nel precedente periodo, in ciascuno dei pannelli piani sono state posizionate due termoresistenze sul retro, centrate in larghezza, una in alto e una in basso a 15 cm di distanza dalle rispettive estremità (Figura 46). Per registrare la temperatura della superficie esterna della parete posta sul retro dei pannelli stessi sono state installate due termoresistenze nella medesima posizione di quelle sul pannello (Figura 46).

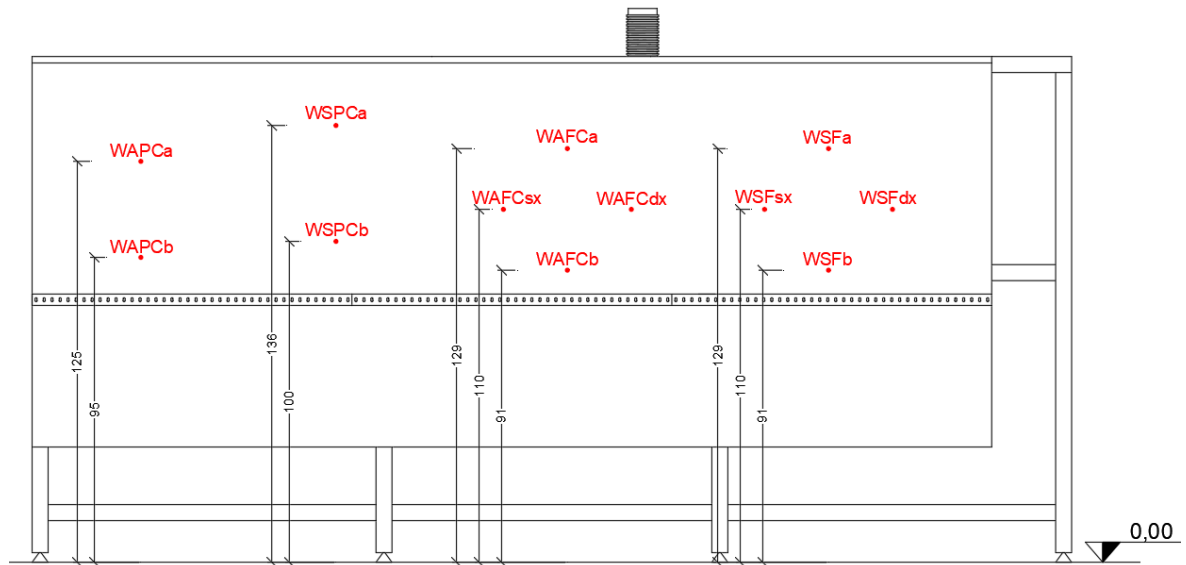


Figura 46 - Disposizione termoresistenze su pannello di AquaBoard

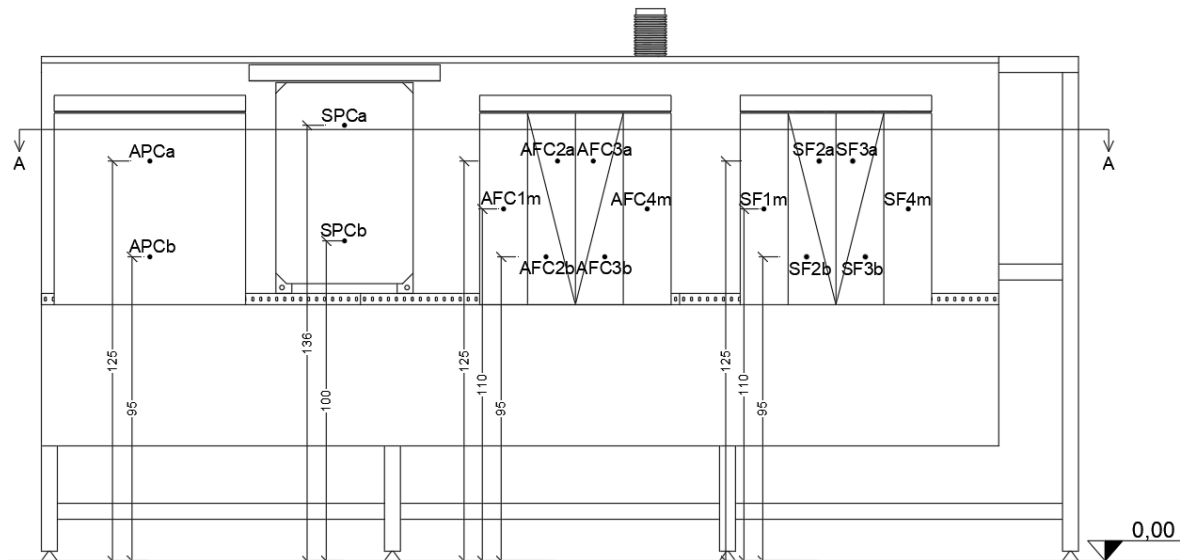


Figura 47 - Disposizione termoresistenze su pannelli metallici



Figura 48 - Sezione orizzontale: disposizione termoresistenza

Nel caso dei pannelli sagomati, sono state ridotte le termoresistenze utilizzate, da dodici a sei (Figura 47); nella prima e nell'ultima faccia, queste sono state messe in posizione centrale mentre nelle alte facce sono state posizionate in basso e in alto, a 15 cm dalle estremità, a facce alterne. Sei in alto, a 15 cm dal bordo superiore e sei in basso, a 15 cm dal bordo inferiore. Tale scelta di ridurre il numero di sensori è stata dettata dal fatto che nella precedente fase di prova, le temperature registrate tra termoresistenze molto vicine variavano in maniera trascurabile. Nella parete retrostante, invece, le sonde sono state poste a croce a 10cm dai bordi esterni della proiezione (Figura 46).

In questo caso, sopra ai pannelli piani sono state posizionate delle schermature metalliche di profondità pari a 17 cm, cioè 10 cm più profonde dei pannelli stessi e sopra a quelli sagomati sono state poste schermature metalliche orizzontali profonde 25 cm, in maniera tale da avere 10 cm di sporgenza. Questo si può ben notare dalla rappresentazione tridimensionale in Figura 49.

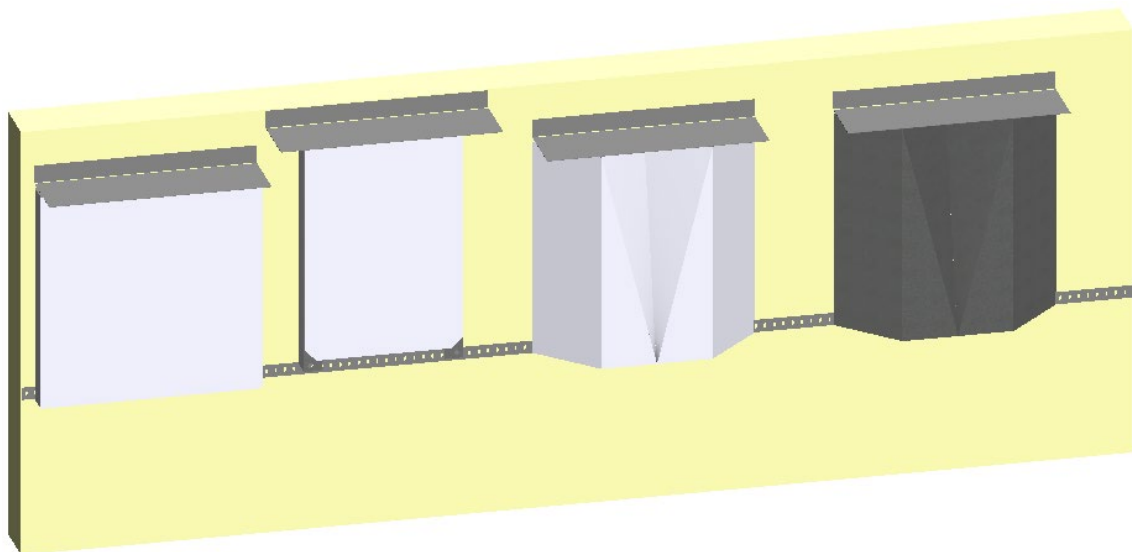


Figura 49 - Modello 3D: terza fase di monitoraggio

Di seguito si riportano le foto delle termoresistenze installate sia sulla superficie interna ai pannelli che sulla lastra di AquaBoard (Figura 50, Figura 51).

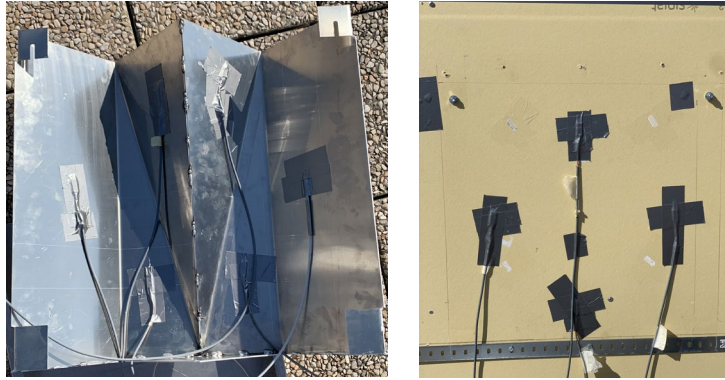


Figura 50 - Disposizione termoresistenze su pannello in alluminio sagomato verniciato e relativa parete retrostante

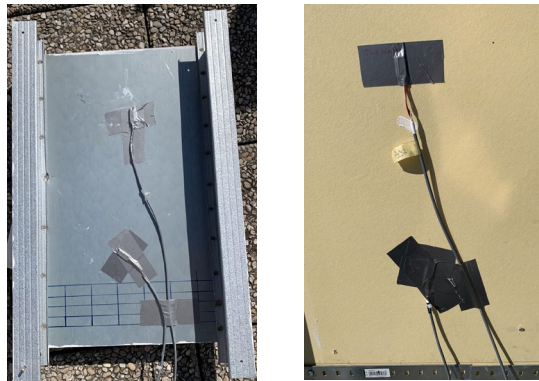


Figura 51 - Disposizione termoresistenze su pannello in acciaio zincato verniciato e relativa parete retrostante

Inoltre, si riporta anche la foto relativa a tutti i pannelli installati sulla lastra in AcquBoard oggetto di sperimentazione nella terza fase (Figura 52).



Figura 52 - Foto pannelli sperimentazione terza fase

Nel quarto periodo, la sperimentazione ha riguardato solo pannelli sagomati. Oltre ai due monitorati nella fase precedente, ne è stato aggiunto un terzo in materiale composito.

Nel pannello in alluminio le termoresistenze restano posizionate come nel caso precedente, così come quelle nella parete retrostante.

Nei pannelli in acciaio zincato e in Alucobond verniciato, i sensori mantengono la configurazione precedente ma sono stati ridotti a cinque, eliminando quello in basso della seconda faccia in quanto forniva temperature simili a quello adiacente (Figura 54).

Nella parete retrostante, le sonde sono rimaste a croce a 10cm dai bordi esterni della proiezione (Figura 53) e sopra ai pannelli sono state lasciate le schermature metalliche di profondità pari a 25 cm come ben visibile dal modello tridimensionale (Figura 56).

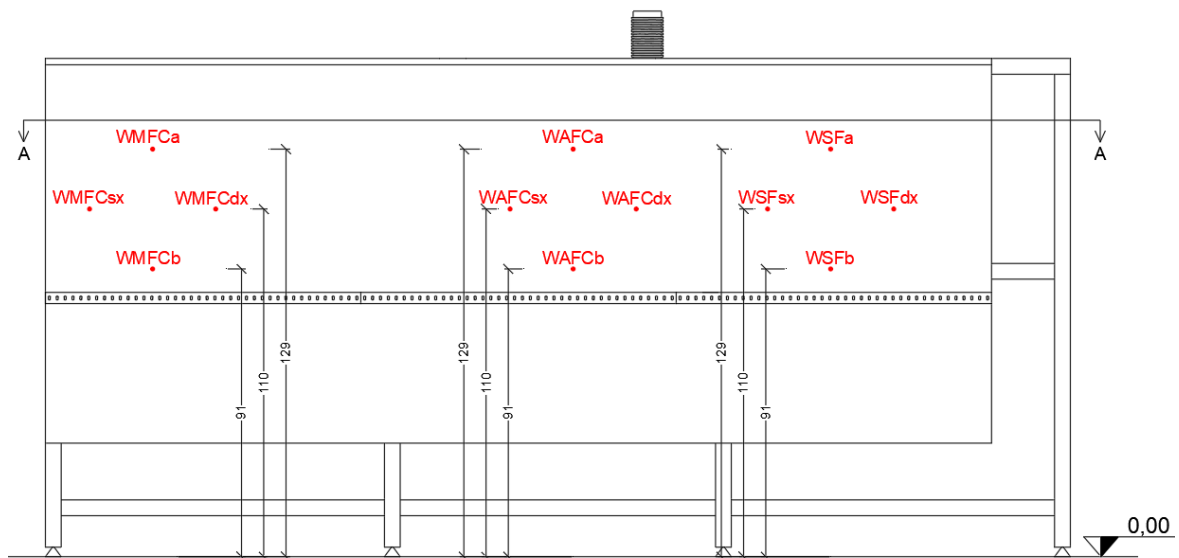


Figura 53 - Disposizione termoresistenze su pannello di AquaBoard

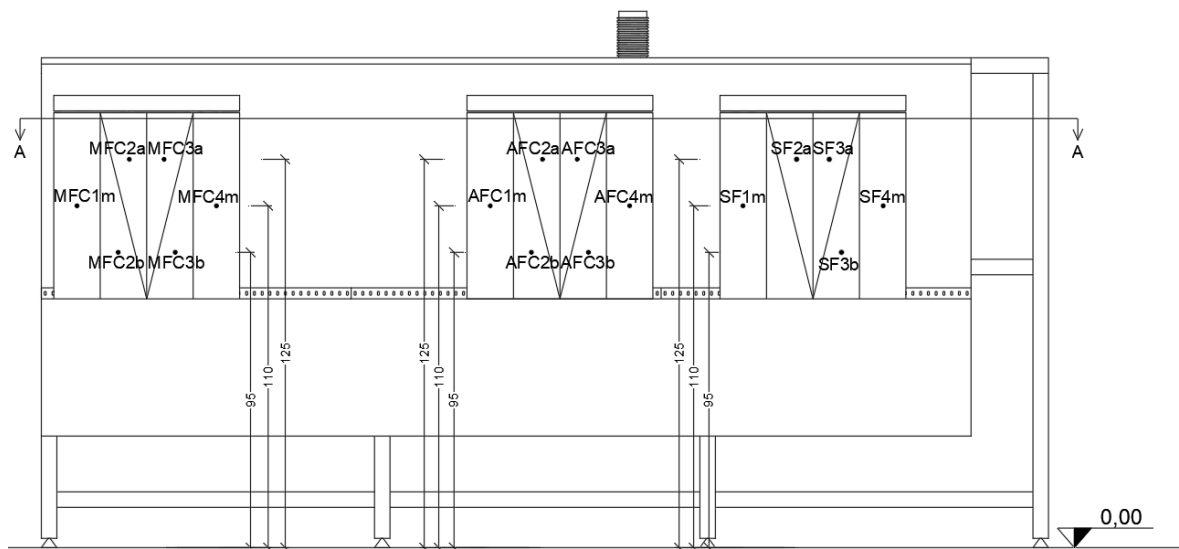


Figura 54 - Disposizione termoresistenze pannelli metallici

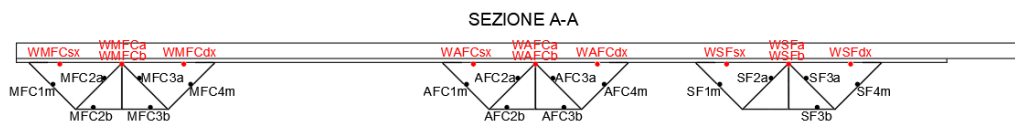


Figura 55 - Sezione orizzontale: disposizione termoresistenza

Di seguito si riporta la modellazione tridimensionale della quarta ed ultima fase del monitoraggio in cui sono coinvolti solo pannelli sagomati con elementi di schermatura di profondità pari a 25 cm (Figura 56).

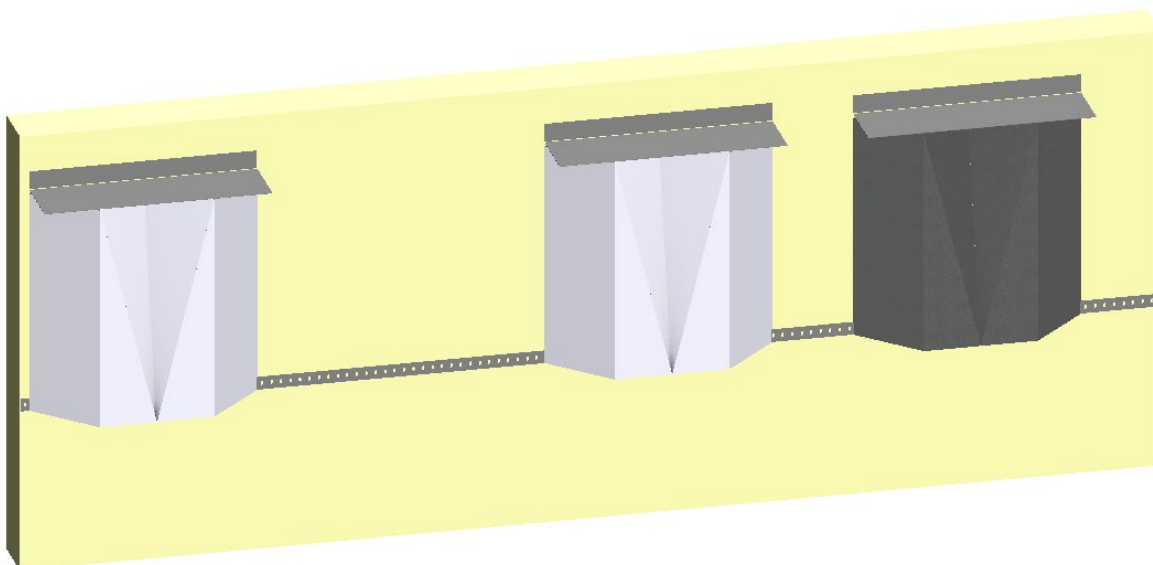


Figura 56 - Modello 3D: quarta fase di monitoraggio

Dalla foto sotto riportata si può vedere il posizionamento delle termoresistenze sia sul pannello in Alucobond sia sulla rispettiva parete retrostante.

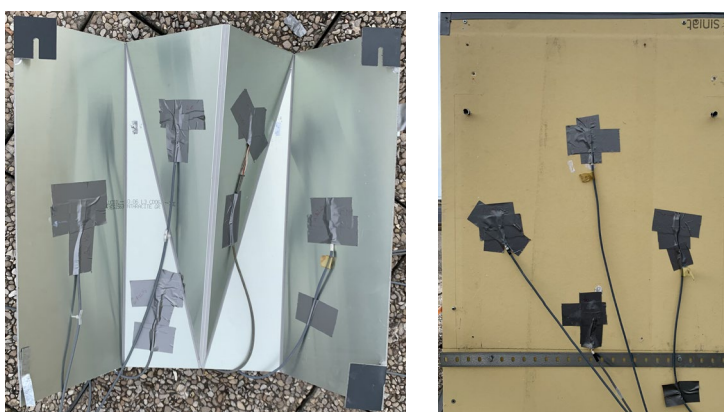


Figura 57 - Disposizione termoresistenze su pannello in Alucobond sagomato verniciato e relativa parete retrostante

Infine, si riporta la foto dell'ultima configurazione della sperimentazione (Figura 58).



Figura 58 - Foto pannelli sperimentazione quarta fase

Di seguito si elencano gli strumenti utilizzati per la campagna di monitoraggio condotta sui due box, utilizzati per la misura dei parametri descritti nella UNI EN ISO 7730 [17].

Le sonde utilizzate per la stazione meteorologica sono:

- *termoigrometro* per il rilievo dell'umidità e della temperatura dell'aria esterna(Figura 59);



Figura 59 - Termoigrometro

- *radiometro SR15-D2A2* per registrare la radiazione globale solare, il quale deve essere collocato in posizione perfettamente orizzontale, in una zona priva di ombra e deve essere orientato a sud, secondo quanto richiesto nella scheda tecnica del produttore. Tale strumento ha un range di misura che va da 285 a 3000 nm ed una incertezza della calibrazione < 18,%;

- *anemometro WMT700*, un sensore ad ultrasuoni che utilizza gli ultrasuoni per determinare velocità e direzione orizzontale del vento; la misura si basa sul tempo di percorrenza impiegato per transitare da un trasduttore all'altro, che dipende dalla velocità del vento. Tale tempo di percorrenza viene misurato in ambo le direzioni per ogni coppia di testine; utilizzando due misure per ognuno dei tre percorsi ad ultrasuoni posti ad angoli di 60° l'un l'altro, lo strumento computa direzione e velocità del vento. La misura del vento viene calcolata con un sistema che elimina completamente gli effetti di altitudine, temperatura ed umidità. Tale sensore ha un range di misura che va da 0 a 90 m/s, con un'accuratezza delle letture pari a $\pm 5\%$.

I rilievi sono stati effettuati contemporaneamente a quelli eseguiti sui pannelli e con stessa rata di acquisizione.

