



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Analisi sperimentale di componenti edilizi per la riqualificazione energetica degli edifici

Dottoranda:

Ing. Chiara Tribuiani

Relatore:

Prof. Ing. Costanzo Di Perna

Coordinatore della Scuola di Dottorato:

Prof. Giovanni Di Nicola

XIX Ciclo – Nuova Serie



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Applied analysis of construction components towards building energetic upgrading

Ph.D. Dissertation of:

Ing. Chiara Tribuiani

Supervisor:

Prof. Ing. Costanzo Di Perna

Ph.D. Course coordinator:

Prof. Giovanni Di Nicola

XIX Edition - New Series

Indice

1. Capitolo 1

Introduzione.....	1
1.1 Oggetto della ricerca.....	2
BIBLIOGRAFIA.....	6

2. Capitolo 2

I Materiali Isolanti.....	8
2.1. L'involucro edilizio.....	8
2.1.1 Contesto normativo.....	8
2.1.2 Meccanismi di trasmissione del calore.....	19
2.1.2.1 Comportamento invernale.....	19
2.1.2.2 Comportamento estivo.....	21
2.2. I materiali isolanti: definizione e classificazione.....	23
2.3. Conducibilità termica λ e normativa di riferimento.....	27
2.4. Le prestazioni estive dei materiali.....	33
2.5. Gli intonaci termoisolanti.....	38
2.5.1 Definizione e classificazione.....	38
2.5.2 Studio dei materiali.....	45
2.5.3 Materiali tradizionali e innovativi.....	46
I. Leganti.....	46
II. Filler.....	50
III. Aggregati.....	54
IV. Additivi.....	64
V. Tabelle riassuntive materiali.....	67
2.5.4 Mix design e caratterizzazione delle miscele: alcuni cenni.....	68
LISTA DELLE FIGURE.....	79
LISTA DELLE TABELLE.....	81
BIBLIOGRAFIA.....	82

3. Capitolo 3

L'influenza dell'inerzia termica: analisi sperimentale.....	84
3.1. Stato dell'arte.....	84
3.2. Materiali e metodi.....	90
Analisi del sito e dello stato di fatto.....	91
Materiali.....	97
I. Misapor Beton.....	97
II. Termointonaco e pannello XPS.....	98
Metodo sperimentale.....	102
Strumentazione per il monitoraggio.....	106
Sistema di monitoraggio, data Taker e pc.....	110
Sistema di monitoraggio ambientale esterno.....	115
Comunicazione da remoto.....	118
Metodo analitico: TRANSYS.....	120
3.3. Risultati campagne sperimentali 2018-2019.....	123
Risultati sperimentali estate 2018.....	126
Risultati analitici estate 2018.....	137
Confronto e osservazioni: monitoraggio mock up Fabriano.....	145

APPENDIX A.....	149
Confronto dati 2018 e 2019.....	149
LISTA DELLE FIGURE.....	157
LISTA DELLE TABELLE.....	158
LISTA DEI DIAGRAMMI.....	158
LISTA DEI GRAFICI.....	159
BIBLIOGRAFIA.....	161

4. Capitolo 4

Le pitture riflettenti: applicazione sperimentale.....	163
4.1. Stato dell'arte.....	163
4.1.1 I cool materials.....	163
4.1.2 Definizioni e standard normativi.....	170
4.1.3 Tipologie di prodotti cool.....	174
Introduzione.....	174
Membrane impermeabilizzanti cool.....	177
Vernici e pitture cool.....	180
Piastrille cool.....	182
4.1.4 Benefici dei cool materials.....	184
Introduzione.....	184
Edifici residenziali.....	185
Edifici commerciali.....	186
Mitigazione dell'isola di calore.....	187
Ottimizzazione del comfort termico indoor.....	188
Ottimizzazione del comfort termico outdoor.....	190
Durabilità dei rivestimenti cool.....	193
4.2 Obiettivi e fasi della sperimentazione.....	196
4.2.1 Caratterizzazione dei materiali.....	199
Leganti.....	200
Pigmenti.....	208
Pigmenti tradizionali.....	210
Pigmenti riflettenti.....	212
Cariche ed extenders.....	214
Cariche tradizionali.....	216
Cariche riflettenti.....	219
Cariche termiche.....	223
4.2.2 Caratterizzazione delle pitture.....	224
Materiali impiegati per le prove.....	225
Metodi di prova e strumentazioni.....	232
Risultati di laboratorio.....	238
4.2.3 Mock up sperimentale.....	240
Realizzazione dei pannelli: i materiali.....	243
Misure di laboratorio preliminari.....	245
Applicazione e installazione dei pannelli.....	247
4.2.4 Sistema di monitoraggio.....	248
Data taker.....	250
Termoflussimetro.....	250
Termoresistenze PT100.....	250
Termoresistenze PT100 ambientali.....	250

Stazione meteo.....	251
Sistema di irrigazione del verde.....	252
Sistema di raffrescamento interno alla serra.....	253
Riepilogo sensori applicati ai pannelli.....	255
Riepilogo schema pannelli.....	256
4.3 Risultati campagna sperimentale 2019.....	257
Grafici con irrigazione on.....	258
Grafici con irrigazione off.....	262
Considerazioni.....	276
Confronti irrigazione on /off.....	277
Conclusioni finali.....	279
APPENDIX B.....	280
Grafici.....	280
LISTA DELLE FIGURE.....	290
LISTA DELLE TABELLE.....	293
LISTA DEI GRAFICI.....	294
BIBLIOGRAFIA.....	295

Acknowledgements

A chi ha creduto in me e mi ha sostenuto in tutto questo percorso, anche solo per un pezzettino di strada... grazie di cuore!

"Cominciate col fare il necessario,
poi ciò che è possibile
e all'improvviso vi sorprenderete a fare l'impossibile."
(San Francesco D'Assisi)

Abstract

Oggetto principale del progetto di ricerca è stata la valutazione del comportamento energetico di componenti edilizi attraverso l'analisi sperimentale in situ con la realizzazione di mock up configurati per lo scopo.

In prima battuta, lo studio si è concentrato sulle problematiche inerenti ai consumi energetici estivi, il comfort interno e la salubrità degli ambienti prefiggendosi l'obiettivo di analizzare nuove strategie per l'ottimizzazione dell'involucro edilizio. La tematica dell'isolamento termico è stata, quindi, declinata sotto diversi aspetti: tipologia dei materiali isolanti e le loro caratteristiche chimico-fisiche, tipologia delle strutture edilizie che necessitano di isolamento, principali parametri termici da considerare e infine la traduzione, in termini di sperimentazione in situ, di un modello comparativo tra involucri termici su una struttura esistente fortemente inerziale ma priva di isolamento termico: mock up realizzato a Fabriano.

La necessità di raggiungere standard energetici sempre più stringenti si è generalmente tradotta con la scelta e l'utilizzo di materiali isolanti con alte prestazioni per coibentare le pareti dei nostri edifici. Una corretta valutazione dei vantaggi e degli svantaggi legati a questa tecnica costruttiva è della massima importanza al fine di comprendere al meglio il comportamento termico delle strutture opache. Pertanto, la ricerca portata avanti, riporta i dati sperimentali e analitici ottenuti dallo studio di una parete ad elevata inerzia termica coibentata con due diversi strati isolanti esterni (metodologia in gergo definita come isolamento "a cappotto") per soddisfare i requisiti nZEB italiani sulla resistenza termica e focalizzandosi sulle problematiche nell'ambito del clima mediterraneo.

Infatti, il surriscaldamento degli ambienti interni e, quindi, l'uso eccessivo dei sistemi di raffrescamento rappresenta uno dei principali problemi sia per la salute degli occupanti che per i consumi energetici, in particolar modo durante il periodo estivo. Ne consegue che, al fine di limitare questo problema, è necessaria una progettazione appropriata e/o un adeguamento energetico dell'involucro edilizio che utilizzi un approccio globale e sinergico.

Altro argomento di ricerca, seguito parallelamente al primo, è stato lo studio dei *cool materials* da applicare in sistemi di raffrescamento passivo degli edifici declinando la tecnica del cool roof alle facciate degli edifici. L'obiettivo dello studio è stato quello di valutare gli effettivi benefici che i *cool materials* possono avere una volta applicati su pareti verticali, al posto delle tradizionali vernici per esterni, e valutarne la convenienza in termini di costi-benefici-durabilità. Questi materiali possono

contribuisce alla riduzione della temperatura superficiale dell'agglomerato abitativo grazie ad un migliore bilancio energetico relativo alle superfici in gioco favorendo la mitigazione dell'effetto di isola di calore urbana. Inoltre, l'utilizzo di pareti con corrette stratigrafie e il giusto posizionamento dell'isolamento con materiali che rispondano a condizioni al contorno dinamiche, soprattutto nei climi Mediterranei come il nostro, possono rappresentare una risposta alle problematiche riguardanti il miglioramento dell'efficienza energetica del nostro patrimonio edilizio. Il progetto di ricerca sui *cool materials* ha previsto una fase preliminare di studio dei materiali, formulazione delle pitture sperimentali e, infine, la preparazione del mock up sul quale installare i pannelli da monitorare durante il periodo estivo.

Riassumendo, la problematica della riqualificazione degli edifici rispetto all'isolamento estivo ha affrontato, principalmente, i seguenti argomenti:

- l'inerzia termica e la sua relazione con l'isolamento termico dell'involucro nel periodo estivo;
- lo studio dei materiali e la loro sperimentazione in condizioni reali, ovvero in regime dinamico;
- l'applicazione sperimentale dei cool materials sulle pareti verticali esterne per valutarne l'efficacia in termini di contenimento delle temperature superficiali.

Abstract

The main object of the research project was the evaluation of the energy behavior of construction components through in situ measurement and experimental analysis with dedicated mock-up.

At first, the study has focused on issues related to energy consumption over the summertime, indoor comfort's situations and environment's salubrity with the aim of analysing new strategies towards building envelope's upgrade.

Therefore, the topic of thermal insulation has been listed into different aspects: the type of insulating materials and their chemical-physical characteristics, the type of building structures that require insulation, the main thermal parameters to be considered within the research and, at last, the translation, in terms of on-site test, of a comparative model between several thermal envelopes applied on a highly inertial structure lacking of thermal isolation: mock up made in Fabriano.

The use of high-performance insulating materials to insulate the building walls is the necessary consequence to achieve the higher strict energy standards.

The urgent need of reaching higher energetic standards has brought to choosing high-performance isolating materials to insulate buildings. A correct evaluation of pros and cons of this specific construction technique is extremely fundamental in order to achieve a better understanding of opaque structures thermal behaviour's.

Perhaps, the current research reports experimental and analytical data obtained from the study of a high thermal inertia surface insulated with two different external isolating layers, to meet the Italian nZEB requirements on thermal resistance and focusing on set of problems caused by the Mediterranean climate conditions.

In fact, the indoor environment overheating and, consequently, the excessive use of cooling systems represents one of the main problems both for the occupants' health and for energy consumption, especially during the summertime. It follows that, in order to decrease the problem, a global and synergistic approach is necessary to design energy efficient building envelopes.

Another topic of the research, in line with the first one covered, has been conducted on studying cool materials to be applied to passive cooling techniques with the application of cool roof technique to the building facades. The aim of the study was to assess the benefits of those materials when applied to vertical envelopes instead of traditional outdoor coatings and evaluate their convenience in terms of costs-benefits-durability.

These materials can contribute to exterior's temperature reduction of the housing agglomeration thanks to a better energy balance of the surfaces, facilitating the mitigation of the urban heat island effect.

Furthermore, resolutions to the problems concerning the energy improvement of our building heritage can be represented by the use of correct stratigraphy walls and the right placement of the insulating materials that respond to dynamic boundary conditions, especially in Mediterranean climate.

The research project on cool materials involved a preliminary phase of the materials study, the formulation of the experimental paints and, at last, the mock up preparation on which to install the panels to be monitored over the summertime period.

In summary, the problem of building energy upgrading in regard to summer insulation is focused on the main following topics:

- thermal inertia and its relationship with the thermal insulation of the envelope over summertime period;
- the study of materials and their experimentation in real conditions, or rather in a dynamic regime;
- the experimental application of cool materials on external vertical walls in order to evaluate their beneficial impact on surface's temperature.

CAPITOLO 1.

Introduzione

Negli ultimi decenni il tema del risparmio energetico degli edifici è stato affrontato attraverso l'emanazione di numerose regolamentazioni a livello Europeo, sottoforma di Energy Performance of Buildings standards (EPB). L'Unione Europea ha delineato inizialmente una "strategia Europa 2020" per fronteggiare le problematiche dovute alla maggiore dipendenza dalle importazioni di energia, dalla scarsità di risorse energetiche, nonché dalla necessità di limitare i cambiamenti climatici e di superare la crisi economica. La strada che è stata tracciata ha come obiettivo quello di perseguire un modello di efficienza energetica come strumento necessario per affrontare tali problematiche. Due target sono assolutamente imprescindibili in questa roadmap: ridurre il consumo di energia primaria e diminuire le importazioni di energia. Di conseguenza questo contribuirebbe a ridurre le emissioni di gas serra e quindi a ridurre i cambiamenti climatici. Il passaggio a un'economia più efficiente sotto il profilo energetico dovrebbe inoltre accelerare la diffusione di soluzioni tecnologiche innovative e migliorare la competitività dell'industria dell'Unione, rilanciando la crescita economica e la creazione di posti di lavoro in diversi settori connessi con l'efficienza energetica.

Le normative sul risparmio energetico sviluppate negli ultimi anni hanno quindi focalizzato la loro attenzione sul problema della riduzione dei consumi. La Direttiva 2002/91/UE indicava le prime misure volte a incentivare il *rendimento energetico* degli edifici stabilendo dei requisiti minimi di efficienza. Successivamente, la Direttiva 2010/31/UE abbandona il concetto di rendimento per spostare l'attenzione sulla *prestazione energetica* degli edifici e introducendo la nozione di "*edifici a energia quasi zero*", ovvero edifici ad altissima prestazione energetica e quindi con fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo. A seguire, la Direttiva 2012/27/UE sancisce il ruolo fondamentale dell'*efficienza energetica* come strumento strategico nell'attuale scenario europeo: efficienza energetica intesa come risparmio di chilowattora dell'energia primaria utilizzata.

Uno scenario in continua evoluzione a cui si aggiunge infine la direttiva UE 2018/844 del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31 sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. La nuova direttiva nasce dall'esigenza di favorire il raggiungimento di nuovi obiettivi di efficientamento e prestazione energetica, come la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra di almeno il 40% entro il 2030 e favorire lo sviluppo di un sistema energetico sostenibile, competitivo, sicuro e decarbonizzato entro il 2050.

Per raggiungere questi obiettivi alcune delle novità più importanti sono:

- promuovere la riqualificazione efficiente degli edifici esistenti,

- integrare strategie smart per aumentare l'efficienza energetica e limitare i consumi,
- promuovere la realizzazione di edifici a emissioni zero entro il 2050,
- attuare azioni a sostegno della mobilità elettrica, attraverso la realizzazione di infrastrutture di ricarica negli edifici.

In questo contesto normativo europeo si colloca il nuovo metodo di calcolo dinamico orario introdotto dalla ISO 52016-1 “Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent head loads” recepito il 1° marzo 2018 in Italia sostituendo la UNI EN ISO 13790 “Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling”. L'importanza di conoscere e padroneggiare in tempi rapidi questa nuova procedura è data dal fatto che il metodo di calcolo semi-stazionario medio mensile sarà dismesso a favore dei metodi orari dinamici e il bilancio termico dell'edificio sarà determinato utilizzando intervalli di calcolo pari ad un'ora. Quindi, rispetto al modello semi-stazionario (su base mensile), il metodo di calcolo orario consentirà di valutare in maniera più realistica il comportamento dell'edificio, in relazione alle sollecitazioni climatiche. Inoltre, viene schematizzato meglio l'utilizzo dei componenti nell'edificio dovuti ad esempio all'utilizzo di dispositivi per il controllo solare, alla presenza di termostati, dell'occupazione, oltre che il ruolo della capacità termica dei componenti della struttura edilizia.

1.1 Oggetto della ricerca

Il progetto di ricerca svolto si è posto come obiettivo principale quello di indagare la tematica dell'isolamento termico declinandola sotto diversi aspetti: la tipologia dei materiali isolanti e le loro caratteristiche chimico-fisiche, la tipologia delle strutture edilizie che necessitano di isolamento, i principali parametri termici da considerare e, in particolare, la traduzione di questi concetti in termini di sperimentazione in sito (mockup sperimentali).

Tutto ciò prende le mosse dall'individuazione di una problematica che interessa a livello globale molti paesi: il crescente aumento del fabbisogno energetico e il problema del surriscaldamento globale.

Negli ultimi anni le tematiche legate al consumo energetico degli edifici e al loro impatto sulle emissioni di gas serra hanno rimarcato l'importanza di studiare il comportamento termico dell'involucro edilizio, con particolare attenzione all'inerzia termica delle pareti. Allo stesso tempo, la necessità di mettere in relazione parametri termici come l'inerzia con la resistenza termica ha portato sempre più alla scelta e

all'utilizzo di materiali isolanti con alte prestazioni per coibentare le pareti dei nostri edifici. Una corretta valutazione dei vantaggi e degli svantaggi legati a questa tecnica costruttiva è della massima importanza al fine di comprendere al meglio il comportamento delle strutture opache.

Pertanto, la ricerca è stata svolta progettando in termini sperimentali gli studi da condurre su differenti componenti edilizi scelti al fine di valutarne l'efficacia in merito alla riqualificazione energetica.

Obiettivi dello studio sono:

- analizzare il comportamento delle strutture in regime dinamico sottoposte a carichi termici estivi;
- individuare i parametri maggiormente interessanti da studiare e stabilirne le correlazioni scientifiche, se esistono;
- individuare le principali stratigrafie di elementi edilizi considerando che lo scenario italiano è composto principalmente da edifici esistenti che necessitano di interventi di riqualificazione.

La documentazione e lo studio bibliografico sono stati propedeutici all'elaborazione del progetto per le campagne di sperimentazione. Sulla base delle precedenti considerazioni, è stato quindi scelto uno dei modelli di studio: una struttura fortemente inerziale, priva di aperture verso l'esterno, collocata in una zona completamente isolata (situata a Fabriano) ed esposta alle condizioni atmosferiche. Sono state poi scelte le soluzioni d'isolamento termico da utilizzare nella sperimentazione: soluzioni da studiare in maniera comparativa a parità di condizioni al contorno.

La predominanza di edifici storici nel territorio italiano e la necessità di adeguarsi alle normative vigenti, porta spesso i tecnici a adottare soluzioni di risparmio energetico non ottimali. Gran parte del patrimonio edilizio esistente è privo di isolamento termico poiché è stato costruito antecedentemente ai regolamenti sul risparmio energetico. In seguito all'introduzione delle nuove normative che stabiliscono dei valori minimi accettabili di trasmittanza, si è diffusa la pratica di inserire elevati spessori di materiale isolante sull'involucro esterno. Sebbene questi regolamenti consentano l'adozione di stratigrafie con diverse configurazioni di massa e isolamento, questi sistemi presentano problematiche rispetto al surriscaldamento estivo, la formazione di condensa e il consumo di energia. Bisogna, infatti, tener conto che l'Italia, come tutti i paesi che si trovano nell'area mediterranea o con un clima temperato, sono soggetti a una forte oscillazione delle temperature giornaliere nel periodo estivo: problema che deve essere affrontato in maniera dinamica. Il presente studio ha posto come scopo la ricerca della migliore

combinazione possibile di ristrutturazione energetica, che garantisca comfort sia in inverno che in estate, risparmio energetico e sostenibilità.

Il focus è, dunque, la problematica del comportamento dell'involucro nell'ambito del clima mediterraneo estivo attraverso lo studio di una parete ad elevata inerzia termica coibentata con due diversi strati isolanti esterni (metodologia in gergo definita come isolamento "a cappotto") per soddisfare i requisiti nZEB italiani sulla resistenza termica.

Parallelamente a questa sperimentazione, si è aperto un altro filone di ricerca riguardante le pitture riflettenti, ovvero quei materiali che vengono definiti come "*cool material*", rivestimenti in grado di non innalzare in modo significativo la propria temperatura superficiale sotto la radiazione solare. Generalmente i *cool materials* sono caratterizzati da una elevata riflettanza solare (elevata capacità di riflettere la radiazione solare incidente sul materiale) e di emittanza termica (elevata capacità di emettere calore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso). L'obiettivo dello studio è stato quello di valutare gli effettivi benefici che i *cool materials* possono avere una volta applicati su pareti verticali al posto delle tradizionali vernici per esterni, e valutarne la convenienza in termini di costi-benefici-durabilità. Lo studio, l'individuazione e l'uso in larga scala di materiali che abbiano specifiche particolarità tecniche rispetto ai fenomeni e alle problematiche sopra descritte, potrebbero portare nel contesto delle aree urbane ad un indiretto risparmio energetico legato all'alta riflettanza solare. Quest'ultima contribuisce alla riduzione della temperatura superficiale dell'agglomerato abitativo grazie ad un migliore bilancio energetico relativo alle superfici in gioco favorendo la mitigazione dell'effetto di isola di calore urbana. Inoltre, l'utilizzo di pareti con corrette stratigrafie e il giusto posizionamento dell'isolamento con materiali che rispondano a condizioni al contorno dinamiche, soprattutto in climi Mediterranei come il nostro, possono rappresentare una risposta alle problematiche riguardanti il miglioramento dell'efficienza energetica del nostro patrimonio edilizio.

L'attività sperimentale ha richiesto inizialmente un periodo di analisi degli standard normativi ASTM riguardanti la misurazione in situ dei parametri di riflessione solare (*albedo*), di materiali da costruzione attraverso l'uso di un piranometro impiegato per compiere delle misurazioni sperimentali. Oltre a queste normative, sono stati analizzati anche gli standard delle prove di laboratorio per la determinazione di questo stesso parametro e di altre proprietà riguardanti la caratterizzazione delle pitture riflettenti. Parallelamente si è proceduto con la ricerca bibliografica volta a stabilire lo stato dell'arte della ricerca nel campo dei *cool materials*, *cool roof*, *solar paint*, isole di calore, raffrescamento passivo, *evaporative cooling*. Successivamente si è proseguito con la fase di progettazione e preparazione delle strumentazioni utili

al progetto di monitoraggio, e con la scelta del mock up, sito ad Agugliano, e l'individuazione e alla caratterizzazione dei materiali e delle pitture riflettenti, valutando le caratteristiche più idonee per essere studiate e monitorate nella fase sperimentale. La sperimentazione ha coinvolto una struttura leggera realizzata in legno, la cui facciata principale è rivolta a Sud ed è stata tamponata con quattro pannelli in OSB pitturati con diverse tipologie di pitture.

Per entrambi i filoni di ricerca, lo studio dei materiali è però imprescindibile e ha rappresentato il punto di partenza del mio percorso di dottorato: l'analisi e la scelta delle materie prime, la composizione e le proprietà dei componenti edilizi, sono passaggi fondamentali e propedeutici, sulla base dei quali sono stati individuati i prodotti e le stratigrafie da studiare sperimentalmente.

Durante i tre anni di ricerca ho approfondito vari aspetti che concorrono alla tematica dell'efficientamento energetico e ogni capitolo della presente tesi tratta gli argomenti di maggiore interesse suddivisi per macro-tematiche:

- Capitolo 2: I materiali isolanti
- Capitolo 3: L'influenza dell'inerzia termica: analisi sperimentale
- Capitolo 4: Le pitture riflettenti: applicazione sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Direttiva 2002/91/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia.
- [2] Direttiva 2010/31/UE del parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia.
- [3] Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le Direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.
- [4] Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.
- [5] ISO 52016-1:2017 “Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent head loads – Part 1: Calculation procedures”.
- [6] U.S. Energy Information Administration (EIA), International Energy Outlook 2019 with projections to 2050, September 2019. <https://www.eia.gov/ieo>
- [7] V. Corrado, G. Murano, Il calcolo della prestazione energetica del fabbricato: la nuova EN ISO 52016, articolo Ingenio, giugno 2017.
- [8] F.Stazi, C.Bonfigli, E.Tomassoni, C.Di Perna, P.Munafò, The effect of high thermal insulation on high thermal mass: Is the dynamic behaviour of traditional envelopes inMediterranean climates still possible?, Energy and Buildings (2015), 88, 367–383.
- [9] F. Stazi, G. Ulpiani, M. Pergolini, C. Di Perna, The role of areal heat capacity and decrement factor in case of hyper insulated buildings: An experimental study, Energy and Buildings 176 (2018) 310-324
- [10] N.Aste, A.Angelotti, M.Buzzetti, The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, Energy & Building 141 (2009) 1181-1187
- [11] Stijn Verbekea, Amaryllis Audenaerta, Thermal inertia in buildings: a review of impacts across climate a building use, Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2300–2318

- [12] T. Kuczy_nski, A. Staszczuk, Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings, *Energy* 195 (2020) 116984
- [13] A.Antonaia, F.Ascione, A.Castaldo, A.D'Angelo, R.F.De Masi, M.Ferrara, G.P.Vanoli, G.Vitiello, Cool materials for reducing summer energy consumptions in Mediterranean climate: In-lab experiments and numerical analysis of a new coating based on acrylic paint, *Applied Thermal Engineering* 102 (2016) 91-107

CAPITOLO 2.

I MATERIALI ISOLANTI

2.1 L'involucro edilizio

2.1.1 Contesto normativo

Una corretta progettazione dei componenti edilizi delle nostre strutture verticali opache può contribuire alla riqualificazione energetica di un edificio, agendo sui meccanismi di riduzione del flusso di energia entrante/uscente, di immagazzinamento dell'energia interna e di trasmissione di quella in eccesso mediante conduzione, convezione e irraggiamento.

Un edificio privo di impianti di climatizzazione reagirà liberamente rispetto alle sollecitazioni derivanti dalle condizioni climatiche esterne e rispetto ai carichi interni. Ne consegue che l'involucro edilizio è la prima strategia progettuale che può essere adottata per agire sul controllo del comportamento estivo ed invernale, al fine di impedire una fluttuazione continua della temperatura interna.

Quantificare l'efficacia e il corretto funzionamento dell'involucro progettato, diventa di fondamentale importanza per la riduzione dei fabbisogni energetici e, parallelamente, al mantenimento di condizioni di comfort interno soddisfacenti.

In particolare, l'attenzione viene posta principalmente sulle prestazioni isolanti dei materiali da costruzione e quindi, su come definire i materiali isolanti anche rispetto ai requisiti posti dalle normative vigenti in termini di risparmio energetico e riqualificazione. Genericamente, tutti i materiali che riportano caratteristiche di isolamento termico sono da ritenersi "materiali isolanti termici", classificabili attraverso i parametri della conduttività termica λ e della resistenza termica R , che associa al valore di λ uno spessore s preciso. L'obiettivo di progettare edifici energeticamente efficienti non può prescindere dalla messa in opera di un involucro prestazionale che agisca riducendo i flussi di calore che lo attraversano. Un corretto isolamento deve essere alla base delle scelte progettuali del tecnico progettista, il quale deve essere conscio delle prestazioni dei materiali messi a progetto, al fine di garantire globalmente il miglioramento energetico e ambientale dell'edificio.

La mobilitazione per ridurre il consumo di energia è diffusa ed è concentrata sulla prevenzione degli sprechi e nel limitare gli impatti inquinanti sull'ambiente. Obiettivi condivisi a livello europeo, poiché, secondo un resoconto stilato dall'UE, i margini di riduzione esistenti sono notevoli, in particolare in un settore ad elevato consumo di energia quale è il settore dell'edilizia che rappresenta ad oggi il 40% del consumo totale.

La maggiore sensibilità nei confronti delle tematiche ambientali ha portato alla nascita e allo sviluppo di programmi di azione e politiche internazionali volte alla riduzione dei consumi di energia primaria e delle emissioni di anidride carbonica. L'edilizia è sicuramente un settore strategico sul quale intervenire, essendo fortemente responsabile dei consumi di energia e, in particolare, delle emissioni di CO₂. Le azioni della UE, attraverso l'emanazione delle varie Direttive succedutesi negli anni, hanno lo scopo di delineare delle strategie comuni per un'energia competitiva, sostenibile e sicura, concentrando l'attenzione su due settori che presentano le maggiori potenzialità di risparmio energetico: trasporti e edilizia. A partire dalla direttiva europea 2002/91/CE Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) e successive, i Paesi appartenenti all'UE introducono l'importante novità dell'obbligo graduale verso edifici ad energia quasi zero, ovvero edifici "ad altissima prestazione energetica, determinata conformemente all'Allegato I. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze" (Dir. 2010/31/UE, Art.2 comma 2). Gli sforzi dell'Unione Europea sono diretti a riconvertire il mercato delle costruzioni verso edifici ad energia quasi zero, incoraggiando i vari paesi a definire nuovi piani nazionali per aumentare il numero degli edifici che rispettino i Requisiti Minimi degli edifici a livello di consumi di energia, e contemporaneamente, a mettere in pratica le linee guida sui criteri di sostenibilità ambientale.

Di conseguenza, il comparto dell'Edilizia Sostenibile si presenta come una valida alternativa ed è in rapida e costante evoluzione poiché maggiormente attento all'uso sostenibile ed equilibrato dei materiali e delle risorse, con il fine ultimo di migliorare la qualità della vita, ridurre le emissioni e la dipendenza energetica da fonti non rinnovabili ed inquinanti. L'impegno degli operatori della filiera delle costruzioni deve orientarsi verso una progettazione che tenga conto della biocompatibilità, della sostenibilità e di costruzioni ecologiche in riferimento alla vita utile del manufatto edilizio: filiera che parte dal reperimento delle materie prime fino ai processi di produzione dei materiali e dei componenti edilizi a basso impatto ambientale.

I componenti che fanno parte dell'involucro dell'edificio, e che hanno un impatto rilevante sulla prestazione energetica globale dell'edificio stesso, devono rispettare i requisiti minimi in materia di prestazione energetica sia quando sono rinnovati o sostituiti, sia quando sono progettati ex novo.

Il miglior modo per ottenere la massima efficienza energetica dell'involucro edilizio è quello di progettare e realizzare un edificio a partire da tre principi:

- limitare al massimo gli sprechi energetici;
- massimo impiego delle risorse energetiche rinnovabili;

- limitare l'uso di fonti energetiche non rinnovabili.