Per misurare le caratteristiche termo-fisiche della parete in esame è stata utilizzata la seguente strumentazione:

- *termoresistenze superficiali PT100* (Figura 60), sonde in grado di rilevare la temperatura superficiale dell'oggetto in esame con una precisione di $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ e con un range di misura che va da -50°C a 300°C . Tale sonda ha una piastrina all'estremità sulla quale viene messa della pasta termica e appoggiata sulla superficie da esaminare. Questa viene poi fissata con nastro adesivo americano per impedire all'aria esterna di influenzare la misurazione;



Figura 60 - Termoresistenza PT100

- *dataTaker DT500* (Figura 61), uno strumento elettronico digitale stand alone che lavora a basse frequenze, equipaggiato con un microprocessore ed una memoria interna che consentono l'acquisizione di dati da una vasta tipologia di sensori. Tutte le termoresistenze installate sono state collegate a questo acquisitore dati,

Questo permette l'acquisizione e la registrazione dei dati, ad intervalli temporali stabiliti, mediante la misurazione degli input dei sensori. I dati sono stati acquisiti ogni dieci minuti ed archiviati nella scheda di memoria rimovibile. Il dispositivo dispone di selettori di canale a stato solido.

Collegando il dataTaker ad un computer, è possibile visualizzare i dati in tempo reale, mediante il software DeLogger, ed esportarli su fogli di calcolo Excel.



Figura 61 - DataTaker e CEM

- *CEM (Channel Expansion Module)* (Figura 61) dispositivi connessi al dataTaker per aumentare il numero di canali analogici e digitali. Questi supportano tutti i tipi di segnali di ingresso e sensori supportati dallo stesso dataTaker.

4. RISULTATI

4.1 Sollecitazioni e verifiche strutturali

La modellazione del singolo pannello illustrata nel Capitolo 3.3.1 ha portato alle seguenti sollecitazioni agenti su ogni tassello di fissaggio utilizzato superiormente:

- azione tagliante: 1,90 N;
- azione di trazione (estrazione dovuta al vento): 3858,00 N.

Dalla modellazione della barra inferiore utilizzata per il fissaggio del pannello, sempre mostrata nel Capitolo 3.3.1, sono state definite le seguenti sollecitazioni agenti sui connettori usati per creare le tasche per l'alloggiamento delle piastrine inferiori del pannello:

- azione tagliante: 20,7 N;
- azione di flessione: 118,85 Nmm. } Direzione z
- azione tagliante: 44,7 N;
- azione di flessione: 114,94 Nmm. } Direzione y

Si ricorda che in direzione z sono stati applicati i carichi relativi al peso proprio del pannello e in direzione y quelli relativi all'azione del vento.

Dopo aver calcolato l'area resistente ($A_{res} = 37,70mm^2$) del singolo bullone $\Phi 8$ e averne definito la classe, come mostrato nel capitolo d'interesse, si sono svolte le verifiche sia per i fissaggi superiori che per quelli inferiori.

Verifiche per i fissaggi superiori

Fissaggio utilizzato

Diametro $\Phi 8$;

Classe di resistenza 8.8 $\rightarrow f_{yb}$ è la tensione di snervamento del bullone;
 \searrow f_{tb} è la tensione di rottura del bullone;

Coefficiente parziale di sicurezza $\gamma_{M2} = 1,25$;

Area resistente $A_{res} = 37,70mm^2$.

- *verifica a taglio del bullone* → $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$

$$F_{v,Ed} = 1,90 \text{ N}$$

$$\tau_b = \frac{F_{v,Ed}}{A_{res}} = \frac{1,90}{37,70} = 0,05 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 37,70}{1,25} = 14476,80 \text{ N}$$

Quindi $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ → *VERIFICATO*

- *verifica a rifollamento della piastra*

$$F_{v,Ed} = 1,90 \text{ N}$$

$$\sigma_{rif} = \frac{F_{v,Ed}}{d \cdot t} = \frac{1,90}{8 \cdot 2} = 0,12 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 350 \cdot 8 \cdot 2}{1,25} = 11200 \text{ N}$$

dove:

$$d = 8 \text{ mm}$$

$$t = 2 \text{ mm}$$

$$d_0 = 9 \text{ mm}$$

$$f_{tk} = 350 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{(3d_0)}; \frac{f_{tb}}{f_t}; 1 \right\} = 1$$

$$k = \min \left\{ \frac{2,8e_2}{(d_0)} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,5$$

$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ → *VERIFICATO*

- *verifica della resistenza complessiva della singola unione a taglio*

$$F_{c,Rd} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) = \min(14476,80; 11200) \rightarrow F_{c,Rd} = 11200 \text{ N}$$

$$F_{c,Rd} \geq \frac{F_{v,Ed}}{n_b} \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

dove n_b è il numero dei bulloni che costituisce il collegamento (in questo caso pari a 1).

- *verifica della resistenza dell'unione a trazione*

$$F_{b,Sd} \leq \min(F_{t,Rd}; F_{p,Rd})$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 37,70}{1,25} = 21715,20 \text{ N}$$

$$F_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 13 \cdot 2 \cdot 350}{1,25} = 13715,52 \text{ N}$$

dove

$$d_m = 13 \text{ mm}$$

$$t_p = 2 \text{ mm}$$

$$F_{b,Sd} = F_{t,Ed} = 3858 \text{ N}$$

Quindi $F_{b,Sd} \leq \min(21715,20; 13715,52) \rightarrow \text{VERIFICATO}$

- *verifica combinata a taglio e trazione*

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{1,90}{14476,80} + \frac{3858}{1,4 \cdot 13715,52} \leq 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{1,90}{13715,52} \leq 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- *verifica della rottura per strappamento della piastra*

$$2\tau \left(2m - \frac{1}{4}\right) \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m = \frac{\sigma_{rif}}{2\tau} + \frac{1}{4} = \frac{0,12}{2 \cdot 0,05} + \frac{1}{4} = 1,43$$

Imponendo che la rottura per strappamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si ha che $m=1,43$ quindi la distanza dai bordi deve essere almeno di 1,43 diametri, in tal caso almeno di $11,44\text{mm} \approx 12\text{mm}$

Come si può notare dall'immagine (Figura 62), la verifica è soddisfatta in quanto le distanze del foro dai bordi sono sempre maggiori di 12 mm.

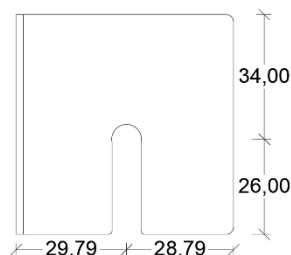


Figura 62 - Piastra superiore: distanze del foro dai bordi

- *verifica della rottura per tranciamento della piastra*

$$2\sigma' \frac{2}{3} m' \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m' = \frac{3\sigma_{rif}}{4\sigma'} = \frac{3 \cdot 0,12}{4 \cdot 0,03} = 2,70$$

$$\sigma' = \frac{F_{v,Ed}}{e_1 \cdot t} = \frac{1,90}{28,79 \cdot 2} = 0,03$$

Imponendo che la rottura per tranciamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si ha che $m'=2,70$ quindi la distanza dai bordi deve essere almeno di 2,70 diametri, in tal caso almeno di 21,6mm \approx 22mm.

Come si può notare dall'immagine (Figura 68), la verifica è soddisfatta in quanto le distanze del foro dai bordi sono sempre maggiori di 22 mm.

Verifiche per i fissaggi inferiori

Fissaggio utilizzato

Diametro $\phi 8$;

Classe di resistenza 8.8 \rightarrow f_{yb} è la tensione di snervamento del bullone;
 \searrow f_{tb} è la tensione di rottura del bullone;

Coefficiente parziale di sicurezza $\gamma_{M2} = 1,25$;

Area resistente $A_{res} = 37,70 \text{mm}^2$.

- *verifica a taglio del bullone* $\rightarrow F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$

$$F_{v,Ed} = 20,70 \text{ N}$$

$$\tau_b = \frac{F_{v,Ed}}{A_{res}} = \frac{20,70}{37,70} = 0,55 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 37,70}{1,25} = 14476,80 \text{ N}$$

Quindi $F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd} \rightarrow$ **VERIFICATO**

- *verifica a rifollamento della barra inferiore*

$$F_{v,Ed} = 20,70 \text{ N}$$

$$\sigma_{rif} = \frac{F_{v,Ed}}{d \cdot t} = \frac{20,70}{8 \cdot 1,50} = 1,73 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,56 \cdot 350 \cdot 8 \cdot 1,50}{1,25} = 4666,67 \text{ N}$$

dove:

$$d = 8 \text{ mm}$$

$$t = 1,50 \text{ mm}$$

$$d_0 = 9 \text{ mm}$$

$$f_{tk} = 350 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = \min \left\{ \frac{p_1}{(3d_0)} - 0,25; \frac{f_{tb}}{f_t}; 1 \right\} = 0,56$$

$$k = \min \left\{ \frac{2,8e_2}{(d_0)} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,5$$

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- *verifica della resistenza complessiva della singola unione a taglio*

$$F_{c,Rd} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) = \min(14476,80; 4666,67) \rightarrow F_{c,Rd} = 4666,67 \text{ N}$$

$$F_{c,Rd} \geq \frac{F_{v,Ed}}{n_b} \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

dove n_b è il numero dei bulloni che costituisce il collegamento (in questo caso pari a 1).

- *verifica della resistenza dell'unione a trazione*

$$F_{b,Sd} \leq \min(F_{t,Rd}; F_{p,Rd})$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 37,70}{1,25} = 21715,20 \text{ N}$$

$$F_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 13 \cdot 1,50 \cdot 350}{1,25} = 10286,64 \text{ N}$$

dove

$$d_m = 13 \text{ mm}$$

$$t_p = 1,50 \text{ mm}$$

$$F_{b,Sd} = F_{t,Ed} = 44,70 \text{ N}$$

$$\text{Quindi } F_{b,Sd} \leq \min(21715,20; 10286,64) \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- *verifica combinata a taglio e trazione*

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{20,70}{14476,80} + \frac{44,70}{1,4 \cdot 10286,64} \leq 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{20,70}{10286,64} \leq 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- *verifica della rottura per strappamento della barra inferiore*

$$2\tau \left(2m - \frac{1}{4}\right) \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m = \frac{\sigma_{rif}}{2\tau} + \frac{1}{4} = \frac{1,73}{2 \cdot 0,55} + \frac{1}{4} = 1,82$$

Imponendo che la rottura per strappamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si ha che $m=1,82$ quindi la distanza dai bordi deve essere almeno di 1,82 diametri, in tal caso almeno di 14,56 mm.

Come si può notare dall'immagine (Figura 63), la verifica è soddisfatta in quanto le distanze del foro dai bordi sono sempre maggiori di 14,56 mm.

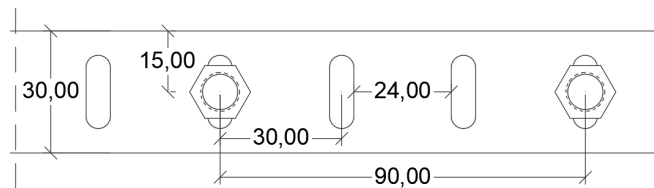


Figura 63 - Barra inferiore: distanze del foro dai bordi

- *verifica della rottura per tranciamento della barra inferiore*

$$2\sigma' \frac{2}{3} m' \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m' = \frac{3\sigma_{rif}}{4\sigma'} = \frac{3 \cdot 1,73}{4 \cdot 0,58} = 2,25$$

$$\sigma' = \frac{F_{v,Ed}}{e_1 \cdot t} = \frac{20,70}{24,00 \cdot 1,50} = 0,58 \text{ N/mm}^2$$

Imponendo che la rottura per tranciamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si ha che $m'=2,25$ quindi la distanza dai bordi deve essere almeno di 2,25 diametri, in tal caso almeno di 18,00mm.

Come si può notare dall'immagine (Figura 63), la verifica non è soddisfatta in quanto la distanza del foro dal bordo superiore è pari a 15 mm quindi minore di 22,48 mm.

Nuove verifiche per i fissaggi inferiori

Dato che la precedente verifica di rottura per tranciamento della barra inferiore non è soddisfatta, sono stati modificati sia la dimensione della barra che il diametro dei connettori. Questa scelta è stata dettata dalla necessità di soddisfare la verifica precedente, ciò porta un vantaggio ulteriore, cioè una barra di dimensione standard più facile da reperire in ambito commerciale.

Fissaggio utilizzato

Diametro $\Phi 6$;

Classe di resistenza 8.8 $\rightarrow f_{yb}$ è la tensione di snervamento del bullone;
 $\rightarrow f_{tb}$ è la tensione di rottura del bullone;

Coefficiente parziale di sicurezza $\gamma_{M2} = 1,25$;

Area resistente $A_{res} = 28,26 \text{ mm}^2$.

- *verifica a taglio del bullone* $\rightarrow F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$

$$F_{v,Ed} = 20,70 \text{ N}$$

$$\tau_b = \frac{F_{v,Ed}}{A_{res}} = \frac{20,70}{28,26} = 0,73 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 28,26}{1,25} = 10851,84 \text{ N}$$

Quindi $F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd} \rightarrow \text{VERIFICATO}$

- *verifica a rifollamento della barra inferiore*

$$F_{v,Ed} = 20,70 \text{ N}$$

$$\sigma_{rif} = \frac{F_{v,Ed}}{d \cdot t} = \frac{20,70}{6 \cdot 1,50} = 2,30 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,85 \cdot 350 \cdot 6 \cdot 1,50}{1,25} = 5325,00 \text{ N}$$

dove:

$$d = 6 \text{ mm}$$

$$t = 1,50 \text{ mm}$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

$$f_{tk} = 350 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = \min \left\{ \frac{p_1}{(3d_0)} - 0,25; \frac{f_{tb}}{f_t}; 1 \right\} = 0,85$$

$$k = \min \left\{ \frac{2,8e_2}{(d_0)} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,5$$

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- *verifica della resistenza complessiva della singola unione a taglio*

$$F_{c,Rd} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) = \min(10851,84; 5325,00) \rightarrow F_{c,Rd} = 5325,00 \text{ N}$$

$$F_{c,Rd} \geq \frac{F_{v,Ed}}{n_b} \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

dove n_b è il numero dei bulloni che costituisce il collegamento (in questo caso pari a 1).

- *verifica della resistenza dell'unione a trazione*

$$F_{b,Sd} \leq \min(F_{t,Rd}; F_{p,Rd})$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 28,26}{1,25} = 16277,76 \text{ N}$$

$$F_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 12 \cdot 1,50 \cdot 350}{1,25} = 9495,36 \text{ N}$$

dove

$$d_m = 12 \text{ mm}$$

$$t_p = 1,50 \text{ mm}$$

$$F_{b,Sd} = F_{t,Ed} = 44,70 \text{ N}$$

$$\text{Quindi } F_{b,Sd} \leq \min(16277,76; 9495,36) \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- *verifica combinata a taglio e trazione*

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{20,70}{10851,84} + \frac{44,70}{1,4 \cdot 9495,36} \leq 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{20,70}{9495,36} \leq 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

- *verifica della rottura per strappamento della barra inferiore*

$$2\tau \left(2m - \frac{1}{4} \right) \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m = \frac{\sigma_{rif}}{2\tau} + \frac{1}{4} = \frac{2,30}{2 \cdot 0,73} + \frac{1}{4} = 1,82$$

Imponendo che la rottura per strappamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si ha che $m=1,82$ quindi la distanza dai bordi deve essere almeno di 1,82 diametri, in tal caso almeno di 10,92 mm.

Come si può notare dall'immagine (Figura 64), la verifica è soddisfatta in quanto le distanze del foro dai bordi sono sempre maggiori di 10,92 mm.

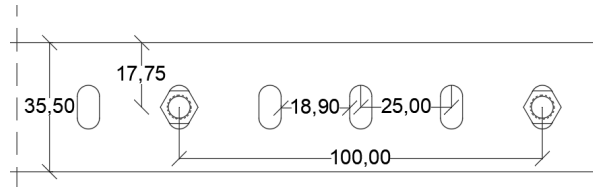


Figura 64 - Nuova barra inferiore: distanze del foro dai bordi

- *verifica della rottura per tranciamento della barra inferiore*

$$2\sigma' \frac{2}{3} m' \phi t = \sigma_{rif} \phi t$$

$$m' = \frac{3\sigma_{rif}}{4\sigma'} = \frac{3 \cdot 2,30}{4 \cdot 0,73} = 2,36$$

$$\sigma' = \frac{F_{v,Ed}}{e_1 \cdot t} = \frac{20,70}{18,9 \cdot 1,50} = 0,73 \text{ N/mm}^2$$

Imponendo che la rottura per tranciamento avvenga contemporaneamente a quella per rifollamento si ha che $m'=2,36$ quindi la distanza dai bordi deve essere almeno di 2,36diametri, in tal caso almeno di 14,16 mm.

Come si può notare dall'immagine (Figura 64), la verifica è soddisfatta in quanto la distanza del foro dal bordo superiore è pari a 17,5 mm quindi maggiore di 14,16 mm.

4.2 Sperimentazione del comportamento termico

Come già anticipato nel Capitolo 3.4.1 la sperimentazione si sviluppa in quattro fasi.

La prima parte della sperimentazione (dal 20 luglio al 31 luglio) è stata effettuata solo sul pannello in acciaio zincato sagomato (SF), soprattutto al fine di valutare l'incidenza delle ombre prodotte dal pannello stesso e dai dispositivi di schermatura.

La seconda parte della sperimentazione è stata svolta durante il mese di agosto, più precisamente dal giorno 8 agosto 2023 al giorno 27 agosto 2023. Come visibile dal grafico in Figura 65 che riporta l'andamento della temperatura dell'aria di tale periodo, le temperature maggiori sono state registrate nella settimana che va dal 21 al 27 agosto.

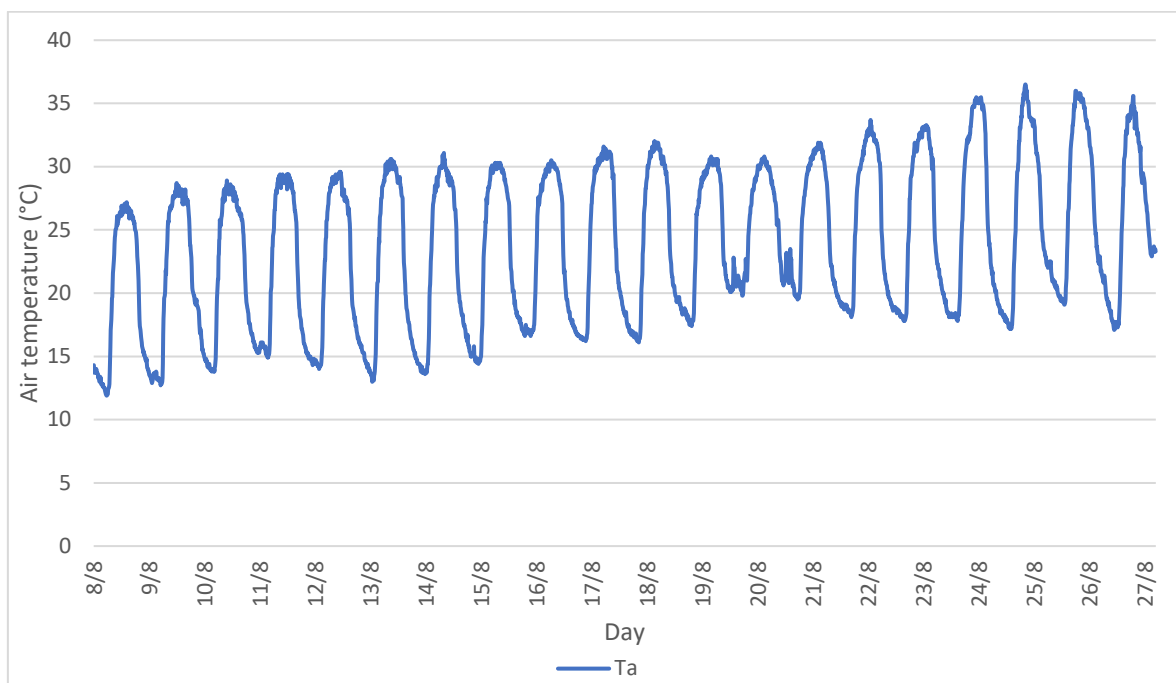


Figura 65 - Andamento temperatura dell'aria intero periodo

Tale settimana è stata presa come periodo di riferimento per effettuare diversi confronti tra i vari pannelli al fine di valutare:

- l'incidenza della forma;
- l'incidenza della finitura;
- l'incidenza del materiale.

4.2.1 Incidenza ombreggiamento

Del periodo preso in considerazione per tale valutazione è stato preso come riferimento il giorno 27 luglio 2023 per dimostrare la corrispondenza tra le ombre reali e quelle ottenute dal software Revit impostando un'analisi solare dello stesso giorno. Di seguito si riportano i confronti grafici di alcuni orari significativi (Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69).

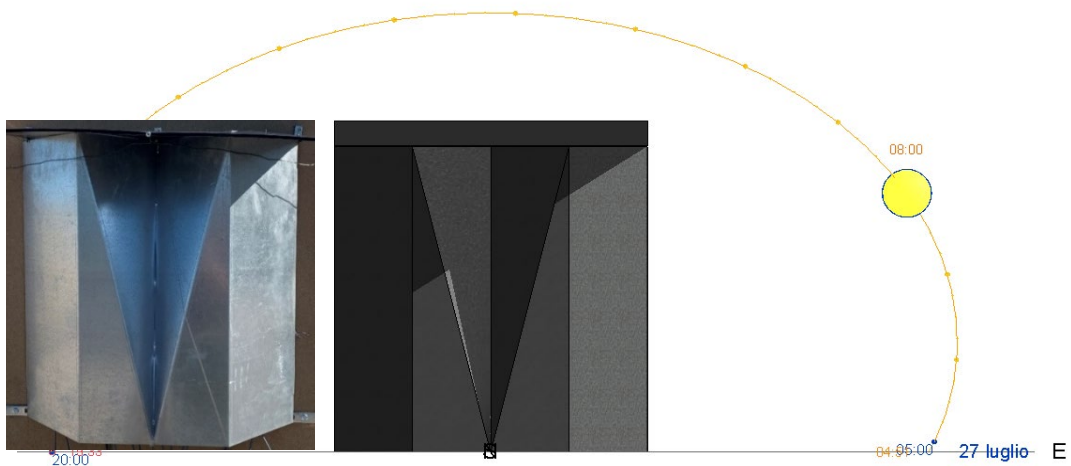


Figura 66 - Confronto ombre ore 8:00

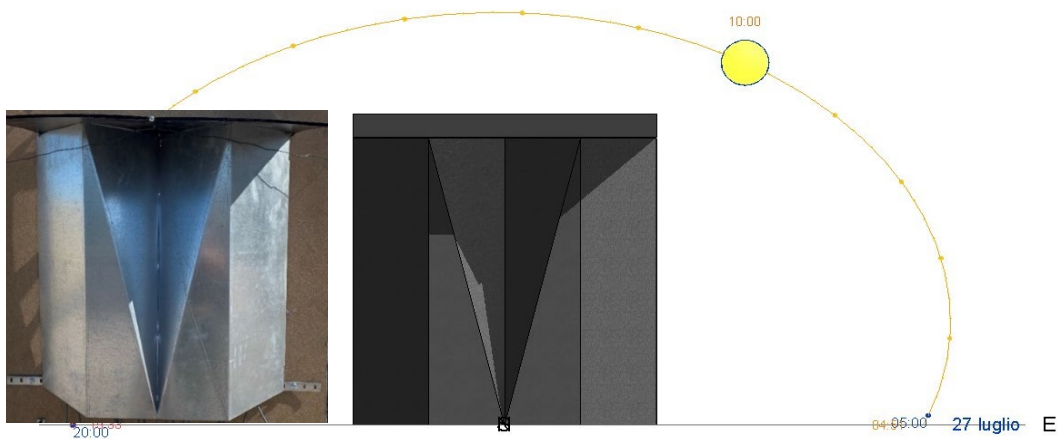


Figura 67 - Confronto ombre ore 10:00

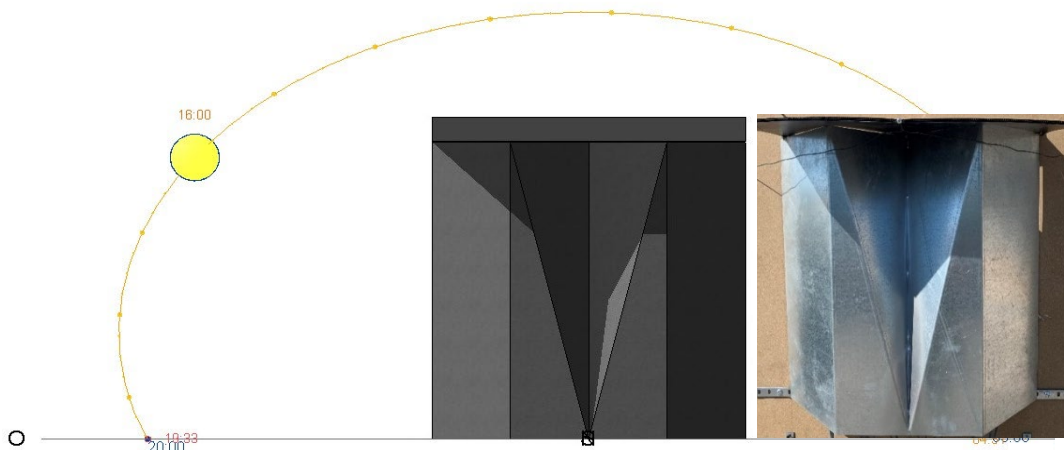


Figura 68 - Confronto ombre ore 16:00

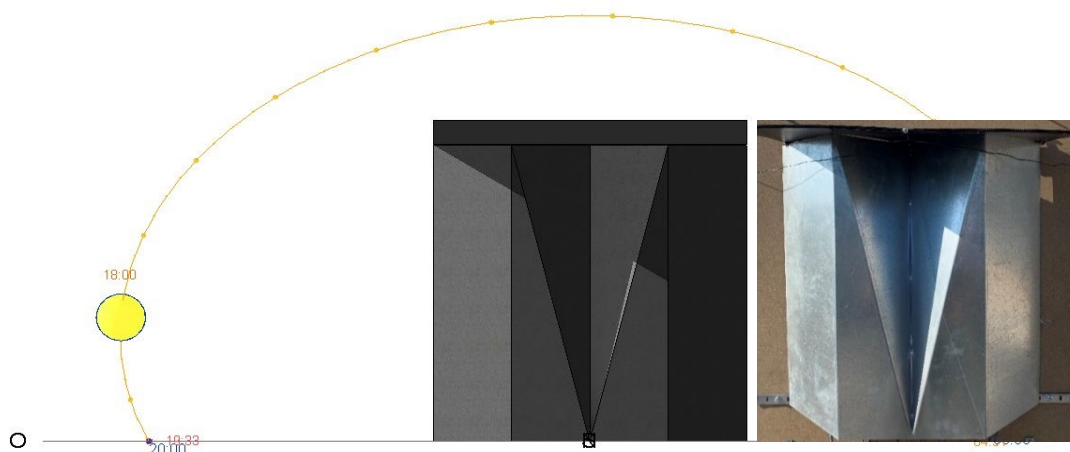


Figura 69 - Confronto ombre ore 18:00

In questo confronto la schermatura orizzontale posta al di sopra del pannello ha una profondità pari a 25 cm, ciò significa che si prolunga 10 cm oltre la faccia più sporgente del pannello stesso.

Dalle immagini precedenti si riesce a cogliere l'effettiva corrispondenza delle zone di ombra per cui il software Autodesk Revit risulta essere affidabile per tale genere di studio.

Per questo motivo, per valutare l'ombreggiamento prodotto da una schermatura orizzontale di profondità pari a 20 cm è stata utilizzata direttamente l'analisi solare svolta dal software. Di seguito si riportano i fotogrammi degli stessi orari dell'analisi del giorno 21 luglio 2023 (Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73).

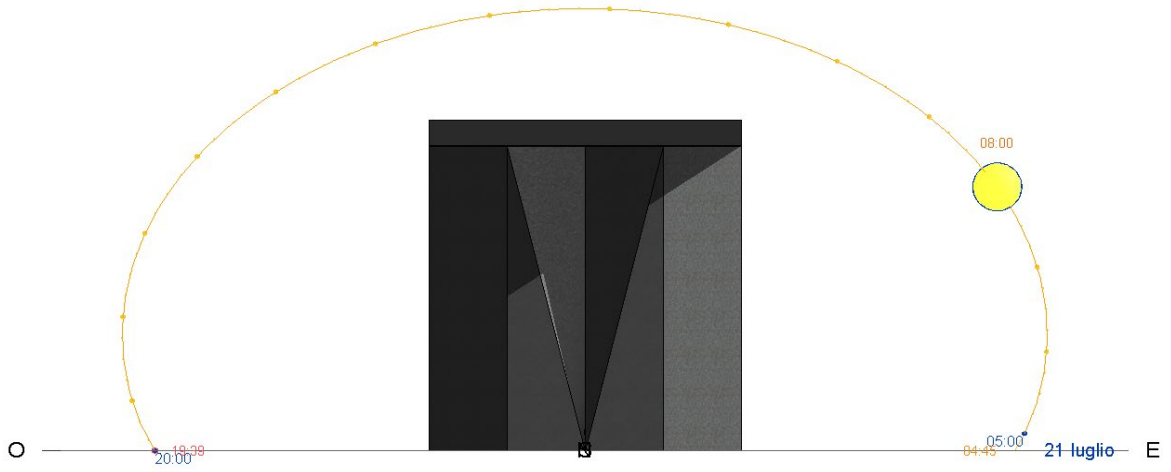


Figura 70 - Confronto ombre ore 8:00

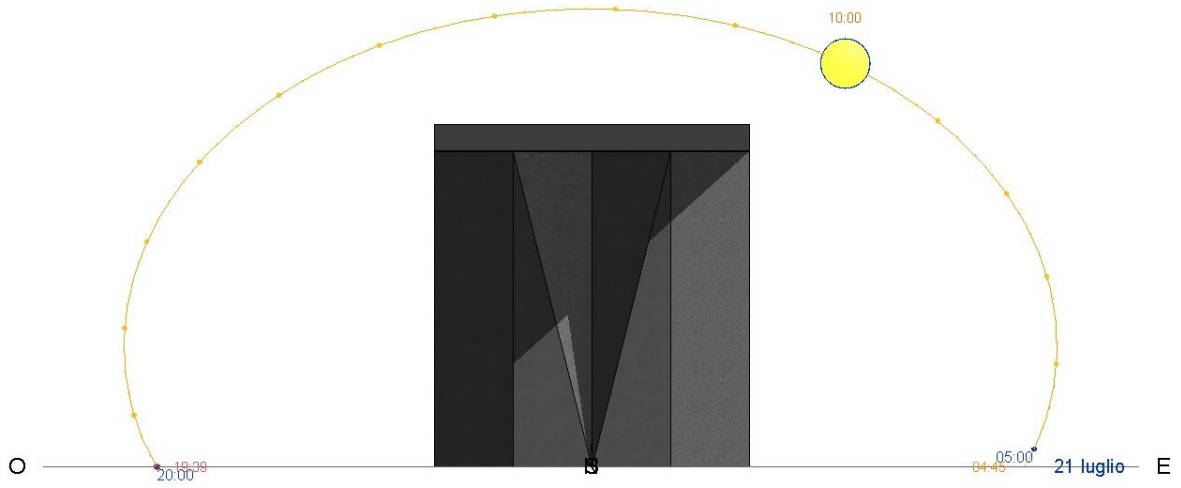


Figura 71 - Confronto ombre ore 10:00

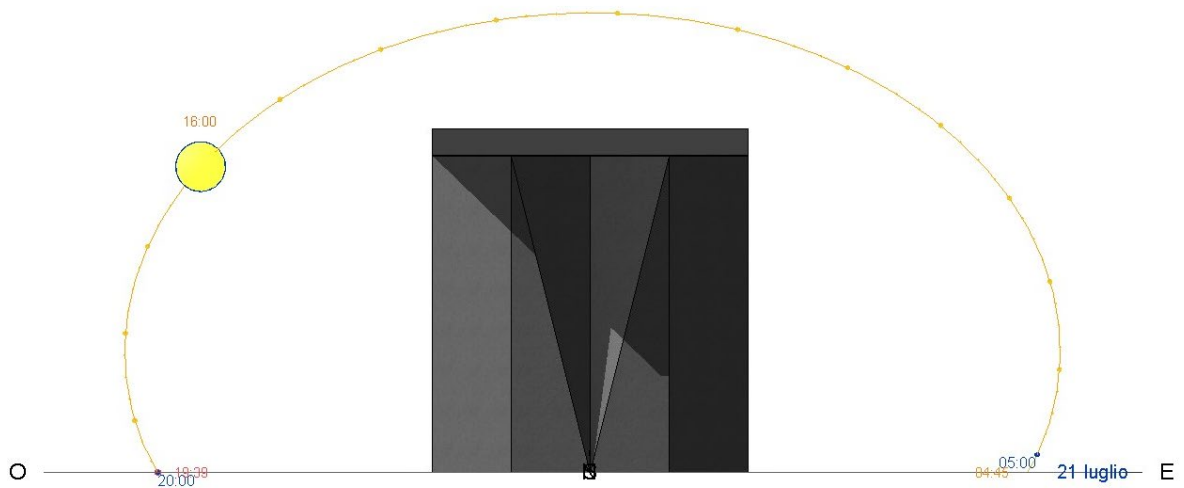


Figura 72 - Confronto ombre ore 16:00

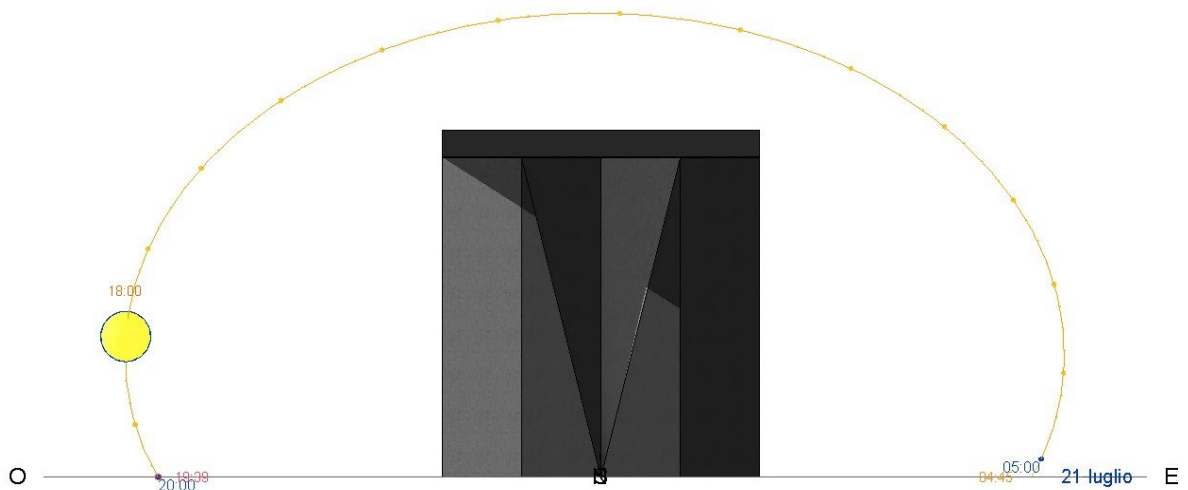


Figura 73 - Confronto ombre ore 18:00

Dopodiché sono state calcolate le aree ombreggiate in termini percentuali riferendosi all'area totale del pannello. Confrontando quelle ottenute nei due giorni, con schermature di dimensioni diverse, dal grafico in Figura 74, è evidente che il pannello con schermatura da 10 cm presenta una superficie ombreggiata maggiore rispetto a quello con schermatura da 5 cm. Tale differenza si può definire trascurabile ad eccezione di quanto accade nelle ore centrali in cui la schermatura da 10 cm offre un incremento della percentuale ombreggiata anche fino al 16% (Tabella 10).

Per ogni fascia oraria sono riportate tre colonne perché nel confronto è stato inserito anche il pannello senza schermatura orizzontale, proprio per apprezzare meglio i vantaggi ottenuti da quest'ultima. Come si può notare dal grafico in Figura 74, la schermatura orizzontale è fondamentale nelle ore centrali in quanto in tali fasce orarie la forma del pannello non contribuisce all'ombreggiamento; infatti, alle ore 12:00, nel caso di assenza di schermatura, l'area ombreggiata è pari a zero.

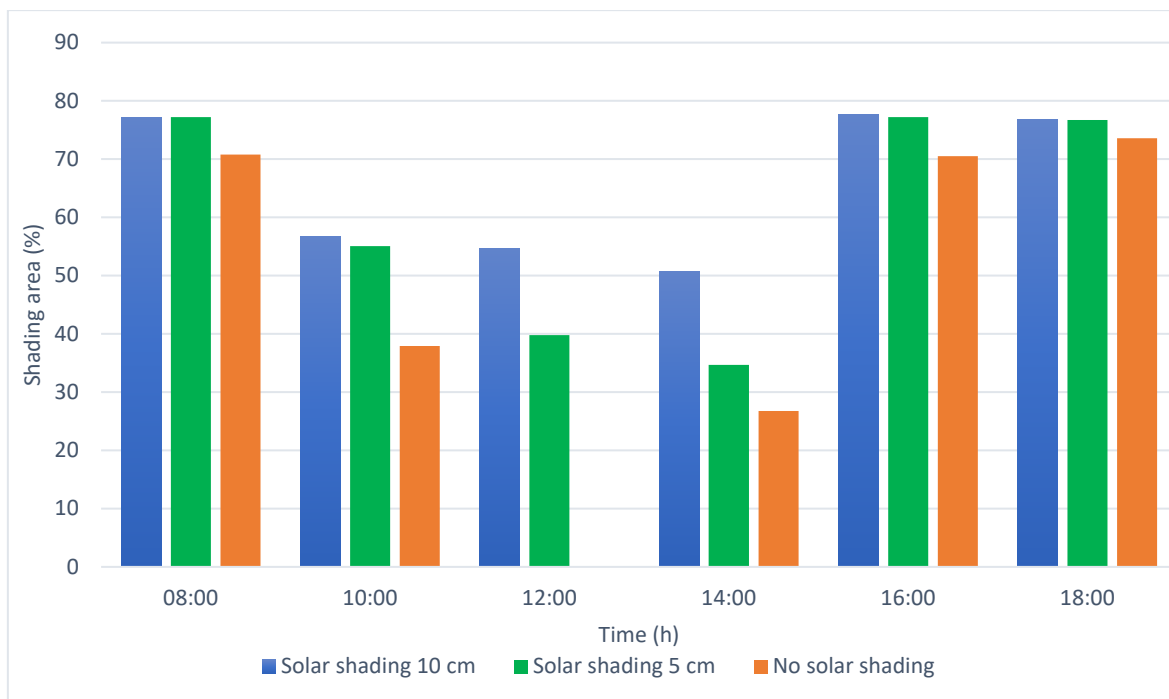


Figura 74 - Grafico confronto ombre percentuali

Tabella 10 - Tabella confronto ombre percentuali

| | 08:00 | 10:00 | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Solar shading 10 cm | 77,22 | 56,69 | 54,69 | 50,77 | 77,61 | 76,88 |
| Solar shading 5 cm | 77,20 | 55,04 | 39,77 | 34,69 | 77,19 | 76,72 |
| No solar shading | 70,77 | 37,93 | 0,00 | 26,77 | 70,48 | 73,57 |
| Δ (10cm-No shading) | 6,45 | 18,76 | 54,69 | 23,99 | 7,12 | 3,31 |
| Δ (10cm-5cm) | 0,02 | 1,65 | 14,92 | 16,08 | 0,41 | 0,16 |

Inoltre, per verificare l'effettiva efficienza della forma del pannello e della schermatura orizzontale, sono state realizzate delle mappe di temperatura con il software Tecplot (Figura 75). Inserendo all'interno del software la geometria del pannello e la posizione delle termoresistenze con le relative temperature, questo restituisce delle mappe di temperatura dove ogni colore corrisponde ad un range di temperature. Da tali mappe si distinguono le zone più calde, quindi quelle direttamente irradiate dal sole, in rosso da quelle meno calde, quindi quelle ombreggiate, in colori che vanno dall'arancio, al giallo, all'azzurro.

Nelle fasce orarie relative alle ore 10:00 e alle ore 16:00 è più evidente l'ombreggiamento dovuto alla forma del pannello; nel primo orario la zona più calda è quella ad est, cioè quella colpita direttamente dalla radiazione solare, mentre nel secondo orario si verifica la condizione opposta per lo stesso motivo. Nelle fasce orarie tra le 12:00 e le 14:00 risulta

evidente l'effetto dell'elemento di schermatura orizzontale, infatti si nota che la parte meno calda è quella superiore in quanto è quella interessata dall'ombra prodotta dalla schermatura.

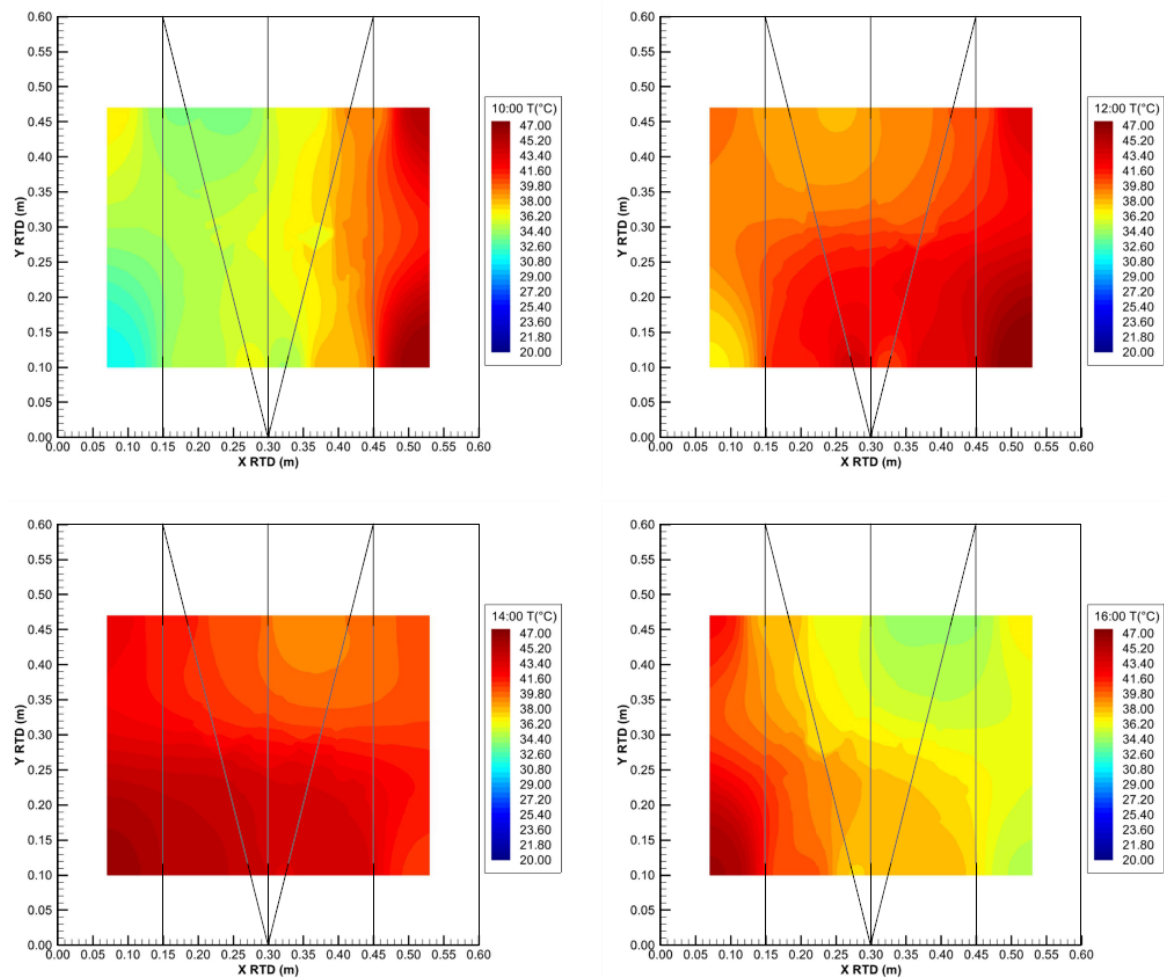


Figura 75 - Mappe di temperatura pannello sagomato in acciaio zincato

In definitiva, per l'ombreggiamento si può dire che la forma del pannello svolge la funzione per cui è stata progettata per gran parte della giornata però pecca nelle ore centrali per cui la schermatura orizzontale superiore risulta necessaria a superare tale limite. Ovviamente più profonda è la schermatura, maggiore sarà l'area ombreggiata nelle ore centrali.