L'obiettivo di massima efficienza energetica, ovviamente, si ottiene se viene posto come obiettivo prioritario fin dalle primissime fasi del progetto, in quanto in questa fase è possibile prendere in esame tutte le componenti che concorrono al miglior risultato: dalla fascia climatica all'orientamento dell'edificio, dai materiali di costruzione alla possibilità di utilizzo di fonti rinnovabili, dagli impianti di condizionamento fino al design dell'illuminazione interna. L'involucro è la somma di tutte le superfici che separano i locali interni dall'ambiente esterno: costituisce, in pratica, la "pelle" dell'edificio regolando gli scambi di energia con l'esterno. Semplificando, quanto più l'involucro è adatto a isolare e a compensare la differenza di temperatura tra interno ed esterno, tanto più è energeticamente efficiente. Quando si tratta di nuove costruzioni sicuramente è più facile raggiungere l'obiettivo, ma anche sugli edifici esistenti è possibile ottenere buoni livelli di efficientamento energetico dell'involucro: in particolare è sul patrimonio edilizio esistente che devono concentrarsi gli sforzi per una riqualificazione energetica funzionale e sostenibile anche dal punto di vista ambientale ed ecologico.

In Italia il patrimonio edilizio esistente è composto quasi interamente da edifici residenziali (89%) rispetto alla componente non residenziale (11%) e la sua distribuzione in base all'epoca di costruzione è ascrivibile al 70% antecedente al 1976: **Legge n. 373/1976** - Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici (vedi **Fig.1**).

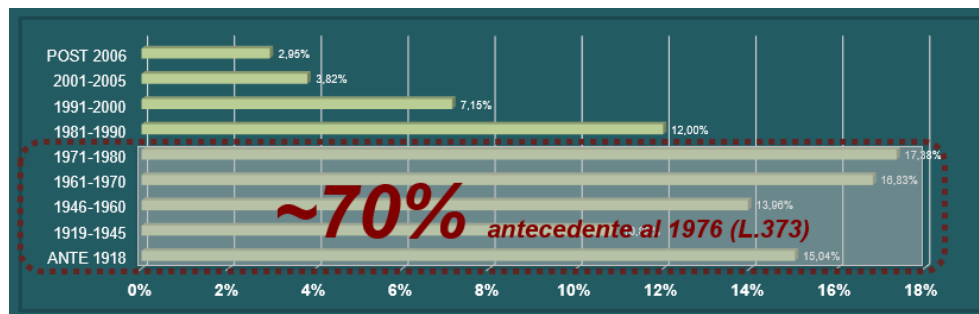


Fig.1 – Distribuzione del patrimonio edilizio residenziale (13,7 Mln di edifici) per epoca di costruzione (fonte ES-PA – ENEA).

Questa data segna un primo spartiacque importante: la legge n.373 rappresenta la prima norma redatta per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici. Proprio in quegli anni l'Europa stava attraversando una vera e propria crisi petrolifera, con il conseguente aumento del prezzo del petrolio. La legge 373/76 prevedeva i primi vincoli per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la

manutenzione degli impianti termici e prescrizioni per l'isolamento termico degli edifici. In particolare, venivano introdotte le seguenti grandezze:

- il coefficiente di dispersione volumico,
- i gradi giorno,
- le zone climatiche,
- il rapporto S/V (superficie disperdente su volume riscaldato).

Inoltre, sulla base di ricerche condotte sempre a livello italiano, è possibile classificare ulteriormente i fabbricati in base alle caratteristiche strutturali:

- per gli edifici residenziali antecedenti al 1976: circa l'80% è in muratura portante e il 20% in cemento armato;
- per gli edifici successivi al 1976: circa il 70% è in muratura portante e solo il 30% in cemento armato.

Da questi dati emerge come la maggior parte del costruito sia rappresentato da edifici in muratura portante. Questa analisi è fondamentale per contestualizzare la riqualificazione energetica: la ricerca di soluzioni idonee al raggiungimento dei requisiti minimi di efficientamento deve andare di pari passo con lo studio delle tipologie edilizie presenti sul nostro territorio.

Sicuramente la legge fondamentale, e anche quella più nota, è la **Legge n.10 del 9 gennaio 1991** "Norma in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia". Questa legge, insieme ai suoi decreti attuativi, ha rappresentato il principale riferimento in materia, oltre che a introdurre alcuni concetti innovativi quali:

- la classificazione degli edifici in categorie a seconda della destinazione d'uso;
- la suddivisione del territorio italiano in zone climatiche in funzione dei gradi giorno;
- per ogni zona climatica la definizione dei giorni dell'anno per l'accensione e lo spegnimento e il numero massimo di ore giornaliere per l'esercizio degli impianti di riscaldamento.
- l'introduzione, di fatto, di una nuova procedura per la verifica energetica delle strutture, costituendo un primo passo verso la Certificazione Energetica degli edifici.

Inoltre, per la prima volta, introdusse norme per favorire e incentivare la riduzione dei consumi di energia e promuovere l'utilizzo delle fonti di energia rinnovabili nella costruzione e nell'uso degli edifici, nonché nei processi produttivi.

La L.10/91 definiva le fonti di energia rinnovabili, quali il *sole, il vento, l'energia idraulica, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso e la trasformazione dei*

rifiuti organici e inorganici o di prodotti vegetali, e assimilava alle fonti energetiche rinnovabili anche quelle derivanti dai *risparmi di energia conseguibili nella climatizzazione e nell'illuminazione degli edifici con interventi sull'involucro edilizio e sugli impianti* (art. 1 comma 3 della L.10/91).

Altra tappa cruciale nel percorso legislativo, questa volta a livello internazionale, è stata la conferenza ONU tenutasi a Kyoto nel dicembre del 1997, in cui fu firmato l'omonimo Protocollo da parte di 160 Paesi tra cui l'Italia. Nel 2002, la volontà di intraprendere un percorso comune per affrontare il problema del consumo energetico, spinse l'Europa a pubblicare la Direttiva 2002/91/CE "Energy Performance Building Directive" (EPBD). L'intento era quello di descrivere una linea guida che ogni stato membro avrebbe poi declinato a livello nazionale.

In Italia, la Direttiva fu recepita con il DLgs 192/2005 fino ad arrivare alla pubblicazione del DM 26/6/2015, che recepiva la Direttiva 2010/31/CE.

Il Decreto n.192 del 19/08/2005 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia" stabilisce i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.

Disciplina in particolare:

- la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche integrate degli edifici;
- l'applicazione di requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici;
- i criteri generali per la certificazione energetica degli edifici;
- le ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione;
- la promozione dell'uso razionale dell'energia anche attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali, la formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore.

Il contenuto di questo decreto è stato poi modificato e integrato dal **D.lgs. n. 311 del 29/12/2006**, "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo n. 192 del 2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/UE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia", pubblicato sulla Gazzetta ufficiale il 1 febbraio 2007.

Il Decreto contribuisce al conseguimento degli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto e promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.

Il Decreto fissa i valori limite di prestazione energetica per la climatizzazione invernale per tre scadenze temporali (2006, 2008, 2010), utilizzando valori progressivamente più limitativi, in funzione della forma dell'edificio e delle specifiche zone climatiche; è così che si definisce il parametro principale, l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (E_{Pi}), che esprime il consumo di energia primaria totale riferito all'unità di superficie utile o di volume lordo, espresso rispettivamente in kWh/m² anno o kWh/m³ anno.

I valori limite di E_{Pi} sono espressi in funzione della zona climatica e del rapporto di forma dell'edificio S/V, dove:

- S (m²) è la superficie che delimita verso l'esterno, ovvero verso ambienti non dotati di impianti di riscaldamento, il volume riscaldato V;
- V (m³) è il volume lordo, delle parti di edificio riscaldate, definito dalle superfici che lo delimitano;
- per valori S/V compresi nell'intervallo 0,2 - 0,9 e, analogamente, per gradi giorno (GG) intermedi ai limiti delle zone climatiche riportati in tabella, si procede mediante interpolazione lineare.

Sempre negli Allegati della norma, sono riportati i valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache verticali, orizzontali e trasparenti dell'involucro, differenziati per zone climatiche e soglie temporali (2006, 2008, 2010). Da questi due concetti si definiscono, poi, le metodologie per certificare energeticamente gli edifici.

Per valori S/V compresi nell'intervallo 0,2 - 0,9 e, analogamente, per gradi giorno intermedi ai limiti delle zone climatiche riportati in tabella, si procede mediante interpolazione lineare.

L'attuazione completa del D.lgs. n.192/05 prevede la pubblicazione di ulteriori decreti attuativi entro 120 giorni, a completamento del quadro normativo sui seguenti temi:

- criteri di calcolo e requisiti minimi per gli impianti;
- criteri generali di prestazione energetica per l'edilizia convenzionata, pubblica e privata;
- requisiti professionali e di accreditamento per la certificazione.

Parallelamente, la legislazione europea continua a dettare le regole con la **Direttiva 31/2010/CE**. I principi contenuti sono:

- il rafforzamento del ruolo della certificazione energetica degli edifici;
- produzione e consegna del certificato energetico al proprietario e al conduttore in caso di nuove costruzioni o nei trasferimenti immobiliari nel caso di nuovi contratti di affitto;

- obbligo di certificazione degli edifici pubblici o a uso pubblico esteso anche agli immobili di superficie utile maggiore di 500 m² (dopo cinque anni: 250 m²);
- obbligo di pubblicazione della prestazione energetica già negli annunci commerciali di vendita e di locazione.

Sempre l'Europa, con la **Direttiva 2012/27/UE** sull'Efficienza Energetica, stabilisce un quadro comune di misure per la promozione dell'efficienza energetica nell'Unione, al fine di garantire il conseguimento dell'obiettivo principale secondo tempi prefissati, gettando le basi per ulteriori miglioramenti dell'efficienza energetica al di là di tale data. Infatti, gli obiettivi di riduzione dei consumi energetici del 20%, prefissati entro il 2020 con il cosiddetto “pacchetto clima-energia 20/20/20”, sono ancora lontani.

Un ulteriore step decisivo nella legislazione italiana si ha il 26 giugno 2015 con l'emanazione di tre nuovi decreti inerenti l'efficienza energetica degli edifici che hanno modificato le modalità di calcolo delle prestazioni energetiche introducendo al contempo nuovi e più restrittivi requisiti minimi di efficienza per gli edifici nuovi e per quelli sottoposti a ristrutturazione.

1. Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015 - “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”;

2. Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015 - “Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici”;

3. Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015 - “Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici”.

I decreti introducono un'importante novità in merito al calcolo degli indici di prestazione energetica da rispettare in merito alla prestazione invernale dell'involucro, a quella estiva e alla prestazione globale.

Tali indici vengono calcolati con il *metodo dell'edificio di riferimento* e non più imposti in base alla zona climatica e al rapporto S/V. Viene definito edificio di riferimento o target per un edificio sottoposto a verifica, diagnosi o altra valutazione energetica, un edificio identico in termini di geometria, orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno, e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati (Appendice A, Allegato 1, Capitolo 3). Con edificio di riferimento si intende quindi un edificio avente un fabbricato di riferimento e degli impianti tecnici di riferimento. Per tutti i dati di input e i parametri

non definiti dalla normativa, si utilizzano i valori dell'edificio reale. Gli indici di fabbisogno energetico limite saranno quelli calcolati imponendo al proprio edificio i parametri tecnici di riferimento (trasmittanze, rendimenti, ecc) indicati nelle tabelle della norma. Tra gli indici da verificare secondo il metodo dell'edificio di riferimento ci sono: la prestazione termica utile per il riscaldamento $EP_{H,nd}$, prestazione termica utile per il raffrescamento $EP_{C,nd}$, prestazione energetica globale dell'edificio $EP_{gl,tot}$. In particolare, quest'ultimo parametro introdotto rappresenta la somma di vari indici derivanti sia da rinnovabile che non rinnovabile:

$$EP_{gl,tot} = EP_H + EP_W + EP_V + EP_C + EP_L + EP_T \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (1)$$

Nella somma troviamo: gli indici di prestazione energetica per climatizzazione invernale (EP_H), climatizzazione estiva (EP_C), produzione di acqua calda sanitaria (EP_W), ventilazione (EP_V), illuminazione artificiale (EP_L) e trasporto di persone (EP_T).

I decreti riportano, inoltre, tutti i parametri relativi all'involucro, definendo i valori delle trasmittanze di riferimento delle strutture (comprehensive di incidenza del ponte termico) da utilizzare nel calcolo degli indici di prestazione energetica limite per quello specifico edificio divise per data di entrata in vigore: 1° ottobre 2015, 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici e infine 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici. Le tabelle sono diversificate a seconda che si tratti di un nuovo edificio (Appendice A) o un edificio esistente soggetto a riqualificazione energetica (Appendice B).

Sempre in relazione all'involucro, ulteriori verifiche sono a carico dell'inerzia termica delle strutture opache. Le verifiche da effettuare (ad esclusione della zona F) per le località in cui l'irradianza ($I_{m,s}$) sul piano orizzontale nel mese di maggiore insolazione sia $\geq 290 \text{ W/m}^2$ sono:

- Per le pareti opache verticali (escluse quelle nel quadrante Nord-ovest/Nord/Nord-est) sia rispettata almeno una delle seguenti condizioni:
 - a. $M_s > 230 \text{ kg/m}^2$;
 - b. $Y_{IE} < 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Per tutte le pareti opache orizzontali e inclinate, che:
 - a. $Y_{IE} < 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Dove:

M_s rappresenta la massa superficiale della parete opaca compresa la malta giunti ed esclusi gli intonaci [kg/m^2];

Y_{IE} rappresenta la trasmittanza termica periodica valutata in accordo alla UNI 13786:2008 e successivi aggiornamenti [$\text{W/m}^2\text{K}$].

Per quanto concerne il controllo estivo sulle coperture, la normativa introduce l'obbligo della verifica sull'efficacia in termini di rapporto costi-benefici, dell'utilizzo di:

- Materiali a elevata riflettanza solare per le coperture (cool roof), assumendo per questi ultimi un valore di riflettanza solare non inferiore a:
 - 0,65 nel caso di coperture piane;
 - 0,30 nel caso di copertura a falde.
- Tecnologie di climatizzazione passiva (ventilazione, coperture verdi, ecc).

Con il **Decreto 11 gennaio 2017** "Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili" (GU Serie Generale n.23 del 28-1-2017), l'Italia ha introdotto i nuovi criteri ambientali minimi (CAM) per l'edilizia. Già il DLgs n.50/2016 sull'aggiudicazione dei contratti di concessione sugli appalti pubblici, stabiliva l'introduzione obbligatoria dei criteri minimi ambientali nei documenti progettuali e di gara per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione degli edifici pubblici. Nel dettaglio, al punto 2.4.2 *Criteri specifici per i componenti edilizi*, allo scopo di ridurre l'impiego di risorse non rinnovabili e di aumentare il riciclo dei rifiuti, con particolare riguardo ai rifiuti da demolizione e costruzione (coerentemente con l'obiettivo di recuperare e riciclare entro il 2020 almeno il 70% dei rifiuti non pericolosi da costruzione e demolizione), il progetto deve prevedere l'uso di materiali come specificato nei successivi paragrafi della normativa. In particolare, tutti i seguenti materiali devono essere prodotti con un determinato contenuto di riciclato. Al paragrafo 2.4.2.8 *Isolanti termici ed acustici*, viene specificato quali sono i criteri che gli isolanti devono rispettare:

- non devono essere prodotti utilizzando ritardanti di fiamma che siano oggetto di restrizioni o proibizioni previste da normative nazionali o comunitarie applicabili;
- non devono essere prodotti con agenti espandenti con un potenziale di riduzione dell'ozono superiore a zero;
- non devono essere prodotti o formulati utilizzando catalizzatori al piombo quando spruzzati o nel corso della formazione della schiuma di plastica;
- se prodotti da una resina di polistirene espandibile gli agenti espandenti devono essere inferiori al 6% del peso del prodotto finito;
- se costituiti da lane minerali, queste devono essere conformi alla Nota Q o alla Nota R di cui al regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) e s.m.i.29;

- il prodotto finito deve contenere le seguenti quantità minime di materiale riciclato e/o recuperato da pre consumo, (intendendosi per quantità minima la somma dei due), misurato sul peso del prodotto finito (**Fig.2**).

Materiali	Isolante in forma di pannello	Isolante stipato, a spruzzo/insufflato	Isolante in materassini
Cellulosa		80%	
Lana di vetro	60%	60%	60%
Lana di roccia	15%	15%	15%
Perlite espansa	30%	40%	8% - 10%
Fibre di poliestere	60% - 80%		60% - 80%
Polistirene espanso	Dal 10% al 60% in funzione della tecnologia adottata per la produzione.	Dal 10% al 60% in funzione della tecnologia adottata per la produzione.	
Polistirene estruso	Dal 5% al 45% in funzione della tipologia del prodotto e della tecnologia adottata per la produzione.		
Poliuretano espanso	Dal 5% al 45% in funzione della tipologia del prodotto e della tecnologia adottata per la produzione.	Dal 5% al 45% in funzione della tipologia del prodotto e della tecnologia adottata per la produzione.	
Isolante riflettente in alluminio			15%

Fig.2 – Quantità minime di materiale riciclato e/o recuperato da pre consumo in %.

Per tornare invece al *singolo edificio* i criteri da rispettare sono i seguenti:

- Diagnosi energetica, p.to 2.3.1
- Prestazione energetica, p.to 2.3.2
- Approvvigionamento energetico, p.to 2.3.3
- Risparmio idrico, p.to 2.3.4
- Qualità ambientale interna, p.to 2.3.5 e sottopunti
- Piano di manutenzione dell'opera/ piano di gestione, p.to 2.3.6
- Fine vita, p.to 2.3.

Nel dettaglio, il p.to 2.3.2 *Prestazione energetica*, i progetti degli interventi di nuova costruzione, inclusi gli interventi di demolizione e ricostruzione e quelli di ampliamento di edifici esistenti che abbiano un volume lordo climatizzato superiore al 15% di quello esistente o comunque superiore a 500 m³, e degli interventi di ristrutturazione importante di primo livello, devono garantire le seguenti prestazioni:

- L'indice di prestazione energetica globale $EP_{gl,n,ren}$ deve corrispondere almeno alla classe A3;
- La *capacità termica areica interna periodica* (C_{ip}) riferita ad ogni singola struttura opaca dell'involucro esterno, calcolata secondo la UNI EN ISO 13786:2008, deve avere un valore di almeno 40 kJ/m²K.

I progetti degli interventi di ristrutturazione importante di secondo livello e di riqualificazione energetica riguardanti l'involucro edilizio devono comunque rispettare i valori minimi di trasmittanza termica contenuti nelle tabelle 1 - 4 di cui all'appendice B del DM 26 Giugno 2015 e s.m.i, relativamente all'anno 2021. In caso di interventi che prevedano l'isolamento termico dall'interno o l'isolamento termico in intercapedine, indipendentemente dall'entità della superficie coinvolta, deve essere mantenuta la capacità termica areica interna periodica dell'involucro esterno precedente all'intervento. (Verificare in parallelo il rispetto di quanto prescritto dai criteri 2.3.5.2 e 2.3.5.7)

In merito ai requisiti CAM, alcuni di questi criteri interessano da vicino la progettazione dell'edificio e l'intervento dal punto di vista estivo. Sintetizzando, gli aspetti connessi alle prestazioni estive possono essere così elencate:

- Capacità termica areica interna;
- Dispositivi di protezione solare dei serramenti;
- Indice di riflessione solare (SRI) delle strutture opache;
- Comfort termo igrometrico degli ambienti interni.
- *Capacità termica areica interna* [kJ/m²K] definita nella UNI EN ISO 13786 come il "modulo della conduttanza termica periodica netta diviso per la

frequenza angolare”. Rappresenta il rapporto tra la variazione di energia accumulata per unità di superficie in un componente nel periodo di tempo e la sollecitazione termica periodica interna nell’ipotesi che la temperatura ambiente sul lato esterno resti costante.

- *Dispositivi di protezione solare.* Al fine di controllare l’immissione nell’ambiente interno di radiazione solare diretta, le parti trasparenti esterne degli edifici sia verticali che inclinate, devono essere dotate di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento fissi o mobili verso l’esterno e con esposizione da Sud-Sud Est (SSE) a Sud-Sud Ovest (SSO). Per i dispositivi di protezione solare di chiusure trasparenti dell’involucro edilizio è richiesta una prestazione di schermatura solare di classe 2 o superiore come definito dalla norma UNI EN 14501:2006. Il requisito va verificato dalle ore 10 alle ore 16 del 21 dicembre (ora solare) per il periodo invernale (solstizio invernale) e del 21 giugno per il periodo estivo (solstizio estivo).
- *Indice di riflessione solare per le superfici opache.* L’SRI (Solar Reflectance Index) è un indice che tiene conto dell’emissività e della capacità di riflessione solare di una superficie. Descrive in sostanza la proprietà di una superficie di “non riscaldarsi” se sottoposta alla radiazione solare. Viene espressa in %, valore che può essere superiore a 100 per il sovrapporsi dei due effetti di alta riflessione solare e alta emissività. Per le coperture deve essere privilegiato l’impiego di coperture a tetto giardino (verdi); in caso di coperture non verdi, i materiali impiegati devono garantire un indice SRI di almeno 29, nei casi di pendenza maggiore del 15%, e di almeno 76, per le coperture con pendenza minore o uguale al 15%.
- *Comfort termoigrometrico.* Al fine di assicurare le condizioni ottimali di benessere termo-igrometrico e di qualità dell’aria interna bisogna garantire condizioni conformi almeno alla classe B secondo la norma ISO 7730:2005 in termini di PMV (Voto Medio Previsto) e di PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti). Inoltre, bisogna garantire la conformità ai requisiti previsti nella norma UNI EN 13788 ai sensi del DM 26 giugno 2015 anche in riferimento a tutti i ponti termici sia per edifici nuovi che per edifici esistenti.

2.1.2 Meccanismi di trasmissione del calore

2.1.2.1 Comportamento invernale

Se prendiamo in considerazione il comportamento invernale di un edificio, questo sarà governato da meccanismi di scambio del calore con l’ambiente esterno: la comprensione di questi meccanismi è la chiave per una corretta progettazione della prestazione energetica invernale. Come sappiamo, il calore si muove da un sistema

a temperatura più alta verso uno a temperatura minore e il fenomeno si esaurisce solo quando i due sistemi sono in equilibrio e avranno raggiunto la stessa temperatura. Ci troveremo pertanto in una condizione dove non avviene alcuno scambio di energia: ovvero un sistema adiabatico. Nella realtà nessun sistema si può definire adiabatico, ma si può procedere per approssimazione ritenendo un sistema adiabatico quando il calore viene trasmesso così lentamente da poter essere approssimato a zero il flusso termico. Al contrario, un sistema che scambia energia con sistemi confinati può trasmettere calore secondo tre differenti modalità: conduzione, convezione e irraggiamento.

La valutazione del comportamento energetico di un edificio è molto complessa ma può essere semplificata attraverso un modello semi stazionario medio mensile (2) che schematizza il bilancio energetico di un edificio (UNI/TS 11300). Infatti, l'energia dissipata attraverso l'involucro dipenderà da un complesso mix di scambi termici e meccanismi di trasmissione del calore che interagiscono e si sovrappongono tra loro:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \times (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (2)$$

Dove:

$Q_{H,nd}$ è il fabbisogno di energia termica dell'edificio necessario per mantenere la temperatura di progetto durante il periodo di riscaldamento;

$Q_{H,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione;

$Q_{H,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione;

$\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti energetici gratuiti;

Q_{int} rappresenta gli apporti gratuiti interni;

Q_{sol} rappresenta gli apporti gratuiti solari.

Il bilancio energetico dell'involucro edilizio include quindi dei parametri in uscita e in ingresso:

- in uscita:
 - dispersioni termiche per trasmissione dall'ambiente interno riscaldato verso quello esterno o verso spazi non riscaldati ($Q_{H,tr}$),
 - dispersioni termiche per infiltrazioni e/o ventilazione dell'ambiente interno riscaldato verso quello esterno o verso spazi non riscaldati ($Q_{H,ve}$);
- in ingresso:
 - apporti di calore fornito dal sistema di riscaldamento ($Q_{H,nd}$),

- apporti di calore gratuiti dovuti alle sorgenti interne (Q_{int}),
- apporti di calore gratuiti legati alla radiazione solare (Q_{sol}).

In questo bilancio energetico, nella maggior parte dei casi, la rilevanza maggiore è attribuibile alle perdite per trasmissione ($Q_{H,tr}$): di conseguenza limitare i consumi energetici vuol dire, in primis, progettare e controllare le dispersioni dell'involucro. Le dispersioni per trasmissione sono legate ai seguenti parametri: trasmittanza termica delle strutture, dall'ampiezza della superficie delle strutture stesse (superficie di scambio), dal salto termico tra interno ed esterno e dalla durata temporale considerata. Considerando che per questi due ultimi parametri le normative stabiliscono delle convenzioni standardizzate, l'attenzione progettuale deve essere rivolta alla *trasmittanza termica* e alle *superfici disperdenti*.

Un involucro efficiente sarà quindi quello in grado di governare infiltrazioni, correggere i ponti termici, adottare trattamenti superficiali efficaci e soprattutto adottare un buon isolamento termico.

2.1.2.2 Comportamento estivo

Come abbiamo potuto vedere nel precedente paragrafo, nella formula (1), l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio $EP_{gl,tot}$ contiene il contributo di EP_C ovvero l'indice di prestazione energetica di raffrescamento. Questo parametro è calcolato come il rapporto tra il fabbisogno ideale di energia termica per il raffrescamento dell'edificio $Q_{C,nd}$ e la superficie utile dell'edificio stesso:

$$EP_{C,nd} = \frac{Q_{C,nd}}{A_{sup,utile}} \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (3)$$

Anche nel caso estivo, il valore di $EP_{C,nd}$ è il risultato di un calcolo condotto sull'edificio di riferimento così come previsto dal DM 26/6/2015.

Sulle verifiche inerziali dell'involucro opaco, il legislatore si concentra su due principali parametri: Y_{IE} e M_s . In realtà, le normative tecniche come la UNI EN ISO 13786 e la UNI 10375 introducono anche i parametri di sfasamento (φ) e attenuazione (f_a).

Secondo la UNI EN ISO 13786, la definizione di *trasmittanza termica periodica* passa attraverso il concetto di *ammittenza* e la definisce come l'ampiezza complessa della massa volumica di flusso termico attraverso la superficie del componente adiacente alla zona m, diviso l'ampiezza complessa della temperatura nella zona n quando la temperatura nella zona m è mantenuta costante. Il flusso termico è definito positivo quando è diretto verso la superficie del componente.

Nel caso in cui la zona m sia l'ambiente esterno e la zona n quello interno dell'edificio, l'ammittenza prende il nome di *trasmissione termica periodica* Y_{IE} (periodic thermal transmittance) dove il pedice "IE" sta per "interno-esterno". Semplificando, la trasmissione termica periodica mette in relazione la variazione del flusso termico sulla superficie esterna del componente edilizio con la conseguente variazione di temperatura sul suo lato interno. Ne consegue che, dal punto di vista estivo, numericamente il valore di Y_{IE} riferito ad una parete, deve essere quanto più basso.

Il *fattore di decremento o di attenuazione* f_a (decrement factor), è definito dalla norma come il rapporto tra il modulo della trasmissione termica periodica e la trasmissione termica in condizioni stazionarie U . Essendo il rapporto tra due grandezze misurate in W/m^2K , questo parametro è un numero adimensionale.

Lo *sfasamento dell'onda termica* φ (time shift) è definito come il periodo di tempo tra l'ampiezza massima di una causa e la massima ampiezza dei suoi effetti, dove la causa è la variazione di temperatura superficiale sul lato esterno e l'effetto è la conseguente variazione sul lato interno.

Come abbiamo visto precedentemente nel comportamento invernale, una struttura viene considerata soggetta a condizioni stazionarie ed è attraversata da un flusso termico costante in ogni punto della stratigrafia. Questa condizione fa dipendere l'andamento della temperatura solo dai parametri della conducibilità dei materiali e dal loro spessore, rispetto alla direzione del flusso. Il comportamento termico è caratterizzato dalla grandezza fisica U , la trasmissione termica, definita come un flusso (q) per unità di superficie e per unità di differenza di temperatura (ΔT), dove quest'ultima è la differenza tra le temperature dell'ambiente sui due lati della struttura in esame.

Nella realtà, al contrario, ci si trova solitamente in un regime dinamico, con condizioni al contorno variabili nel tempo. Il flusso termico varia all'interno della struttura e la distribuzione sia di flusso che di temperatura sono legati all'inerzia termica dei materiali, ovvero dalla loro capacità di immagazzinare calore per poi rilasciarlo in un secondo momento. Infatti, una struttura sottoposta a una sollecitazione esterna reagirà con un certo ritardo poiché la variazione di temperatura non avviene in modo istantaneo, ma ha bisogno di un certo tempo per accumulare energia e per poi rilasciarla. Questi meccanismi sono collegati all'inerzia della struttura e acquistano una notevole rilevanza in particolare nel periodo estivo durante il quale si verificano grandi variazioni della temperatura esterna nell'arco delle 24 ore. Oltre ai parametri descritti precedentemente di *trasmissione termica periodica* Y_{IE} , *fattore di attenuazione* f_a e *sfasamento dell'onda termica* φ , un altro fattore è altrettanto importante: *la capacità termica areica* (C_{ip}).

Questo parametro è definito come il rapporto tra la variazione di energia accumulata per unità di superficie nel periodo di tempo e la sollecitazione termica periodica su un lato, nell'ipotesi che la temperatura ambiente sull'altro lato del componente sia costante. A seconda che si consideri la sollecitazione termica sul lato interno o esterno, si parla di capacità termica areica interna o esterna.

La *capacità termica areica interna/esterna* non è da confondere con la capacità termica della struttura: quest'ultima rappresenta la sommatoria delle capacità termiche di ogni singolo strato che compone la struttura in esame, pertanto è un parametro che rimane costante una volta definiti i materiali che compongono l'elemento costruttivo. Se invece, facciamo riferimento ad esempio alla capacità termica interna periodica, è un parametro funzionale alla descrizione di come i primi strati di materiale reagiscono alle sollecitazioni energetiche sulla superficie interna presa in considerazione. Si tratta di un parametro che è funzione della profondità di penetrazione dell'onda termica e che descrive la capacità effettiva di accumulare del calore sul lato interno di un componente edilizio.