4.2.2 Incidenza forma

L'incidenza della forma è stata valutata sfruttando il secondo e terzo periodo di sperimentazione quindi sia quello relativo all'ultima settimana di agosto che quello relativo alla prima settimana di settembre.

Nel primo periodo è stato confrontato il pannello in acciaio zincato sagomato (SF) con il pannello in acciaio zincato piano (SP) per valutare se effettivamente la forma progettata porta dei vantaggi in termini di temperatura superficiale della parete retrostante allo stesso, rispetto ad un normale pannello piano dello stesso materiale.

Per questo sono state graficate le temperature superficiali dei due pannelli (Figura 76) e delle rispettive pareti sul retro (Figura 77) con le relative tabelle esplicative (Tabella 11, Tabella 12).

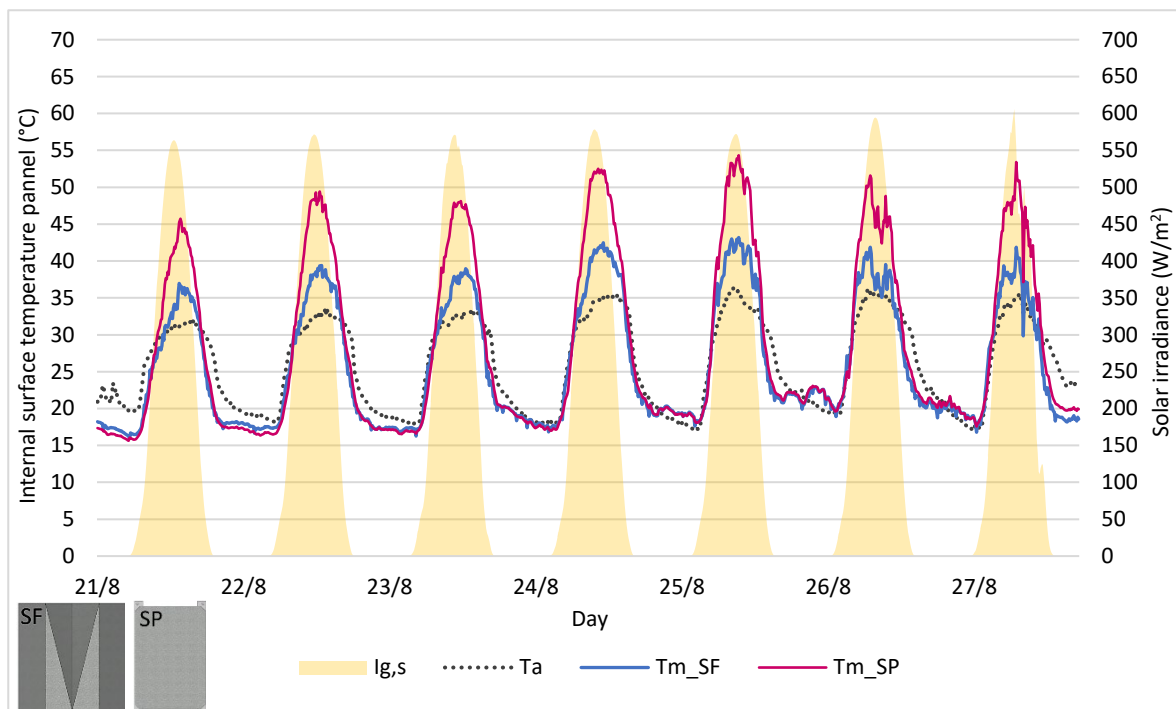


Figura 76 - Confronto temperature superficiali medie SF-SP

Tabella 11 - Confronto temperature superficiali medie SF-SP

| GIORNO | SF | | | SP | | | Δ (SP-SF) | | | |
|------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | T _m (°C) | T _{max} (°C) | T _{min} (°C) | T _m (°C) | T _{max} (°C) | T _{min} (°C) | Δ _m (°C) | Δ _{max} (°C) | Δ _{min} (°C) | Δ _m (%) |
| 21/08/2023 | 23,59 | 36,96 | 15,95 | 25,26 | 45,72 | 15,63 | 1,67 | 8,76 | 0,32 | 6,61 |
| 22/08/2023 | 25,22 | 39,41 | 16,65 | 27,37 | 49,41 | 16,37 | 2,15 | 9,99 | 0,28 | 7,86 |
| 23/08/2023 | 25,21 | 38,95 | 16,27 | 27,46 | 48,11 | 16,52 | 2,25 | 9,16 | 0,25 | 8,20 |
| 24/08/2023 | 27,15 | 42,47 | 16,81 | 29,79 | 52,50 | 17,00 | 2,64 | 10,03 | 0,18 | 8,85 |
| 25/08/2023 | 27,45 | 43,19 | 17,62 | 30,23 | 54,33 | 18,08 | 2,78 | 11,14 | 0,46 | 9,21 |
| 26/08/2023 | 27,28 | 41,89 | 18,73 | 29,82 | 51,60 | 19,59 | 2,54 | 9,71 | 0,86 | 8,51 |
| 27/08/2023 | 25,48 | 41,88 | 16,77 | 28,56 | 53,39 | 17,57 | 3,07 | 11,52 | 0,80 | 10,76 |

Dal grafico che rappresenta l'andamento delle temperature superficiali medie dei due pannelli si può osservare che i massimi registrati sui pannelli sono sempre maggiori rispetto a quelli della temperatura dell'aria, a differenza dei minimi che sono variabili e vicini ad essa.

Il pannello piano ha raggiunto mediamente una temperatura superficiale maggiore del 10,76% rispetto a quella del pannello sagomato; tale differenza percentuale è quella maggiore registrata all'interno della settimana di riferimento a cui, naturalmente, corrisponde un Δ _{MAX} pari a 11,52°C.

Da tali dati si vede che l'auto-ombreggiamento dato dalla forma sagomata incide positivamente in quanto tale pannello raggiunge temperature inferiori rispetto all'altro che può contare solo sulla schermatura superiore.

A questo punto è stato valutato ciò che succede sulla parete che si trova dietro al pannello in acciaio zincato sagomato (WSF) e su quella dietro al pannello in acciaio zincato piano (WSP) (Figura 10).

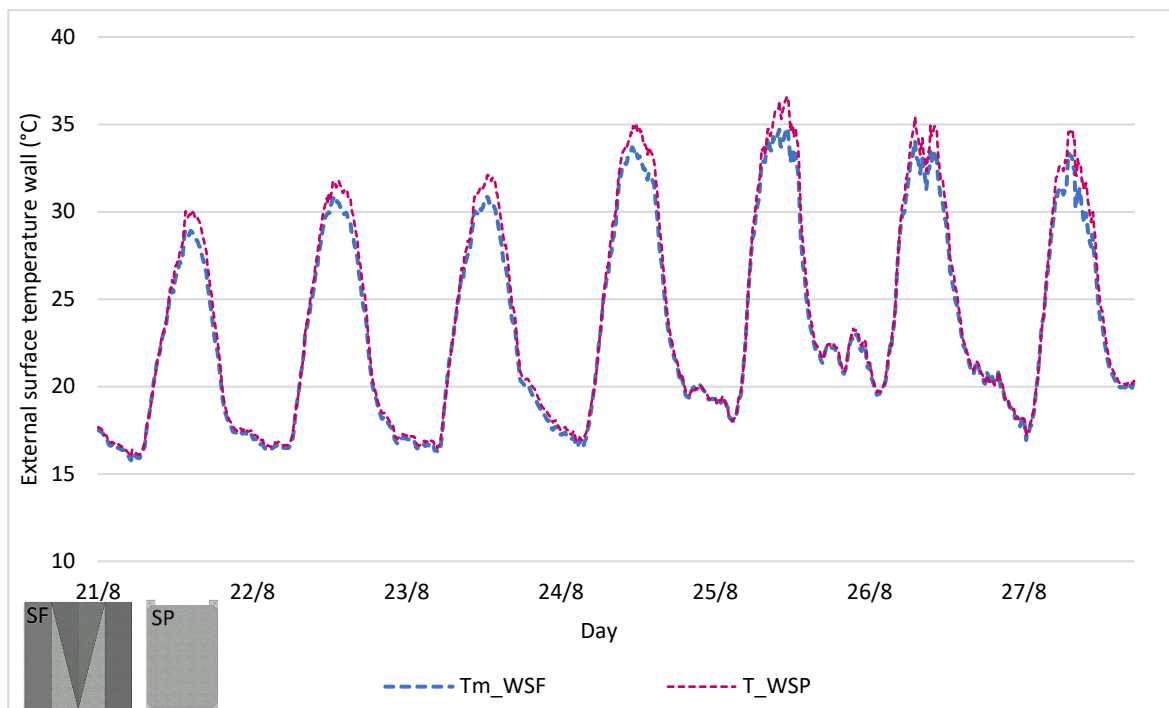


Figura 77 - Confronto andamento temperature superficiali medie WSF-WSP

Tabella 12 - Confronto andamento temperature superficiali medie WSF-WSP

| GIORNO | Tm (°C) | WSF | | WSP | | | Δ(WSP-WSF) | | | |
|------------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|--------|
| | | Tmax (°C) | Tmin (°C) | Tm (°C) | Tmax (°C) | Tmin (°C) | Δm (°C) | Δmax (°C) | Δmin (°C) | Δm (%) |
| 21/08/2023 | 20,90 | 28,91 | 15,78 | 21,33 | 30,07 | 15,98 | 0,44 | 1,16 | 0,20 | 2,04 |
| 22/08/2023 | 22,07 | 30,85 | 16,38 | 22,56 | 31,74 | 16,55 | 0,49 | 0,89 | 0,17 | 2,17 |
| 23/08/2023 | 22,25 | 30,85 | 16,23 | 22,79 | 32,10 | 16,49 | 0,54 | 1,25 | 0,26 | 2,36 |
| 24/08/2023 | 23,92 | 33,69 | 16,53 | 24,51 | 34,97 | 16,83 | 0,59 | 1,28 | 0,30 | 2,43 |
| 25/08/2023 | 25,02 | 34,75 | 18,03 | 25,53 | 36,59 | 18,05 | 0,51 | 1,84 | 0,03 | 2,01 |
| 26/08/2023 | 25,29 | 34,05 | 19,52 | 25,82 | 35,43 | 19,67 | 0,53 | 1,38 | 0,15 | 2,07 |
| 27/08/2023 | 23,61 | 33,35 | 16,94 | 24,19 | 34,72 | 17,16 | 0,58 | 1,37 | 0,22 | 2,42 |

Inoltre, la superficie della parete dietro il pannello piano e quella dietro il pannello sagomato sono più fresche dei pannelli stessi.

La temperatura superficiale media della parete dietro il pannello sagomato è più bassa del 2,43% di quella della parete dietro al pannello piano, ma sono comunque confrontabili nell'arco della settimana presa in considerazione, con un $\Delta_{MAX}=1,84^{\circ}C$.

Quindi, a primo impatto, l'auto-ombreggiamento esercitato dal pannello sagomato sembra dare un contributo positivo, anche se minimo.

Di seguito si riporta un box plot (Figura 78) relativo a questo periodo per avere un quadro di insieme relativo alle temperature sia dei pannelli che delle pareti retrostanti considerate in questa fase della sperimentazione.

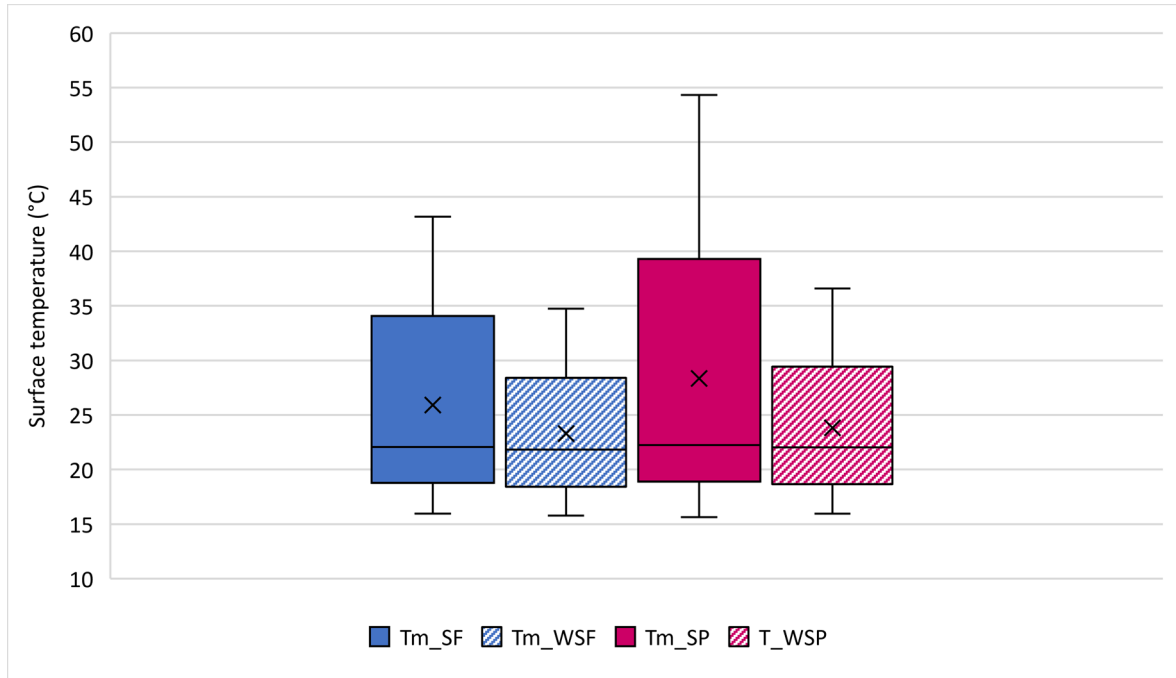


Figura 78 - Box plot temperature SF - WSF, SP - WSP

Da tale grafico si può facilmente notare che la superficie interna del pannello in acciaio zincato piano raggiunge temperature nettamente maggiori (max circa 54°C) rispetto a quello sagomato (max circa 43°C) e tale differenza si ritrova anche nelle rispettive pareti retrostanti anche se in maniera meno evidente, infatti, entrambe arrivano a 35-37°C.

La maggior parte delle temperature registrate sono comprese tra la linea superiore e inferiore del box che rappresentano rispettivamente il 75° e 25° percentile della curva di Gauss. Quindi per l'acciaio zincato sagomato le temperature sono principalmente comprese tra 18°C e 34°C, per il pannello piano le temperature sono comprese tra 18°C e 39°C, mentre per le rispettive pareti retrostanti, gli intervalli sono 18- 28°C e 18-29°C.

La “x” rappresenta la media delle temperature mentre la linea orizzontale di ogni box rappresenta la mediana e questo vuol dire che la maggior parte delle temperature sono pari a quelle corrispondenti a tale linea quindi la curva di Gauss è più spostata verso i valori corrispondenti a tale linea.

Per completare la valutazione dell'incidenza della forma, lo stesso confronto tra pannello sagomato e pannello piano è stato effettuato anche nella prima settimana di settembre considerando pannelli in alluminio, sagomato (AFC) e piano (APC), verniciato con smalto nano tecnologico bianco.

Per questo sono state graficate le temperature superficiali dei due pannelli (Figura 79) e delle rispettive pareti sul retro (Figura 80) con le relative tabelle esplicative (Tabella 13, Tabella 14).

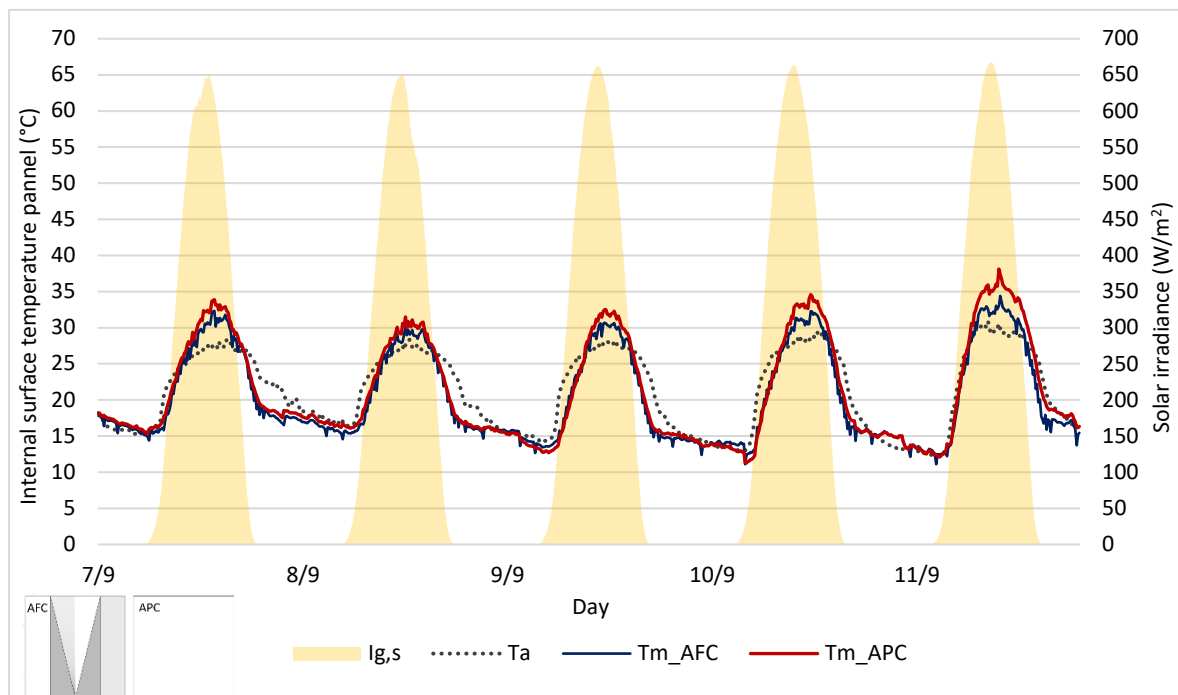


Figura 79 - Confronto temperature superficiali medie AFC - APC

Tabella 13 - Confronto andamento temperature superficiali medie AFC - APC

| GIORNO | AFC | | | APC | | | Δ(APC-AFC) | | | |
|------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | T _m (°C) | T _{max} (°C) | T _{min} (°C) | T _m (°C) | T _{max} (°C) | T _{min} (°C) | Δ _m (°C) | Δ _{max} (°C) | Δ _{min} (°C) | Δ _m (%) |
| 07/09/2023 | 21,41 | 32,33 | 14,40 | 22,30 | 33,90 | 15,29 | 0,88 | 1,57 | 0,89 | 3,95 |
| 08/09/2023 | 20,48 | 30,10 | 14,58 | 21,24 | 31,51 | 15,79 | 0,77 | 1,41 | 1,21 | 3,60 |
| 09/09/2023 | 19,71 | 30,71 | 12,67 | 20,02 | 32,52 | 12,72 | 0,31 | 1,81 | 0,05 | 1,54 |
| 10/09/2023 | 19,67 | 32,28 | 11,12 | 20,21 | 34,58 | 11,26 | 0,54 | 2,30 | 0,14 | 2,68 |
| 11/09/2023 | 20,81 | 34,41 | 11,10 | 22,26 | 38,12 | 12,12 | 1,45 | 3,71 | 1,02 | 6,53 |

Dal grafico che rappresenta l'andamento delle temperature superficiali medie dei due pannelli si può osservare che i massimi registrati sui pannelli sono sempre maggiori rispetto

a quelli della temperatura dell'aria, a differenza dei minimi che sono variabili e vicini ad essa.

Il pannello piano ha raggiunto mediamente una temperatura superficiale maggiore del 6,53% rispetto a quella del pannello sagomato; tale differenza percentuale è quella maggiore registrata all'interno della settimana di riferimento a cui, naturalmente, corrisponde un Δ_{MAX} pari a 3,71°C.

Da tali dati si vede che l'auto-ombreggiamento dato dalla forma sagomata incida positivamente in quanto tale pannello raggiunge temperature inferiori rispetto all'altro che può contare solo sulla schermatura superiore.

In questo caso però la differenza di temperatura media tra le due geometrie è molto minore rispetto al confronto precedente tra i pannelli in acciaio zincato. Questa differenza dipende dal fatto che i pannelli in alluminio sono verniciati mentre quelli in acciaio zincato no, quindi si deduce che la vernice da un contributo molto significativo per l'abbassamento delle temperature infatti è come se appiattisse la differenza tra pannello sagomato e quello piano, rendendoli paragonabili.

A questo punto è stato valutato ciò che succede sulla parete che si trova dietro al pannello in alluminio sagomato verniciato (WAFC) e su quella dietro al pannello in alluminio piano verniciato (WAPC) (Figura 80).

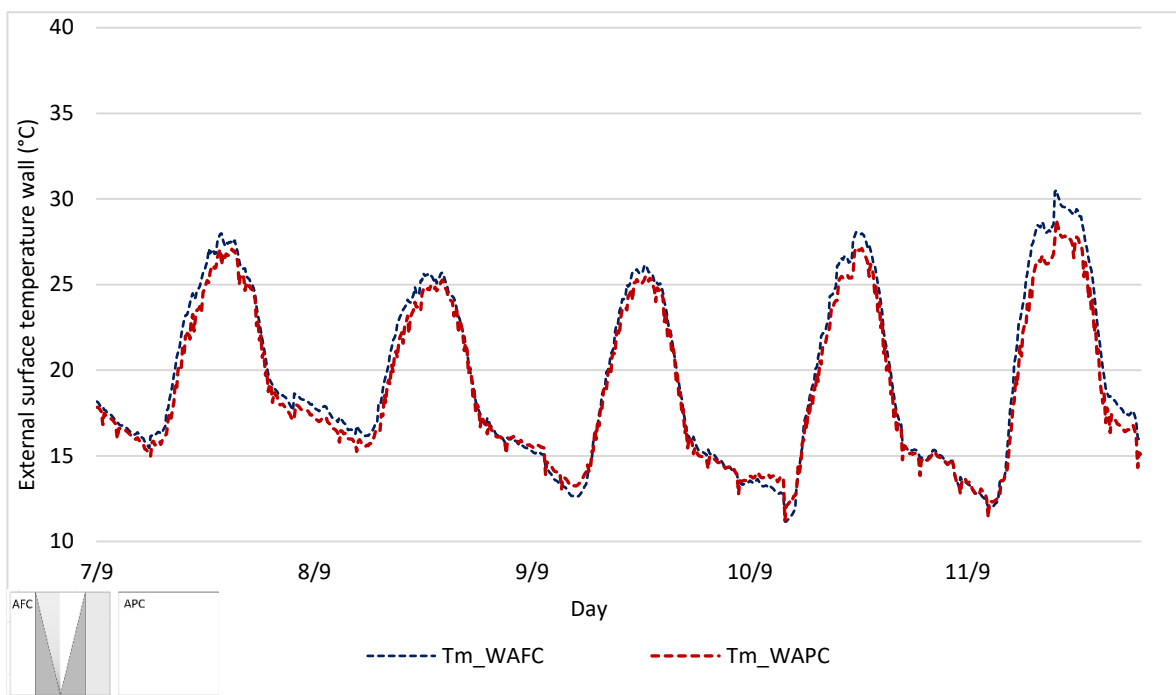


Figura 80 - Confronto temperature superficiali medie WAFC - WAPC

Tabella 14 - Confronto andamento temperature superficiali medie WAFC - WAPC

| GIORNO | WAFC | | | WAPC | | | $\Delta(WAPC-WAFC)$ | | | |
|------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| | T _m (°C) | T _{max} (°C) | T _{min} (°C) | T _m (°C) | T _{max} (°C) | T _{min} (°C) | Δ_m (°C) | Δ_{max} (°C) | Δ_{min} (°C) | Δ_m (%) |
| 07/09/2023 | 20,81 | 27,99 | 15,46 | 20,11 | 27,07 | 14,98 | -0,70 | -0,93 | -0,48 | -3,49 |
| 08/09/2023 | 19,79 | 25,71 | 15,80 | 19,18 | 25,28 | 15,12 | -0,61 | -0,43 | -0,67 | -3,19 |
| 09/09/2023 | 18,16 | 26,15 | 12,59 | 18,01 | 25,53 | 13,06 | -0,15 | -0,62 | 0,47 | -0,82 |
| 10/09/2023 | 18,23 | 28,05 | 11,16 | 17,91 | 27,16 | 11,23 | -0,32 | -0,90 | 0,07 | -1,77 |
| 11/09/2023 | 20,16 | 30,52 | 11,94 | 19,11 | 28,77 | 11,40 | -1,05 | -1,76 | -0,54 | -5,50 |

La superficie della parete dietro il pannello piano e quella dietro il pannello sagomato sono più fresche dei pannelli stessi.

La temperatura superficiale media della parete dietro il pannello piano è più bassa del 5,50% di quella della parete dietro al pannello sagomato, ma sono comunque confrontabili nell'arco della settimana presa in considerazione, con un $\Delta_{MAX}=1,76^{\circ}C$.

Questo vuol dire che nella parete dietro i pannelli si registra la situazione contraria a quella che si verifica sulla superficie interna dei pannelli metallici.

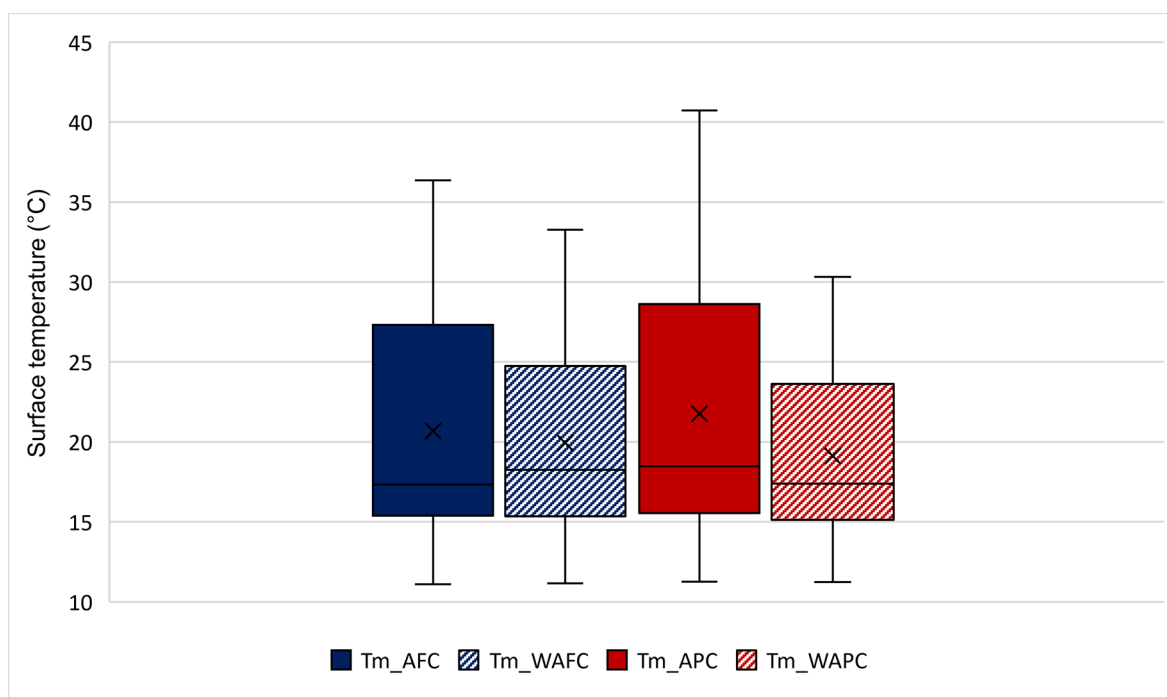


Figura 81 - Box plot temperature AFC - WAFC, APC - WAPC

Da tale grafico (Figura 81) si può facilmente notare che la superficie interna del pannello in alluminio piano verniciato raggiunge temperature maggiori (max circa 41°C) rispetto a quello sagomato (max circa 37°C) e tale differenza si ritrova anche nelle rispettive pareti retrostanti anche se in maniera meno evidente, infatti, entrambe arrivano a 35-37°C.

La maggior parte delle temperature registrate sono comprese tra la linea superiore e inferiore del box che rappresentano rispettivamente il 75° e 25° percentile della curva di Gauss. Quindi per l'acciaio zincato sagomato le temperature sono principalmente comprese tra 18°C e 34°C, per il pannello piano le temperature sono comprese tra 18°C e 39°C, mentre per le rispettive pareti retrostanti, gli intervalli sono 18- 28°C e 18-29°C.

La "x" rappresenta la media delle temperature mentre la linea orizzontale di ogni box rappresenta la mediana e questo vuol dire che la maggior parte delle temperature sono pari a quelle corrispondenti a tale linea quindi la curva di Gauss è più spostata verso i valori corrispondenti a tale linea.

Come già detto precedentemente, anche nel box plot, è evidente che nella parete dietro i pannelli si registra la situazione contraria a quella che si verifica sulla superficie interna dei pannelli metallici.

Questo fenomeno viene giustificato con una maggiore ventilazione nel canale d'aria dietro al pannello piano, quindi quello che ha una temperatura superficiale maggiore. Infatti, la maggiore temperatura superficiale del pannello piano aumenta il moto di aria convettivo nel canale e questo favorisce la fuoriuscita verso l'alto dell'aria dal canale stesso e quindi il conseguente abbassamento della temperatura della parete retrostante.

Tale inversione di andamento delle temperature del pannello metallico e della parete retrostante, non si verifica nel periodo di agosto con i pannelli in acciaio zincato non verniciato; questo perché a settembre sono stati registrati valori della velocità del vento maggiori rispetto a quelli registrati ad agosto che hanno influenzato il moto convettivo nel canale d'aria dietro al pannello e che ha contribuito all'abbassamento di temperatura della parete retrostante. Infatti, la velocità massima dell'aria registrata nel periodo di riferimento ad agosto è pari a 4,53 m/s, mentre quella massima registrata a settembre è pari a 5,48 m/s.

Un'ulteriore valutazione è stata fatta con il software Tecplot. Inserendo all'interno del software la geometria del pannello e la posizione delle termoresistenze (che definiscono la superficie della mappa stessa) con le relative temperature, questo restituisce delle mappe di temperatura dove ogni colore corrisponde ad un range di temperature. Da tali mappe si distinguono le zone più calde, quindi quelle direttamente irradiate dal sole, in rosso da quelle meno calde, quindi quelle ombreggiate, in colori che vanno dall'arancio, al giallo, all'azzurro.

Queste mappe sono state definite per ogni ora dalle 8:00 alle 19:00 sia per il pannello sagomato in acciaio zincato che per quello sagomato in alluminio verniciato. Ovviamente, dato che questi due pannelli stati oggetto di sperimentazione in periodi diversi, quindi con temperature differenti tra loro, i paragoni sono stati fatti su due giornate rappresentative dei due periodi considerati (25-08-2023 e 10-09-2023).

Di seguito si riportano le mappe di alcuni orari significativi del 25 agosto del pannello in acciaio zincato sagomato (Figura 82) e del 10 settembre del pannello in alluminio sagomato (Figura 83) in cui le temperature riportate in rosso sono riferite alle termoresistenze che si trovano in quella posizione sulla parete retrostante ai pannelli.

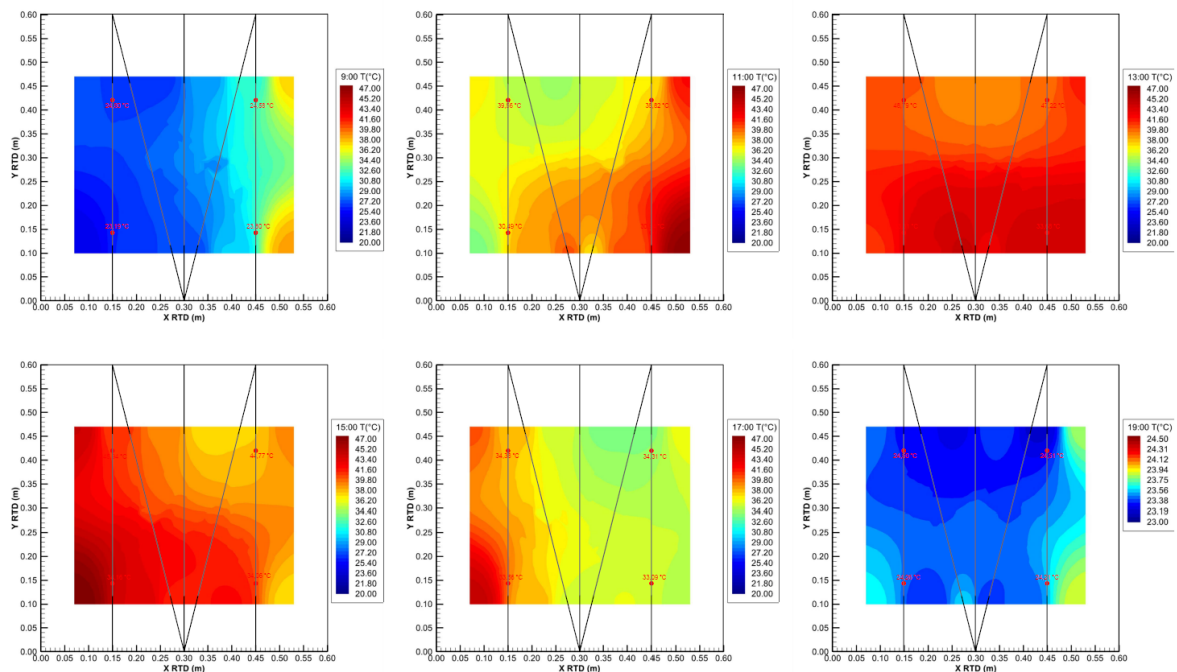


Figura 82 - Mappe di temperatura pannello in acciaio zincato sagomato

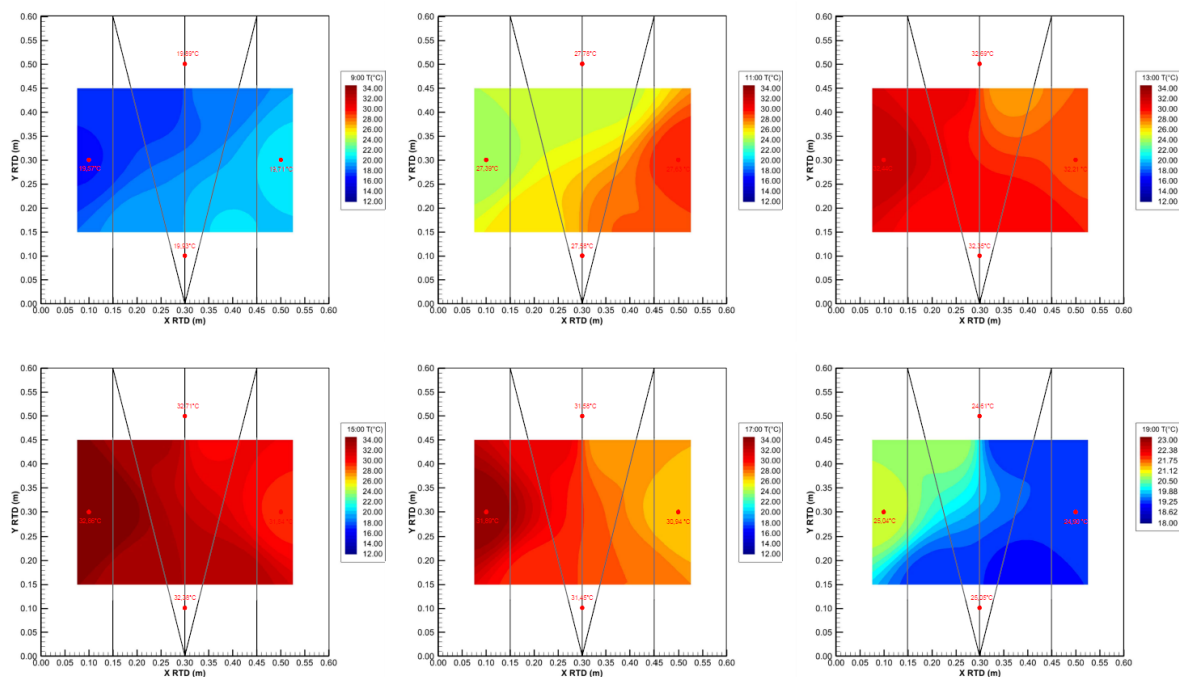


Figura 83 - Mappe di temperatura pannello in alluminio sagomato

In entrambi i casi si può vedere come variano le temperature nei vari orari in funzione della forma. In particolare, si vede che, essendo i pannelli esposti a sud, nella fascia oraria che ricopre la mattina, la parte più calda dei pannelli corrisponde a quella della posizione del sole, cioè ad est. Man mano che si prosegue con la giornata e quindi seguendo il percorso del sole, si vede che le zone più calde, ancora una volta corrispondono alla posizione del sole; le zone opposte alla posizione del sole risultano avere una temperatura più bassa in quanto sono ombreggiate grazie proprio alla morfologia del pannello stesso. Le mappe dei giorni sopra detti di tutti gli orari, dalle ore 8:00 alle ore 19:00 sono riportate in Appendice C a) – Mappe di temperatura acciaio zincato per il pannello in acciaio zincato e in Appendice C b) – Mappe di temperatura alluminio per il pannello in alluminio.

In definitiva, l'auto-ombreggiamento esercitato dal pannello sagomato dà un contributo positivo fintanto che si considerano pannelli non verniciati. Questo vuol dire che, quando non si ha un coating la forma ha un'importanza significativa, invece se si utilizza una vernice altamente riflettente la forma perde di significato.

4.3 Progetto di una sperimentazione in situ

Di seguito si riporta il progetto di monitoraggio di una sperimentazione futura che verrà effettuata al solar pond, un campo di prova dell'Università Politecnica delle Marche, sito nel comune di Ancona (Figura 84).



Figura 84 - Aerofotogrammetria area solar pond, Ancona

La sperimentazione che avrà luogo nel campo di prova coinvolgerà pannelli in alluminio piano verniciato e pannelli in alluminio sagomato non verniciato. Tale scelta dipende dal fatto che, nella sperimentazione effettuata tra agosto e settembre, il pannello in alluminio piano verniciato risulta essere la soluzione più performante. Un altro risultato importante ottenuto è che la finitura nanotecnologica perde di importanza in un pannello sagomato, quindi sicuramente non si utilizzerà in una soluzione sagomata. Proprio per questo si sceglierà un pannello di alluminio sagomato non verniciato che, in termini di materiale è migliore dell'acciaio zincato.

Il box utilizzato è costituito da pareti con stratigrafie diverse. La parete su cui verrà montata la facciata ha una stratigrafia composta da uno strato di isolante da 10cm, intercapedine di 5cm e pannello di Aquapanel di 1,25cm. Le restanti pareti sono costituite da due strati di isolante di 10 cm ciascuna, rivestite da fogli in alluminio.

Di seguito si riporta la pianta del box (Figura 85).

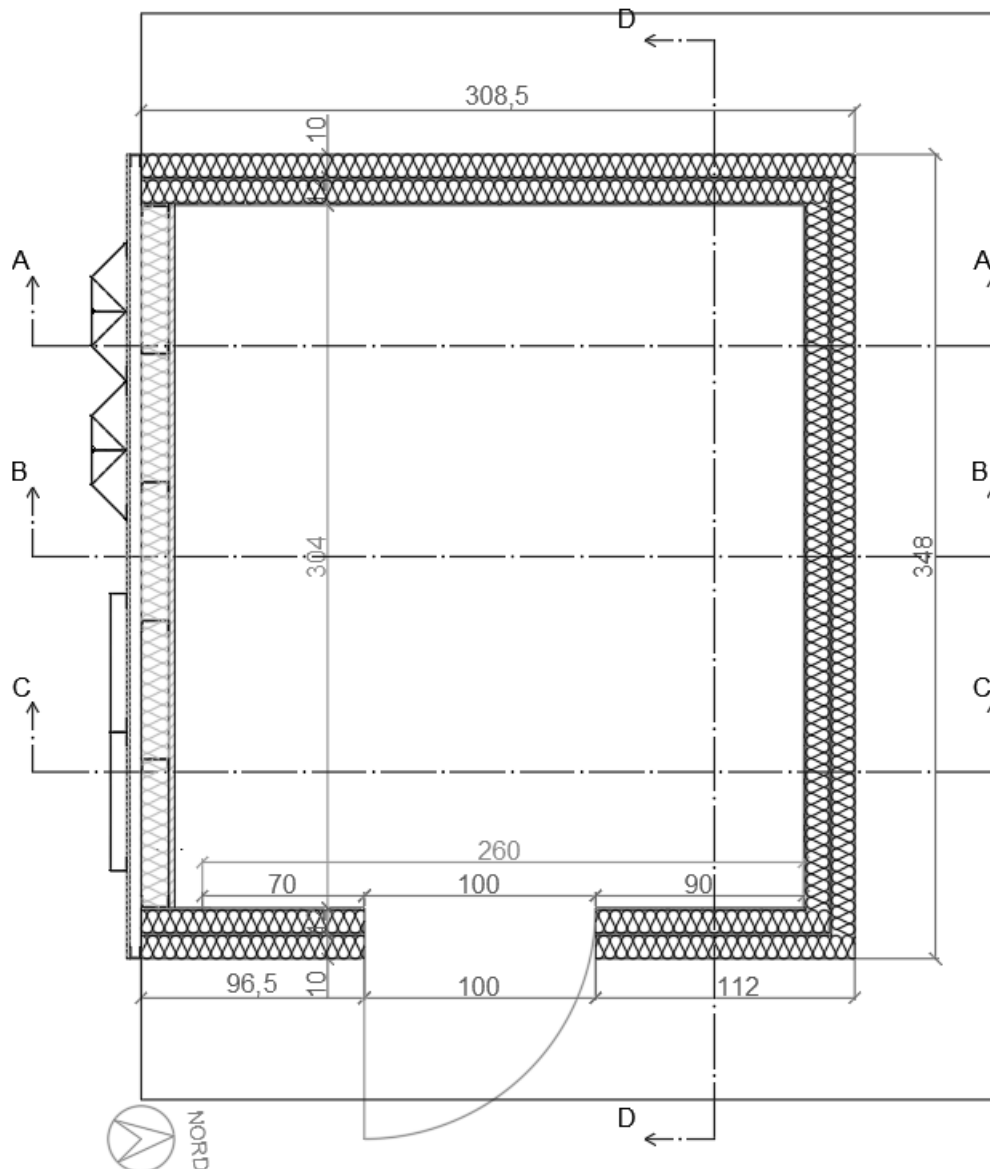


Figura 85 - Stratigrafie pianta box due, solar pond

La facciata ventilata avrà dimensioni pari a 120 cm x 240 cm quindi coprirà solo metà parete, sulla restante metà verranno montati pannelli piani in alluminio.