Questo indice rappresenta lo spessore della massa termica interna (o esterna) che, realmente, contribuisce a ridurre le temperature superficiali interne (o esterne) ed attenuare la temperatura operante interna. Le pareti migliori sono quelle con capacità termica areica interna elevata e tanto maggiori sono i carichi interni tanto più importante sarà fissare un alto valore di C_{ip} . Diversi studi hanno dimostrato che un buon equilibrio tra i valori di capacità termica periodica interna e trasmittanza termica periodica può offrire ottimi risultati in termini di comfort abitativo in regime estivo.

2.2 I materiali isolanti: definizione e classificazione

L'involucro edilizio è quel componente architettonico che delimita e conclude perimetralmente l'elemento costruttivo e strutturale rappresentandone la "frontiera" e che ha la funzione di mediare, separare e connettere l'interno con l'esterno. Tra le molte prestazioni che l'involucro deve soddisfare, sicuramente i compiti principali riguardano sia la necessità di garantire il comfort termico e igrometrico degli ambienti, sia il contenimento dei consumi energetici mediante:

- il mantenimento della temperatura dell'aria interna entro i limiti di normativa;
- il controllo dei fenomeni di condensa superficiale e interstiziale;
- il controllo della combinazione tra temperatura – umidità – ventilazione;
- la resistenza termica e l'inerzia ai fini del risparmio energetico e del comfort ambientale interno.

In particolare, se associamo al significato di *involucro* il concetto di *parete*, possiamo identificare dei parametri fondamentali che concorrono ad una buona progettazione energetica e che dobbiamo conoscere per ciascun materiale impiegato:

- conducibilità termica
- densità
- capacità termica
- calore specifico
- coefficiente di assorbimento della radiazione solare
- controllo solare (fattore di schermatura).

Il principale parametro che descrive la capacità isolante di un materiale è la conducibilità termica λ e sulla base di questo parametro possiamo definire i materiali:

- isolanti, con $\lambda < 0,065$ W/mK
- debolmente isolanti, con $0,065$ W/mK $< \lambda < 0,090$ W/mK
- non isolanti, con $\lambda > 0,090$ W/mK.

Inoltre, possiamo classificarli in base a tre caratteristiche (vedi anche **Fig. 3**):

1. struttura del materiale
2. processo di trasformazione
3. tipologia di derivazione delle materie prime.

Analizziamo ora, in maniera più dettagliata, ciascun punto sopra elencato.

Analizzando la struttura solida di un materiale possiamo distinguere cavità, canali o interstizi. In base a queste diverse configurazioni microscopiche, possiamo classificare i materiali in: *cellulari*, *fibrosi* e *porosi*.

I materiali cellulari sono caratterizzati dalla presenza di elementi chiusi (come cellule) che trattengono l'aria al loro interno rendendoli molto leggeri e molto isolanti. A questa categoria appartengono sia materiali organici di origine naturale come il sughero (naturale ed espanso), sia materiali organici di origine sintetica come il polistirene, il poliuretano, il vetro cellulare, resine melamminiche ed altri.

I materiali fibrosi presentano un reticolo di fibre, naturali o artificiali, che permette di trattenere aria all'interno del materiale stesso. Appartengono a questa categoria la lana di vetro, lana di roccia, fibre di legno, fibre di poliestere ed altri.

I materiali porosi sono invece caratterizzati da una struttura fatta di cavità e cunicoli che garantisce che l'aria rimanga all'interno permettendo un buon livello di isolamento e di leggerezza. Appartengono a questa categoria materiali come l'argilla espansa, la vermiculite, la pomice, la perlite espansa, il cemento cellulare ed altri.

La classificazione riferita alla natura delle materie prime utilizzate per la produzione del materiale isolante ci fa distinguere tra prodotti organici (mondo vegetale) e inorganici (mondo minerale). Tra i materiali organici ricadono tutti i materiali che

derivano dalla raffinazione del petrolio. Ultimo criterio è quello relativo al livello di “sostanzializzazione” nel processo di trasformazione delle materie prime, distinguendo tra prodotti naturali e prodotti sintetici.

Struttura del materiale	Processo di trasformazione	Tipologie delle materie prime	Elenco materiali isolanti
FIBROSI	Naturali	Organici	Fibra di cocco, di legno, di canapa, lana di legno, di pecora, fibra di cellulosa
		Inorganici	--
	Sintetici	Organici	Fibra di poliestere
		Inorganici	Fibra di vetro, di roccia, di ceramica
CELLULARI	Naturali	Organici	Sughero
		Inorganici	--
	Sintetici	Organici	Eps, xps, pur, pir, pht, resine fenoliche, PNT, elastomeri espansi
		Inorganici	Vetro cellulare
POROSI	Naturali	Organici	--
		Inorganici	Pomice, argilla espansa, vermiculite, perlite
	Sintetici	Organici	--
		Inorganici	Calcio silicato, cemento cellulare

Fig.3 – Classificazione dei materiali isolanti (Fonte ANIT).

Come affermato inizialmente, la conducibilità termica è ciò che caratterizza e classifica un materiale isolante poiché è quel parametro fisico che misura l'attitudine

di un materiale a lasciarsi attraversare dal calore. Materiali con un valore elevato di conducibilità sono definiti “buoni” conduttori, mentre quelli con un basso valore di λ sono definiti “cattivi” conduttori e perciò con buone proprietà isolanti.

La conduttività termica di un materiale è in realtà data dalla sommatoria dei tre meccanismi di trasmissione del calore: conduzione, convezione e irraggiamento. Infatti, questi meccanismi non operano singolarmente ma agiscono contemporaneamente ed è possibile osservarli a livello macroscopico all’interno di un materiale. Bisognerebbe parlare quindi di *conduttività apparente* visto che il calore migra sfruttando anche vie convettive e radiative oltreché conduttive (**Fig. 4**).

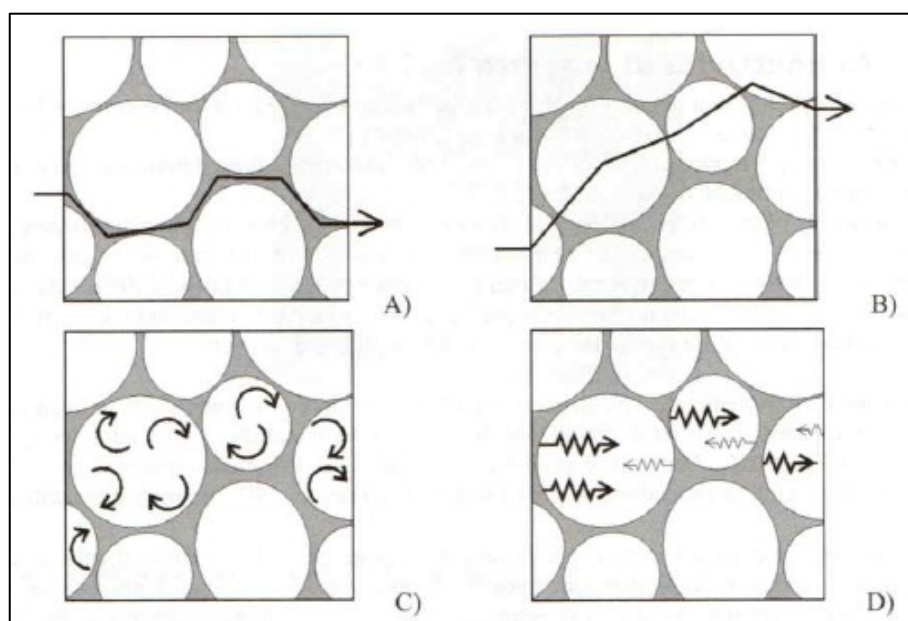


Fig.4 – Meccanismi di trasmissione del calore: esempio di trasmissione all’interno di un termointonaco. A) conduzione attraverso la matrice del legante; B) conduzione attraverso le molecole d’aria intrappolate nelle bolle di porosità o negli aggregati leggeri; C) convezione nell’aria intrappolata; D) irraggiamento tra le pareti degli spazi vuoti. (Fonte ANIT)

Sperimentalmente è stata dimostrata la correlazione tra la conduttività apparente e la densità dei materiali per tutti i meccanismi di trasmissione: nei materiali a bassa densità prevalgono il contributo radiativo e convettivo, mentre nei materiali ad alta densità prevale il meccanismo conduttivo della fase solida. Inoltre, si evidenzia che per materiali a bassa densità piccole variazioni della stessa producono notevoli variazioni della conduttività. L’unico elemento per il quale la conduttività rimane

invariata è nella fase aeriforme, per cui il valore rimane costante e pari a un valore che dipende dal tipo di gas intrappolato nel materiale (nelle bolle, tra le fibre o negli aggregati leggeri). Un'ottima soluzione a basso costo per incrementare le performance isolanti di un prodotto è inglobare aria immobilizzata, la quale ha una conduttività pari a circa 0,026 W/mK (**Fig. 5**).

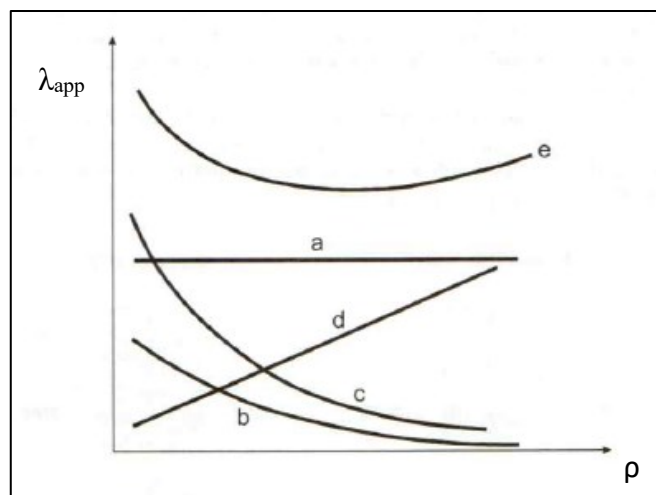


Fig.5 – Grafico di correlazione tra conduttività apparente e densità di un materiale. La risultante macroscopica combina l'effetto microscopico dei diversi meccanismi di trasmissione del calore: a) conduzione attraverso l'aria; b) convezione nei fluidi presenti; c) irraggiamento tra gli spazi interstiziali microscopici; d) conduzione attraverso le parti solide; e) trasmissione complessiva attraverso il materiale. (Fonte ANIT)

2.3 Conducibilità termica λ e normativa di riferimento

Prima di proseguire entrando nel dettaglio della sperimentazione condotta sui materiali isolanti, è bene precisare la normativa di riferimento e i parametri che influenzano il valore di conducibilità termica di un materiale.

Ogni struttura opaca è caratterizzata da un valore di trasmittanza termica stazionaria U [W/m^2K], parametro a sua volta definito come l'inverso della somma delle resistenze termiche degli strati che costituiscono la struttura (4):

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + R_{se}} \quad (4)$$

Dove:

R_{si} è la resistenza termica superficiale interna [m^2K/W];

d/λ è la resistenza termica di uno strato di materiale omogeneo in [m^2K/W];

R_n è la resistenza termica di uno strato non omogeneo [m^2K/W];

R_a è la resistenza termica di un'intercapedine d'aria [m^2K/W];

R_{se} è la resistenza termica superficiale esterna [m^2K/W].

Osservando i termini che compongono la formula (4), possiamo capire come i materiali isolanti hanno un ruolo fondamentale per abbattere il valore di trasmittanza termica di una struttura edilizia. In particolare, il valore di conduttività termica a cui si fa riferimento in (4) è definito come “conduttività di progetto” (in inglese “design thermal conductivity”) e indicato semplicemente con λ . Questo parametro si riferisce al valore di un determinato materiale nelle condizioni tipiche di esercizio, ovvero quando il prodotto è incorporato in una struttura edilizia.

Perciò il progettista deve conoscere in partenza quali saranno le condizioni di esercizio a cui il materiale sarà sottoposto una volta messo in opera e dovrà verificare che quanto dichiarato (“conduttività dichiarata λ_D ”) dal produttore in scheda tecnica corrisponda alle reali condizioni di esercizio. Se le condizioni di temperatura e umidità sono differenti, dovrà modificare il valore dichiarato e trasformarlo in valore di progetto.

La normativa di riferimento, che fornisce il procedimento di trasformazione del valore di conduttività termica di un materiale isolante da un set di condizioni di umidità e temperatura a un altro set, è la UNI EN ISO 10456 “Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto”.

La norma specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati (λ_D) e di progetto (λ) per materiali e prodotti per l'edilizia termicamente omogenei. Fornisce inoltre i procedimenti per convertire i valori ottenuti per un insieme di condizioni in quelli validi per un altro insieme di condizioni. Questi procedimenti sono validi per temperature ambiente di progetto comprese tra -30 °C e $+60\text{ °C}$. La norma fornisce coefficienti di conversione per temperatura e umidità: tali coefficienti sono validi per temperature medie tra 0 °C e 30 °C . Fornisce inoltre valori di progetto tabulati che possono essere utilizzati nei calcoli di trasferimento di calore e umidità

per materiali termicamente omogenei e prodotti comunemente utilizzati nella costruzione degli edifici.

Generalmente i valori di conduttività di progetto utilizzati in condizioni standard sono riferiti a una temperatura di 10°C. Ad esempio, in accordo con le norme di prodotto per la valutazione della conduttività termica in laboratorio, la norma UNI EN 12667, stabilisce che i materiali isolanti vengano testati a 10°C di temperatura media, cioè con una differenza applicata alle facce dei campioni di $\Delta T=20^\circ\text{C}$.

La UNI EN ISO 10456 chiarisce quali sono i set di condizioni per cui un valore di conduttività termica dichiarato è ammissibile ed evitare poi di ricorrere a conversioni (**Tab. 1**). Sempre nella normativa appena citata, la conduttività dichiarata è definita come “valore di conduttività rappresentativo di una determinata percentuale della produzione e con un determinato livello di confidenza. Il valore ricavato a partire da una serie di misure effettuate in condizioni standard di temperatura e umidità e corrisponde a un livello prestazionale ragionevolmente atteso per la vita d’esercizio del prodotto in normali condizioni di esercizio”. Ne consegue che il valore da calcolare λ_D deve corrispondere al $\lambda_{90/90}$ ovvero un valore con un frattile al 90% e una confidenza al 90%.

Property	Sets of conditions			
	I (10°C)		II (23°C)	
	a)	b)	a)	b)
Reference temperature	10°C	10°C	23°C	23°C
Moisture	u_{dry}^a	$u_{23,50}^b$	u_{dry}^a	$u_{23,50}^b$
Ageing	aged	aged	aged	aged
a u_{dry} is a low moisture content reached by drying according to specifications or standards for the material concerned. b $u_{23,50}$ is the moisture content when in equilibrium with the air at 23°C and relative humidity of 50%.				

Tab.1 – Tabella relativa ai set di condizioni ammessi per il valore di conduttività termica dichiarato λ_D . Due sono le temperature di riferimento: 10°C oppure 23°C (Fonte UNI EN ISO 10456).

Una volta calcolato il nostro λ_D e verificato che sia congruente con quello di progetto, possiamo ritenere che questo valore rimanga immutato per tutto il tempo

della sua vita utile? In realtà la conduttività termica è influenzata da diversi fattori e i principali sono:

- Temperatura
- Umidità
- Spessore e densità
- Invecchiamento.

In particolare, se l'insieme delle condizioni per i valori dichiarati, misurati o tabulati dalla norma è ritenuto coerente e rilevante per l'applicazione reale (valore di progetto), tali valori possono essere utilizzati tal quali come valori di progetto. Altrimenti deve essere effettuata una conversione dei dati secondo quanto riportato dalla UNI EN ISO 10456.

Le conversioni dei valori termici da un insieme di condizioni (λ_1, R_1) ad un'altra serie di condizioni (λ_2, R_2) devono essere effettuate secondo le seguenti espressioni che tengono conto di alcuni dei parametri d'influenza elencati precedentemente:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times F_T \times F_m \times F_a \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T \times F_m \times F_a} \quad (6)$$

Dove

F_T è il fattore di conversione per la temperatura,

F_m è il fattore di conversione per l'umidità,

F_a è il fattore di conversione per l'invecchiamento.

- La *temperatura*: la conduttività termica è influenzata, come abbiamo visto, dal cambio di temperatura. La normativa indica quindi, le modalità per passare da un valore λ_1 calcolato in condizioni T1 a un valore di λ_2 calcolato in condizioni T2 attraverso un fattore di temperatura F_T .

$$F_T = e^{f_t \times (T_2 - T_1)} \quad (7)$$

Dove

F_T è il fattore di conversione per la temperatura,

f_t è il coefficiente di conversione della temperatura [1/K],

T1 è la temperatura del primo insieme di condizioni.

T2 è la temperatura del secondo insieme di condizioni.

I valori di f_t sono suggeriti dall'Annex A della stessa normativa per ciascuna tipologia di materiale isolante.

- *Umidità*. Una piccola quantità di acqua, inferiore anche del 5% del volume complessivo dell'isolante, provoca un aumento, e quindi un peggioramento, considerevole della conduttività. La perdita di potere coibente di un materiale isolante è dunque in funzione del possibile volume d'acqua assorbito nelle varie situazioni in cui si può trovare una struttura durante la sua vita d'esercizio. Infatti, nelle condizioni di esercizio caratterizzate dalla normale presenza di umidità ambientale, si può osservare che anche con piccole percentuali di umidità in volume è possibile registrare incrementi di conduttività anche fino al 30%. Bisogna valutare con molta attenzione l'utilizzo dei materiali in riferimento alle loro condizioni di esercizio. La norma UNI EN ISO 10456 fornisce le relazioni matematiche per poter passare da un valore λ_1 a λ_2 per differenti condizioni di umidità attraverso il fattore F_m .

La conversione può essere data in massa su massa:

$$F_m = e^{f_u \times (u_2 - u_1)} \quad (8)$$

La conversione può essere data in volume su volume:

$$F_m = e^{f_\psi \times (\psi_2 - \psi_1)} \quad (9)$$

Dove

F_m è il fattore di umidità,

f_u è il coefficiente di conversione per il contenuto di umidità in riferimento alla massa,

f_ψ è il coefficiente di conversione per il contenuto di umidità in riferimento al volume,

u_1 è il contenuto di umidità alla condizione 1 espresso in kg/kg,

u_2 è il contenuto di umidità alla condizione 2 espresso in kg/kg,

ψ_1 è il contenuto di umidità alla condizione 1 espresso in m^3/m^3 ,

ψ_2 è il contenuto di umidità alla condizione 2 espresso in m^3/m^3 .

Materiale	Contenuto di umidità in condizioni standard				Coefficienti di conversione e condizioni di umidità			
	23°C; 50%UR		23°C; 80%UR					
	u kg/kg	ψ m ³ /m ³	u kg/kg	ψ m ³ /m ³	u kg/kg	f_u --	ψ m ³ /m ³	f_ψ --
EPS pannelli		0		0			<0,10	4
EPS in grani		0		0	<0,10			4
XPS pannelli		0		0			<0,10	2,5
Poliuretano rigido		0		0			<0,15	6
Poliuretano schiumato		0		0			<0,15	6
Lana di roccia in pannelli		0		0			<0,15	4
Lana di roccia sfusa		0		0			<0,15	4
Schiuma fenolica		0		0			<0,15	5
Vetro cellulare	0		0		0	0		
Perlite in pannelli	0,02		0,03		0-0,03	0,08		
Sughero in pannelli		0,008		0,011			<0,10	6
Lana di legno in pannelli		0,03	0,05				<0,10	1,8
Fibra di legno in pannelli	0,1		0,16				<0,5	1,4
Fibra di cellulosa sfusa	0,11		0,18		<0,20	0,5		

Tab.2 – Valori f_u e f_ψ da utilizzare nelle formule (8) e (9) per la conversione della conduttività termica per le differenti condizioni di umidità.

- *Spessore e densità* sono due parametri da cui dipende la misura della conduttività termica. In particolare, è stato documentato da letteratura che la dipendenza dallo spessore è tanto più marcata quanto è più bassa la densità del materiale. Per queste ragioni le prove di laboratorio dovrebbero essere

effettuate per valori di spessore del provino commisurati alla densità dello stesso. Infatti, per provini a bassa densità e basso spessore si possono rilevare valori di conducibilità più bassi del reale. Questa dipendenza dalla densità del materiale è riconducibile ai meccanismi di trasmissione del calore che avvengono a livello microscopico, come già osservato nella Fig.5 cap.2.2: al diminuire della densità aumentano i micro-scambi radiativi facendo aumentare la conduttività apparente del materiale.

- *Invecchiamento.* L'invecchiamento dipende dal tipo di materiale, rivestimento, strutture, agenti espandenti, temperatura e spessore del materiale. Non esistono regole semplici per correlare l'invecchiamento nel tempo per un dato materiale. La normativa UNI EN ISO 10456 propone il fattore di invecchiamento F_a ma non propone valori standard di riferimento. Suggerisce di trovare questa informazione all'interno delle norme di prodotto specifiche, ricordando che mediamente la vita utile di esercizio è spesso considerata di 50 anni.

2.4 Le prestazioni estive dei materiali

Il rischio di surriscaldamento estivo degli ambienti interni è una problematica particolarmente importante per i climi mediterranei come il nostro, di conseguenza, la progettazione delle strutture opache si deve confrontare con questa tematica e adottare strategie efficaci. Le indicazioni legislative impongono verifiche riguardanti il contenimento del fabbisogno di raffrescamento $Q_{C,nd}$ e per le strutture opache limiti sulla trasmittanza termica periodica Y_{IE} e sulla massa superficiale M_s . Il presupposto è quello di ridurre l'energia entrante nell'edificio e controllarne il bilancio energetico. Per ridurre la velocità di propagazione dell'onda termica entrante e attenuare la fluttuazione della temperatura giornaliera possono essere impiegati materiali con due principali peculiarità: buone caratteristiche isolanti e buone caratteristiche inerziali. In base alle considerazioni precedentemente esposte, la prescrizione di legge sulla massa superficiale, che indica una massa maggiore di 230 kg/m^2 per le pareti perimetrali esterne, risulta inadeguata o comunque insufficiente.

Se si considera l'analogia idraulica del serbatoio per rappresentare il fabbisogno energetico estivo $Q_{C,nd}$ (**Fig. 6**), il controllo del rischio di surriscaldamento di una struttura può essere ottenuto limitando l'energia entrante rappresentata dagli apporti solari Q_{sol} .

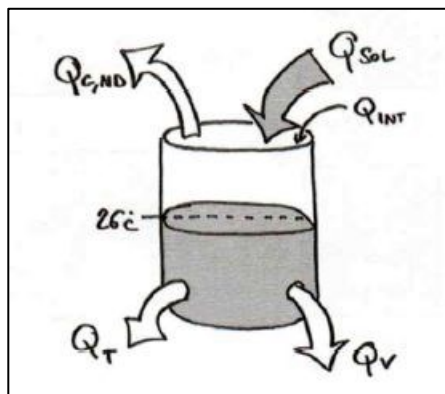


Fig. 6 – Analogia idraulica: il rischio di surriscaldamento passa dal controllo degli apporti solari Q_{sol} . (Fonte ANIT)

A questo dobbiamo aggiungere che non è possibile calcolare l'effettivo fabbisogno energetico di raffrescamento attraverso un'analisi in regime semi stazionario. Infatti, l'uso della media mensile e la semplificazione dei fenomeni dinamici non riescono a descrivere il comportamento medio reale delle oscillazioni dei flussi energetici o dei meccanismi inerziali dell'involucro. Un approccio con un metodo dinamico, che si basa su un arco temporale orario, considera gli effetti inerziali puntuali di accumulo e il rilascio energetico nel tempo di tutte le strutture dell'edificio. In un modello stazionario il dimensionamento dei sistemi e dei componenti avviene in funzione della temperatura esterna di progetto e del profilo di carico del giorno più critico (carico di picco), con il rischio di sovradimensionare gli impianti e di operare in condizioni molto lontane da quelle di ottimo. Nel metodo dinamico la valutazione del comportamento dei sistemi di generazione si esprime al variare del carico termico ed elettrico dell'edificio in funzione di: caratteristiche meteo del sito, disponibilità e costo delle fonti energetiche, comportamento delle utenze (occupanti, illuminazione, apparecchiature, ecc), modalità di gestione degli impianti stessi. In particolare, si parla di profilo orario di carico poiché considera sia il carico di picco che l'andamento generale.

Ipotizziamo il caso di una parete sottoposta a una sollecitazione termica crescente sul lato esterno e costante sul lato interno. Per effetto della sollecitazione, la struttura progressivamente si riscalderebbe fino a uno stato di equilibrio sulle condizioni finali in cui si avrebbe una distribuzione lineare della temperatura tra il valore massimo esterno e quello più basso e fisso interno. La velocità con cui la struttura raggiungerà questo stato di equilibrio dipende dalla capacità di accumulo di energia degli strati che la compongono. In termini energetici possiamo spiegare quello che accade all'interno della struttura suddividendo il materiale in tanti strati

e immaginando che sia in corso un meccanismo di trasmissione del calore e che solo una parte del flusso attraversa lo strato, mentre una parte viene assorbita dal materiale stesso. Quindi avremo che solo una quota dell'energia riempie il serbatoio di accumulo proprio dello strato in oggetto e di conseguenza il flusso energetico passante si riduce a mano a mano per ciascuno strato. In un regime stazionario, questo schema potrebbe essere rappresentato con tutti i serbatoi già pieni e quindi il flusso energetico dipenderebbe solamente dalla conduttività termica dei materiali. Mentre in un regime variabile, entra in gioco anche il fattore tempo di reazione di ogni strato: materiali con capacità di accumulo differente innescano comportamenti inerziali diversi e tempi di reazione differenti.

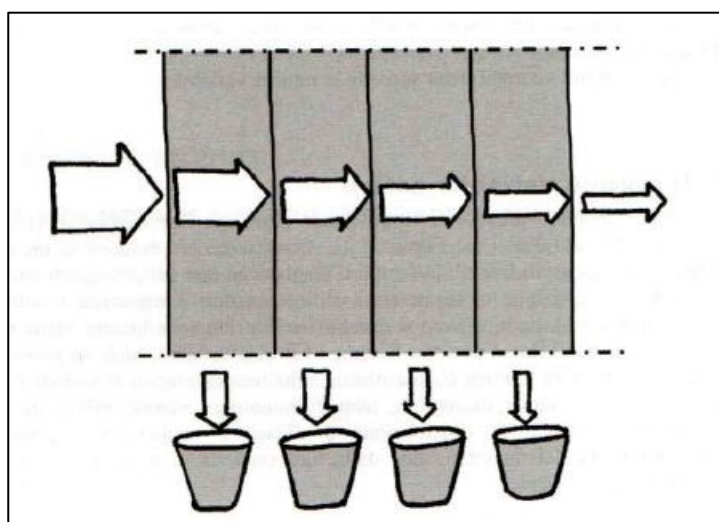


Fig. 7 – Suddivisione di un materiale in strati e soggetto al passaggio di un flusso: ogni strato trattiene una parte di energia (serbatoio = capacità di accumulo propria per ogni strato) riducendo strato per strato il flusso stesso. (Fonte ANIT)

Ad una prima riflessione possiamo affermare che:

- A parità di trasmittanza termica, una struttura con maggiore capacità di accumulo assorbe più energia e impiega più tempo a raggiungere una condizione di equilibrio termico;
- A parità di comportamento inerziale, una struttura con trasmittanza termica minore si lascia attraversare da una quantità inferiore di energia anche in condizioni estive.

Da queste considerazioni preliminari, emerge chiaramente che la scelta di un materiale isolante idoneo sia d'inverno che d'estate non è affatto scontata e che

occorre il giusto equilibrio tra potere isolante e capacità termica. In particolare, se ci concentriamo su quest'ultimo aspetto al fine di limitare il fabbisogno per la climatizzazione estiva e contenere la temperatura interna, è necessario verificare il comportamento inerziale dell'involucro.

L'*inerzia termica* si può definire come l'attitudine della parete a ridurre (smorzamento) e ritardare (sfasamento) l'effetto di sollecitazioni dinamiche sul carico termico dell'ambiente. Possiamo distinguere tra sollecitazioni termiche esterne ed interne.

- Sul lato esterno:
 - Variazione giornaliera della temperatura
 - Variazione giornaliera della radiazione incidente sul componente
- Sul lato interno:
 - Radiazione solare attraverso i vetri
 - Occupazione, apporti interni
 - Intermittenza impianto di riscaldamento/raffrescamento.

Oltre ai parametri che descrivono il comportamento di una struttura, è altrettanto fondamentale conoscere le caratteristiche che descrivono il singolo materiale, come ad esempio:

- Densità, ρ [kg/m³],
- Spessore, s [m],
- Calore specifico, c [J/kgK],
- Conduttività, λ [W/mK].

Questi parametri sono riassumibili attraverso due grandezze:

- Diffusività termica, \mathbf{a} [m²/s]

$$\mathbf{a} = \frac{\lambda}{\rho \times c} \quad (10)$$

- Capacità termica, \mathbf{C} **volumica** [kJ/m³K] o **areica** [kJ/m²K]

$$\mathcal{C} = \rho \times c \quad \text{oppure} \quad \mathcal{C} = \rho \times c \times s \quad (11)$$

Quindi, possiamo definire la *diffusività termica* \mathbf{a} come una proprietà specifica del materiale che descrive la conduzione non stazionaria del calore. Questa grandezza esprime quanto rapidamente un materiale reagisce a una variazione di temperatura. Per spiegare questo concetto possiamo paragonare due materiali: un elemento in calcestruzzo e un pannello di lana di legno (vedi valori in **Tab.3**). Il primo è

caratterizzato da una elevata capacità termica C rispetto al valore del secondo materiale: di conseguenza, se considerassimo solo questo parametro, il calcestruzzo sarebbe il materiale migliore perché capace di accumulare più energia. Ma questa caratteristica non è la sola che contraddistingue il comportamento estivo. L'altra altrettanto importante è la predisposizione a rallentare il flusso termico derivante dall'irraggiamento solare, che si traduce in termini di conduttività termica λ del materiale. Il calcestruzzo, pur possedendo un'ottima capacità termica, ha un flusso energetico entrante elevato dovuto allo scarso potere isolante a differenza della lana di legno. Se paragonassimo i materiali a due serbatoi, potremmo dire che il serbatoio calcestruzzo è molto capacitivo ma si riempie rapidamente, mentre il serbatoio lana di legno ha dimensioni di circa 1/3 rispetto al primo ma è in grado di limitare il flusso termico entrante in maniera più efficace. Continuando l'analogia con i serbatoi, la *diffusività termica* a rappresenta la velocità di riempimento del serbatoio e, in generale, minore è il valore della diffusività termica, maggiore sarà il contributo nel rallentare e sfasare il flusso termico entrante. La tabella successiva (**Tab.4**) riporta alcuni valori di parametri che concorrono al calcolo della diffusività termica, in accordo alla UNI EN ISO 10456:2008 sui materiali isolanti.