La sperimentazione verrà effettuata per valutare il comportamento estivo della facciata ventilata progettata e per verificare se effettivamente il tiraggio del canale di ventilazione è sufficiente al funzionamento della facciata ventilata.

Attraverso l'uso di sensori verranno misurate le temperature superficiali, interne ed esterne, la temperatura dell'aria, interna ed esterna, la velocità dell'aria nell'altezza dell'intercapedine, e la differenza di temperatura nello spessore della parete.

Queste grandezze vengono misurate con i sensori riportati nella pianta (Figura 86) e nel prospetto (Figura 87) del progetto di monitoraggio di seguito riportato.

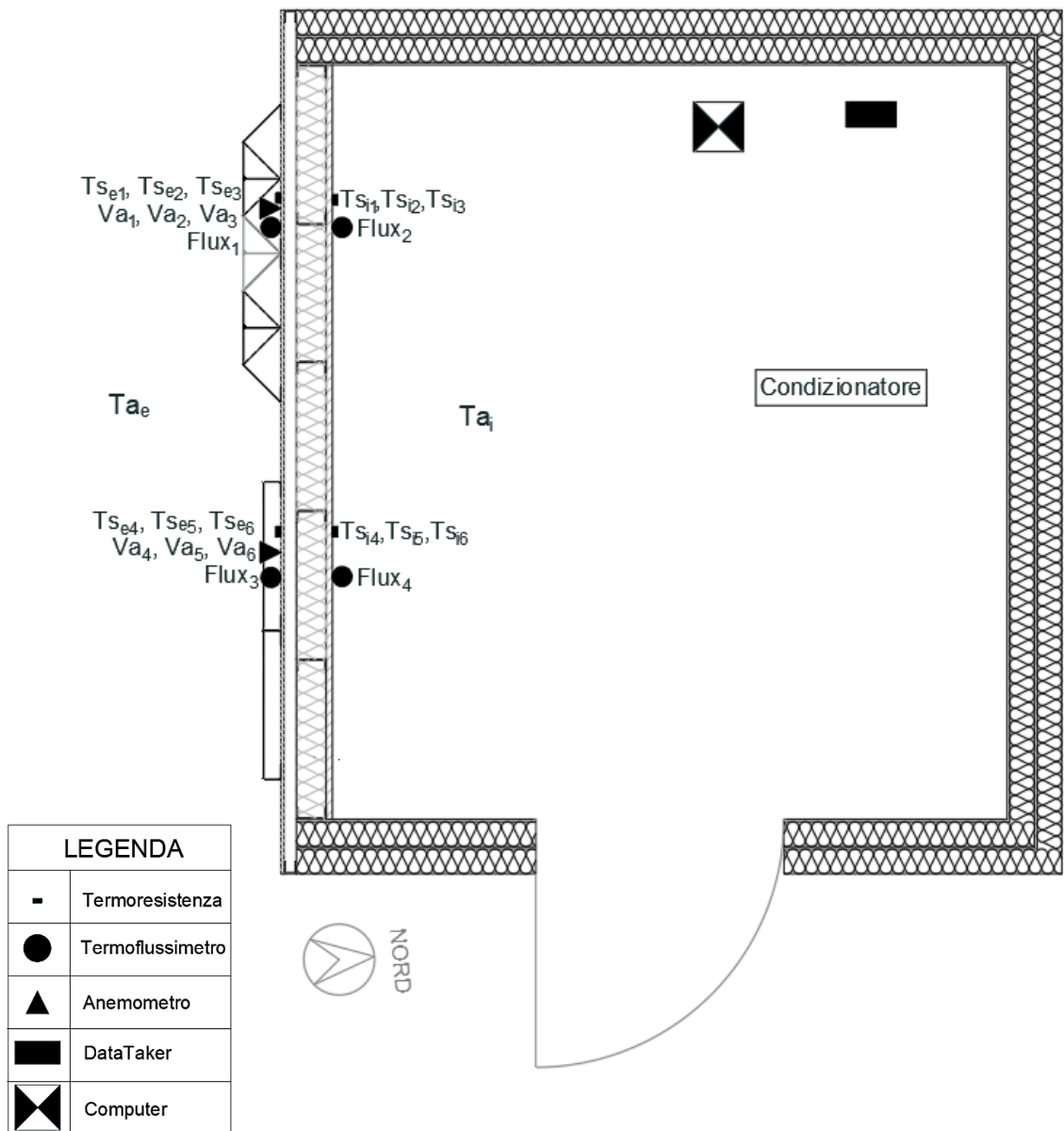


Figura 86 – Pianta progetto di monitoraggio box due

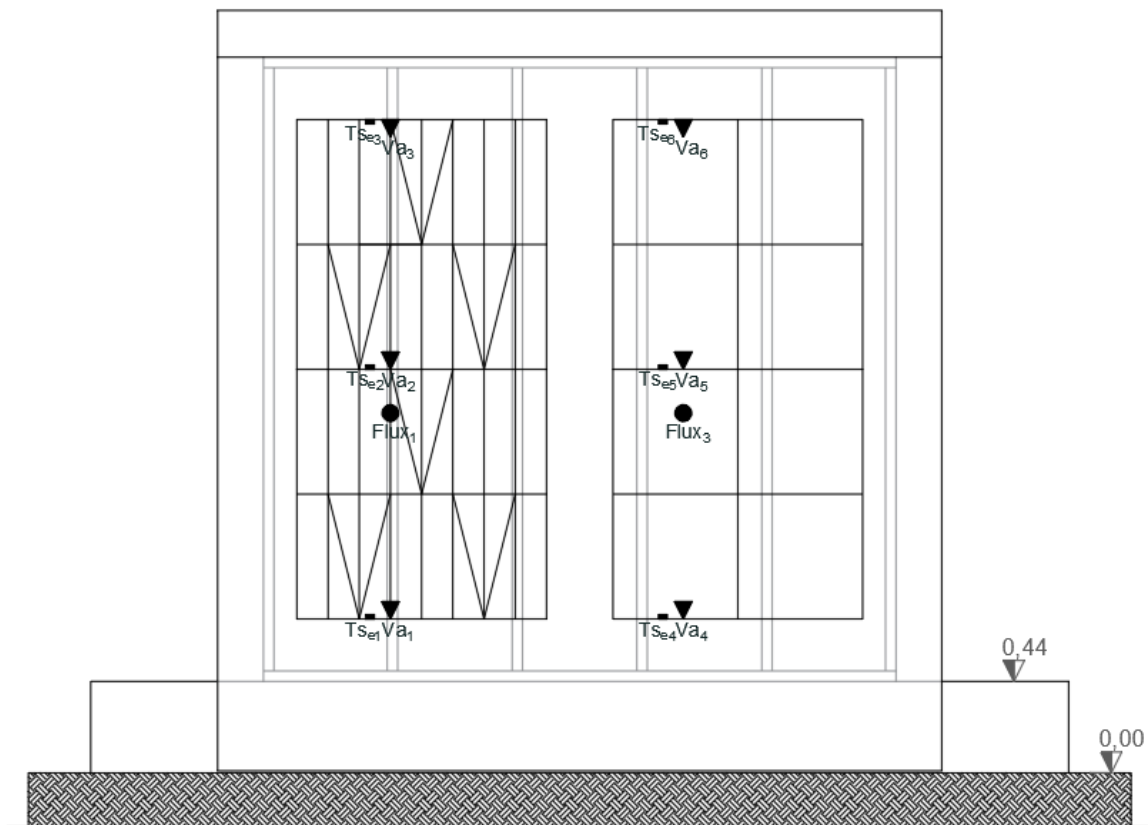


Figura 87 - Prospetto sud progetto di monitoraggio box due

5. DISCUSSION

Si conclude il presente lavoro andando ad effettuare un confronto complessivo dei pannelli oggetto di sperimentazione, dividendoli semplicemente in due macro-periodi di sperimentazione, quello di agosto e quello di settembre.

Nel grafico che segue (Figura 88) si riporta la situazione di agosto in cui sono stati sperimentati e confrontati quattro tipi di pannelli diversi per forma, materiale e finitura:

- pannello in acciaio zincato sagomato non verniciato (SF);
- pannello in acciaio zincato piano non verniciato (SP);
- pannello in acciaio zincato piano verniciato (SPC);
- pannello in alluminio piano non verniciato (AP).

In realtà ciò che si riporta nel grafico sono le temperature superficiali delle pareti retrostanti a ciascuno dei pannelli sopra elencati, perché uno degli obiettivi della presente tesi è stato quello di creare un pannello che, per forma, materiale e finitura, fosse in grado di garantire una temperatura superficiale di una qualsiasi parete esterna tale da assicurare un adeguato confort indoor.

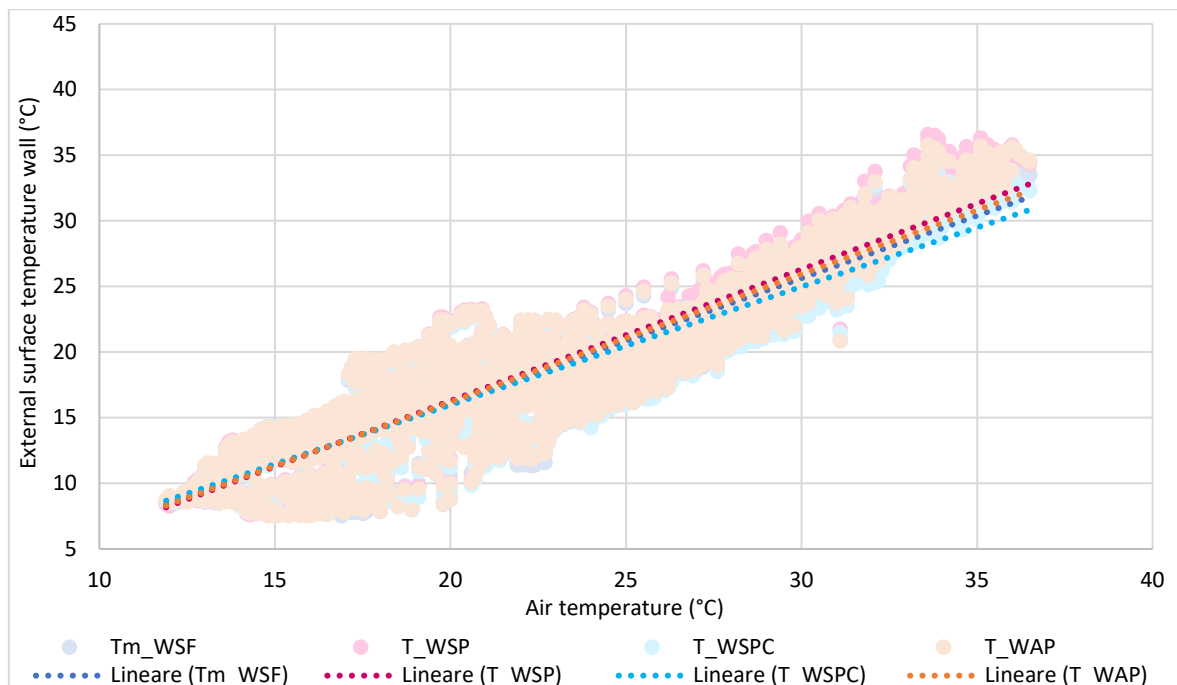


Figura 88 - Grafico a dispersione relazione temperature aria – pannelli agosto

Dal grafico a dispersione sopra riportato è evidente la temperatura della superficie dietro ai pannelli cresce linearmente con la temperatura dell'aria.

Inoltre, è chiaro che il pannello in acciaio zincato piano verniciato è quello che permette alla parete retrostante di mantenere una temperatura minore rispetto agli altri. Questo risulta essere quasi scontato in quanto è l'unico verniciato tra quelli considerati e, da altri confronti effettuati nella stessa sperimentazione, è stato dimostrato che lo smalto nanotecnologico utilizzato ha capacità altamente riflettenti per cui permette di mantenere temperature sempre più basse rispetto agli altri casi.

Considerando invece i soli pannelli non verniciati, quello più performante risulta essere quello in acciaio zincato sagomato, quindi si può dire che la forma progettata produce un auto – ombreggiamento tale da permettere al pannello di mantenere delle temperature più basse rispetto a quelli piani.

A questo punto la valutazione finale si è spostata al periodo di settembre (Figura 89) in cui sono stati studiati i seguenti pannelli:

- pannello in alluminio piano verniciato (APC);
- pannello in acciaio zincato piano verniciato (SPC);
- pannello in alluminio sagomato verniciato (AFC);
- pannello in acciaio zincato sagomato non verniciato (SF);
- pannello in Alucobond sagomato verniciato (MFC);
- pannello di AquaBoard (reference).

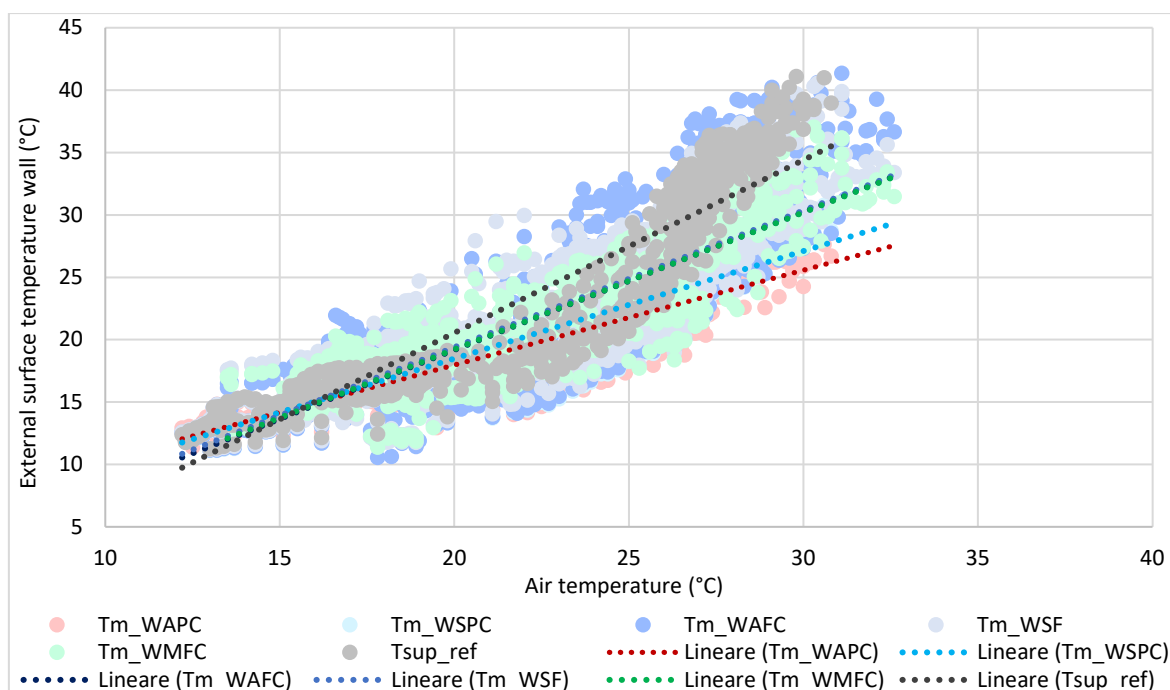


Figura 89 - Grafico a dispersione relazione temperature aria – pannelli settembre

Anche in questo caso la temperatura superficiale delle pareti retrostanti ai pannelli cresce linearmente con la temperatura dell'aria.

In tal caso i pannelli che permettono di mantenere la temperatura più bassa sono quelli piani verniciati; in particolare quello più performante tra i due piani è quello in alluminio.

A seguire i tre pannelli sagomati, seppur con materiali e finiture diverse, risultano avere un comportamento quasi coincidente. Questo non è un risultato ovvio in quanto tra i tre pannelli sagomati, c'è sempre quello in acciaio zincato sagomato non verniciato per cui ci si aspettava di avere delle temperature nettamente maggiori rispetto agli altri due verniciati.

Ciò significa che l'effetto dello smalto nanotecnologico, su un pannello sagomato dà un contributo non significativo rispetto a quanto accade, invece, su un pannello piano. Questo è dovuto al fatto che su un pannello piano la superficie soleggiata e quindi riflettente è maggiore rispetto a quella che si ha su un pannello sagomato in grado di auto – ombreggiarsi che produce zone di ombra maggiori e quindi minor superficie riflettente. Inoltre, nel pannello sagomato le facce inclinate centrali, trovandosi quasi una di fronte all'altra, scambiano calore tra loro per irraggiamento ma anche per riflessione quando sono colpite dai raggi solari. Questo doppio contributo fa sì che un pannello piano, rispetto a quello sagomato progettato, a parità di finitura riflettente, sia più performante.

Nel grafico la temperatura più alta viene raggiunta naturalmente dal pannello di AquaBoard verniciato con smalto bianco tradizionale, privo di pannello metallico; questa è la dimostrazione che, nonostante la parete ventilata sia realizzata da pannelli metallici, quindi per loro natura conduttivi, produce comunque vantaggi in termini di temperature rispetto a una struttura tradizionale.

Quindi in definitiva, alla luce di quanto riscontrato dall'intera sperimentazione, il pannello più performante è quello in alluminio piano verniciato. Non considerando la verniciatura il pannello più performante risulta essere quello in acciaio zincato sagomato.

Naturalmente arrivati a questo punto non si può prescindere dall'aspetto economico in quanto, se da un lato, c'è da considerare il costo di una lavorazione più complessa, dall'altro si deve tenere conto che una vernice innovativa termoriflettente sicuramente non sarà economica.

6. CONCLUSIONI

Lo studio indaga come la forma e il tipo di rivestimento anche con additivi nanotecnologici influenzano la performance delle facciate. Per questo fine è stato effettuato uno studio sperimentale e analitico

I risultati sperimentali hanno mostrato che:

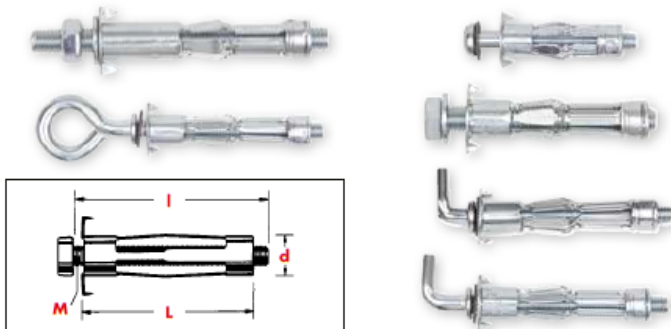
- la forma progettata riesce a verificare le sollecitazioni strutturali anche dimostrate attraverso il disegno e la realizzazione di un prototipo che risulta essere una soluzione abbastanza economica rispetto a soluzioni tradizionali;
- la forma sagomata svolge la funzione per cui è stata progettata in quanto sfrutta la propria configurazione per auto – ombreggiarsi, quindi abbattere le temperature superficiali e garantire migliori condizioni di comfort indoor (fintanto che non entra in gioco la finitura);
- il materiale che risulta meno performante è l'acciaio zincato, mentre l'alluminio e l'Alucobond, da un punto di vista prestazionale, sono competitivi, dal punto di vista economico invece, l'Alucobond risulta essere più costoso per cui considerando un rapporto costo – prestazioni, alluminio risulta essere il materiale migliore;
- la finitura con smalto termoriflettente abbatte le temperature a tal punto che il pannello piano risulta essere migliore di quello sagomato in quanto presenta una superficie riflettente maggiore di quest'ultimo.

7. APPENDICI

Appendice A – Scheda tecnica Tassello Würth



TASSELLO IN METALLO W-MH



| Ø filetto M | esecuzione | Ø foro d [mm] | lungh. tassello L [mm] | lungh. vite I [mm] | spessore parete [mm] | Art. | |
|----------------|---|------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|-------------|
| M4 | vite t.c.b. PR2 | 8 | 40 | 47 | 8 - 15 | 0903 524 40 | |
| | | | 46 | 58 | 8 - 20 | 0903 524 46 | |
| | | | 54 | 61 | 18 - 28 | 0903 524 54 | |
| | | | 59 | 65 | 32 - 38 | 0903 524 59 | |
| M5 | vite t.c.b. PR3 | 10 | 37 | 49 | 5 - 13 | 0903 525 37 | |
| | | | 53 | 66 | 5 - 16 | 0903 525 53 | |
| | | | 65 | 74 | 16 - 32 | 0903 525 65 | |
| | | | 80 | 89 | 32 - 45 | 0903 525 80 | |
| M6 | vite t.c.b. PR3 | 12 | 37 | 49 | 5 - 13 | 0903 526 37 | |
| | | | 53 | 66 | 5 - 16 | 0903 526 55 | |
| | | | 66 | 78 | 16 - 32 | 0903 526 66* | |
| | | | 81 | 92 | 32 - 45 | 0903 526 81* | |
| | gancio corto | gancio | 12 | 53 | 62 | 5 - 16 | 0903 526 52 |
| | | | | 53 | 62 | 5 - 16 | 0903 526 53 |
| oacchiolo | oacchiolo | 12 | 53 | 62 | 5 - 16 | 0903 526 54 | |
| | | | 66 | 74 | 16 - 32 | 0903 526 67 | |
| M8 | barra filettata con dado e rondella | 13 | 55 | 82 | 5 - 16 | 0903 528 55 | |
| | | | 68 | 95 | 16 - 32 | 0903 528 68* | |
| | | | 84 | 111 | 32 - 45 | 0903 528 84* | |
| | vite testa esagonale | 13 | 55 | 65 | 5 - 16 | 0903 528 56 | |
| | | | 68 | 80 | 16 - 32 | 0903 528 69* | |
| | | | 84 | 90 | 32 - 45 | 0903 528 85* | |

| Carichi massimi consigliati in kN: | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|
| Ø filetto | | M4 | M5 | M6 | M8 |
| trazione o taglio | cartongesso ≥ 12 mm | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| | cartongesso ≥ 25 mm | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | pannelli in fibra dura ≥ 4 mm | 0,20 | 0,20 | 0,25 | 0,30 |
| | pannelli in fibra dura ≥ 10 mm | 0,20 | 0,20 | 0,30 | 0,30 |
| | pannelli truciolari ≥ 10 mm | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| | blocchi per solai ≥ 30 mm | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |

(1 kN = 100 kg.)



per fissaggi di carichi medio-leggeri in pareti vuote

| |
|--|
| Certificati: |
| Resistenza al fuoco* Esposizione diretta alla fiamma (M6 - M8) |
| |

Idoneo per fissaggi su cartongesso, pannelli in fibra dura, pannelli truciolari o mattoni forati

- ideale per il fissaggio di canaline, porta-abiti, pannelli, plafoniere, collari per tubazioni, mensole ecc.
- in acciaio zincato bianco
- alette dentate antirotazione
- su materiali duri (p.es. piastrelle) le alette dentate vanno raddrizzate
- il tassello rimane espanso anche estraendo la vite
- per fissaggio non passante
- profondità foro: lungh. tassello + 5 mm

Assortimento tasselli per pareti vuote
Art. 5964 090 300

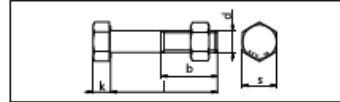


Contenuto: Art. 0903 524 40 100 pezzi
Art. 0903 525 37 50 pezzi
Art. 0903 526 37 50 pezzi
Art. 0903 20 1 pezzo

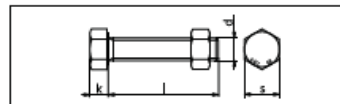
| | |
|--|--|
| | Pinza di montaggio Art. 0903 20 |
| | Pinza di montaggio a crikchello Art. 0903 201 |

BULLONERIA STRUTTURALE SB NON A SERRAGGIO CONTROLLATO TZN

ISO 4014



ISO 4017



CE

| Ø filetto d | M 8 | M 10 | M 12 | M 16 | M 20 | M 24 | M 27 | M 30 |
|---------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| b / mm per ISO 4014 | 22 | 26 | 30 | 38 | 46 | 54 | 60 | 66 |
| k / mm | 5,3 | 6,4 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 | 17 | 18,7 |
| s / mm | 13 | 16 | 18 | 24 | 30 | 36 | 41 | 46 |

| In acciaio classe 8.8, zincato termico (a caldo) | | | |
|--|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| Ø filetto d | l mm | ISO 4017 filetto intero Art. | ISO 4014 filetto parziale Art. |
| M8 | 10 | 0059 58 10 | |
| | 12 | 0059 58 12 | |
| | 16 | 0059 58 16 | |
| | 20 | 0059 58 20 | |
| | 25 | 0059 58 25 | |
| | 30 | 0059 58 30 | |
| | 35 | 0059 58 35 | |
| | 40 | 0059 58 40 | |
| | 45 | 0059 58 45 | |
| | 50 | 0059 58 50 | |
| | 55 | 0059 58 55 | |
| | 60 | 0059 58 60 | |
| | 65 | 0059 58 65 | |
| | 70 | 0059 58 70 | |
| 80 | 0059 58 80 | | |
| 90 | 0059 58 90 | | |
| 100 | 0059 58 100 | | |
| M10 | 16 | 0059 510 16 | |
| | 20 | 0059 510 20 | |
| | 25 | 0059 510 25 | |
| | 30 | 0059 510 30 | |
| | 35 | 0059 510 35 | |
| | 40 | 0059 510 40 | 0059 410 40 |
| | 45 | 0059 510 45 | 0059 410 45 |
| | 50 | 0059 510 50 | 0059 410 50 |
| | 55 | 0059 510 55 | 0059 410 55 |
| | 60 | 0059 510 60 | 0059 410 60 |
| | 65 | 0059 510 65 | 0059 410 65 |
| | 70 | 0059 510 70 | 0059 410 70 |
| | 80 | 0059 510 80 | 0059 410 80 |
| | 85 | 0059 510 85 | 0059 410 85 |
| | 90 | 0059 510 90 | 0059 410 90 |
| | 100 | 0059 510 100 | 0059 410 100 |
| | 110 | 0059 510 110 | 0059 410 110 |
| | 120 | | 0059 410 120 |
| 130 | 0059 510 130 | 0059 410 130 | |
| 140 | 0059 510 140 | 0059 410 140 | |
| 150 | | 0059 410 150 | |
| 160 | | 0059 410 160 | |
| 180 | 0059 510 180 | | |

Note:

Per gli assieme a norma UNI EN 15048-1 zincati a caldo (TZN) è possibile richiedere il certificato 3.1 (a pagamento) in base al numero di lotto indicato sul documento di trasporto.

UNI EN 15048-1

Assieme (viti e dadi)
per costruzioni metalliche
(con sistema non a precarico)

Prodotto soggetto a marcatura CE (sulla vite e/o sulla confezione) come richiesto dal nuovo regolamento europeo (UE) Nr. 305/2011 CPR (Construction Product Regulation) e dalla norma armonizzata EN 1090.

- viti e dadi in acciaio zincato termico (a caldo) TZN
- classe di resistenza delle viti : 8.8 U (la sigla U indica la tolleranze per la zincatura a caldo sulla vite per garantire l'accoppiamento con il dado)
- classe di resistenza dei dadi: 8
- particolarmente idonee per l'impiego all'esterno, grazie alla zincatura a caldo
- SB = Structural Bolting (Bulloneria Strutturale) - secondo la norma EN 15048 deve essere riportata la sigla "SB" sia sulla vite che sul dado



- vengono fornite come "assieme" (viti e dadi nella stessa confezione):
 - vite con filetto intero a norma ISO 4017 con dado a norma ISO 4032
 - vite con filetto parziale a norma ISO 4014 con dado esagonale a norma ISO 4032
- le viti a norme ISO si differenziano dalle viti UNI con alcune misure di chiave differenti: 16 anziché 17, 18 anziché 19, 22 anziché 21 - i dadi ISO sono leggermente più alti rispetto i dadi medi UNI)
- disponibile la Dichiarazione di Prestazione DoP che sostituisce la dichiarazione di conformità CE come previsto dal Regolamento CPR Nr. 305/2011

Sistema **combitech**[®] **logika**[®]

La gamma di profili **logika**[®] è disponibile in acciaio e alluminio. L'alluminio porta il vantaggio naturale di non arrugginire e quindi si presta per usi in aree esterne o umide (ad. es. in vivai, serre, ma anche barche, stand di mercato, celle frigorifere, garage, cantine ecc.).

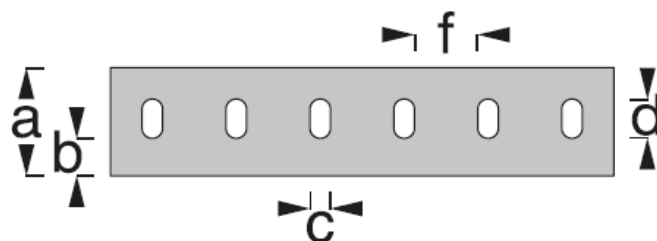
Inoltre le guide forate in alluminio hanno il grande vantaggio di essere più leggere rispetto alle guide forate in acciaio. La loro applicazione ideale è in scaffalature o sistemi di riordino all'interno di furgoni per le consegne e veicoli per cantieri.

Come ulteriore vantaggio rispetto ai profili in acciaio, le barre perforate in alluminio possono essere anodizzate, per un effetto estetico particolarmente bello, ma anche professionale. Sono adatte quindi in particolare nella realizzazione di arredamento di design (credenze, scrivanie, supporti per dispositivi elettronici d'intrattenimento, scaffalature in spazi residenziali moderni ecc.).

Anche **logika**[®] include un'intera gamma di profili: non solo angolari con lati uguali o disuguali e una barra piatta, ma anche profili a U, a T e tubi quadrati. Queste ulteriori 3 tipologie di profilo (in totale sei tipi) sono rilevanti in base al tipo di costruzione e offrono notevoli impieghi.

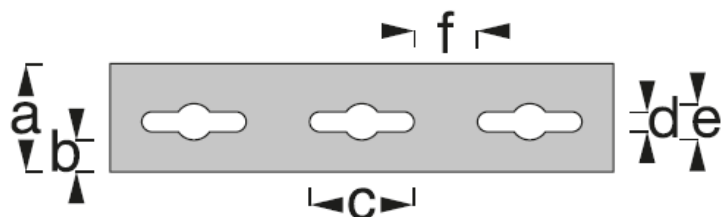
Queste sei tipologie di profili sono disponibili in quattro misure (7,5 mm; 15,5 mm; 23,5 mm; 35,5 mm), combinabili/componibili al di là delle singole misure, poiché la distanza dal centro del foro al centro del foro successivo corrisponde esattamente alle due distanze di 25,0 mm e 12,5 mm (12,5 mm × 2 distanze dei fori genera nuovamente 25,0 mm).

Foro lungo



| misura a | misura b | misura c | misura d | misura f |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7,5 mm | 2,2 mm | 2,1 mm | 3,1 mm | 10,4 mm |
| 15,5 mm | 4,4 mm | 3,1 mm | 6,7 mm | 9,4 mm |
| 23,5 mm | 6,65 mm | 5,1 mm | 10,2 mm | 19,9 mm |
| 35,5 mm | 11,75 mm | 6,1 mm | 12,0 mm | 18,9 mm |

Foro a chiave



| misura a | misura b | misura c | misura d | misura e | misura f |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7,5 mm | 2,2 mm | 14,6 mm | 2,1 mm | 3,1 mm | 10,4 mm |
| 15,5 mm | 4,75 mm | 15,6 mm | 3,1 mm | 6,0 mm | 9,4 mm |
| 23,5 mm | 7,35 mm | 30,1 mm | 5,1 mm | 8,8 mm | 19,9 mm |
| 35,5 mm | 12,2 mm | 31,1 mm | 6,1 mm | 11,1 mm | 18,9 mm |

Sistema combitech® | logika®

Sistema di profili | Acciaio, zincato e verniciato

Barra piatta, perforata

STA

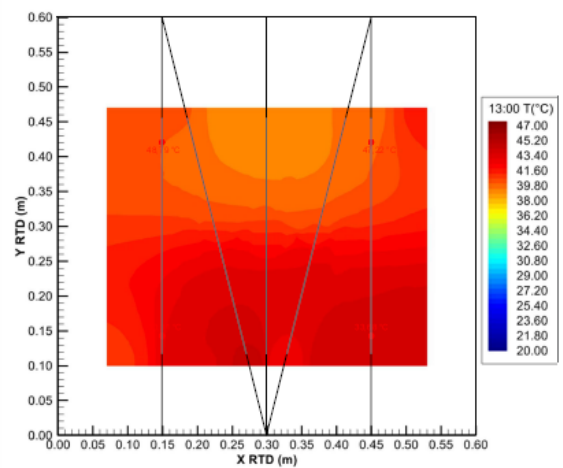
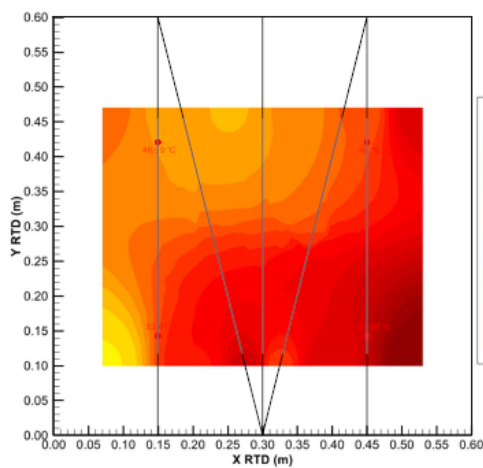
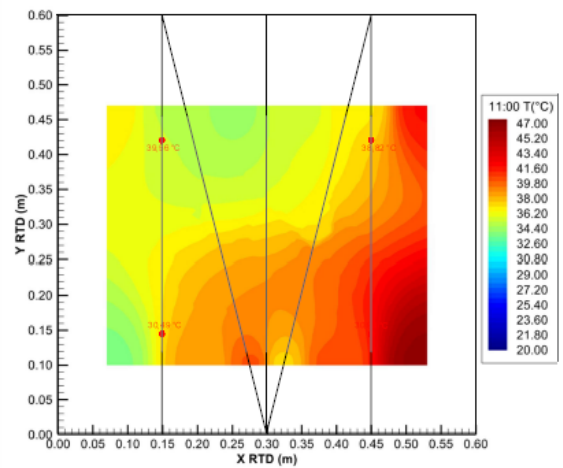
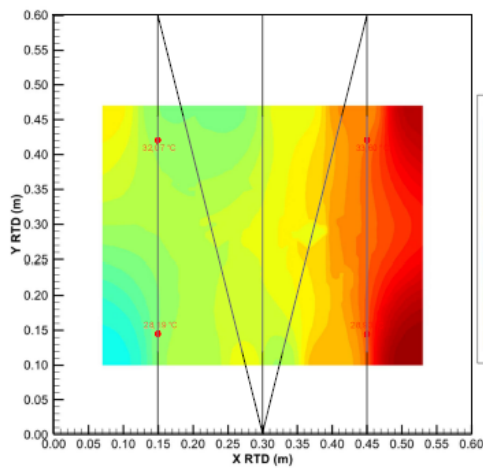
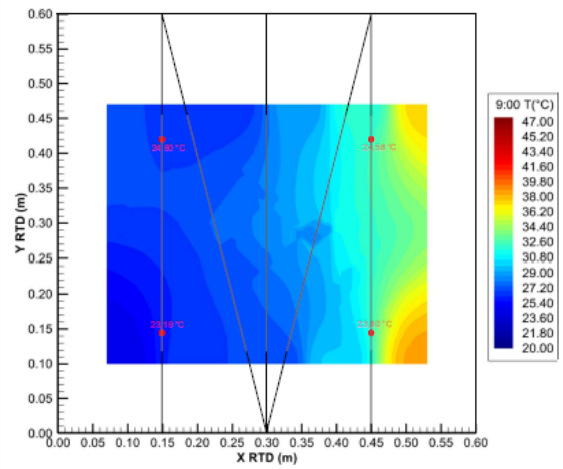
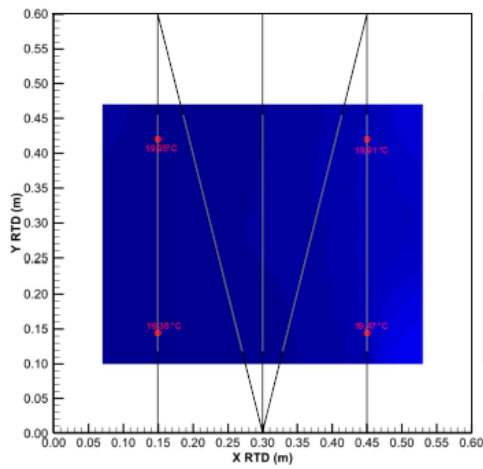
Obt. min.: 5 pz.

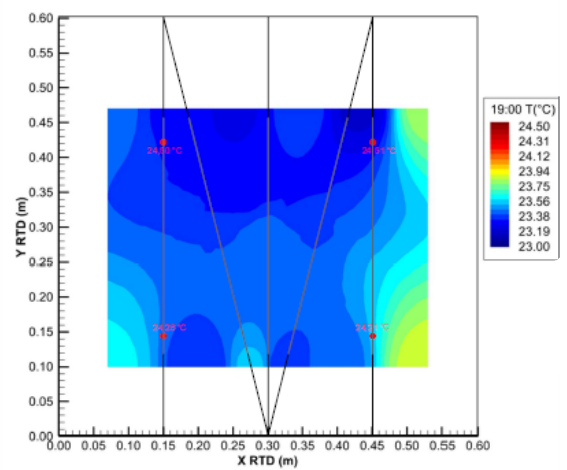
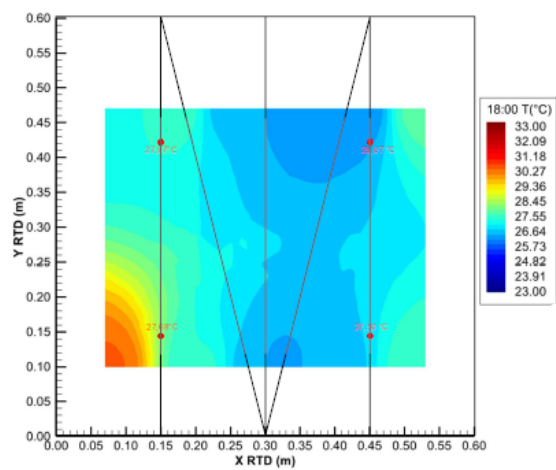
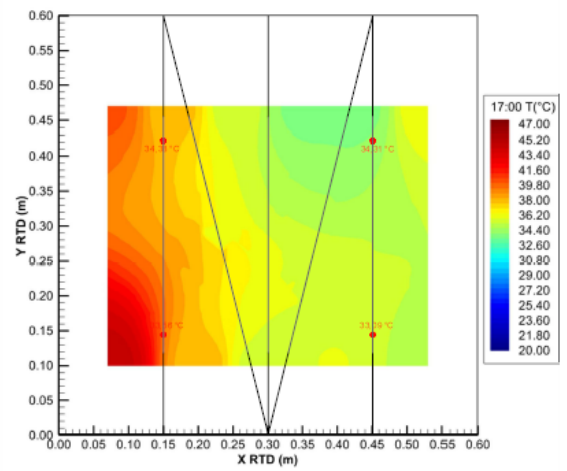
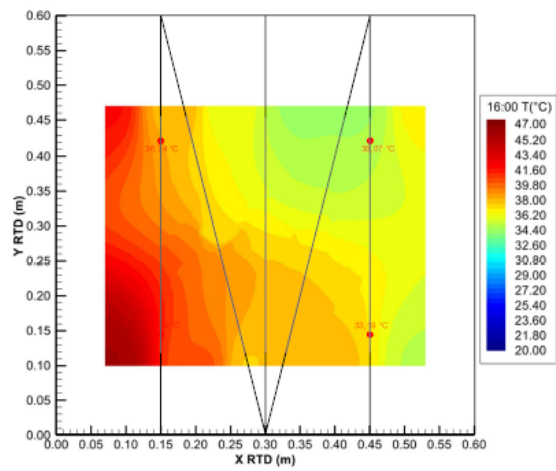
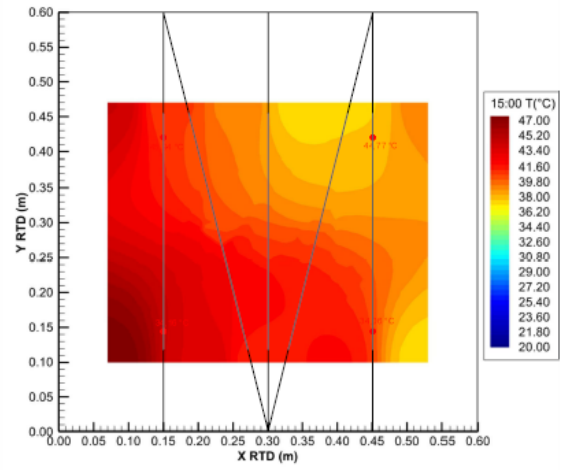
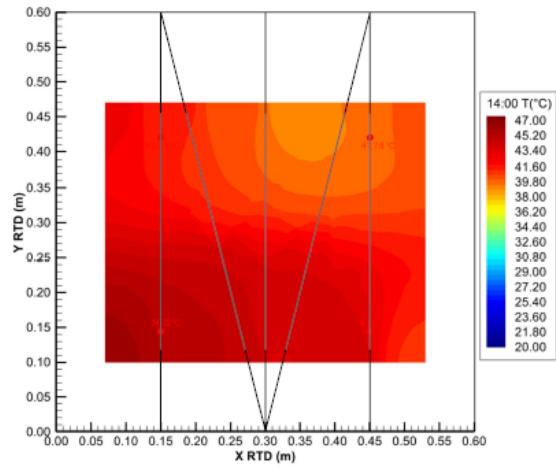
· La serie di profili forata con logika

| Acciaio zincato | Dim. a | Dim. b | Imballo | Lung.: 1,00 m EAN / cod. prod. | Lung.: 2,00 m EAN / cod. prod. | Lung.: 2,50 m EAN / cod. prod. |
|-----------------|---------|--------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| A zincato | 23,5 mm | 1,2 mm | sciolto | 4001116390135 | 4001116390630 | 4001116391132 |
| A zincato | 35,5 mm | 1,5 mm | sciolto | 4001116390036 | 4001116390531 | 4001116391033 |