	CALCESTRUZZO	LANA DI LEGNO
Densità (kg/m³)	2400	450
Calore specifico (J/kgK)	1000	1811
Conduttività (W/mK)	2,16	0,065
Capacità termica volumica (kJ/m³K)	2400	814
Diffusività termica (m/s * 10⁶)	1,03	0,080

Tab.3 – Confronto tra il comportamento inerziale del cls e della lana di legno.

Materiali isolanti (UNI EN ISO 10456)	Densità kg/m³	Calore specifico J/kgK	Conduttività termica W/mK	Diffusività termica m/s *10⁶
Calcestruzzo cellulare	300	1000	0,089	0,30
Fibra di legno	150	2000	0,040	0,13
Lana di legno	450	1811	0,065	0,08

Lana di roccia	100	1030	0,035	0,34
Lana di vetro	80	1030	0,035	0,42
XPS	35	1450	0,035	0,70
EPS	25	1450	0,036	0,99
Poliuretano espanso	43	1400	0,028	0,46
Sughero espanso	100	1560	0,040	0,26
Vetro cellulare	150	1000	0,055	0,37

Tab. 4 – Caratteristiche termiche per alcuni materiali isolanti in accordo alla UNI EN ISO 10456: i dati di densità, calore specifico e conduttività termica sono quelli indicati dalla norma e la diffusività termica è calcolata utilizzando la formula (10).

2.5 Gli intonaci termoisolanti

2.5.1 Definizione e classificazioni

Quando parliamo di interventi di isolamento termico al fine di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, una tecnologia sicuramente da considerare è quella basata sugli intonaci isolanti. L'intonaco isolante, o "termointonaco", permette di isolare con una sola operazione l'edificio creando una sorta di strato protettivo. L'intonaco termico, che superficialmente si comporta come qualsiasi tipo di rivestimento, ha la caratteristica di creare uno spessore isolante continuo attorno alla struttura dell'edificio, aderendo in modo solidale ad essa, salvaguardando inoltre l'edificio dagli agenti atmosferici.

L'intonaco, per definizione, è un rivestimento minerale con funzione protettiva e decorativa. Può essere applicato a diversi spessori a seconda delle necessità, e può variare da pochi millimetri a qualche centimetro, allo scopo di livellare ed uniformare le superfici murarie. La diffusione di questo tipo di rivestimento è dovuta al costo limitato, alla sua rapidità di preparazione e alla facilità di messa in opera.

La malta, utilizzata per la costruzione di murature, per la preparazione di intonaci e per applicare i rivestimenti in genere, è il risultato della miscelazione di acqua con un legante minerale ed un inerte. Inerti e leganti sono le due categorie con cui vengono classificati gli elementi costitutivi dell'intonaco. Inoltre, negli intonaci moderni sono presenti in formulazione anche sostanze additive quali cellulosa, amido, fumo di silice, resine di varia natura chimica che servono per migliorare delle specifiche caratteristiche del prodotto finale.

I leganti sono materiali che, opportunamente ricondotti allo stato di polvere, una volta miscelati con acqua e messi in opera, subiscono modificazioni chimico-fisiche

irreversibili e si trasformano progressivamente in un prodotto caratterizzato da alcune qualità quali resistenza meccanica, adesione e resistenza agli agenti atmosferici, qualità che sono indispensabili al raggiungimento delle caratteristiche finali della struttura realizzata. I leganti, a seconda della loro natura, induriscono in presenza di acqua e/o aria; quindi possono essere classificati in leganti idraulici o leganti aerei. Per i leganti idraulici il fenomeno di presa, e quindi di indurimento finale, avviene anche se immersi in acqua; mentre per i leganti aerei il fenomeno può avvenire soltanto in presenza di aria.

I leganti più comuni sono a base di calce e cemento e si ottengono a partire da elementi naturali, ad esempio, dal carbonato di calcio nel caso delle calci. Una volta sottoposti a cottura, vengono trasformati in sostanze che reagiscono con l'acqua e l'anidride carbonica contenuta nell'aria, formando cristalli che sviluppano enormi forze adesive fra il legante stesso e gli inerti presenti nell'impasto. I leganti come calce idrata, grassello di calce, calce idraulica, cemento possono essere utilizzati da soli o in abbinamento tra loro formando le cosiddette "malte bastarde". Intonaci che impiegano sola calce come legante presenteranno, generalmente, resistenze meccaniche basse, tempi di presa e indurimento più lunghi ma benefici ad esempio in termini di traspirabilità, elasticità e biocompatibilità. Utilizzando solo cemento, invece, l'intonaco sarà poco traspirante, piuttosto rigido, e quindi poco adatto a seguire i movimenti dei vari supporti ma presenterà caratteristiche di resistenza meccanica maggiori e tempi di posa più brevi.

Nella malta, oltre al legante e all'inerte, si impiegano anche altri elementi coadiuvanti la reazione di presa, come la pozzolana. La pozzolana, si trova generalmente sotto forma di sabbia incoerente, ma può presentarsi anche come agglomerato e quindi essere frantumata e vagliata. L'aggiunta di cariche dal comportamento pozzolanico in malte a base calce, porta a numerosi vantaggi come una presa più rapida e una maggiore resistenza meccanica.

I componenti che qui sono stati brevemente presentati, vengono opportunamente miscelati tra loro in determinate proporzioni al fine di conferire all'impasto la lavorabilità desiderata allo stato fresco, mentre allo stato indurito l'intonaco deve presentare adeguate caratteristiche fisico-meccaniche (resistenza, deformabilità, aderenza, porosità, permeabilità all'acqua in fase vapore e in fase liquida), estetiche e di durabilità.

Gli inerti sono materiali che non subiscono una trasformazione chimica pur partecipando al risultato finale del manufatto poiché formano lo scheletro rigido della malta occupando circa il 65 – 70% del volume totale. La scelta della granulometria degli inerti è un passaggio molto importante: un corretto assortimento granulometrico permette di ottenere malte più o meno compatte. Infatti, la qualità e

la quantità dei vuoti che saranno riempiti dal legante dipendono dal rapporto tra la dimensione granulometrica degli inerti e il legante stesso. Se il fine è quello di assicurare una massa compatta, i cristalli che si formeranno a seguito della trasformazione chimica del legante, saranno più corti e quindi più robusti con una conseguente contrazione durante l'essiccamento ridotta al minimo. Un assortimento granulometrico tale da garantire da un lato la minore percentuale possibile di vuoti e dall'altro che tutti gli inerti siano inglobati nel legante (matrice), sono i prerequisiti per la formulazione di malte e intonaci ad alta resistenza meccanica. Ne consegue che altre proprietà quali ad esempio la densità, la porosità, la permeabilità all'acqua e al vapore acqueo, saranno direttamente correlate.

La tipologia di inerti più diffusa sono le sabbie, naturali se provengono da cave, da fiumi, laghi o dal mare, artificiali se invece provengono dalla frantumazione di rocce o di prodotti artificiali. A seconda della loro natura e dal tipo di roccia da cui provengono, le sabbie possono avere diverse granulometrie andando ad incidere sulla qualità delle malte. Per esempio, la presenza di impurità come terra, argilla e polveri fini riduce il potere legante del carbonato di calcio e la conseguente resistenza della malta. Anche l'impiego di sabbie di mare, a causa della presenza di cloruri, produce effetti negativi favorendo nel tempo l'insorgenza di efflorescenze saline.

L'intonaco, quindi, deve assolvere fondamentalmente a tre funzioni:

1. proteggere le strutture sulle quali viene applicato,
2. garantire la traspirabilità delle murature,
3. garantire una finitura regolare ed esteticamente accettabile.

Generalmente, lo spessore dell'intonaco è di 2 cm, sebbene, in determinate circostanze e per talune necessità e tipologie, può essere incrementato. Un intonaco è un rivestimento compatto composto di più strati ognuno dei quali con caratteristiche e funzioni diverse, per questo motivo, in casi particolari lo spessore può raggiungere anche i 10 cm.

Procedendo dalla muratura verso l'esterno, il primo strato che incontriamo è quello che in gergo viene chiamato *rinzafo*. Questo strato ha il compito di creare una superficie di collegamento tra la muratura stessa e i successivi strati d'intonaco al fine di garantire una corretta adesione tra tutti gli elementi. Deve essere applicato in maniera uniforme sulla muratura e, grazie alla sua granulometria grossolana, crea delle zone scabre che fungeranno da aggrappante per gli strati successivi. Tra i vari strati dell'intonaco, il rinzafo è quello più soggetto a sollecitazioni meccaniche.

Il secondo strato è definito *arriccio* e ha una granulometria media pari a 1,5 mm circa di diametro massimo degli inerti. Costituisce il *corpo dell'intonaco* e ha il compito principale di uniformare la superficie delle murature, andando ad eliminare

tutti i difetti di planarità e verticalità, oltre che di fungere da barriera protettiva e da struttura portante.

L'ultimo strato è quello del *rasante*, che generalmente ha due funzioni: proteggere l'intonaco e renderlo esteticamente gradevole. Questo strato ha una granulometria fine, di diametro massimo inferiore agli 800 micron, mentre il suo spessore di applicazione è inferiore a circa 5 mm. Per definizione, la rasatura è uno strato di preparazione per la successiva decorazione (o finitura) che fa da ponte intermedio con il sottofondo: per adempiere a tale compito, il rasante dovrà presentare un modulo elastico inferiore a quello del supporto ma superiore a quello dell'eventuale finitura.

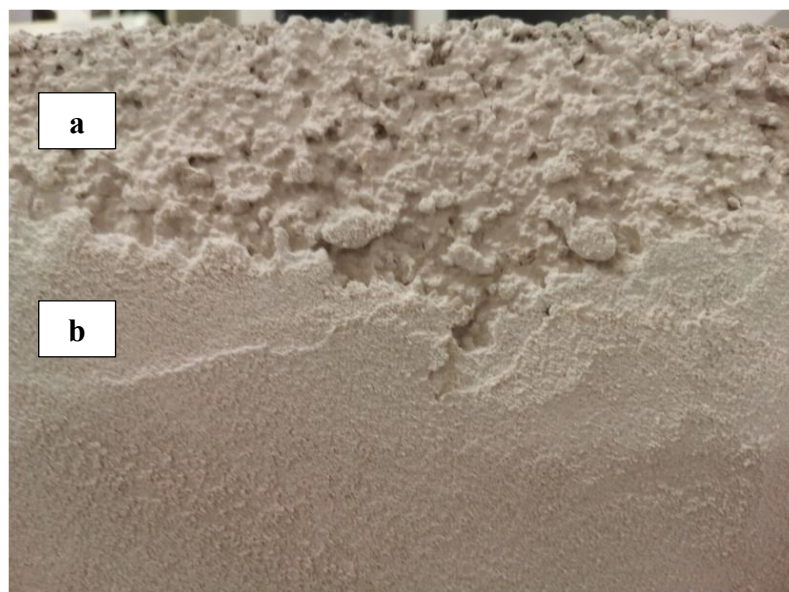


Fig. 8 – Strato di rasante (b) a base calce applicato su un termointonaco (a) sempre a base calce e con inerti leggeri.

Ricapitolando, gli intonaci sono quindi conglomerati ottenuti dalla miscela di tre tipologie di elementi: un “legante” (come il cemento e/o la calce), l’acqua e un “inerte”. Per attribuire prestazioni isolanti alla miscela ottenuta, i produttori sostituiscono in tutto o in parte l’inerte tradizionale, ad esempio sabbia o ghiaia, con aggregati leggeri e/o con l’aggiunta di additivi chimici che creano bolle d’aria all’interno dell’impasto; bolle d’aria che restano intrappolate all’interno della miscela e che una volta solidificata diventano porosità interne all’intonaco. Con il termine “termointonaco” si indicano in generale le malte da muratura che hanno buone caratteristiche isolanti. In modo più preciso la norma UNI EN 998-1 “Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed

esterni” definisce l’intonaco termoisolante come “malta a prestazione garantita con proprietà isolanti specifiche” e ne stabilisce le caratteristiche essenziali da riportare sulla marcatura CE (**Tab.5**). Per malta a prestazione garantita si intende: “malta la cui composizione e il cui metodo di produzione sono scelti dal produttore per ottenere le proprietà specificate (concetto di prestazione)”. La differenza tra un intonaco tradizionale e un intonaco isolante dipende dal suo valore di conduttività termica λ : secondo la UNI EN 998-1 infatti le malte termiche (indicate con la lettera T) rispetto alle altre devono garantire valori di λ inferiori a 0.1 W/mK (categoria T1) o inferiori a 0.2 W/mK (categoria T2).

Le malte di categoria T1 hanno quindi una più alta prestazione isolante, poiché al decrescere del valore della conduttività termica decresce anche il flusso di calore che attraversa l’elemento. Sempre in base alla UNI EN 998-1, il metodo di riferimento per la determinazione della conducibilità termica è la UNI EN 1745 “Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare le proprietà termiche”. Secondo questa normativa il valore della conduttività termica dei materiali isolanti, e in generale per i prodotti che essa descrive, possono essere ricavati per via tabellare o attraverso dati misurati.

Proprietà (UNI EN 998-1)	Categorie	Valori
Intervallo di resistenza a compressione a 28 giorni	CS I	Da 0,4 N/mm ² a 2,5 N/mm ²
	CS II	Da 1,5 N/mm ² a 5,0 N/mm ²
	CS III	Da 3,5 N/mm ² a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Assorbimento d’acqua per capillarità	W _c 0	Non specificato
	W _c 1	$C \leq 0,40 \text{ kg/ (m}^2 \times \text{min}^{0,5})$
	W _c 2	$C \leq 0,20 \text{ kg/ (m}^2 \times \text{min}^{0,5})$
Conducibilità termica	T1	≤ 0,1 W/m x K
	T2	≤ 0,2 W/m x K

Tab. 5 – Prospetto 1 della UNI EN 998-1: valori di conducibilità termica ammessi per la classificazione di malte per isolamento termico in classe T1 o T2.

Nel prospetto della UNI EN 1745 sono riportati i valori di conduttività misurata in condizioni secche con temperatura media a 10°C, indicata come $\lambda_{10,\text{dry}}$ e si può osservare una correlazione diretta tra densità e conduttività del prodotto (**Tab.6**).

Massa volumica del materiale	Λ_{10dry} W/mK		Coeff. diffusione vapore acqueo	c kJ/kgK
	$P=50\%$	$P=90\%$	μ	
Kg/m ³				
250	0,074	0,080	5 - 20	1,0
400	0,10	0,11	5 - 20	1,0
700	0,18	0,20	5 - 20	1,0
1000	0,27	0,30	5 - 20	1,0
1500	0,47	0,54	5 - 20	1,0
1600	0,67	0,76	15 - 35	1,0
1800	0,83	0,93	15 - 35	1,0
2000	1,17	1,28	15 - 35	1,0
$f_{\psi} = 4 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$				

Tab. 6 – Estratto della Tabella A.12 “Malta: malta per muratura e malta per intonaco” della UNI EN 1745. I valori tabulati si riferiscono a dati sperimentali relativi a composizioni classiche di malte e in generale di elementi solidi di muratura.

Nel caso di valore di conduttività termica misurato, le normative di riferimento richiamate nella UNI EN 1745 sono le seguenti: ISO 8301, ISO 8302, UNI EN 12667 e UNI EN 12664.

La ricerca di “leggerezza” nei prodotti isolanti non ha solo uno scopo di praticità della messa in opera, di preparazione in cantiere o di riduzione degli effetti statici sulla parete oggetto d’intervento. Nel caso delle malte per isolamento termico, la ricerca di leggerezza coincide con l’obiettivo di ottenere prestazioni isolanti sempre migliori.

Per raggiungere dei valori performanti di λ si può procedere percorrendo due strategie principali:

- sfruttare le porosità interne della matrice,
- utilizzare inerti leggeri e altamente isolanti.

Intrappolare una certa quantità d’aria nella struttura del materiale (porosità) significa ottenere un prodotto termicamente più isolante. L’aria infatti se immobilizzata è uno dei materiali a basso costo più isolanti: conduttività termica pari a circa 0,026 W/mK. Per quanto riguarda gli inerti, invece, numerosi sono gli studi e le ricerche svolti su materiali isolanti innovativi, sperimentandone l’impiego in alternativa ai materiali tradizionali, oppure su aggregati provenienti da materiali di scarto, con conseguenti benefici economici ed ambientali. Infatti, la crescente attenzione alle problematiche ambientali nel campo delle costruzioni ha reso negli ultimi tempi sempre più

difficoltoso il prelievo da cava degli inerti e quindi delle materie prime in generale. Inoltre, la gestione dei rifiuti e delle macerie da costruzione sta diventando uno dei principali problemi ambientali e interessa a livello globale molte nazioni. Per poter fronteggiare questa problematica, è fondamentale un buon Life-Cycle-Assessment (LCA) dei materiali impiegati nelle costruzioni, nel pieno rispetto del concetto di sostenibilità dei materiali.

La ricerca portata avanti in questo studio comprende una parte dedicata allo studio delle materie prime con proprietà isolanti nell'impiego di termointonaci. Lo scopo è stato quello di individuare materie prime e intonaci che riescano a garantire una buona conducibilità termica includendo la possibilità di realizzare miscele che offrano anche una sufficiente resistenza meccanica.

Questi intonaci generalmente sono prodotti premiscelati e quindi pronti all'uso, che necessitano solo di un preciso quantitativo di acqua e vengono formulati con inerti leggeri come sughero, argilla, perlite espansa, silice, pomice, vetro espanso, aerogel in granuli.

Per ottenere un prodotto isolante innovativo e ad alte prestazioni, la densità ottimale della malta indurita dovrebbe avere un valore compreso tra 250 e 350 kg/m³, oltre ad avere le caratteristiche seguenti:

- Installazione facile e veloce;
- Applicazione a macchina (pompa miscelatrice a ciclo continuo);
- Campo d'impiego: isolamento sia in interno che in esterno;
- Prodotti altamente traspiranti (basso coefficiente di permeabilità al vapore, μ);
- Prodotti alleggeriti in grado di non appesantire la struttura;
- Applicazioni anche ad alto spessore.

La coibentazione e quindi anche la riqualificazione termica di un edificio può essere raggiunta attraverso l'impiego di prodotti che sfruttano materie prime alleggerite inserite in miscela. Queste materie prime possono provenire da materiali di riciclo, e per questo motivo sono definite materie prime seconde, oppure possono essere di origine naturale ma provenienti da cave di estrazione. Per quanto riguarda gli inerti provenienti dal riciclo, numerosi studi descrivono come l'effetto di queste materie sotto forma di polvere o di inerte, in opportuna curva granulometrica, contribuiscano all'ottenimento di valori di conducibilità termica ottimali e nel pieno rispetto della sostenibilità dei materiali.

2.5.2 Studio dei materiali

La tematica predominante del progetto di ricerca del dottorato è stata l'isolamento termico e una parte rilevante di questo aspetto è costituita dai materiali isolanti e, quindi, dalle materie prime che li compongono. L'analisi dei singoli materiali è necessaria per capire quali sono le caratteristiche tecniche che possono concorrere alla formulazione di un buon prodotto per l'isolamento termico. Successivo passo è poi quello di studiare il prodotto, così formulato, nel suo complesso e valutarne attraverso prove di laboratorio specifiche, le proprietà dal punto di vista termico, meccanico, igrometrico e facilità di applicazione.

Una volta chiarito lo scenario rispetto alle tipologie dei materiali, il progetto ha avuto come obiettivo quello di studiare due differenti sistemi di isolamento applicandoli su pareti fortemente inerziali per analizzarne il comportamento dinamico, in particolare durante il periodo estivo attraverso due campagne di sperimentazione: estate 2018 ed estate 2019. Più specificatamente, la sperimentazione in sito è stata condotta su un mockup localizzato a Fabriano e caratterizzato da pareti con un'elevata massa termica e due diversi sistemi di isolamento esterno a cappotto: un intonaco a base calce alleggerito con inerti in sughero e un tradizionale pannello in polistirene espanso estruso (XPS).

La descrizione della campagna sperimentale e dei dati acquisiti durante le prove in sito saranno oggetto della successiva sezione (Cap. 3), nella quale il focus sarà spostato sulla funzionalità in opera di questi sistemi isolanti.

Nella presente sezione vengono descritti i materiali utilizzati in alcune miscele di malte sperimentali e che successivamente hanno condotto alla messa a punto di differenti mix design ed ottimizzazioni.

In questa prima parte sono riportate, in maniera descrittiva, le caratteristiche chimiche e funzionali delle materie prime tradizionali e innovative sulle quali si è concentrata la sperimentazione condotta sia nei laboratori del Dipartimento DIISM, sia presso l'azienda chimica per la quale ho lavorato durante i primi due anni del dottorato.

Gli argomenti di studio possono essere così suddivisi:

- classificazione dei materiali suddividendo, in prima battuta, tra tradizionali e innovativi. Inoltre, si sono individuate in queste due macrocategorie i leganti, i filler e gli aggregati leggeri e non;
- elenco delle principali proprietà funzionali di volta in volta più pertinenti: curva granulometrica, densità apparente e/o superficie specifica, conducibilità termica, classe di reazione al fuoco, composizione chimica;

- analisi della microstruttura con microscopio elettronico a scansione, comunemente indicato con l'acronimo SEM, dall'inglese Scanning Electron Microscope.

Dopo aver condotto la prima parte degli studi di laboratorio sulla caratterizzazione dei materiali utilizzati, si è proceduto con il confezionamento degli intonaci realizzando differenti mix design.

2.5.3 Materiali tradizionali e innovativi

I. Leganti

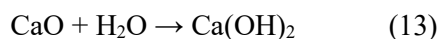
Il legante è una sostanza con proprietà adesive e coesive che, se impastata con altri materiali, permette di ottenere una massa inizialmente plastica ma che, con il tempo, subisce un progressivo processo di irrigidimento fino a raggiungere un'elevata resistenza meccanica. Nel processo di solidificazione di un legante si distinguono due fasi. Nel corso della prima fase, chiamata *presa*, si passa dalla fluidità iniziale ad una massa più consistente capace di mantenere la forma impartitale. Alla presa segue l'*indurimento*, nel quale si verifica un continuo aumento di resistenza meccanica. La presa ha una durata che a seconda dei casi può andare da pochi minuti a qualche decina di ore, mentre l'indurimento si prolunga in un arco di tempo che non è possibile definire a priori. In altri termini, il legante rappresenta la matrice nella quale vengono inglobati i differenti inerti scelti in base alle proprietà finali che si vogliono raggiungere: resistenza meccanica, elasticità, proprietà termiche e così via.

Calce idrata

Prodotto ottenuto dalla cottura della pietra calcarea, costituita da carbonato di calcio (CaCO_3), a temperature relativamente elevate ($800 - 1000^\circ\text{C}$). La cottura del calcare produce anidride carbonica (CO_2) che viene trascinata dagli altri gas della combustione, sempre in prevalenza CO_2 :



Il materiale ottenuto dalla cottura (CaO) è denominato ossido di calcio o calce ma non può essere impiegato come legante tal quale poiché necessita di un successivo trattamento, detto di "spegnimento", che consiste nel far reagire la calce con acqua per ottenere la calce idrata (**Fig.9**): idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$:



La reazione della calce sotto forma di CaO con l'acqua produce una reazione fortemente esotermica, ovvero sprigiona un forte calore. Per questo motivo la CaO viene chiamata anche calce viva mentre l'idrossido è chiamato calce spenta.

La calce idrata è un legante aereo perché l'indurimento avviene solo per contatto con l'aria ed in particolare con la CO₂ presente nell'aria:



Con la carbonatazione della calce idrata si chiude un ciclo: si parte dalla materia prima formata da calcare secondo il processo per produrre calce (12), ed al calcare si torna secondo la reazione (14). Oltre alla formazione del calcare (CaCO₃), l'indurimento della calce richiede un processo di asciugamento per l'eliminazione all'aria dell'acqua che si forma sempre secondo la reazione (14).



Fig.9 – Calce idrata: Ca(OH)₂.

Calce idraulica naturale

La scoperta di un legante capace di indurire anche in assenza di aria e di resistere all'azione dilavante dell'acqua segnò una svolta nel progresso tecnologico delle costruzioni, ma passarono diversi secoli prima che la calce idraulica fosse inventata su basi scientifiche (nel 1750 circa). Oggi noi sappiamo che il comportamento idraulico delle malte descritte nell'antichità era dovuto alla presenza di impurità argillose nel calcare di partenza (calcare marnoso). Infatti, la presenza di argilla è fondamentale per produrre una calce idraulica.

La calce idraulica appartiene alla famiglia dei leganti idraulici, cioè alla famiglia dei cementi; proprio per questo, oltre ad essere chiamata calce idraulica viene comunemente detta cemento povero. Ne ha tutte le caratteristiche sia di struttura sia di resistenza. Le uniche due cose in cui si differenziano sono il tempo di cottura/temperatura e la quantità di argilla contenuta nell'una e nell'altra. I tempi di cottura vanno dalle 36 ore circa a 1000°C della calce idraulica naturale ai 45 minuti

circa a 1450°C per il cemento. Le quantità di argilla vanno dal 20 – 22% per la calce idraulica ai 25 – 27% per il cemento.

Oggi si possono ottenere calci idrauliche naturali (**Fig. 10**) anche dalla cottura di calcari silicei anziché argillosi: questo metodo è sicuramente molto più rapido ed economico. La calce idraulica è un legante a base d'idrossido di calcio (come la calce idrata) dall'elevata traspirabilità; inoltre è un ottimo coibente termico e in particolare resiste bene agli sbalzi termici, presenta un'ottima adesione ai supporti e una migliore elasticità.



Fig. 10 – Calce idraulica naturale.

Cemento

In edilizia con il termine cemento si intende una varietà di materiali da costruzione, noti come leganti idraulici, che miscelati con acqua sviluppano proprietà adesive (proprietà idrauliche).

La pasta cementizia o boiaccia, cemento più acqua, viene impiegata come legante in miscela con materiali inerti come sabbia, ghiaia o pietrisco. Nel caso in cui la pasta di cemento si misceli con un aggregato fino (sabbia) si ha la malta di cemento, nel caso in cui alla pasta di cemento si uniscano aggregati di diverse dimensioni (sabbia, ghiaietto e ghiaia), secondo una determinata curva granulometrica, si ottiene il calcestruzzo, infine, nel caso in cui il calcestruzzo venga accoppiato con un'armatura costituita da tondini di acciaio, opportunamente posizionati, si ha il calcestruzzo armato.

Esistono diversi tipi di cemento, differenti per la composizione, per le proprietà di resistenza e durevolezza e quindi per la destinazione d'uso o per la classe di esposizione ambientale. Dal punto di vista chimico si tratta in generale di una miscela di silicati e alluminati di calcio, ottenuti dalla cottura ad alta temperatura di calcare e argilla oppure di marna. Proprio dalla variazione nelle proporzioni tra

questi materiali, nello specifico aumentando dal 10% al 40% l'argilla, che si arrivò ad aumentare il contenuto dei silicati ed alluminati di calcio a spese della calce libera, con un incremento delle resistenze meccaniche. Altro fattore determinante nella produzione del cemento è la temperatura di cottura (ben oltre 900°C) che permette di ridurre drasticamente la presenza della calce non combinata. La distinzione tra calce idraulica e cemento avvenne per opera di Vicat, che in maniera scientifica definì la differenza tra i due materiali. Nella produzione di calce idraulica c'è la necessità di spegnere con acqua per convertire tutto l'ossido di calcio libero in idrossido di calcio, mentre nel cemento (*clinker*) non vi è bisogno di alcun trattamento di spegnimento poiché la calce libera è assente del tutto (o presente in tracce). Altro aspetto importante ed elemento di distinzione tra i due leganti è la presenza nel cemento del *gesso* che viene aggiunto nel clinker per regolare la presa ed evitare un rapido rapprendimento dopo la miscelazione del cemento con acqua che avrebbe impedito una corretta messa in opera dell'impasto cementizio.

Tale miscela è commercializzata col nome di cemento Portland (**Fig.11**) e tre sono i principali componenti chimici che lo caratterizzano:

- Silicati, in forma di silicato bicalcico (C_2S) e soprattutto di silicato tricalcico (C_3S) ai quali si deve il buon comportamento meccanico delle malte e dei calcestruzzi;
- Alluminato tricalcico (C_3A) e il ferro-alluminato tetracalcico (C_4AF) attraverso la cui presenza il clinker può essere ottenuto a temperature ragionevoli (circa 1400°C). Passaggio fondamentale per la reazione che porta alla formazione dei quattro costituenti mineralogici del cemento Portland: $C_3S + C_2S$ (pari all'80%) e $C_3A + C_4AF$ (pari al 20%);
- Il ruolo del gesso per controllare la presa del cemento (4 % - 6% circa).



Fig. 11 – Cemento Portland.

II. Filler

I filler sono aggiunte minerali solitamente impiegate per ridurre i fenomeni di bleeding nelle sospensioni cementizie e possono essere di tre tipologie: filler calcareo, cenere volante, bentonite, fumo di silice e silice colloidale. Tutti i filler menzionati sono prodotti inorganici ad elevatissima area superficiale specifica e quindi in grado di sedimentare molto lentamente in un mezzo acquoso. L'elevata area superficiale fa aumentare l'interazione fisica all'interfaccia solido – liquido, apportando benefici a tutto il sistema. Inoltre, per effetto della piccolissima dimensione di queste particelle si riduce notevolmente la velocità di sedimentazione per effetto della legge di Stokes.

L'impiego dei filler apporta notevoli miglioramenti delle miscele sia sotto l'aspetto reologico, sia dal lato prestazionale, allargando così le potenziali destinazioni e i campi di applicazione delle malte o dei calcestruzzi. Per definizione il filler è un aggregato, la cui dimensione è inferiore a 0,063 mm, che può essere aggiunto ai materiali da costruzione per conferirne diverse proprietà, ad esempio come riempitivo poiché le ridotte dimensioni permettono di ridurre la percentuale di vuoti in un conglomerato artificiale.