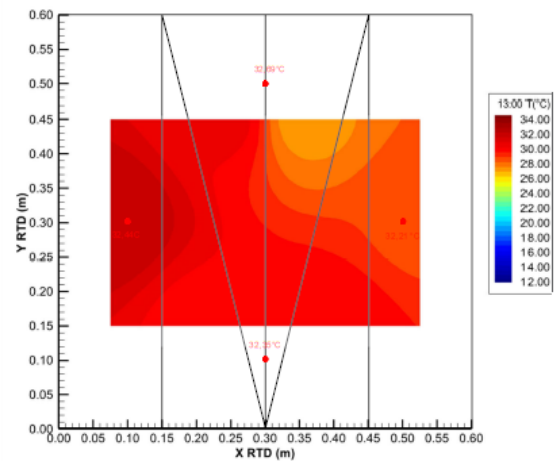
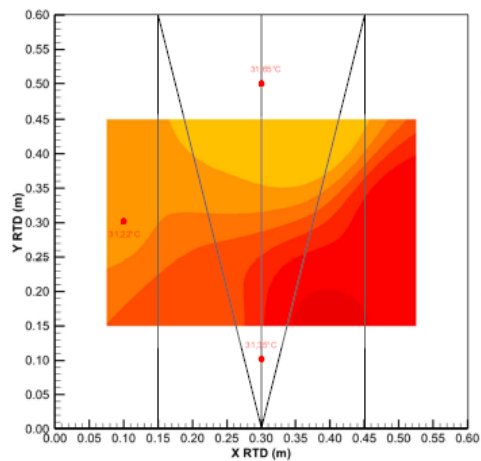
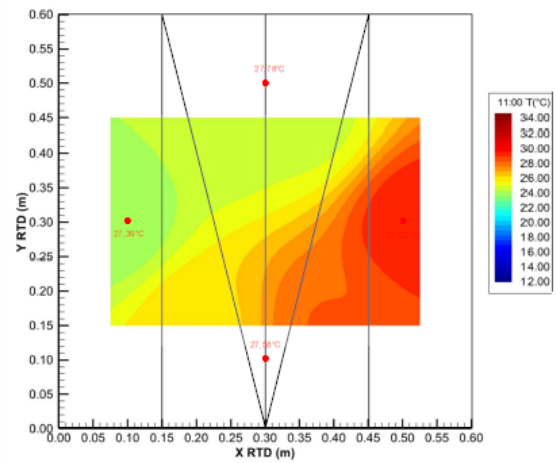
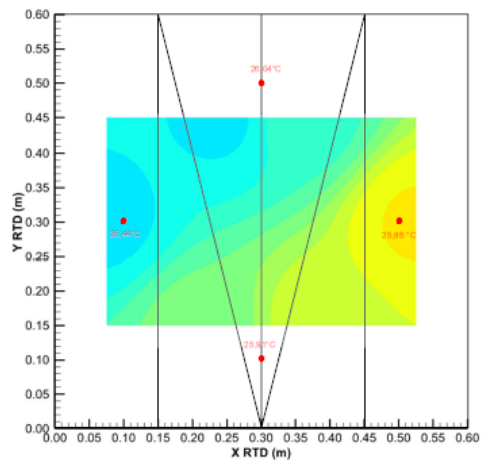
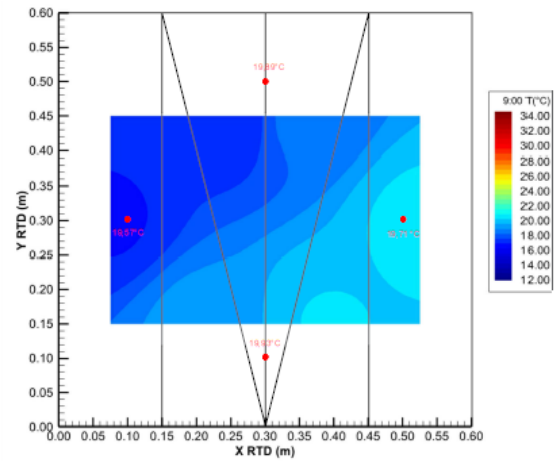
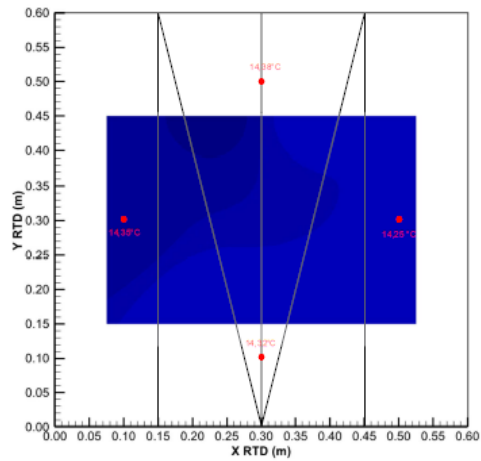
Appendice C – Mappe di temperatura acciaio zincato

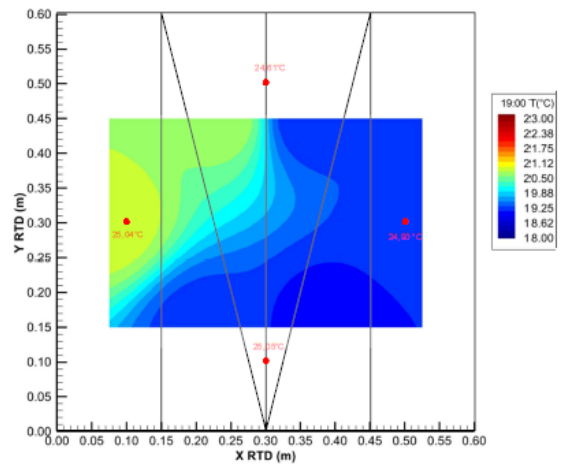
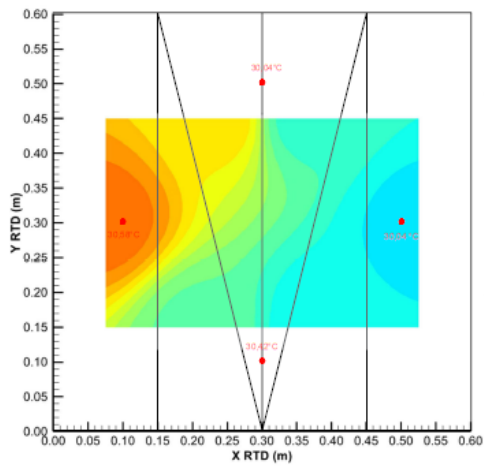
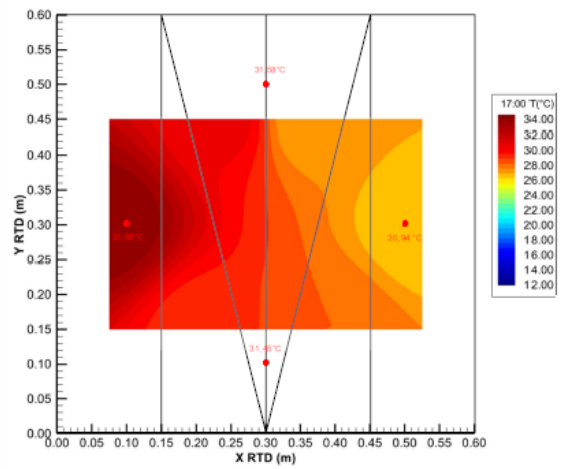
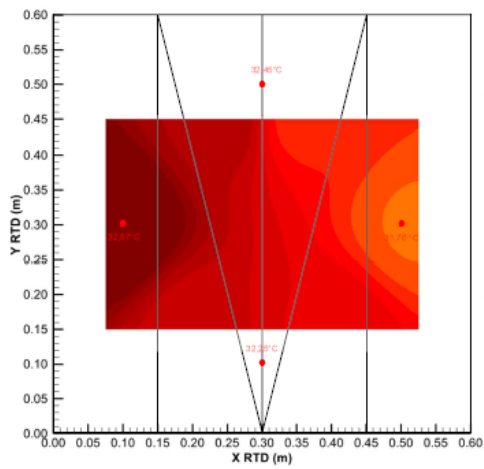
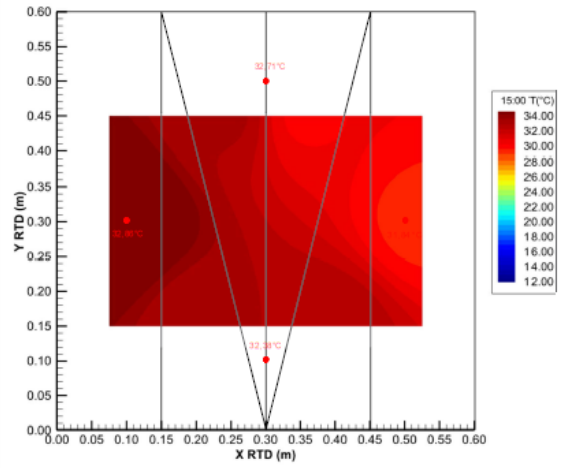
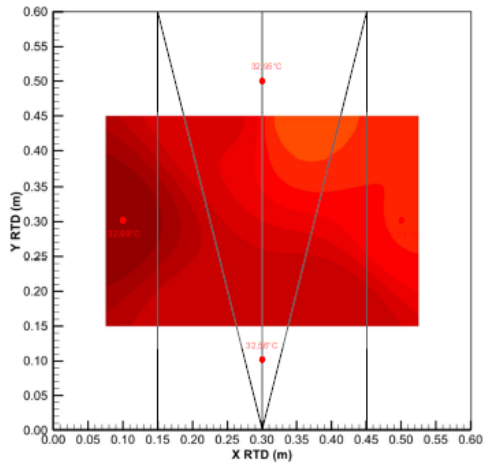
a) Acciaio zincato





b) Alluminio





Bibliografia

- [1] *Ana Picallo-Perez, José María Sala-Lizarraga, Energy and exergy analysis of an experimental ventilated façade.*
- [2] *Stefano Fantucci, Valentina Serra, Corrado Carbonari, An experimental sensitivity analysis on the summer thermal performance of an Opaque Ventilated Façade.*
- [3] *Mohammed Rahiminejad, Dolaana Khovalyg, Review on ventilation rates in the ventilated air-spaces behind common.*
- [4] *Rosa Francesca De Masi, Valentino Festa, Antonio Gigante, Silvia Ruggiero, Giuseppe Peter Vanoli, Experimental analysis of grills configuration for an open jointventilated facade in summertime.*
- [5] *Rosa Francesca De Masi, Valentino Festa, Silvia Ruggiero, Giuseppe Peter Vanoli, Environmentally friendly opaque ventilated façade for wall retrofit: One year of in-field analysis in Mediterranean climate.*
- [6] *Ester Pujadas-Gispert, Mohammed Alsailani, K.C.A. van Dijk (Koen), A.D.K. Rozema (Annine), J.P. ten Hoop (Puck), C.C. Korevaar (Carmen), S.P.G. Moonen (Faas), Design, construction, and thermal performance evaluation of an innovative bio-based ventilated façade.*
- [7] *Payam Sadrolodabae, S.M. Amin Hosseini, Josep Claramunt, M`onica Ardanuy, Laia Haurie, Ana M. Lacasta, Albert de la Fuente, Experimental characterization of comfort performance parameters and multi-criteria sustainability assessment of recycled textile-reinforced cement facade cladding.*
- [8] *Heura Ventura, María Dolores Álvarez, Laura Gonzalez-Lopez, Josep Claramunt, Monica Ardanuy, Cement composite plates reinforced with nonwoven fabrics from technical textile waste fibres: Mechanical and environmental assessment.*
- [9] *Arslan Akbar, V.K.R. Kodur, K.M. Liew, Microstructural changes and mechanical performance of cement composites reinforced with recycled carbon fibers.*
- [10] *T. Colinart, M. Bendouma, P. Glouannec, Building renovation with prefabricated ventilated façade element: A case study.*
- [11] *C. Marinosci, G. Semprini, G.L. Morini, Experimental analysis of the summer thermal performances of naturally ventilated rainscreen façade building.*

- [12] *J. Hegger, M.Schneider, C. Kulas, Institute od Structural Concrete, RWTH Aachen University, Germany, Dimensioning of TRC with application to ventilated façade systems.*
- [13] *3.3 Azione del vento D.M. 17 gennaio 2018. Norme tecniche per le costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8, 2018, (NTC18).*
- [14] *4.2.8.1 Unioni con bulloni, chiodi e perni soggetti a carichi statici - D.M. 17 gennaio 2018 Norme tecniche per le costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8, 2018, (NTC18).*
- [15] *Eurocode 3: Design of steel structures - EN 1993.*
- [16] *European standard UNI EN ISO 7726:2002, Ergonomics of the thermal environment.*
- [17] *UNI EN ISO 7730:2006, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005).*

Indice delle figure

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1 - Stratigrafie pareti: parete non isolata (A), parete ventilata opaca a giunto aperto (B), parete con VIP (C).</i> | 13 |
| <i>Figura 2 - Stratigrafia parete</i> | 15 |
| <i>Figura 3 - Configurazioni facciata ventilata</i> | 16 |
| <i>Figura 4 - Retro del pannello di facciata di grandi dimensioni con nervature in calcestruzzo; sezione trasversale con flessione; foto pannello reale.</i> | 18 |
| <i>Figura 5 - Elaborati grafici pannello sagomato: prospetti e sezioni</i> | 22 |
| <i>Figura 6 - Elaborato grafico pannello sagomato: spianato con dettaglio piastrene</i> | 22 |
| <i>Figura 7 - Sezione orizzontale installazione tipo con dettaglio tassello superiore</i> | 23 |
| <i>Figura 8 - Barra in acciaio zincato per il fissaggio inferiore</i> | 24 |
| <i>Figura 9 - Sequenza fasi di montaggio</i> | 24 |
| <i>Figura 10 - Definizione delle categorie di esposizione</i> | 30 |
| <i>Figura 11 - a) Carichi applicati sull'asta; b) Sforzo assiale; c) Azione tagliante; d) Azione di flessione;</i> | 31 |
| <i>Figura 12 - Modellazione 3D barra inferiore</i> | 31 |
| <i>Figura 13 - a) Carichi applicati sull'asta in z; b) Azione tagliante; c) Azione di flessione;</i> | 32 |
| <i>Figura 14 - a) Carichi applicati sull'asta in y; b) Azione tagliante; c) Azione di flessione;</i> | 32 |
| <i>Figura 15 - Rottura a taglio del bullone</i> | 34 |
| <i>Figura 16 – a) Rottura a rifollamento della piastra; b) Interasse tra i fori</i> | 36 |
| <i>Figura 17 - Rottura della piastra per strappamento</i> | 37 |
| <i>Figura 18 - Rottura della piastra per tranciamento</i> | 38 |
| <i>Figura 19 - Pannello ombreggiato ore 08:00</i> | 39 |
| <i>Figura 20 - Pannello ombreggiato ore 10:00</i> | 39 |
| <i>Figura 21 - Pannello ombreggiato ore 12:00</i> | 40 |
| <i>Figura 22 - Pannello ombreggiato ore 14:00</i> | 40 |
| <i>Figura 23 - Pannello ombreggiato ore 16:00</i> | 40 |
| <i>Figura 24 - Pannello ombreggiato ore 18:00</i> | 40 |
| <i>Figura 25 - Pannello piano ore 08:00</i> | 41 |
| <i>Figura 26 - Pannello piano ore 10:00</i> | 41 |
| <i>Figura 27 - Pannello piano ore 12:00</i> | 42 |
| <i>Figura 28 - Pannello piano ore 14:00</i> | 42 |
| <i>Figura 29 - Pannello piano ore 16:00</i> | 42 |
| <i>Figura 30 - Pannello piano ore 18:00</i> | 42 |
| <i>Figura 31 - Facciata ventilata tipo ore 12:00</i> | 44 |
| <i>Figura 32 - Facciata ventilata tipo ore 9:00</i> | 44 |
| <i>Figura 33 - Facciata ventilata tipo ore 15:00</i> | 45 |
| <i>Figura 34 - Alternativa pannelli inclinati</i> | 46 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 35 - Alternativa pannelli capovolti</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 36 - Alternativa canali separati</i> | <i>47</i> |
| <i>Figura 37 - a) Alternativa schermatura orizzontale regolare; b) Alternativa schermatura architettonica</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 38 - Analisi solare ore 12:00. a) Alternativa schermatura orizzontale regolare; b) Alternativa schermatura architettonica</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 39 - Elaborati progettuali elemento orizzontale di schermatura</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 40 - Disposizione termoresistenze su pannello di AquaBoard</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 41 - Disposizione termoresistenze su pannelli metallici</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 42 - Sezione orizzontale: disposizione termoresistenze.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 43 - Modello 3D: seconda fase di monitoraggio.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figura 44 - Foto disposizione termoresistenze: a) Pannello in acciaio zincato sagomato; b) Pannello in alluminio piano; c) Pannello in alluminio in acciaio piano verniciato/non verniciato</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 45 - Foto pannelli sperimentazione seconda fase</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 46 - Disposizione termoresistenze su pannello di AquaBoard</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 47 - Disposizione termoresistenze su pannelli metallici</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 48 - Sezione orizzontale: disposizione termoresistenza.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 49 - Modello 3D: terza fase di monitoraggio.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 50 - Disposizione termoresistenze su pannello in alluminio sagomato verniciato e relativa parete retrostante.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 51 - Disposizione termoresistenze su pannello in acciaio zincato verniciato e relativa parete retrostante.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 52 - Foto pannelli sperimentazione terza fase</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 53 - Disposizione termoresistenze su pannello di AquaBoard</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 54 - Disposizione termoresistenze pannelli metallici</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 55 - Sezione orizzontale: disposizione termoresistenza.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 56 - Modello 3D: quarta fase di monitoraggio</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 57 - Disposizione termoresistenze su pannello in Alucobond sagomato verniciato e relativa parete retrostante.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 58 - Foto pannelli sperimentazione quarta fase.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 59 - Termoigrometro</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 60 - Termoresistenza PT100</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 61 - DataTaker e CEM.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 62 - Piastra superiore: distanze del foro dai bordi.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figura 63 - Barra inferiore: distanze del foro dai bordi</i> | <i>69</i> |
| <i>Figura 64 - Nuova barra inferiore: distanze del foro dai bordi</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 65 - Andamento temperatura dell'aria intero periodo.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figura 66 - Confronto ombre ore 8:00.....</i> | <i>74</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 67 - Confronto ombre ore 10:00.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura 68 - Confronto ombre ore 16:00.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura 69 - Confronto ombre ore 18:00.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura 70 - Confronto ombre ore 8:00.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura 71 - Confronto ombre ore 10:00.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura 72 - Confronto ombre ore 16:00.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura 73 - Confronto ombre ore 18:00.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura 74 - Grafico confronto ombre percentuali.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura 75 - Mappe di temperatura pannello sagomato in acciaio zincato.....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figura 76 - Confronto temperature superficiali medie SF-SP.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figura 77 - Confronto andamento temperature superficiali medie WSF-WSP.....</i> | <i>82</i> |
| <i>Figura 78 - Box plot temperature SF - WSF, SP - WSP.....</i> | <i>83</i> |
| <i>Figura 79 - Confronto temperature superficiali medie AFC - APC.....</i> | <i>84</i> |
| <i>Figura 80 - Confronto temperature superficiali medie WAFC - WAPC.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura 81 - Box plot temperature AFC - WAFC, APC - WAPC.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figura 82 - Mappe di temperatura pannello in acciaio zincato sagomato.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Figura 83 - Mappe di temperatura pannello in alluminio sagomato.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Figura 84 - Aerofotogrammetria area solar pond, Ancona.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Figura 85 - Stratigrafie pianta box due, solar pond.....</i> | <i>91</i> |
| <i>Figura 86 – Pianta progetto di monitoraggio box due.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Figura 87 - Prospetto sud progetto di monitoraggio box due.....</i> | <i>93</i> |
| <i>Figura 88 - Grafico a dispersione relazione temperature aria – pannelli agosto.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Figura 89 - Grafico a dispersione relazione temperature aria – pannelli settembre.....</i> | <i>96</i> |

Indice delle tabelle

| | |
|--|----|
| <i>Tabella 1 - Configurazioni facciata ventilata</i> | 17 |
| <i>Tabella 2 - Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0, k_s</i> | 26 |
| <i>Tabella 3 - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione</i> | 29 |
| <i>Tabella 4 - Classi di rugosità del terreno</i> | 29 |
| <i>Tabella 5 - Coefficienti parziali di sicurezza</i> | 33 |
| <i>Tabella 6 - Classificazione dei bulloni</i> | 33 |
| <i>Tabella 7 - Posizione dei fori per unioni bullonate e chiodate</i> | 36 |
| <i>Tabella 8 - Valori percentuali aree soleggiate - ombreggiate</i> | 41 |
| <i>Tabella 9 - Valori percentuali aree soleggiate - ombreggiate</i> | 43 |
| <i>Tabella 10 - Tabella confronto ombre percentuali</i> | 78 |
| <i>Tabella 11 - Confronto temperature superficiali medie SF-SP</i> | 81 |
| <i>Tabella 12 - Confronto andamento temperature superficiali medie WSF-WSP</i> | 82 |
| <i>Tabella 13 - Confronto andamento temperature superficiali medie AFC - APC</i> | 84 |
| <i>Tabella 14 - Confronto andamento temperature superficiali medie WAFC - WAPC</i> | 86 |