Caolino

Le rocce costituite prevalentemente da caolinite sono minerali silicati delle argille (alluminio silicato idrato). Nella sua forma naturale, la struttura cristallina del caolino contiene due molecole d'acqua, pari a circa il 12% del suo peso. Portando il materiale ad una temperatura di circa 1400°, le due molecole d'acqua si separano dal cristallo, causando un grande cambiamento nella sua struttura. Il prodotto che si ottiene in questo modo è il *caolino calcinato* (**Fig. 12**).

Usando temperature estremamente alte per alterare le proprietà dei minerali, la calcinazione del caolino aumenta la durezza del materiale, e inoltre ne modifica le proprietà elettriche. Il processo elimina l'acqua e in questo modo si ottiene un prodotto refrattario estremamente efficace. Il processo di calcinazione aumenta dal punto di vista della composizione chimica (**Tab. 7**), il contenuto di silice e di allumina; di conseguenza si ottiene un materiale dalle proprietà pozzolaniche con un'ottima resistenza, una maggiore area superficiale specifica, migliori proprietà isolanti e stabilità termica.



Fig. 12 – Caolino calcinato (diametro nominale delle particelle 0,80 μm).

Caolino calcinato		
Silicia	SiO_2	80%
Alumina	Al_2O_3	13,8%
Iron oxide	Fe_2O_3	0,7%
Titanium dioxide	TiO_2	0,15%
Magnesium oxide	MgO	0,1%
Potassium oxide	K_2O	0,2%
Sodium oxide	Na_2O	0,1%
Calcium oxide	CaO	2,5%

Tab. 7 – Composizione chimica del Caolino calcinato.

La caratterizzazione al SEM (**Fig. 13**) evidenzia le proprietà di questo materiale che funge principalmente da matrice/filler, andando a creare una “base” che unisce in maniera omogenea tutti i componenti dell’impasto. Il processo di calcinazione “espande” le particelle che assumono la forma di “fiocchi” simili a pop-corn a testimonianza del fatto che questo processo modifica la struttura chimica del caolino.

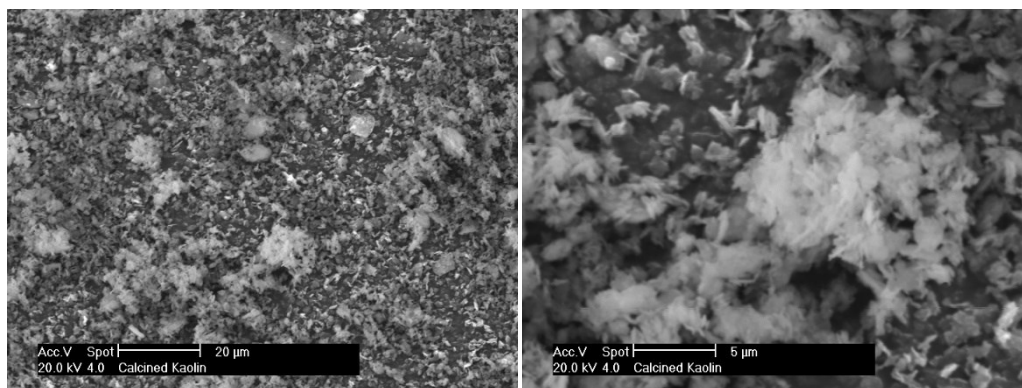


Fig. 13 – Caratterizzazione al SEM: Caolino calcinato ingrandimento a 20 µm e 5 µm.

Perlite espansa

La composizione chimica della perlite è quella di un silicato complesso naturale di alluminio, sodio e potassio, non trattato chimicamente. Lo stato fisico più comune in natura è quello solido cristallino, in minerali come il quarzo e i suoi polimorfi, e più raramente quello amorfo. Si trova solitamente come roccia vulcanica effusiva di colore variabile tra il grigio e il rosa, che ha la capacità di espandere il proprio volume fino a 20 volte rispetto a quello originale quando viene portata a elevate temperature. L'espansione è legata alla presenza di acqua rimasta confinata nella porosità chiusa della roccia per effetto del repentino raffreddamento in fase di fuoriuscita del magma.

Quando viene sottoposta a temperature comprese tra 550 e i 900°C, la roccia si espande per la vaporizzazione dell'acqua: in questo processo irreversibile si generano internamente ai granuli delle bolle che conferiscono alla roccia espansa un'estrema leggerezza, un buon potere coibente e il tipico colore bianco (**Fig. 14**). La struttura finale delle particelle mostra la compresenza di una rete di macroporosità aperte (canalicoli comunicanti tra loro a partire dalla superficie esterna del granulo) e di microporosità chiuse (cavità isolate interne al granulo), che conferiscono ottime caratteristiche termiche al materiale.



Fig. 14 – Perlite espansa in polvere (granulometria nominale 0 - 150 μm).

Perlite espansa		
Silicia	SiO_2	74 - 78%
Alumina	Al_2O_3	11 - 14%
Iron oxide	Fe_2O_3	0,5 - 1,5%
Sodium oxide	Na_2O	0,5 - 1,5%
Potassium oxide	K_2O	2 - 4%
Calcium oxide	CaO	1 - 2%
Magnesium oxide	MgO	0 - 0,5%

Tab. 8 – Composizione chimica della perlite espansa.

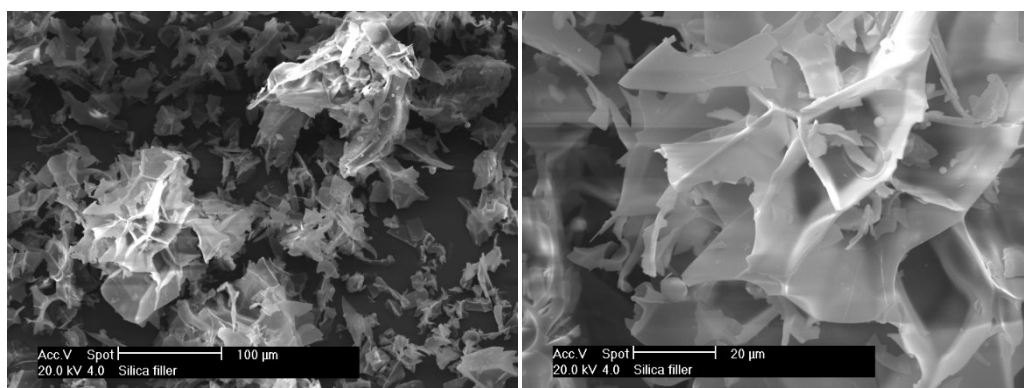


Fig. 15 – Caratterizzazione al SEM: Perlite espansa (0 - 150 μm) ingrandimento a 100 μm e 20 μm .

La caratterizzazione al SEM (**Fig. 15**) delle particelle di perlite espansa con granulometria nominale 0 - 150 μm , evidenzia la natura cristallina della materia prima sottoposta al processo di espansione termica.

Le particelle sono frastagliate creando delle macroregioni caratterizzate da un'elevata porosità e numerose cavità interconnesse tra di loro. Questa caratteristica è molto importante dal punto di vista termico in quanto il materiale, mantenendo inalterata la sua porosità, conferisce alle miscele nelle quali viene inglobato un'elevata percentuale di pori, contribuendo alla creazione di prodotti alleggeriti e isolanti termicamente.

III. Aggregati

Gli aggregati giocano un ruolo di primaria importanza, anche dal solo punto di vista quantitativo, poiché occupano mediamente i due terzi del volume di una miscela. Ovviamente, è facile intuire che anche da un punto di vista qualitativo gli inerti assumono un ruolo decisivo nelle prestazioni finali di una miscela. In generale, gli aggregati sono una vasta categoria di materiali minerali granulari usati nelle costruzioni e possono essere naturali, artificiali o riciclati da materiali precedentemente usati nelle costruzioni. Costituiscono lo scheletro del conglomerato, la cui coesione è garantita dalla pasta cementizia o dalla calce o più in generale dalla matrice che lo ingloba. Per la buona riuscita di un conglomerato è fondamentale, oltre che la qualità degli aggregati, anche la composizione granulometrica (curva granulometrica).

La caratteristica più evidente dell'inerte è la sua granularità, ovvero il fatto che si presenta in forma di granuli sciolti. La granularità degli aggregati è strettamente connessa con il suo assortimento granulometrico, cioè con la presenza o meno di varie frazioni: dalle più fini a quelle più grosse passando per quelle intermedie.

La norma UNI EN 12620 specifica le proprietà degli aggregati e dei filler ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali o riciclati miscelati per essere utilizzati nel confezionamento di calcestruzzi, classificando:

- Aggregati fini: con passante allo staccio 4 mm (UNI 2332) maggiore del 95%
- Aggregati grossi: con passante allo staccio 4 mm (UNI 2332) minore del 5%.

Carbonato di calcio

Il calcare finemente macinato non è un materiale pozzolanico, ovvero non reagisce con la calce libera, ma è un ottimo fillerizzante sia per quanto riguarda la fase di produzione del cemento Portland per ridurre la percentuale di clinker, sia nella produzione di calcestruzzi e/o malte per aumentarne, ad esempio, la lavorabilità e la messa in opera.

In natura, il carbonato di calcio (**Fig. 16**) è il materiale che costituisce, in tutto o in parte, una grande varietà di tipi di rocce: il marmo, le rocce calcaree, il travertino. I

minerali costituiti da carbonato di calcio sono l'aragonite e la calcite. In quanto minerale naturale, il carbonato di calcio ha una moltitudine di caratteristiche che lo rendono una materia prima ideale per gli usi più disparati nel campo dell'edilizia: asfalto, ceramica, vetro, calcestruzzo, detersivi, tegole, mattoni, ecc. In base al processo di estrazione e frantumazione del minerale grezzo, è possibile avere diverse pezzature di carbonato di calcio; tali informazioni sono facilmente ricavabili dalle curve granulometriche fornite dai produttori.



Fig. 16 – Carbonato di calcio 0-600 μm .

Nelle formulazioni sperimentali messe a punto, è stato scelto un carbonato di calcio con granulometria definita da setacciatura 0 – 600 μm (**Fig. 17**): come precedentemente esposto, l'aggiunta di una frazione di filler alla formulazione di una malta consente di migliorarne la lavorabilità allo stato fresco della miscela senza comprometterne l'obiettivo finale di raggiungere una matrice leggera e porosa allo stato indurito.

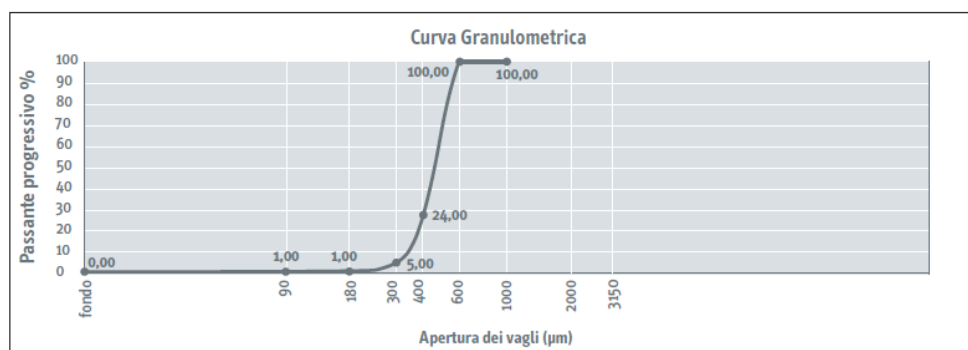


Fig. 17 – Curva granulometrica del carbonato di calcio 0-600 μm .

Dalla caratterizzazione al SEM (**Fig. 18**), è evidente la struttura cristallina del carbonato di calcio in polvere. Oltre alla struttura, è possibile notare anche

l'irregolarità superficiale delle particelle; questa caratteristica consente di ottenere una maggiore capacità coesiva all'interno di una miscela apportando notevoli benefici sia dal punto di vista di omogeneità, adesione interna e lavorabilità.

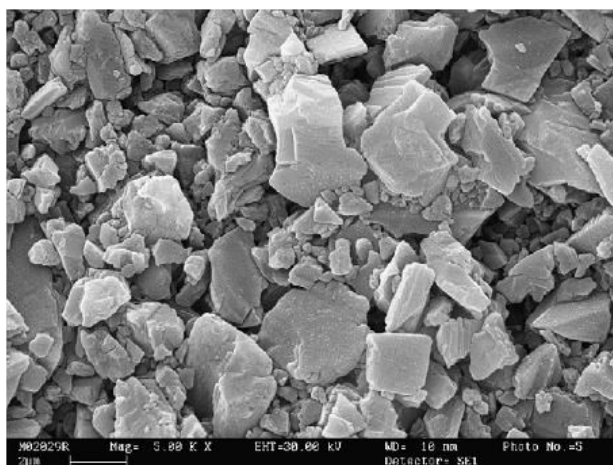


Fig. 18 – Caratterizzazione al SEM del carbonato di calcio, ingrandimento 2 µm.

Argilla

L'argilla espansa (**Fig. 19**) è una miscela principale di ossidi di silice, alluminio e ferro sinterizzati a 1200°C. La dimensione micrometrica dei cristalli dà alla polvere notevoli capacità di assorbimento d'acqua e di scambio ionico. Queste caratteristiche conferiscono al sedimento argilloso una plasticità rilevante se miscelato con acqua e refrattarietà se disidratato. Il materiale ha una buona inerzia termica e una buona resistenza alla compressione, è altamente traspirante e resistente all'umidità. Non contiene materiali organici né loro derivati perciò non marcisce né si degrada nel tempo, neppure in condizioni di temperatura o umidità estreme. Resiste bene ad acidi, basi e solventi, conservando inalterate le sue caratteristiche. Se sottoposto al gelo non si rompe né si imbibisce. È un prodotto naturale ed ecologico, non contiene



Fig. 19 – Argilla espansa frantumata.

né emette silice libera, sostanze fibrose, gas Radon o altri materiali nocivi, nemmeno in caso d'incendio.

Argilla espansa		
Silice	SiO ₂	50 ÷ 65 %
Ossido di alluminio	Al ₂ O ₃	16 ÷ 20 %
Ossido di ferro	Fe ₂ O ₃	3 ÷ 6 %
Ossido di calcio	CaO	3 ÷ 5 %
Ossido di magnesio	MgO	2 ÷ 4 %
Ossido di potassio	K ₂ O	1 ÷ 2 %
Ossido di sodio	Na ₂ O	0,5 ÷ 1 %
Altri	-	0 ÷ 0,5 %

Tab. 9 – Composizione chimica dell'argilla espansa.

La caratterizzazione al SEM (**Fig. 20**) dei granuli di argilla espansa mette in luce la presenza di una microporosità diffusa su tutta la loro superficie, rendendolo quindi un aggregato leggero e con proprietà isolanti.

Le caratteristiche termiche dell'argilla espansa derivano dal comportamento termoisolante dell'aria inglobata nelle piccole cavità interne alla struttura cellulare dei granuli. In funzione del livello di espansione del granulo variano le prestazioni termiche che risulteranno direttamente correlate alla densità in mucchio dell'argilla espansa stessa.

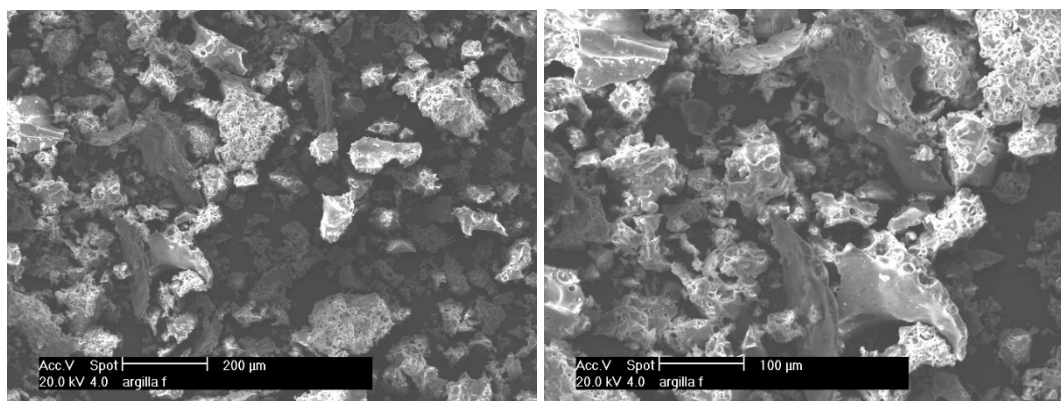


Fig. 20 – Caratterizzazione al SEM: Argilla espansa frantumata, ingrandimento a 200 µm e 100 µm.

Pomice

La pomice (**Fig. 21**) è un materiale estremamente versatile che ha origine dalla naturale espansione del materiale magmatico effusivo: le bolle di gas formatesi nel processo eruttivo, durante la rapida fase di raffreddamento vengono intrappolate generando così un prodotto dalla struttura alveolare di notevole leggerezza, totalmente naturale, con elevata porosità interna ed alto potere isolante. In commercio si trovano differenti tipologie di pomice che vengono classificate e distinte principalmente in base al loro peso specifico e per curva granulometrica.



Fig. 21 – Pomice in granuli.

Pomice in granuli – Tipo I e II		
Silicia	SiO ₂	71%
Sodium oxide	Na ₂ O	13,3%
Calcium oxide	CaO	8,9%
Alumina	Al ₂ O ₃	2,5%
Magnesium oxide	MgO	2,1%
Potassium oxide	K ₂ O	0,8%
Iron oxide	Fe ₂ O ₃	0,4%
Sulfur dioxide	SO ₃	0,1%
Titanium dioxide	TiO ₂	0,1%

Tab. 10 – Composizione chimica di alcune tipologie di pomice.

La caratterizzazione al SEM (**Fig. 22**) evidenzia i vantaggi di utilizzare un materiale leggero, espanso naturalmente, grazie alla struttura alveolare a celle aperte formando un reticolo di microporosità diffusa all'interno della struttura dei singoli grani.

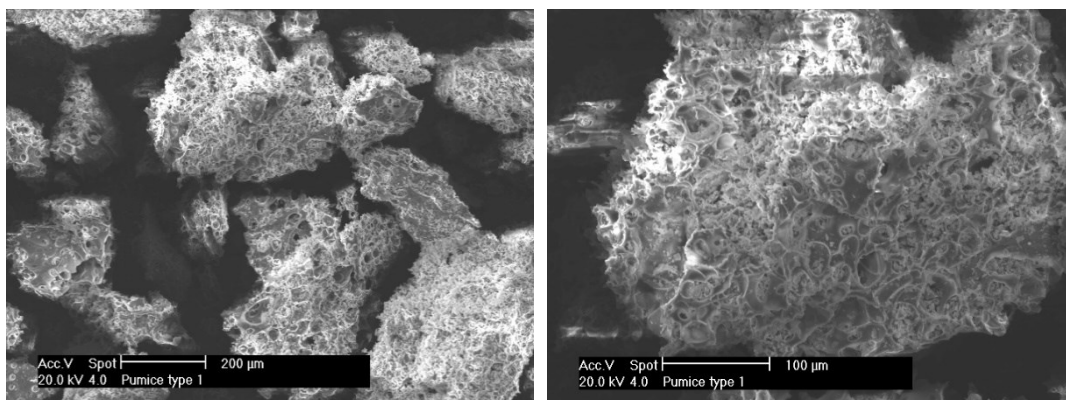


Fig. 22 – Caratterizzazione al SEM: pomice in opportuna curva granulometrica, ingrandimento a 200 µm e 100 µm.

Perlite espansa in granuli

La perlite espansa (**Fig. 23**) è un composto del silicio, derivante da una specifica varietà di roccia vulcanica effusiva, ottenuta con un processo di espansione termica con bruciatori a metano che consentono di ottenere un prodotto inorganico, stabile e chimicamente inerte. Dopo l'espansione, il materiale viene sottoposto a vagliatura per ottenere un prodotto in opportuna curva granulometrica in base alle applicazioni ed utilizzi finali.



Fig. 23 – Perlite espansa in granuli.

Perlite espansa in granuli		
Silice	SiO ₂	74 - 78%

Ossido di alluminio	Al_2O_3	11 - 14%
Ossido di ferro	Fe_2O_3	0,5 - 1,5%
Ossido di sodio	Na_2O	3 - 6%
Ossido di potassio	K_2O	2 - 4%
Ossido di calcio	CaO	1 - 2%
Ossido di magnesio	MgO	0 - 0,5%

Tab. 11 – Composizione chimica della perlite espansa.

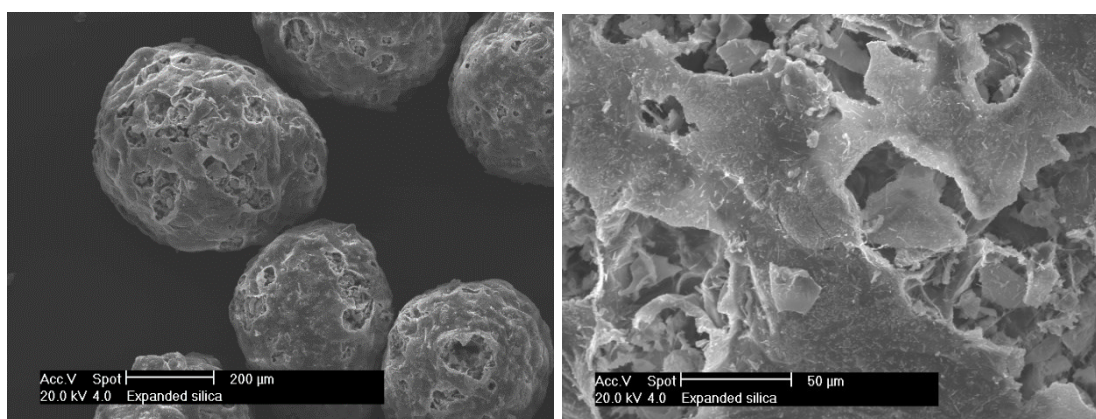


Fig. 24 – Caratterizzazione al SEM: perlite espansa in opportuna curva granulometrica, ingrandimento a 200 µm e 50 µm.

La caratterizzazione al SEM (**Fig. 24**), sia sotto forma di filler (analizzata precedentemente) che, in maniera più accentuata, nella configurazione di granuli espansi, evidenzia la natura cristallina della materia prima, la quale forma una struttura diffusa caratterizzata da un'elevata porosità e cavità interconnesse tra di loro. Ciò è molto importante dal punto di vista termico e acustico in quanto il materiale, sia in fase filler che in aggregato mantiene sempre la sua porosità, attribuendo ai composti nei quali viene inglobata una percentuale di pori elevata. La struttura finale dei granuli mostra la compresenza di una fitta rete di macroporosità aperte, canalicoli comunicanti tra loro a partire dalla superficie esterna del granulo, e di microporosità chiuse (cavità isolate interne al granulo).

Sughero

Il sughero (**Fig. 25**) è una risorsa naturale, sostenibile, ecologica e rispettosa dell'ambiente in quanto è biodegradabile e rinnovabile al 100%. Ha ottime proprietà fisico-chimiche, meccaniche e un'elevata elasticità. La sua struttura compatta e indeformabile lo rende impermeabile ai liquidi e ai gas. È un ottimo isolante sia termico che acustico e inoltre ha buone caratteristiche di isolamento nei confronti delle vibrazioni. Il sughero si estrae asportando un determinato strato della corteccia dal tronco senza causare danni alla pianta, con cicli di estrazione di circa 9/12 anni: questo metodo non danneggia la pianta e permette alla nuova corteccia di rinnovarsi e crescere. Grazie a questo ciclo ogni albero è una fonte di materia prima rinnovabile. Per le sue ottime caratteristiche isolanti (conduttività: 0,040 - 0,05 W/mK), viene utilizzato in edilizia, nello specifico nei settori della bioedilizia, in quanto il sughero al naturale o opportunamente trasformato, rientra totalmente nei principi di sostenibilità e compatibilità tra i materiali.



Fig. 25 – Sughero in granuli.

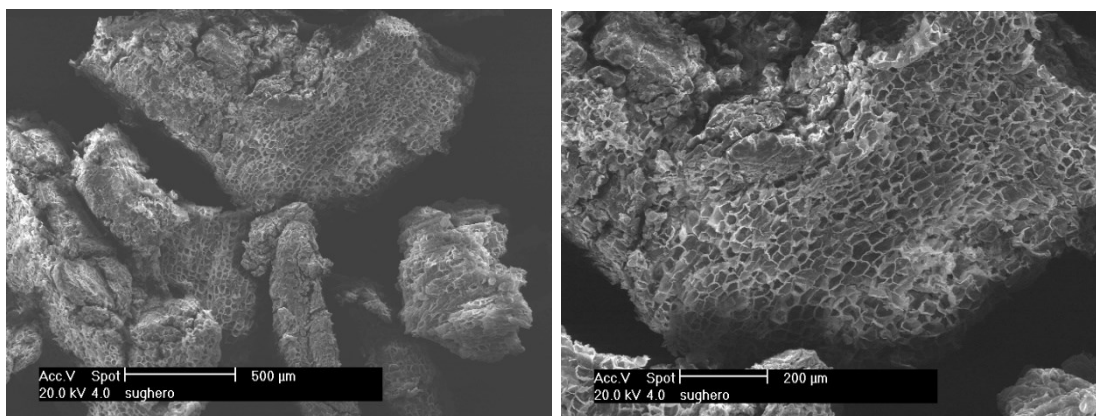


Fig. 26 – Caratterizzazione al SEM: sughero in granuli, ingrandimento a 500 µm e 200 µm.

La caratterizzazione al SEM evidenzia come il sughero, grazie alla sua natura di origine vegetale, si distingue per la sua struttura alveolare e uniforme, con una microporosità diffusa all'interno di ogni singolo granulo. Questa conformazione caratteristica rende il sughero un materiale estremamente poroso, leggero e termico.

Vetro espanso

Il vetro espanso (**Fig. 27**) è un materiale molto innovativo sia dal punto di vista delle proprietà di isolamento termico che acustico. Altro enorme benefit che questo materiale apporta è sul lato ambientale. Infatti, i prodotti di scarto provenienti sia dall'industria manifatturiera del vetro stesso sia dai rifiuti in generale possono essere riciclati, polverizzati e trasformati in piccole sfere. Il risultato sono delle sfere di colore bianco di varie granulometrie, leggere ma con un'ottima resistenza meccanica a compressione, resistenza al calore e agli agenti chimici, ed eccellenti proprietà di isolamento acustico e termico. In generale, essendo utilizzando vetro amorfo per la sua produzione, il materiale che ne deriva è chimicamente resistente agli alcali (e perciò ideale per la lavorazione con calce e cemento), agli agenti atmosferici e alle fiamme.



Fig. 27 – Vetro espanso riciclato in granuli: granulometria 1 – 2 mm.

Vetro espanso riciclato in granuli		
Silicia	SiO ₂	56%
Alumina	Al ₂ O ₃	22%
Alkali	K ₂ O + Na ₂ O	5% - 7%
Iron oxide	Fe ₂ O ₃	3%
Calcium oxide	CaO	2%
Magnesium oxide	MgO	0,5%
Titanium dioxide	TiO ₂	0,5%

Tab. 12 – Composizione chimica del vetro espanso.

La caratterizzazione al SEM (**Fig. 28**) evidenzia in modo ancor più marcato la porosità di questa materia prima, la cui morfologia stessa delle sfere di vetro è caratterizzata da micropori che incrementano maggiormente le proprietà fonoassorbenti una volta inglobate all'interno di un composto.

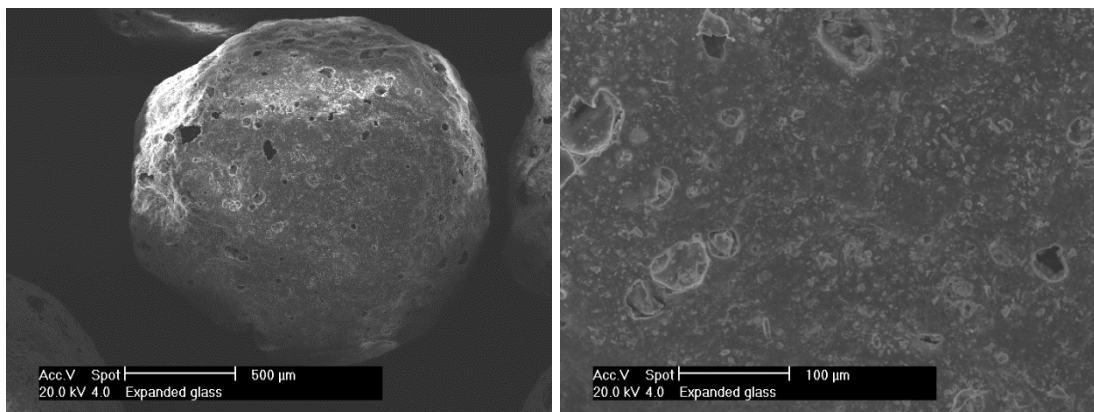


Fig. 28 – Caratterizzazione al SEM: vetro espanso in granuli, ingrandimento a 500 µm e 100 µm.

Aerogel

La ricerca nel campo dei materiali altamente tecnologici si è spostata in laboratorio sui cosiddetti superisolanti, ossia su quei materiali, come gli aerogel, con una conducibilità termica inferiore a 0,02 W/mK (e spesso inferiore a 0,01 W/mK).

Gli aerogel (**Fig. 29**) sono materiali nanostrutturati sintetici altamente porosi, ispirati a un brevetto di Steven Kistler del 1931. Il termine aerogel deriva dal gel di cui sono costituiti, in cui la componente liquida del gel viene poi sostituita con un gas, conferendo al prodotto finale un aspetto di “fumo condensato” o “nebbia solidificata”. Rispetto a qualsiasi altro materiale conosciuto, l'aerogel ha la più alta porosità, la più alta superficie specifica e la più bassa densità, tipicamente inferiore a 100 kg/m³. Il valore di conducibilità termica che si ottiene per questo materiale è il risultato dell'elevata porosità e della *nano* dimensione dei pori.

Infatti, i nanopori che hanno diametri di poche decine di nanometri occupano dall'85% fino al 99,9% del volume totale, dando origine a un materiale ad elevatissima porosità e con proprietà fisiche, termiche, ottiche e acustiche uniche, ma anche resistenze meccaniche ridotte. A causa della scarsa resistenza meccanica, gli aerogel sono tipicamente incorporati in una matrice di fibre più forti, per migliorarne la resistenza complessiva e, in particolare nel settore edile, sottoforma di strati isolanti come pannelli, o in intonaci come malte e intonaci.



Fig. 29 – Aerogel in granuli.

IV. Additivi

Gli additivi sono sostanze chimiche aggiunte, solitamente in piccole quantità, nell'impasto di una miscela, sotto forma di liquido o polvere, con il fine di migliorare una o più prestazioni allo stato fresco e/o indurito della miscela stessa. A seconda della funzione coinvolta nel miglioramento, gli additivi possono essere classificati nel seguente modo:

- *Fluidificanti*: migliorano la lavorabilità dell'impasto a pari rapporto acqua/cemento (a/c) senza alterare la resistenza meccanica finale;
- *Viscosizzanti*: modificano la reologia della miscela fresca, migliorandone la lavorabilità e l'omogeneità del getto;
- *Acceleranti*: riducono i tempi di presa della miscela e contemporaneamente possono apportare un incremento della resistenza meccanica iniziale. Particolarmente indicati nei climi freddi;
- *Ritardanti*: riducono il grado di idratazione nelle prime ore. Particolarmente indicati nei climi caldi per evitare un'eccessiva perdita di lavorabilità e fenomeni di ritiro in fase plastica;
- *Aeranti*: agiscono modificando la tensione superficiale (tensioattivi) dell'acqua presente nell'impasto e favoriscono la formazione di bolle d'aria in fase di miscelazione;
- *Antiritiro*: agiscono diminuendo la tensione superficiale dell'acqua che rimane nei pori capillari riducendo quindi la contrazione da ritiro

igrometrico, senza modificare il naturale trasferimento d'acqua dalla miscela verso l'ambiente insaturo di umidità.

Metilcellulosa

Sono additivi derivanti dalla metilcellulosa pura o modificata con additivi organici ed inorganici (**Fig. 30**), allo scopo di migliorare le proprietà di applicazione e resistenza di intonaci, rasanti, collanti e finiture sia a base gesso-calce che a base cemento o cemento-calce. Queste sostanze manifestano un'eccellente ritenzione d'acqua e riducono la migrazione della stessa dal formulato verso substrati porosi. Inoltre, conferiscono lavorabilità, resistenza alla colatura e garantiscono un'ottimale miscelazione evitando la formazione di grumi. Le cellulose usate nell'edilizia come modificatori reologici, vengono classificate in base al grado di viscosità (viscosimetro Brookfield). Nel passato si tendeva ad usare cellulose con gradi di viscosità più elevati ma questo comportava lo svantaggio di un'elevata "collosità" della miscela e di conseguenza anche di tempi di asciugatura più lunghi, poiché l'evaporazione dell'acqua avveniva molto lentamente. Perciò la tendenza attuale è di scendere intorno ai 20000 - 15000 mPas per bilanciare il rapporto tra viscosità/tempi di presa.



Fig. 30 – Metilcellulosa modificata in polvere.

Resine in polvere

Le resine in polvere (**Fig. 31**) impiegate nell'edilizia solitamente sono copolimeri in polvere a base di vinilacetato / etilene che agiscono da legante ed agente idrorepellente. Grazie alla particolare composizione, al metodo di produzione del materiale, ed allo speciale procedimento di polimerizzazione con l'attivazione alcalina dovuta alla presenza di cemento, calce o silicati nelle miscele, si ottiene automaticamente un'accentuata e durevole idrorepellenza dei materiali con

conseguente riduzione di assorbimento di acqua. L'aggiunta di resine migliora l'adesione e la resistenza alla flessione adattandosi alle diverse condizioni climatiche. Sono particolarmente adatte per la formulazione di prodotti con elevata flessibilità e ottima adesione di lunga durata.

L'uso di questi additivi, oltre a migliorare l'adesione, offre molteplici benefici alle formulazioni. Il tempo aperto ed il "pot life" vengono prolungati a seconda del tipo di formulazione e del dosaggio. Il suo impiego in combinazione con eteri di cellulosa (vedi paragrafo precedente "Metilcellulose") migliora le proprietà allo stato fresco della malta e la sua lavorabilità.



Fig. 31 – Resine in polvere.

Aerante in polvere

Gli additivi aeranti (**Fig. 32**) generalmente agiscono modificando la tensione superficiale dell'acqua provocando la formazione di bolle d'aria durante la miscelazione meccanica dell'impasto. Esistono tre tipologie di tensioattivi:

- *Tensioattivi anionici*: generalmente Sali costituiti da lunghe catene di atomi terminanti con un gruppo carbossilato o solfonato. In questo caso, se si crea un ambiente che disturba la formazione della micella di tensioattivo (ad esempio la presenza di cationi), questo tipo di additivo potrebbe non attivarsi completamente o del tutto.
- *Tensioattivi non ionici*: sono alcoli a lunga catena, come i derivati poliossietilenici degli acidi grassi. Questo tipo di additivi sono più stabili poiché non sono influenzabili non essendo caricati né positivamente né negativamente ma sono meno efficaci nella formazione della micella.
- *Tensioattivi anfoteri*: sono zwitterioni e si comportano come tensioattivi cationici in ambiente acido o anionici in ambiente alcalino. Dipendono quindi dal pH in cui si trovano: prendono carica positiva se si trovano in

ambiente acido, carica negativa se si trovano in ambiente basico. Poiché la miscela cementizia è basica, sostanzialmente si comporta come un tensioattivo anionico.

Un'azione collaterale ma benefica degli additivi aeranti consiste nella riduzione di circa il 5% nell'acqua d'impasto per ottenere una determinata lavorabilità



Fig. 32 – Aerante in polvere.

V. Tabelle riassuntive materiali

In questa sezione sono riportate le materie prime più significative ai fini della sperimentazione, concentrandoci in particolare sui filler e sugli aggregati. Lo scopo è quello di riportare una panoramica sui materiali al fine di evidenziare come al variare delle materie prime impiegate, ad esempio per la produzione di una malta, alcune di queste siano più performanti di altre rispetto al parametro della conduttività termica e delle densità.

La fase del mix design, e quindi lo studio a monte delle singole componenti, è una fase che deve procedere per step progressivi, in cui le miscele devono essere gradualmente ottimizzate al fine di ottenere un buon compromesso tra lavorabilità della miscela fresca, proprietà funzionali allo stato indurito e resistenza meccanica finale.

Tab. V.1 Filler

Denominazione	Curva granulometrica (μm)	Densità apparente (kg/m^3)	pH	λ (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Reazione al fuoco
Caolino calcinato	0,8	210	4 ÷ 7	-	-	Classe A1
Perlite micronizzata	0 ÷ 150	100 ÷ 160	6,5 ÷ 7,5	0,040 ÷ 0,060	837	Classe A1

Tab. V.2 Aggregati

Aggregati tradizionali	Curva granulometrica (μm)	Densità apparente (kg/m^3)	pH	λ (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Reazione al fuoco
Carbonato di calcio	200 ÷ 600	1300 ÷ 1500	10	-	-	Classe A1
Aggregati leggeri termici	Curva granulometrica (mm)	Densità apparente (kg/m^3)	pH	λ (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Reazione al fuoco
Argilla	0 ÷ 3	600 ÷ 950	10	0,085 ÷ 0,130	920 ÷ 1100	Classe A1 – A1 _{FL}
Pomice (tipo 1 e 2)	0,09 ÷ 0,3	360	7 ÷ 8	0,080	840	Classe A1
	0,25 ÷ 0,5	320				
	0,50 ÷ 1,0	310				
	1,0 ÷ 2,0	300				
Pomice (tipo 3)	0 ÷ 0,10	800 ÷ 950	7 ÷ 8	0,110	840	Classe A1
	0,10 ÷ 0,85	750 ÷ 800				
	0,85 ÷ 3,0	850 ÷ 1000				
Perlite espansa	1,0 ÷ 2,0	90 ÷ 100	6,5 ÷ 7,5	0,050	837	Classe A1
Sughero	0 ÷ 3,15	80 ÷ 100	-	0,038 ÷ 0,045	1600 ÷ 1900	-
Aggregati innovativi	Curva granulometrica (mm)	Densità apparente (kg/m^3)	pH	λ (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Reazione al fuoco
Vetro espanso riciclato	0,25 ÷ 0,5	340	8 ÷ 11	0,070	850	Classe A1
	0,50 ÷ 1,0	270				
	1,0 ÷ 2,0	230				
Aerogel	0,01 ÷ 4,0	60 ÷ 100	-	0,018 ÷ 0,020	-	-

2.5.4 Mix design e caratterizzazione delle miscele: alcuni cenni

Il progetto di ricerca del dottorato prende le mosse dall'idea di studiare differenti sistemi di isolamento applicati in particolare su pareti fortemente inerziali per analizzarne il comportamento dinamico durante il periodo estivo attraverso delle campagne di sperimentazione sul campo. Più specificatamente, la sperimentazione in sito è stata condotta su un mockup, localizzato a Fabriano, e caratterizzato da pareti con un'elevata massa termica e due diversi sistemi di isolamento esterno a

cappotto presenti in commercio: un intonaco a base calce alleggerito con inerti in sughero e un tradizionale pannello in polistirene espanso estruso (XPS).

Lo scopo è quello di individuare le caratteristiche e i parametri termici che meglio descrivono il comportamento dinamico dell'involucro edilizio sottoposto alle condizioni climatiche estive mediterranee, oltretutto valutare quale sistema di isolamento sia più funzionale rispetto agli obiettivi prefissati. La verifica attraverso dati sperimentali dell'efficacia di una stratigrafia rispetto all'altra è indispensabile per poter capire quali materiali isolanti ottengono le migliori performance non solo in regime stazionario (periodo invernale) ma anche in quello dinamico (periodo estivo). Costruire o riqualificare edifici con target sempre più elevati di efficienza energetica è un obiettivo che passa attraverso lo studio e la conoscenza del comportamento dell'involucro edilizio, in particolare, rispetto ai carichi di picco estivi per poter stimare il fabbisogno energetico globale. La scelta dei materiali e delle tecniche di isolamento diventa anch'essa strategica per raggiungere gli obiettivi appena esposti.

Per questi motivi una parte della ricerca è stata incentrata sullo studio delle singole materie prime e successivamente sulla sperimentazione di mix design innovativi per la formulazione d'intonaci termici per studiarne i meccanismi di funzionamento e le proprietà termiche.

Come abbiamo già visto nei paragrafi precedenti, una malta è una miscela formata da un legante, solitamente cemento, unito a sabbia e acqua: i componenti vengono miscelati tra loro in opportune proporzioni al fine di ottenere un impasto di consistenza lavorabile (allo stato fresco) e una determinata resistenza finale (allo stato indurito). A tutti gli effetti, si può parlare di "conglomerato" cementizio. Gli utilizzi più conosciuti delle malte sono quelli tradizionali per murature ed intonaci, e per i rivestimenti in generale. A queste funzioni primarie, si sono aggiunte a mano a mano impieghi con finalità sempre più specializzate, ovvero, le caratteristiche tecniche richieste alla malta sono diventate sempre più mirate e verso valori altamente performanti.

Un esempio è proprio il così detto temintonaco (**Fig. 33**): una malta che ingloba al suo interno inerti alleggeriti con proprietà termoisolanti in grado di raggiungere degli ottimi valori di Resistenza termica con poco spessore, traspirabilità, compatibilità con la muratura, resistenza meccanica ed elasticità, protezione della struttura dagli agenti esterni.



Fig. 33 – Esempi di miscele di termointonaco: l'introduzione di aggregati leggeri e l'impiego di additivi aeranti permette di ottenere un'elevatissima porosità in fase di miscelazione allo stato fresco.

Dopo aver analizzato le caratteristiche chimico – fisiche dei materiali e aver selezionato quelli più innovativi e performanti, la fase della formulazione delle miscele è stata condotta per step progressivi. Le miscele sono state gradualmente ottimizzate al fine di ottenere un buon bilanciamento tra lavorabilità e proprietà funzionali allo stato indurito.

La fase sperimentale di mix design può essere riassunta e suddivisa come segue:

- Prima fase del mix design: il progetto delle miscele è stato condotto inserendo gradualmente materiali innovativi ed ecosostenibili rispetto a materiali più tradizionali, variando anche le percentuali di volume degli aggregati e dei filler da sostituire.
- Seconda fase: ottimizzazione del mix design. Ha lo scopo di migliorare le principali caratteristiche che una miscela deve possedere: lavorabilità, applicabilità, resistenza meccanica e, ovviamente, conducibilità termica.
- Terza fase: implementazione del mix design. Ulteriore ottimizzazione per raggiungere gli obiettivi inizialmente posti: intonaco termico ad elevate prestazioni per l'efficientamento energetico degli edifici.

La sperimentazione ha visto la messa a punto di circa 60 intonaci, sui quali sono state condotte prove preliminari come lo studio del comportamento reologico della

miscela, applicabilità, controllo dei tempi di asciugatura e di presa, prove di conducibilità termica e controllo della resistenza meccanica.

Nello specifico, in questa sezione tratteremo solo i risultati ottenuti dalle prove di conducibilità termica condotte su tutte le miscele di intonaco.

Prova di conducibilità termica: Heat Flux Meter

Le prove di determinazione della conducibilità termica sono state eseguite secondo la UNI EN 12667 “*Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro – Prodotti con alta e media resistenza termica*”.

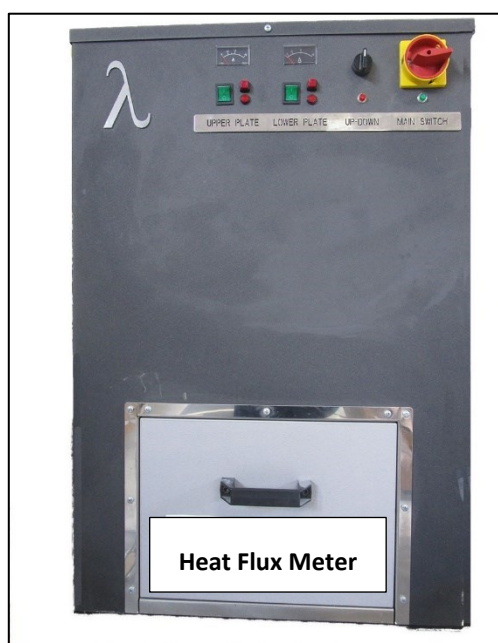


Fig. 34 – Strumentazione per la determinazione della conducibilità termica λ .

L'*heat flow meter* misura la densità del flusso di calore che attraversa un campione in esso inserito. Tale flusso è generato da una differenza di temperatura ed è prodotto da un *homogeneous core*: un rilevatore di differenza superficiale di temperatura (multi – junction termopile) e un rilevatore/i di temperatura superficiale. I dati registrati vengono raccolti ed elaborati da un software appositamente programmato. Il flussometro di calore è progettato per mantenere una temperatura costante su entrambi i lati del campione: tolleranza di variazione di temperatura inferiore a $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ (il flusso di calore viene misurato con due sensori di flusso termico separati).

L'*heat flow meter* occupa la parte relativa al core dell'*apparatus*, dove è posizionato il rilevatore/i di temperatura superficiale. Questa è identificata come la *metering area*. Attraverso questa prova è possibile determinare le proprietà relative alla conducibilità e alla resistenza termica di lastre di materiale campionato concorde alle normative ISO 8301, EN 12667 e ASTM C518.

I principali elementi costitutivi del macchinario sono:

- Un'unità riscaldante,
- 1 o 2 termoflussimetri,
- 1 o 2 campioni e un'unità di raffreddamento.

Le principali configurazioni possibili dell'apparecchiatura sono riportate in **Fig.35** (per valutare i vantaggi e/o svantaggi una configurazione rispetto ad un'altra, occorre consultare la ISO 8301 Annex B).

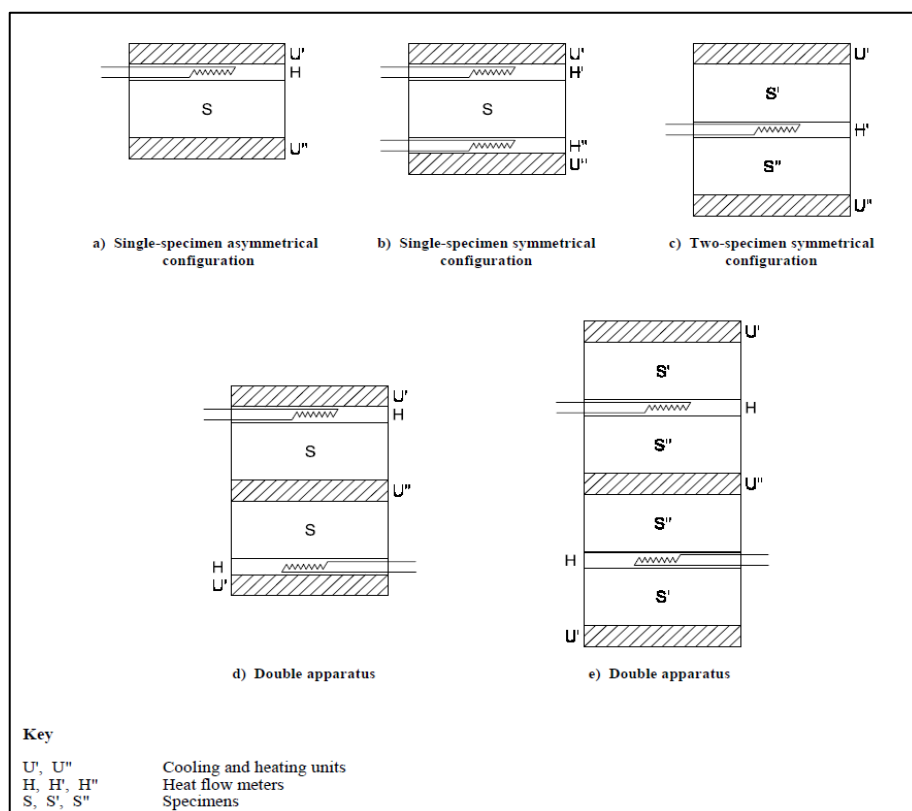


Fig. 35 – Possibili configurazioni dell'Heat Flux Meter Apparatus.

Il dispositivo restituisce come output il valore e_h :

$$q = f x e_h \quad (15)$$

dove:

q : quantità del flusso di calore

f : fattore di calibrazione

e_h : valore di output

Il fattore di calibrazione f , che correla e_h e q , non è una costante in tutti i casi, ma può dipendere dalla temperatura e , in misura più limitata, dalla densità del flusso termico.

La procedura di calibrazione è fornita nella norma ISO 8301.

L'apparecchio deve essere usato solo per densità di flusso termico all'interno di un range coperto dalla calibrazione.

Questo metodo si basa sulla resistenza termica del provino/i misurata e comparata ad un campione standard di riferimento; per tal motivo è di grande importanza la fase di calibrazione dello strumento.

Dalla misura della quantità del flusso di calore con il campione standard e del flusso di calore del campione da determinare, si deve raggiungere la condizione costante di densità del flusso di calore attraverso la *metering section* e assumendo costante la differenza di temperatura e la temperatura media, è possibile determinare nel seguente modo la resistenza termica del campione standard R_s e quella del campione sconosciuto R_u :

$$R_u/R_s = \Phi_s/\Phi_u \quad (16)$$

Risultati delle prove di conducibilità termica

La conduttività misurata è correlata principalmente a due parametri: lo spessore e la densità del materiale sottoposto a prova. In particolare, la dipendenza dallo spessore è più marcata per i materiali a bassa densità per via di problemi metrologici. Per questo motivo, tutti i campioni testati sono stati confezionati con le medesime dimensioni, 30 cm x 30 cm, e spessore 3 cm (vedi **Fig. 36**). Mentre per quanto riguarda la correlazione tra densità del materiale e conducibilità, questa è legata ai meccanismi della trasmissione del calore che si innescano a livello microscopico: al diminuire della densità aumentano i micro - scambi radiativi aumentando così la conduttività apparente del prodotto. Questo fenomeno è certamente importante e da tenere in considerazione data l'estrema leggerezza di alcune formulazioni

sperimentali ottenute e l'elevata porosità sia delle singole materie prime utilizzate, sia degli intonaci realizzati.



Fig. 36 – Realizzazione delle miscele e getti dei campioni 30 cm x 30 cm per le prove da condurre con l'Heat Flux Meter Apparatus, previa stagionatura dei provini.

I mix design progettati sono stati denominati in maniera progressiva e assegnando a ciascuno un numero. Per ogni formulazione, 58 intonaci, è stata riportata la densità media dei campioni stagionati e condizionati secondo quanto riportato dalle normative di prodotto (UNI EN 998-1): il numero di campioni testati per ciascun mix design è stato pari a 2.

ID	ρ_{dry}	$\lambda_{10,dry}$	ID	ρ_{dry}	$\lambda_{10,dry}$
1	361	0,059	30	195	0,053
2	410	0,064	31	209	0,047
3	352	0,050	32	199	0,045
4	393	0,053	33	195	0,052
5	382	0,062	34	476	0,071
6	381	0,060	35	213	0,055
7	357	0,060	36	176	0,039
8	409	0,055	37	146	0,039
9	452	0,071	38	171	0,041
10	424	0,068	39	173	0,045
11	307	0,060	40	160	0,043
12	374	0,061	41	155	0,042
13	365	0,067	42	158	0,044
14	330	0,061	43	180	0,050
15	321	0,062	44	178	0,049
16	318	0,061	45	182	0,049
17	334	0,056	46	248	0,046
18	362	0,062	47	342	0,062
19	213	0,051	48	295	0,055
20	342	0,063	49	316	0,066
21	348	0,060	50	287	0,053
22	412	0,061	51	250	0,051
23	394	0,056	52	163	0,039
24	387	0,055	53	163	0,045
25	494	0,066	54	152	0,036
26	428	0,058	55	155	0,041
27	242	0,050	56	173	0,043
28	267	0,054	57	402	0,065
29	494	0,074	58	387	0,060
30	195	0,053			

Tab. 13 – Elenco delle formulazioni sperimentali realizzate: determinazione della densità (kg/m^3) e della conducibilità termica (W/mK).

La **tabella 13** riporta tutti i valori misurati sulle miscele: sono evidenziati dei range di valori sulla colonna relativa al peso specifico applicati tramite la funzione excel *formattazione condizionale* impostando la regola di evidenziare le celle con valori di ρ_{dry} compresi tra 200 kg/m^3 e 320 kg/m^3 . Stessa funzione è stata applicata sulla

colonna relativa alla conducibilità termica applicando la regola di evidenziare le celle con valori di $\lambda_{10, dry}$ compresi tra 0,035 W/mK e 0,045 W/mK.

Tutti i valori tabulati sono stati graficati mettendo in correlazione questi due parametri: densità e conducibilità termica (Fig. 37).

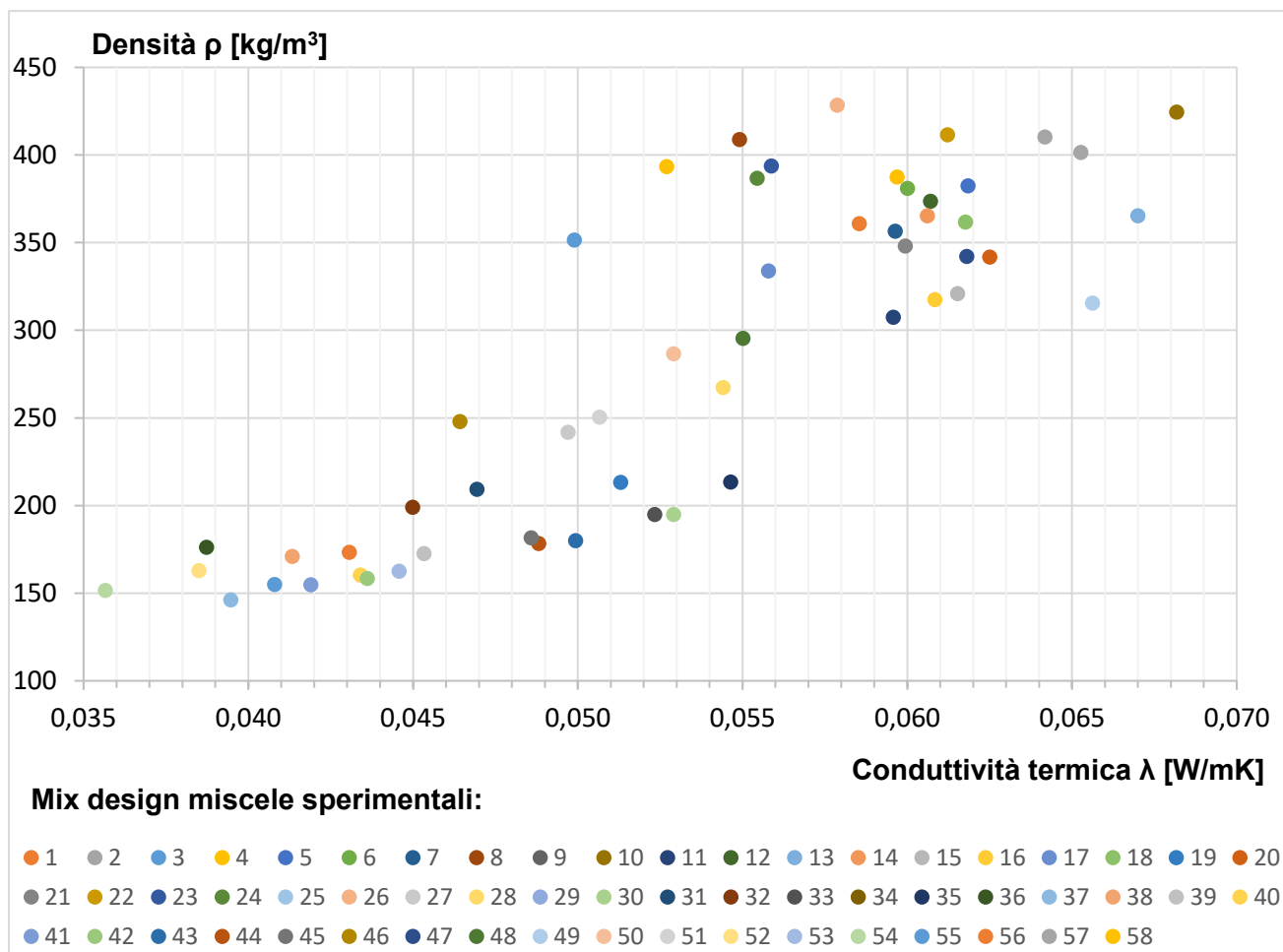


Fig. 37 – Correlazione tra densità e conducibilità termica dei campioni realizzati con le miscele sperimentali di termointonaco a parità di dimensioni del provino (superficie e spessore).

Dall'analisi dei dati riportati emergono alcune riflessioni in merito a:

- Influenza degli *additivi aeranti*, sia per tipologia che per il dosaggio % in miscela. Infatti, i tensioattivi anionici sono più influenzabili dalle variazioni di pH dell'ambiente, mentre i tensioattivi anfoteri si adattano all'ambiente diventando cationici o anionici in funzione del pH dell'ambiente miscela. Altro aspetto rilevante è la % di dosaggio: trovare un punto di equilibrio

nella miscela non è semplice poiché un dosaggio troppo elevato potrebbe inizialmente portare alla formazione di una schiuma molto aerata (vedi **Fig. 36**) ma successivamente potrebbe collassare in fase di asciugatura e indurimento della malta. Il dosaggio di questo additivo dipende da molteplici fattori: rapporto legante/aggregati, rapporto acqua/legante, tipologia degli inerti, curva granulometrica degli inerti combinati all'interno della miscela.

- Utilizzo dell'*aerogel in granuli*: la combinazione di questo tipo di aggregato innovativo con gli altri inerti leggeri è risultata essere sempre la migliore in termini di valori di conducibilità termica e di leggerezza finale dell'intonaco. Le miscele hanno ottenuto valori di $\rho < 200 \text{ kg/m}^3$ e $\lambda < 0,045 \text{ W/mK}$.
Anche in questo caso il dosaggio in % influisce sul risultato finale ma influisce negativamente in termini di prestazioni meccaniche e di lavorabilità della miscela allo stato fresco. L'introduzione di dosi elevate di questo aggregato porta a scarsissime resistenze meccaniche e di coesione della matrice, oltre che a un peggioramento in fase di applicazione della miscela. Non da ultimo, dal punto di vista dei costi e di approvvigionamento è un materiale molto costoso e con pochi produttori/distributori in Europa.
- Utilizzo della *perlite* sia sotto forma di granuli che di filler: le miscele realizzate combinando la perlite hanno riportato dei risultati ottimali che ben bilanciano il requisito di sufficiente resistenza meccanica con quello di un ottimo valore di conducibilità termica. Le miscele hanno ottenuto valori di densità compresa tra $200 \text{ kg/m}^3 < \rho < 400 \text{ kg/m}^3$ e di conducibilità termica $0,045 \text{ W/mK} < \lambda < 0,062 \text{ W/mK}$ in combinazione con altri aggregati leggeri escluso l'aerogel.
- Influenza della *bassa densità* sui fenomeni di trasmissione del calore per la determinazione della conduttività. La UNI 10351, che integra quanto non presente nella UNI EN ISO 10456, richiama il fatto che la conduttività termica definisce l'attitudine di un materiale omogeneo ed isotropo a trasmettere il calore quando lo scambio avviene solo per conduzione. Nei materiali cellulari, granulosi, fibrosi e porosi di bassa massa volumica, i meccanismi di trasmissione avvengono anche e soprattutto per radiazione e per convezione. Per questi materiali nella norma viene introdotto il concetto di *conduttività termica apparente*. Il valore di conduttività termica misurato per ogni materiale di questo tipo non è univoco in quanto dipende dallo spessore e dal gradiente termico. I valori ottenuti dalle prove aumentano all'aumentare degli spessori e del gradiente di temperatura. In particolare, in

assenza di convezione, la conduttività misurata tende ad un valore costante al crescere dello spessore del campione.

Questo fenomeno spiega la grande variabilità dei dati di conducibilità ottenuti: per materiali a bassa densità, piccole variazioni di massa portano a notevoli variazioni di conduttività termica.

In questa sezione gli obiettivi della ricerca sono stati volti ad analizzare miscele sperimentali di intonaci termoisolanti in grado di apportare un contributo alla riduzione dei consumi energetici, affrontando anche la tematica relativa al riciclo e all'impiego di materiali naturali compatibili con la bioedilizia. La scelta consapevole dei materiali da impiegare è fondamentale: pomice con estrazione e lavorazione a basso impatto ambientale, vetro post – consumo espanso, silice espansa composta principalmente da silice amorfa e una percentuale di vetro riciclato. L'impiego di materiali con un buon Life – Cycle Assessment (LCA), in grado di rispettare e sostenere il concetto di sostenibilità dei materiali, è la chiave di volta per ridurre sia l'impatto che il settore dell'edilizia ha sull'ambiente, sia la riduzione dei consumi energetici grazie all'impiego di materiali isolanti energy efficient e allo stesso tempo ecofriendly.

Le prove condotte sulle miscele analizzate hanno consentito di studiare la correlazione tra le proprietà degli intonaci e i materiali selezionati, mentre i parametri funzionali determinati sono serviti a stabilire, o quanto meno ad ipotizzare, una correlazione tra conducibilità termica, micro e macroporosità delle matrici, resistenza meccanica e lavorabilità delle miscele. Il campo di ricerca è tutt'oggi molto vasto e i risultati ottenuti incoraggianti per sviluppi futuri nel campo dei termintonaci come valida alternativa alla tradizionale tecnica dell'intonaco a cappotto mediante pannelli in XPS o EPS, argomento trattato nel capitolo successivo attraverso campagne sperimentali su mock up esistenti.

List of Figures

Fig.1 – Distribuzione del patrimonio edilizio residenziale (13,7 Mln di edifici) per epoca di costruzione (fonte ES-PA – ENEA).

Fig.2 – Quantità minime di materiale riciclato e/o recuperato da pre consumo in %.

Fig.3 – Classificazione dei materiali isolanti (Fonte ANIT).

Fig.4 – Meccanismi di trasmissione del calore: esempio di trasmissione all'interno di un termointonaco. A) conduzione attraverso la matrice del legante; B) conduzione attraverso le molecole d'aria intrappolate nelle bolle di porosità o negli aggregati leggeri; C) convezione nell'aria intrappolata; D) irraggiamento tra le pareti degli spazi vuoti. (Fonte ANIT)

Fig.5 – Grafico di correlazione tra conduttività apparente e densità di un materiale. La risultante macroscopica combina l'effetto microscopico dei diversi meccanismi di trasmissione del calore: a) conduzione attraverso l'aria; b) convezione nei fluidi presenti; c) irraggiamento tra gli spazi interstiziali microscopici; d) conduzione attraverso le parti solide; e) trasmissione complessiva attraverso il materiale. (Fonte ANIT)

Fig. 6 – Analogia idraulica: il rischio di surriscaldamento passa dal controllo degli apporti solari Q_{sol} . (Fonte ANIT)

Fig. 7 – Suddivisione di un materiale in strati e soggetto al passaggio di un flusso: ogni strato trattiene una parte di energia (serbatoio = capacità di accumulo propria per ogni strato) riducendo strato per strato il flusso stesso. (Fonte ANIT)

Fig. 8 – Strato di rasante (b) a base calce applicato su un termointonaco (a) sempre a base calce e con inerti leggeri.

Fig.9 – Calce idrata: $Ca(OH)_2$.

Fig. 10 – Calce idraulica naturale.

Fig. 11 – Cemento Portland.

Fig. 12 – Caolino calcinato (diametro nominale delle particelle 0,80 μm).

Fig. 13 – Caratterizzazione al SEM: Caolino calcinato ingrandimento a 20 μm e 5 μm .

Fig. 14 – Perlite espansa in polvere (granulometria nominale 0 - 150 μm).

Fig. 15 – Caratterizzazione al SEM: Perlite espansa (0 – 150 μm) ingrandimento a 100 μm e 20 μm .

Fig. 16 – Carbonato di calcio 0-600 μm .

- Fig. 17** – Curva granulometrica del carbonato di calcio 0-600 μm .
- Fig. 18** – Caratterizzazione al SEM del carbonato di calcio, ingrandimento 2 μm .
- Fig. 19** – Argilla espansa frantumata.
- Fig. 20** – Caratterizzazione al SEM: Argilla espansa frantumata, ingrandimento a 200 μm e 100 μm .
- Fig. 21** – Pomice in granuli.
- Fig. 22** – Caratterizzazione al SEM: pomice in opportuna curva granulometrica, ingrandimento a 200 μm e 100 μm .
- Fig. 23** – Perlite espansa in granuli.
- Fig. 24** – Caratterizzazione al SEM: perlite espansa in opportuna curva granulometrica, ingrandimento a 200 μm e 50 μm .
- Fig. 25** – Sughero in granuli.
- Fig. 26** – Caratterizzazione al SEM: sughero in granuli, ingrandimento a 500 μm e 200 μm .
- Fig. 27** – Vetro espanso riciclato in granuli.
- Fig. 28** – Caratterizzazione al SEM: vetro espanso in granuli, ingrandimento a 500 μm e 100 μm .
- Fig. 29** – Aerogel in granuli.
- Fig. 30** – Metilcellulosa modificata in polvere.
- Fig. 31** – Resine in polvere.
- Fig. 32** – Aerante in polvere.
- Fig. 33** – Esempi di miscele di termointonaco: l'introduzione di aggregati leggeri e l'impiego di additivi aeranti permette di ottenere un'elevatissima porosità in fase di miscelazione allo stato fresco.
- Fig. 34** – Strumentazione per la determinazione della conducibilità termica λ .
- Fig. 35** – Possibili configurazioni dell'Heat Flux Meter Apparatus.
- Fig. 36** – Realizzazione delle miscele e getti dei campioni 30 cm x 30 cm per le prove da condurre con l'Heat Flux Meter Apparatus, previa stagionatura dei provini.
- Fig. 37** – Correlazione tra densità e conducibilità termica dei campioni realizzati con le miscele sperimentali di termointonaco a parità di dimensioni del provino (superficie e spessore).

List of Tables

Tab.1 – Tabella relativa ai set di condizioni ammessi per il valore di conduttività termica dichiarato λ_D . Due sono le temperature di riferimento: 10°C oppure 23°C (Fonte UNI EN ISO 10456).

Tab.2 – Le due Tabelle riportano i valori f_u e f_ψ da utilizzare nelle formule (8) e (9) per la conversione della conduttività termica per le differenti condizioni di umidità (Fonte UNI EN ISO 10456).

Tab.3 – Confronto tra il comportamento inerziale del cls e della lana di legno.

Tab. 4 – Caratteristiche termiche per alcuni materiali isolanti in accordo alla UNI EN ISO 10456: i dati di densità, calore specifico e conduttività termica sono quelli indicati dalla norma e la diffusività termica è calcolata utilizzando la formula (10).

Tab. 5 – Prospetto 1 della UNI EN 998-1: valori di conducibilità termica ammessi per la classificazione di malte per isolamento termico in classe T1 o T2.

Tab. 6 – Tabella A.12 “Malta: malta per muratura e malta per intonaco” della UNI EN 1745. I valori tabulati si riferiscono a dati sperimentali relativi a composizioni classiche di malte e in generale di elementi solidi di muratura.

Tab. 7 – Composizione chimica del Caolino calcinato.

Tab. 8 – Composizione chimica della perlite espansa.

Tab. 9 – Composizione chimica dell’argilla espansa.

Tab. 10 – Composizione chimica di alcune tipologie di pomice.

Tab. 11 – Composizione chimica della perlite espansa.

Tab. 12 – Composizione chimica del vetro espanso.

Tab. 13 – Elenco delle formulazioni sperimentali realizzate: determinazione della densità (kg/m^3) e della conducibilità termica (W/mK).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Il comportamento estivo dell'involucro degli edifici – Rapporto tecnico ANIT-sintetico (Dicembre 2017)
- [2] Materiali isolanti e superbonus 110%– Documento di approfondimento ANIT (19 novembre 2020)
- [3] Guida alla nuova Legge 10 (Vol.2 ANIT) – Guida pratica per capire e rispettare le regole sull'efficienza energetica degli edifici e degli impianti
- [4] Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD recast). s.l.: European Parliament and of the Council, 19 May 2010
- [5] *Soluzioni progettuali per interventi di efficientamento energetico* (29 aprile 2020), Arch. Francesca Margiotta, WEBINAR ES-PA SULL'EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI EDIFICI (ENEA)
- [6] C. Masotti, M. Cucinella, *Comfort estivo e risparmio energetico in architettura*, Maggioli Editore, 2012
- [7] I materiali isolanti (Vol.1 ANIT) – Guida all'approccio prestazionale per la scelta dei materiali isolanti
- [8] Usa e isola – Manuale pratico per la posa dei materiali per l'edilizia, ANIT, ANCE, Scuola Edile di Bergamo
- [9] UNI EN ISO 10456:2008 “Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto”.
- [10] UNI EN 998-1:2016 “Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni”
- [11] UNI EN 1745:2020 “Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare le proprietà termiche”
- UNI 10351:2015 “Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto”
- [12] D. Urge-Vorsatz, L.F. Cabeza, S. Serrano, C. Barreneche, K. Petrichenko, Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41 (2015), 85–98.

- [13] S.Barbero, M. Dutto, C. Ferrua, A. Perenoa, Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison, *Energy and Buildings*, 77 (2014), 40–47.
- [14] A.M. Papadopoulos, State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, *Energy and Buildings*, 37 (2005) 77–86.
- [15] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M.T. Blanco-Varela, V. Calderón, Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties, *Construction and Building Materials*, 34 (2012), 179–185.
- [16] Abdel Monem Mohamed Soltan, Wolf-Achim Kahl, Fawzia Abd EL-Raof, Baher Abdel-Hamid El-Kaliouby, Mohamed Abdel-Kader Serry, Noha Ali Abdel-Kader, Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay, *Journal of Cleaner Production*, 117 (2016), 139 -149.
- [17] M. Collepardi, S. Collepardi, R. Troli “Il nuovo calcestruzzo”, ENCO s.r.l., editore Tintoretto, 2009.
- [18] UNI EN 12667 “Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro – Prodotti con alta e media resistenza termica”.
- [19] Giuseppe Emmi(*), Valentina Raisa(**), Roberto Zecchin(*)
(*Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Padova
(**) R & D ALDESITALIA, Modena, Le proprietà dei materiali edilizi per i calcoli termici ed energetici. Parte prima: caratteristiche termofisiche dei materiali da costruzione.

CAPITOLO 3.

L'INFLUENZA DELL'INERZIA TERMICA: ANALISI SPERIMENTALE

3.1 Stato dell'arte

Il settore dell'edilizia, che globalmente comprende sia strutture residenziali, sia commerciali che industriali, accresce annualmente i suoi consumi energetici dell'1,3%. Si prevede che la quantità di energia erogata al settore delle costruzioni mostrerà un aumento dei consumi progressivo fino a raggiungere il 22% nel 2050. La regolamentazione europea, in particolare la Direttiva EPB 2018/844, mira a promuovere una maggiore diffusione delle energie rinnovabili e di strategie per l'efficienza energetica negli edifici, al fine di ottenere riduzioni delle emissioni di gas ad effetto serra e contribuire contemporaneamente ad accrescere la sicurezza dell'approvvigionamento energetico. Poiché il patrimonio edilizio è responsabile di circa il 36% di tutte le emissioni di CO₂ nell'EU, l'impegno di quest'ultima è di ridurre queste emissioni climatiche di almeno il 40% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, promuovendo parallelamente un modello energetico decarbonizzato e ad alta efficienza. Per ridurre il consumo di energia e le emissioni di gas serra, lo sviluppo di strategie d'efficienza energetica negli edifici è senza dubbio la migliore soluzione per mitigare il cambiamento climatico in atto.

Diversi studi hanno dimostrato che il consumo di energia dipeso dagli edifici è influenzato principalmente da sei fattori, così come definito dall' International Energy Agency (IEA):

1. clima,
2. involucro edilizio,
3. servizi di costruzione e sistemi energetici,
4. gestione e manutenzione degli edifici,
5. attività e comportamento degli occupanti,
6. qualità ambientale indoor.

Al fine di individuare le opportunità di risparmio energetico relative a ciascuna di queste sei voci, è necessario studiare in maniera specifica i dati sull'energia dovuta a questi singoli fattori nel bilancio energetico globale imputabile alle costruzioni. Gruppi di lavoro europei hanno previsto un ulteriore aumento del consumo di energia dovuto alla climatizzazione estiva piuttosto che al consumo dovuto per il riscaldamento invernale. Questa previsione si collega ad un altro fondamentale problema: il surriscaldamento urbano dovuto all'effetto isola di calore, Urban

Heating Island (UHI) che porta al surriscaldamento delle città e quindi a un aumento crescente della domanda di energia per il raffrescamento degli edifici. In estate, il surriscaldamento indoor rappresenta un problema sia per la salute degli occupanti, sia per il consumo energetico dovuto all'uso eccessivo dei condizionatori.

Come evidenziato dall' IEA, il tema dell'involucro edilizio (punto 2) è di centrale importanza per il raggiungimento degli obiettivi legati al pacchetto clima – energia che l'UE porta avanti. In particolare, le pareti esterne ricoprono un ruolo significativo nel bilancio energetico di un edificio incidendo sia sull'ambiente, sia sui fabbisogni di energia necessari per mantenere un adeguato comfort indoor. Nel progettare un edificio è necessario considerare tutte le problematiche ad esso legate, valutando non solo la tematica del comfort termico ma anche altri aspetti quali il risparmio idrico, comfort acustico e luminoso, la durabilità della struttura e dei componenti edilizi, la resistenza e la reazione al fuoco. L'obiettivo della sostenibilità dell'edificio prevede accorgimenti non solo nella fase di progettazione e realizzazione, ma sull'intero ciclo di vita dell'edificio e delle parti che lo compongono, compresa la riciclabilità dei materiali, come visto nel capitolo precedente (Cap.2). Per individuare il livello prestazionale raggiunto da un edificio, è necessario fare un bilancio energetico, ossia valutare quali sono le “uscite” di energia così da apportare in entrata un quantitativo idoneo di energia. Le prestazioni di quella componente che individuiamo come *involucro edilizio* devono garantire il comfort termico e igrometrico degli spazi confinati e il contenimento dei consumi energetici mediante il soddisfacimento di alcuni prerequisiti prestazionali. Ad oggi, l'involucro è inteso come un complesso sistema in grado di ottimizzare le interazioni tra ambiente interno e ambiente esterno al mutare delle diverse condizioni climatico – ambientali che avvengono durante l'arco della giornata e nel corso dell'anno. Si è assistito anche ad un'evoluzione nell'uso dei materiali, passando da involucri prevalentemente massivi, realizzati in materiale lapideo o misto, a involucri sempre più leggeri e realizzati con superfici verticali trasparenti. Questa tendenza costruttiva deve però tener conto che l'impiego di questi componenti edilizi innovativi deve comunque garantire prestazioni energetiche simili a quelle dei materiali da costruzione più tradizionali, mettendo in luce la necessità di una continua ricerca nel campo dei materiali.

Di conseguenza evolve anche il concetto di involucro, che non viene più visto come elemento energeticamente passivo e di mera separazione tra ambiente esterno ed interno, bensì come elemento dinamico ed interattivo nel complesso sistema energetico che regola il funzionamento dell'edificio. Il compito dell'involucro, a prescindere dalle componenti da cui è composto, rimane però quello di regolare i flussi energetici legati al passaggio di calore dall'esterno all'interno, e viceversa, e

alla protezione dalla radiazione solare nei mesi più caldi: perciò le soluzioni tecnologiche e la scelta dei materiali devono tener conto che occorre garantire idonei scambi termici e luminosi.

Come ampiamente documentato in letteratura, in inverno una buona progettazione dell'involucro esterno dell'edificio permette di trattenere i carichi interni abbattendo il consumo energetico relativo al riscaldamento degli ambienti. Al contrario, nel periodo estivo, in particolare nei climi mediterranei, questo stesso involucro deve essere capace di dissipare i carichi interni o comunque dovrebbe essere in grado di immagazzinare il calore nelle ore di picco giornaliera per poi rilasciarlo durante la notte, ovvero nelle ore più fresche.

In un edificio le dispersioni termiche avvengono a causa della differenza di temperatura tra la superficie interna e quella esterna dell'involucro e sono influenzate dalle caratteristiche termiche dei materiali che compongono la stratigrafia della parete: questi offrono una resistenza al passaggio del calore che è direttamente proporzionale allo spessore dello strato e inversamente proporzionale alla sua trasmittanza. Ne consegue che la trasmittanza termica U deve assumere valori piuttosto bassi per ottimizzare le caratteristiche invernali dell'edificio, mentre per raggiungere un comfort estivo ottimale, lo sfasamento φ delle pareti deve essere elevato, almeno tra le 10 e le 12 ore, il fattore di attenuazione f_a deve assumere valori minimi per ridurre le variazioni della temperatura dell'aria interna e la capacità termica interna k_1 deve essere massimizzata.

Dunque, è necessario progettare i componenti di chiusura in modo da ridurre al minimo le dispersioni dei flussi di calore durante la stagione invernale per minimizzare il fabbisogno energetico adottando, ad esempio, le seguenti strategie:

- utilizzare la massa termica,
- aggiungere isolamento termico all'involucro aumentando la resistenza termica R .

Tuttavia, si può parlare di miglioramento energetico se le soluzioni costruttive adottate sono valide sia per il periodo invernale che per quello estivo. Anche se singolarmente sono conosciute tutte le caratteristiche che una parete deve possedere per poter essere prestazionale, rimane la difficoltà di progettare un involucro realmente efficiente che ottimizzi contemporaneamente tutti questi parametri estivi ed invernali, come ad esempio trovare un equilibrio tra isolamento ed inerzia termica.

Le tecniche costruttive moderne prevedono la realizzazione di edifici leggeri ed iperisolati non solo nelle regioni del Nord Europa, ma anche nelle aree mediterranee: edifici con trasmittanze termiche molto basse e con spessori di materiale isolante

elevati che impediscono l'ingresso e la fuoriuscita dei flussi termici attraverso l'involucro esterno. Questa tipologia di costruzione risulta molto efficace nelle zone con clima prevalentemente rigido ma, al contrario, ben lontana dal raggiungere i valori ottimali dei parametri termici estivi, causando fenomeni di surriscaldamento che portano all'impiego massiccio dei sistemi di raffrescamento. Considerazioni che devono essere affrontate in un paese con un clima come l'Italia, dove già nel 2004 la domanda di picco estivo di energia elettrica ha uguagliato quella invernale e continua a crescere. In città del sud Italia, come Palermo e Catania, i consumi estivi possono risultare anche sei volte maggiori rispetto a quelli invernali soprattutto se gli edifici presentano superfici vetrate molte estese.

Nei climi mediterranei, solitamente caratterizzati da un'escursione termica giornaliera rilevante (15°C circa), è consigliabile l'impiego di involucri edilizi massivi, o meglio *capacitivi*, ovvero costituiti da materiali ad elevata capacità termica che consentono di ridurre il carico termico dovuto al raffrescamento estivo dal 10% al 40% rispetto al caso di involucri leggeri, a parità di prestazioni isolanti. Infatti, una struttura a bassa inerzia e iperisolata determina oscillazioni maggiori delle temperature interne, temperature superficiali più elevate e quindi temperature operanti maggiori. Gli edifici fortemente coibentati, inoltre, se progettati con una scarsa ventilazione, incorrono maggiormente nella problematica del surriscaldamento indoor incidendo negativamente sul comfort e sul consumo energetico finale. Studi simili sono stati condotti anche in climi caldi tropicali, dove il rischio di surriscaldamento è presente tutto l'anno, dimostrando che la soluzione tecnica migliore è quella di costruire con involucri massivi accoppiati a un'adeguata ventilazione passiva specialmente durante le ore notturne quando le pareti rilasciano il calore immagazzinato.

Recenti studi sperimentali condotti su edifici leggeri hanno evidenziato come la temperatura dell'aria interna tenda significativamente ad aumentare più velocemente che negli edifici massivi, nei quali la capacità termica delle strutture d'involucro consente di attenuare le fluttuazioni giornaliere della temperatura dell'aria interna. Il problema dell'aumento del consumo energetico degli edifici dovrebbe essere affrontato attraverso tecniche di raffrescamento passivo che includono anche la protezione dalla radiazione solare: vale a dire elevata inerzia termica, un buon isolamento termico, dispositivi di ombreggiamento, rivestimenti a basso coefficiente di assorbimento solare, ventilazione notturna e raffrescamento evaporativo. Da studi condotti, si è dimostrato che l'uso combinato di tre strategie passive come l'ombreggiatura solare, la ventilazione naturale e strutture capacitive possono ridurre la domanda di energia da raffrescamento tra il 74% e il 59%. Anche nei climi temperati, ricerche condotte durante l'estate, hanno dimostrato come l'inerzia

termica offra benefici sia sul lato del comfort termico, sia per la diminuzione della domanda di energia di raffrescamento. Infatti, da alcuni di questi studi si evince che gli edifici ad alta massa termica hanno ridotto la domanda di energia di raffrescamento del 67-75% a seconda del valore di temperatura operativa impostato. Inoltre, gli edifici con elevata inerzia termica mostrano una maggiore attenuazione delle fluttuazioni giornaliere della temperatura dell'aria interna. Altre ricerche invece si sono focalizzate sull'analisi dell'influenza della posizione dello strato isolante nella stratigrafia dell'involucro, concentrandosi sul parametro dell'umidità relativa e del modo in cui influenza i meccanismi di trasferimento del calore. I loro risultati mostrano che l'isolamento posto sul lato interno della parete è il caso peggiore in condizioni di umidità relativa interna al 70%; pertanto, l'isolamento sul lato esterno della parete è la soluzione più adatta nel clima caratterizzato da un'alternanza di estati calde e inverni freddi. In questi ambienti, lo strato di isolamento termico all'esterno rappresenta la soluzione migliore per ridurre la domanda di energia di riscaldamento e raffrescamento.

L'interesse sulla tematica dell'inerzia termica negli edifici è ancora estremamente centrale e attuale. La capacità di attenuare le fluttuazioni delle temperature giornaliere e di sfasare nel tempo l'onda termica sono caratteristiche legate all'inerzia termica delle pareti. In letteratura è ampiamente riconosciuto che una soluzione progettuale adatta nella maggior parte dei climi e per la maggior parte degli usi è rappresentata da pareti con elevata massa termica posta sul lato interno rispetto alla posizione dell'isolamento termico (isolamento a cappotto). Tuttavia, l'inerzia termica è un fenomeno complesso e dovrebbe essere valutata considerando diversi fattori tra loro interdipendenti, come, ad esempio, la posizione dell'edificio (contesto urbano), l'uso previsto e il tipo di isolamento termico dell'involucro.

La maggior parte del tessuto urbano italiano è concentrato nei centri storici ed è costituito da edifici con strutture fortemente massive ma che non rispettano gli attuali limiti normativi imposti per quanto riguarda i valori di resistenza termica (R) e, quindi, di trasmittanza termica (U). Al fine di migliorarne l'efficienza energetica e garantire un comfort abitativo ottimale, è della massima importanza individuare quali siano le tecniche di isolamento migliori da applicare a partire dal patrimonio edilizio esistente e che siano altrettanto valide sia per il periodo invernale che per quello estivo.

Diversi ricercatori hanno condotto studi volti a identificare le migliori tecniche di riqualificazione energetica applicate a edifici caratterizzati da pareti fortemente massive, situate nell'area mediterranea, studiando l'influenza dello strato isolante in termini di posizionamento rispetto alla massa termica. I risultati mostrano come le

strategie passive, come la ventilazione naturale, possono ridurre il surriscaldamento dell'ambiente interno negli edifici iperisolati.

Altri studi evidenziano l'importanza di un'elevata inerzia termica dell'involucro edilizio, concentrandosi sul problema della riduzione della domanda di energia di raffreddamento. Questi studi dimostrano inoltre che la definizione dei valori di riferimento per la massa superficiale (M_s) e la trasmittanza termica periodica (Y_{ie}) non sono parametri esaustivi per studiare gli effetti dell'inerzia termica sulle prestazioni estive degli edifici collocati in un clima mediterraneo. Anche altri parametri devono essere presi in considerazione per le pareti ad alta capacità termica: la capacità termica areale interna (k_1) e il fattore di decremento (f_a). Inoltre, in letteratura, al fine di determinare il consumo energetico, viene sottolineata l'importanza delle condizioni meteorologiche al contorno: dati gli stessi valori Y_{ie} e k_1 , le ricerche mostrano diversi consumi energetici per diverse aree geografiche italiane (Milano e Catania).

Lo studio correlato dei due parametri capacità termica areale interna (k_1) e fattore di decremento (f_a) su edifici leggeri con pareti iperisolate ha evidenziato i limiti di questa tipologia costruttiva. I risultati ottenuti raffrontando questi due fattori hanno mostrato che la combinazione ottimale in un clima mediterraneo è rappresentata da una struttura dotata di elevata capacità termica areale interna k_1 pari a $30 \text{ kJ} / \text{m}^2\text{K}$ e abbinata a un fattore di decremento f_a maggiore di 0,07.

Alla luce dello stato dell'arte sulle ricerche fin qui condotte in letteratura, lo scopo di questo studio è analizzare le possibili interazioni tra parametri correlati alla tipologia di materiale isolante rispetto ad una struttura massiva situata in un determinato contesto geografico. In particolare, si analizzerà la relazione tra la resistenza termica (R) e la capacità termica areale esterna (k_2) di un edificio massivo con due tipologie di strato coibente applicato esternamente. L'edificio sperimentale si trova a Fabriano (AN), la cui zona è classificata nel Gruppo C (clima temperato), in particolare Cfa (clima subtropicale umido), secondo il sistema di classificazione climatica Köppen-Geiger.

Month	Outdoor air Temperature (°C)	Relative Humidity (RH%)	Wind Speed (m/s)	Solar Global Irradiance on Horizontal Plane (Wm^{-2})	Atmospheric Pressure (hPa)
June	22.9	51	2.8	255	977
July	25.4	44	3	281	978
August	24.9	50	2.8	234	978

Tabella 14 – Media estiva dei dati metereologici interpolati sulla zona di Fabriano.

La **Tabella 14** presenta i dati meteorologici medi estivi ottenuti attraverso l'interpolazione dei valori delle tre stazioni meteorologiche più vicine (Perugia, Frontone, Ancona/Falconara), ufficialmente riconosciute dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO).

Obiettivi principali della sperimentazione condotta sono:

- apportare nuovi dati sperimentali sullo studio del comportamento estivo di un involucro edilizio massivo e ben isolato sottoposto alle condizioni climatiche mediterranee.
- acquisire conoscenza sul comportamento dell'involucro dell'edificio con diversi materiali isolanti applicati all'esterno.

A parità di condizioni climatiche, lo studio si prefigge di individuare la possibile soluzione costruttiva più idonea e di limitare il surriscaldamento delle superfici esterne di un edificio massivo. Il capitolo prosegue come segue: nella Sezione 3.2 vengono presentati i materiali e i metodi utilizzati per la campagna sperimentale, mentre nella Sezione 3.3 vengono mostrati i risultati ottenuti con i monitoraggi in loco e attraverso un modello virtuale in TRNSYS. Infine, vengono argomentati i risultati e gli scenari per future implementazioni.

3.2 Materiali e metodi

Quanto esposto precedentemente è fondamentale per conoscere lo stato dell'arte della ricerca e delle normative italiane ed europee: punto di partenza imprescindibile per pianificare e affrontare un'attività di ricerca sperimentale. Lo studio di nuovi materiali e componenti edilizi che possano rispondere alle esigenze di sostenibilità ambientale e contemporaneamente alle problematiche del risparmio energetico è una necessità a cui il settore delle costruzioni deve trovare soluzione. Lo scopo della presente sperimentazione è indagare le prestazioni energetiche e il comportamento nel periodo estivo, per il clima mediterraneo, di un mock up realizzato con pareti massive in calcestruzzo alleggerito con inerti termici e coibentato dall'esterno con due differenti materiali isolanti. La struttura è stata quindi isolata termicamente con due materiali molto diversi tra loro per raggiungere i limiti di trasmittanza termica previsti dalla normativa italiana per questa zona, Fabriano (AN). Al fine di indagare la risposta dinamica delle due tipologie di involucro sono state condotte due campagne sperimentali, una nell'estate del 2018 e l'altra nell'estate del 2019. Di seguito saranno descritte la conformazione del sito sul quale il mock up è stato

installato e la struttura dello stesso, i materiali utilizzati e il metodo sperimentale utilizzato durante la campagna.

Analisi del sito e stato di fatto

L'edificio sperimentale è stato realizzato nel Comune di Fabriano (AN): 2198 gradi giorno, ad un'altezza sul livello del mare di 400 m e a latitudine di 43,329° e longitudine di 12,939° come individuato nelle foto satellitari nelle quali è evidenziata la struttura in calcestruzzo (Fig. 38-39). Il mock up è posizionato in un'area tale da non essere condizionato dalla presenza di altri edifici e dalla vegetazione, con una posizione angolare di circa 45° rispetto al Sud, dato che ci servirà per la scelta del posizionamento degli strati isolanti proprio sulla facciata esposta a sud. La struttura risulta avere un'altezza complessiva di 3,00 m con uno spessore di tutte le pareti di 0,70 m, fornendo così un'elevata capacità termica, e all'interno una cavità larga 1,60 m nella quale sono state collocate le strumentazioni per il monitoraggio sperimentale. Per accedere a questa cavità vi è un'apertura sulla facciata orientata a Nord di superficie 0,60 x 0,60 m ad un'altezza dal suolo di 0,70 m. Pertanto, il volume totale è di 27 m³ e il volume interno è di soli 4,1 m³. L'apertura durante la sperimentazione estiva è stata chiusa con un pannello in polistirolo per cercare di limitare i flussi entranti/uscenti. Il mock up non è dotato di sistemi di riscaldamento o raffrescamento, quindi non c'è alcun controllo interno della temperatura. Inoltre, per escludere qualsiasi guadagno di calore dovuto alla radiazione solare da elementi trasparenti, non vi sono finestre.

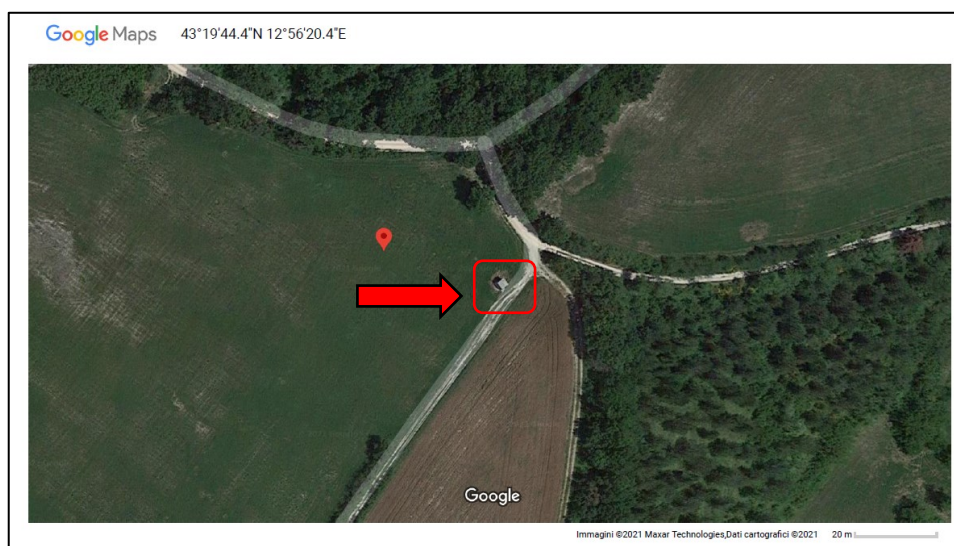


Fig. 38 – Individuazione della zona nella quale è stato realizzato il mock up utilizzato per la sperimentazione.

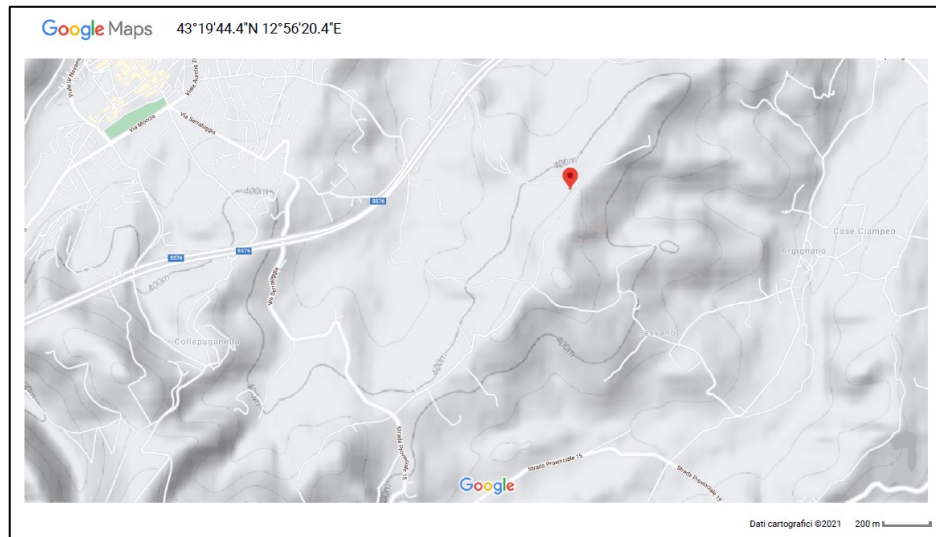


Fig. 39 – Individuazione della posizione sul livello del mare: 400 m.s.l.m.

Di seguito vengono riportate pianta e sezioni del mock-up per comprendere meglio la geometria della sua struttura.

PIANTA:

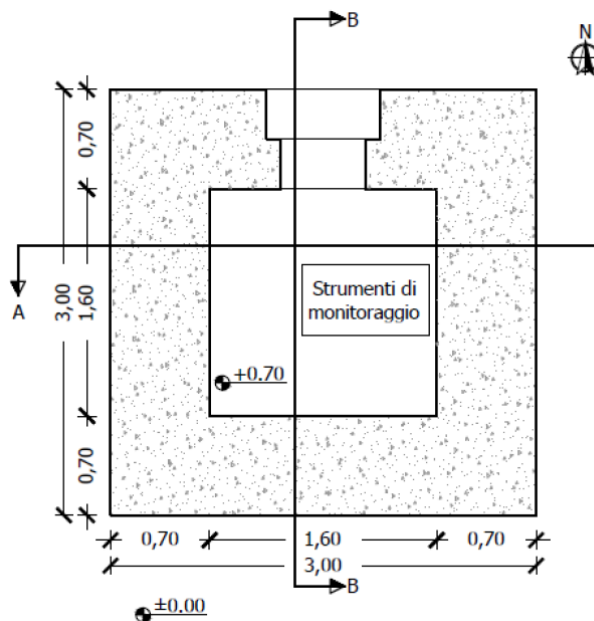


Fig. 40 – Pianta del Mock up di Fabiano (AN).

SAZIONE A-A:

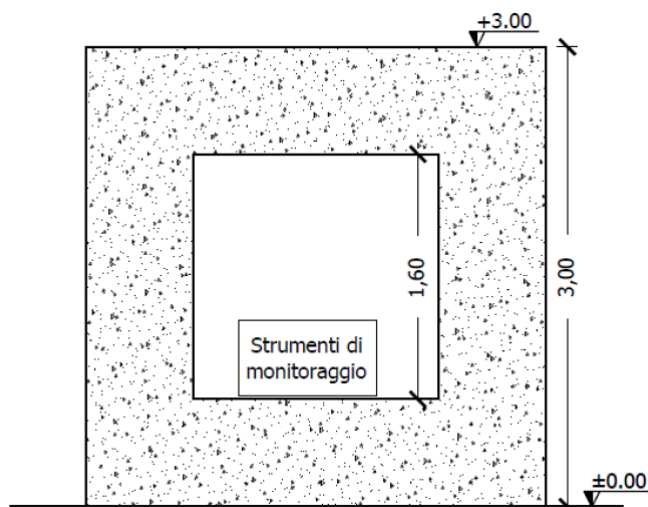


Fig. 41 – Sezione A-A del Mock up di Fabriano (AN).

SAZIONE B-B:

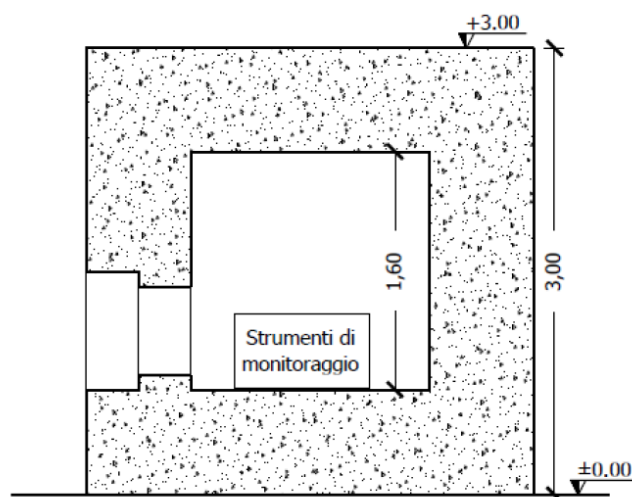


Fig. 42 – Sezione B-B
del Mock up di Fabriano (AN).

Grazie alla collaborazione tra Università Politecnica delle Marche e i consulenti tecnici responsabili dell'area Emilia-Romagna - Marche dell'azienda Misapor, è stato possibile progettare e realizzare un mock-up interamente in Misapor Beton, un calcestruzzo leggero e isolante, con caratteristiche del tipo LC8/9. Il progetto è stato

seguito direttamente dai consulenti tecnici dell'azienda Misapor, produttrice della miscela utilizzata per la realizzazione dell'intera struttura del mock up. Le fasi di realizzazione del mock-up, gettato in un'unica soluzione, sono avvenute nel luglio 2014. In loco era già stata preparata la cassetta (Fig. 43), la cui predisposizione, così come le operazioni prima del getto, sono state del tutto analoghe a quelle di un getto con un calcestruzzo tradizionale così come l'esecuzione dei giunti di costruzione avvenuta in modo convenzionale.



Fig. 43 – Predisposizione della cassetta per il getto in cls Misapor Beton.

Dal momento della sua realizzazione, questo mock up è stato utilizzato per alcune campagne di sperimentazione volte a indagare l'effettivo comportamento di questo materiale, Misapor Beton, e successivamente del modello isolato con pannelli in polistirene estruso (XPS).

L'utilizzo di un modello reale per condurre delle sperimentazioni in campo è necessario per ottenere dei dati da poter studiare al fine di comprendere il comportamento dinamico delle strutture in un dato contesto climatico. Per questo motivo la disponibilità di avere un mock up già esistente è stata fondamentale per le attività di ricerca del dottorato. Naturalmente il primo passo è stato quello di effettuare un sopralluogo per rilevare lo stato di fatto e la fattibilità del progetto, essendo il mock up di Fabriano dismesso da qualche anno. Le attività di ricognizione, individuazione delle problematiche e programmazione della prima campagna di monitoraggio estiva 2018 hanno comportato una pianificazione delle attività preliminari da compiere sul mock up stesso (Fig.44).



Fig. 44 – Sopralluogo Mock up prima dell'inizio della sperimentazione per individuare le problematiche da risolvere e pianificare l'avvio campagna.

Durante il primo anno di ricerca la fase di predisposizione del mock up di studio, sul quale svolgere un monitoraggio estivo, è stata molto molto impegnativa sia dal punto di vista logistico di predisposizione dell'area, sia per quanto riguarda la realizzazione delle opere connesse all'installazione degli stati isolanti sulla struttura esistente e per la collocazione della strumentazione per il monitoraggio.

Sinteticamente riporto l'iter del progetto di sperimentazione:

- Scelta del modello di studio: edificio fortemente inerziale.

L'edificio è situato nel comune di Fabriano, realizzato con il sistema costruttivo Misapor Beton, calcestruzzo con inerti alleggeriti in vetro con proprietà isolanti. Il modello è privo di aperture verso l'esterno ed isolato, riducendo al minimo condizioni al contorno che potrebbero alterare/influenzare i dati sperimentali (Fig.45).

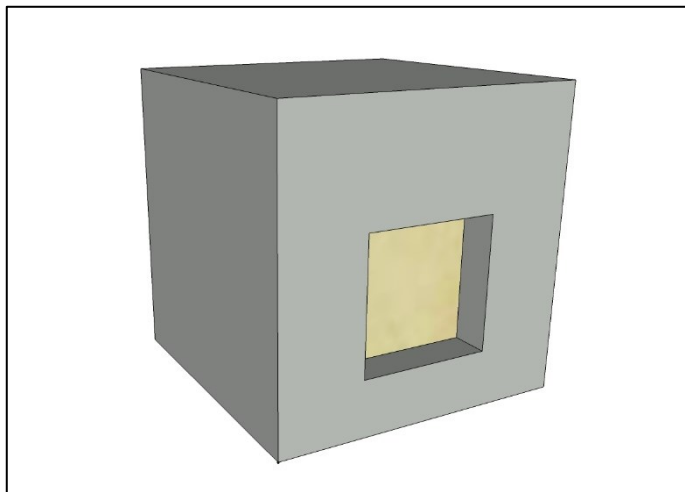


Fig. 45 – Modello 3D del Mock up: vista della facciata esposta a nord.

- Scelta delle soluzioni d'isolamento termico da analizzare e confrontare sperimentalmente. L'idea è quella di mettere a confronto due tipologie di isolamento totalmente differenti sia per tipologia di materiale sia per modalità applicativa:
 - Isolamento a cappotto mediante intonaco termico alleggerito a base sughero: Sistema 1;
 - Isolamento a cappotto mediante pannelli isolanti EXS: Sistema 2;
 - Scelta dello spessore dei materiali isolanti in base alla pratica più comune per la posa in opera degli stessi e al raggiungimento degli standard normativi previsti per la trasmittanza termica per quella zona.
- Posa in opera del Sistema 1 e Sistema 2:
 - Posa in opera degli isolanti.
 - Posa in opera delle relative finiture protettive:
 - i. rasante armato a base calce (sul Sistema 1);
 - ii. rasante armato a base calce (sul Sistema 2).
- Preparazione alla campagna di raccolta dati sperimentali
 - Installazione delle sonde di temperatura, termoflussimetro, centraline meteo, pannello solare, e tutto il necessario per la rilevazione ed acquisizione dei dati orari.
 - Verifica dell'acquisizione dati in remoto.

- Raccolta dati per la campagna sperimentale estiva: monitoraggio del caso studio durante tutto il periodo estivo.

Materiali

I. MISAPOR BETON

L'edificio sperimentale è stato realizzato con un calcestruzzo isolante che ha il compito di svolgere sia una funzione portante, sia di isolamento termico. L'azienda produttrice di questo materiale è di origine svizzera, fondata nel 1982.

Il Misapor Beton è un calcestruzzo innovativo che, diversamente dai cementi compositi tradizionali, ingloba una parte di vetro riciclato sottoforma di granuli, contribuendo all'isolamento termico. Gli inerti sono quindi di origine riciclata, materia prima seconda proveniente prevalentemente da fornitori locali, che necessita di un preliminare trattamento di depurazione attraverso un processo brevettato dall'azienda. Successivamente il vetro viene macinato, fuso e fatto schiumare con l'aggiunta di un attivatore minerale a temperature comprese tra 900° e 1000°C. Quando il prodotto si raffredda diventa resistente alla compressione, ma mantiene la propria struttura schiumosa grazie alle bollicine d'aria imprigionate all'interno. Appositamente frantumata in tre diverse granulometrie, la ghiaia in vetro cellulare può essere impiegata nelle miscele di cemento per ottenere un calcestruzzo con caratteristiche termiche isolanti ma anche con un'ottima resistenza a compressione. Un'altra caratteristica è che può essere impiegato come soluzione monolitica, ovvero senza l'aggiunta di ulteriore materiale isolante, anche se questo, tuttavia, comporta pareti relativamente spesse.

Le prestazioni di isolamento della facciata non sono determinate esclusivamente dal valore λ della conducibilità termica, ma dall'intera massa dell'edificio; i dati dichiarati dal produttore indicano uno sfasamento teorico massimo di 16-18 ore che riduce i costi di riscaldamento mantenendo un piacevole clima interno stabile. Quest'ultimo aspetto, sommato alle altre caratteristiche sopra esposte, fa davvero la differenza rispetto a miscele tradizionali. In tabella sono riportati i principali parametri tecnici del materiale così come dichiarati dal produttore (Tab.15).

MISAPOR calcestruzzo isolante - riconosciuto MINERGIE-ECO®		
Classe di resistenza	LC8/9	LC12/13
EN 206:2013	XC4 XF1 XD1	XC4 XF1 XD1
SN EN 206/NE:2013	XC2(CH), F3, D _{max} 32, D1/1.2	XC2(CH), F3, D _{max} 32, D1.2/1.4
Modulo di elasticità	E _{cm} = 9'000 N/mm ²	E _{cm} = 8'900 N/mm ²
Resistenza a trazione per flessione	f _{lctm} = 1.6 N/mm ²	f _{lctm} = 1.73 N/mm ²
Retiro	ε _{cs,28} = -0.44‰ ε _{cs,56} = -0.52‰	ε _{cs,28} = -0.32‰ ε _{cs,56} = -0.48‰
	ε _{cs,364} = -0.70‰	ε _{cs,91} = -0.62‰
Scorrimento	Carico di scorrimento 3N/mm ²	Carico di scorrimento 4N/mm ²
	ε _{C,el} = -0.55‰ ε _{CC,364} = -0.48‰	ε _{C,el} = -0.47‰ ε _{CC,91} = -0.45‰
Scorrimento caratteristico	Φ = (364 Tage) 0.9	Φ = (91 Tage) 1.0
Conducibilità termica	λ = 0.27 W/(m·K)	λ = 0.32 W/(m·K)
Coefficiente di dilatazione termica	α _{th} = 12.1·10 ⁻⁶ K ⁻¹	α _{th} = 12.1·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Permeabilità al vapore		
Densità di diffusione della corrente	g = 538.5 mg/(h·m ²)	
Coefficiente di permeabilità	W = 0.3835 mg/(h·m ² ·Pa)	
Resistenza alla diffusione totale	Z = 2.607 h·m ² ·Pa/mg	
Coefficiente di conducibilità termica	δ = 0.0031 mg/(m·h·Pa)	
Fattore di resistenza alla diffusione	μ = 22.6	
Diff. equiv. strato atmosferico	s _d = 1.83 m	
Altri requisiti		
Fibre	aggiunta di ca. 1 kg/m ³ fibre polimeriche (ca. 20 mm lungo und 30 μm spesso, modulo E: ca. 2'000 N/mm ²)	
Tipi di cemento	CEM I (più cenere volante) o CEM II/A-LL o CEM III/B	
Additivi	Superfluidificante, aerante e stabilizzatore, se necessario ritardante	
Test AAR	≤ 0.025% dopo 20 settimane soddisfatto per CEM II/A-LL o CEM III/B ≤ 0.03% dopo 52 settimane soddisfatto per CEM I più cenere volante	
Conducibilità idrica	q _w < 10.0 g/(m ² ·h) (impermeabile secondo SIA 262/1)	
Resistenza a gelo e sale antigelo	Δm ₂₈ = 200 g/m ² (elevata resistenza)	
Grana aggregato	Aggregati leggeri 100% vetro cellulare MISAPOR (certificato SÜGB) Produzione secondo raccomandazioni MISAPOR Beton AG	

Tabella 15 – Scheda tecnica del prodotto Misapor Beton.

Come abbiamo detto, il mock up monitorato è un edificio sperimentale realizzato in calcestruzzo leggero (LWC) con aggregati termici provenienti dal vetro riciclato: il mix design scelto per il progetto consente di raggiungere una classe di resistenza meccanica di LC 8/9. Riassumendo, questo materiale, che indicheremo come Tipo 0, presenta una conducibilità termica λ di 0,27 W m⁻¹ K⁻¹, capacità termica specifica c di 1000 J kg⁻¹ K⁻¹ e densità ρ di soli 1200 kg m⁻³. Pertanto, questo calcestruzzo rappresenta una soluzione ottimale per costruire un edificio monolitico, come quello analizzato in questa ricerca, che è caratterizzato da un elevato spessore pari a 0,70 m.

II. TERMOINTONACO E PANNELLO XPS

Lo scopo di questo studio è quello di confrontare il comportamento dell'involucro dell'edificio con diversi strati isolanti esterni. Nello specifico, lo studio si è concentrato sulle prestazioni della facciata orientata al sud-est, la più esposta alla radiazione solare giornaliera, coibentandola con due differenti rivestimenti isolanti applicati all'esterno: isolamento a cappotto. Pertanto, la facciata nello stato iniziale

era composta da un singolo strato di calcestruzzo Misapor Beton, denominato Parete 0 e materiale Tipo 0, successivamente è stata divisa a metà: nella prima metà è stato applicato il termointonaco leggero a base di sughero (Parete 1, materiale Tipo 1), mentre nella seconda metà della facciata è stato applicato il pannello XPS (Parete 2, materiale Tipo 2).

L'intonaco alleggerito a base sughero e altri inerti termici naturali (Tipo 1) è caratterizzato da uno spessore di applicazione di 4 cm, una conduttività termica λ di $0,037 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, una capacità termica specifica c di $1100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e una densità ρ di 280 kg m^{-3} . Mentre il pannello in polistirolo estruso, XPS (Tipo 2), è caratterizzato da uno spessore tipico di 8 cm, una conduttività termica λ di $0,036 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, una capacità termica specifica c di $1450 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e una densità ρ di 35 kg m^{-3} .

Al fine di proteggere gli strati isolanti esterni, è stato applicato un rasante a finitura liscia (Tipo 3), composto da leganti naturali di calce, filler minerali alleggeriti e inerti calcarei di granulometria da 0 a 0,60 mm. Il rasante scelto, anch'esso realizzato con minerali espansi con proprietà termiche, è caratterizzato da uno spessore di circa 5 mm, una conduttività termica λ di $0,128 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, una capacità termica specifica c di $1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e una densità ρ di 1165 kg m^{-3} . Il rasante di finitura liscia esterno è lo stesso applicato sia per la Parete 1 che per la Parete 2 e presenta, quindi, lo stesso colore e rugosità superficiale per entrambe le superfici analizzate.

I due materiali isolanti, tipo 1 e tipo 2, sono stati scelti in base al loro valore di conduttività termica molto simile, ma invece molto diversi per caratteristiche chimico-fisiche, pesi specifici ρ e permeabilità al vapore acqueo μ . L'intonaco termico, composto principalmente da calce idraulica naturale, ha una struttura con una maggiore porosità e traspirabilità rispetto al pannello in XPS, che è in polistirolo estruso a celle chiuse, caratterizzato da una buona resistenza all'umidità ma con meno permeabilità al vapore acqueo.

Le proprietà tecniche dei materiali maggiormente rilevanti ai fini della ricerca sono presentate nella Tabella 16.

Caratteristiche dei materiali	u.d.m.	Tipo 0	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Spessore	cm	70	4	8	0,50
Conduttività termica λ	W/mK	0,27	0,037	0,036	0,128
Calore specifico c	J/kgK	1000	1100	1450	1000
Densità ρ	kg/m ³	1200	280	35	1165
Diffusività termica a	m ² /Ms	0,225	0,120	0,709	0,111
Permeabilità al vapore acqueo μ	-	22,6	3	150	15

Coeff. Assorbimento solare α	-	0,60	-	-	0,30
Resistenza meccanica a compressione	-	LC8/9 N/mm ²	CS II 2,8 N/mm ²	CS(10) 300 kPa	CS IV 15 N/mm ²

Tabella 16 – Caratteristiche termiche e meccaniche dei materiali impiegati nella sperimentazione.

La normativa nazionale italiana (DM 26/06/2015) prevede degli specifici valori di trasmittanza termica U nel caso strutture esistenti sottoposte a riqualificazione energetica: in questo caso studio, il limite previsto è di $0,28 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ in vigore dal 1° gennaio 2021, data la zona termica E in cui si trova il mock up (Tab.17).

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015	2021
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 17 – Requisiti termici richiesti in base alle zone termiche secondo il D.M. 26 giugno 2015 Appendice B.

Lo scopo di questo studio è quello di confrontare il comportamento dell'involucro dell'edificio rispetto ai due strati isolanti esterni applicati. Perciò, definiamo di seguito le tre tipologie di pareti:

- 1. Parete 0:** parete allo stato di fatto, costruita in LWC (materiale Tipo0);
- 2. Parete 1:** Parete 0 più lo strato isolante del termointonaco alleggerito a base sughero (materiale Tipo 1) e strato di finitura rasante (materiale Tipo 3) per proteggere l'intonaco isolante;
- 3. Parete 2:** Parete 0 più lo strato isolante del pannello XPS (materiale Tipo 2) e strato di finitura rasante (materiale Tipo 3) per proteggere l'intonaco isolante.

La Parete 0 offre una trasmittanza termica U pari a $0,36 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, che non è sufficiente per adempiere agli obblighi normativi italiani. Pertanto, al fine di rispettare il limite nazionale di trasmittanza, sono stati scelti questi due diversi tipi

di materiali isolanti, con i quali si raggiunge un valore di trasmittanza di $0,26 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $0,20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ rispettivamente per la Parete 1 e la Parete 2.

Negli ultimi anni le problematiche legate al consumo energetico degli edifici e l'impatto che questi hanno sull'inquinamento globale, hanno sottolineato l'importanza degli studi sul comportamento dell'involucro, in particolare ponendo attenzione all'inerzia termica delle strutture. Allo stesso tempo, la necessità di coibentare gli edifici dall'esterno comporta la realizzazione di pareti fortemente isolate. La corretta valutazione dei vantaggi e svantaggi di questa tecnica d'isolamento è importante ai fini della comprensione del comportamento termico degli edifici. La ricerca portata avanti vuole analizzare i dati sperimentali e analitici ottenuti su questo edificio massivo sul quale è stato realizzato un intervento di riqualificazione sull'involucro esterno. Tale riqualificazione energetica ha permesso di raggiungere valori di resistenza termica tipici degli edifici nZEB per studiarne il comportamento rispetto al clima Mediterraneo in cui è ubicato. La scelta degli spessori degli strati isolanti è stata dettata dalla pratica costruttiva: l'applicazione ottimale per un intonaco è all'incirca di $4 \div 5 \text{ cm}$ mentre i pannelli isolanti hanno spessori ben maggiori e solitamente non minori di 8 cm come nel caso presentato. Le proprietà termiche delle pareti studiate sono riportate di seguito nella Tabella 18.

Proprietà termiche delle pareti	u.d.m.	Parete 0	Parete 1	Parete 2
Spessore totale	cm	70	74,5	78,5
Posizione del materiale isolante	-	diffuso	esterno	esterno
Spessore strato isolante	cm	-	4	8
Resistenza termica R	m^2KW^{-1}	2,76	3,88	5,02
Trasmittanza termica U	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	0,36	0,26	0,20
Capacità termica areale K	$\text{kJ m}^{-2}\text{K}^{-1}$	58,3	15,6	9,3
Capacità termica areale esterna K_2	$\text{kJ m}^{-2}\text{K}^{-1}$	840	862	853
Proprietà del singolo strato isolante				
Resistenza termica R_i	m^2KW^{-1}	2,76	1,08	2,22
Capacità termica areale K_i	$\text{kJ m}^{-2}\text{K}^{-1}$	840	12,32	4,06

Tabella 18 – Proprietà termiche delle 3 pareti studiate e dei singoli strati isolanti.

Metodo sperimentale

Come detto precedentemente, il modello sperimentale si trova a Fabriano, nel centro Italia (latitudine 43.329°, longitudine 12.939°, altitudine di 400 m.s.l.d.m. e 2198 gradi giorno). Fabriano è caratterizzata da un clima caldo e temperato, classificato cfa secondo la classificazione Köppen-Geiger. L'area rurale senza altri edifici o vegetazione nelle vicinanze è stata scelta per eliminare ogni possibile influenza sulle prestazioni del modello.

Le campagne di monitoraggio sono state condotte durante l'estate 2018 (in particolare dal 15 giugno al 5 settembre) e tra la primavera e l'estate 2019 (in particolare dal 27 maggio al 16 luglio). Il mock up cubico è posizionato ad un angolo di 44° rispetto al Sud e presenta pareti spesse 70 cm che forniscono un'elevata capacità termica. Il mock up non è dotato di alcun sistema di riscaldamento o raffrescamento, quindi non è consentito alcun controllo interno della temperatura.

Il progetto di ricerca è stato realizzato con le seguenti fasi:

- preparazione del sito per verificare gli strumenti necessari per rendere funzionante il modello;
- progettazione della rete di sensori e dei sistemi di controllo;
- monitoraggio in continuum per studiare il comportamento dinamico estivo del caso studio sperimentale;
- raccolta e analisi dei risultati. Lo studio è stato condotto analizzando le temperature superficiali, i flussi di calore, i dati meteorologici esterni (temperatura dell'aria esterna, umidità relativa esterna e radiazione solare globale sul piano orizzontale), la temperatura dell'aria interna e l'umidità relativa;
- simulazioni dinamiche del modello attraverso il software TRNSYS, al fine di testarne l'efficienza di calcolo nel caso di struttura con elevata massa termica e pareti isolate.

La campagna sperimentale ha richiesto una progettazione preliminare per l'installazione delle attrezzature tecniche necessarie al monitoraggio in situ. Infatti, il mock up si trova in un'area isolata senza collegamento alla rete di distribuzione elettrica, quindi l'alimentazione delle strumentazioni di monitoraggio è stata ottenuta attraverso un pannello fotovoltaico accoppiato ad una batteria di accumulo.

Le componenti dell'impianto elettrico sono state:

- pannello fotovoltaico;

- batteria di accumulo;
- controller di carica solare PWM;
- convertitore DC / DC step-up con uscita 4-30V.

Le misure condotte, le tipologie di sensori e la loro posizione sono riassunte nella seguente Tabella 19.

Misura	Tipo di sensore	Posizione	Precisione	Range
<i>Dati ambientali</i>				
Temperatura dell'aria	Termoigrometro	Stazione meteo	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	Da -40 a 65°C
Umidità	Termoigrometro	Stazione meteo	$\pm 3\%$	Da 0 a 100%
Velocità del vento	Anemometro	Stazione meteo	$\pm 0,5 \text{ ms}^{-1}$	Da $1,5 \text{ ms}^{-1}$ a 79 ms^{-1}
Radiazione solare globale orizzontale	Radiometro	Stazione meteo	$< 5\%$	Da 0 a 1800 Wm^{-2}
<i>Condizioni climatiche interne</i>				
Temperatura dell'aria	Termoresistenza al platino	Stazione meteo interna/all'interno del cubo	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$	Da 0 a 60°C Da -200 a 850°C
Umidità	Termoigrometro	Stazione meteo	$\pm 5\%$	Dal 10 al 90%
<i>Prestazioni dell'involucro dell'edificio</i>				
Flusso di calore	Termoflussimetro	Superficie interna della parete sud	$\pm 3\%$	$\pm 2000 \text{ W m}^{-2}$
Temperatura superficiale	Termoresistenze piatte	Esterno, rivestimento interno, superficie interna sud	$\pm 0,05^{\circ}\text{C}$	Da -200 a 850°C

Tabella 19 – Caratteristiche dei principali sensori impiegati durante il monitoraggio in situ.

La sperimentazione si è focalizzata sulla registrazione delle seguenti grandezze termiche fondamentali:

- temperatura aria esterna;
- temperatura aria interna a metà altezza del vano del mock up;

- temperature superficiali sulle pareti isolate esposte a Sud, sia interne che esterne;
- flusso termico all'intradosso della parete Sud;
- radiazione globale solare;
- direzione e velocità del vento.

Nello specifico sono state utilizzate:

- 1 termoresistenza piatta Pt100 sulla superficie esterna della Parete 1;
- 1 termoresistenza piatta Pt100 sulla superficie esterna della Parete 2;
- 3 termoresistenze piatte Pt100 sulla superficie tra lo strato di applicazione del materiale Tipo 1 (termointonaco) e la Parete 0 (Misapor Beton);
- 1 termoresistenza piatta Pt100 sulla superficie tra il pannello in materiale Tipo 2 (XPS) e la Parete 0 (Misapor Beton);
- 1 termoresistenza piatta Pt100 sulla superficie interna del mock up in corrispondenza della Parete 1;
- 1 termoresistenza piatta Pt100 sulla superficie interna del mock up in corrispondenza della Parete 2;
- 1 termoflussimetro al centro del lato interno della parete del mock up.

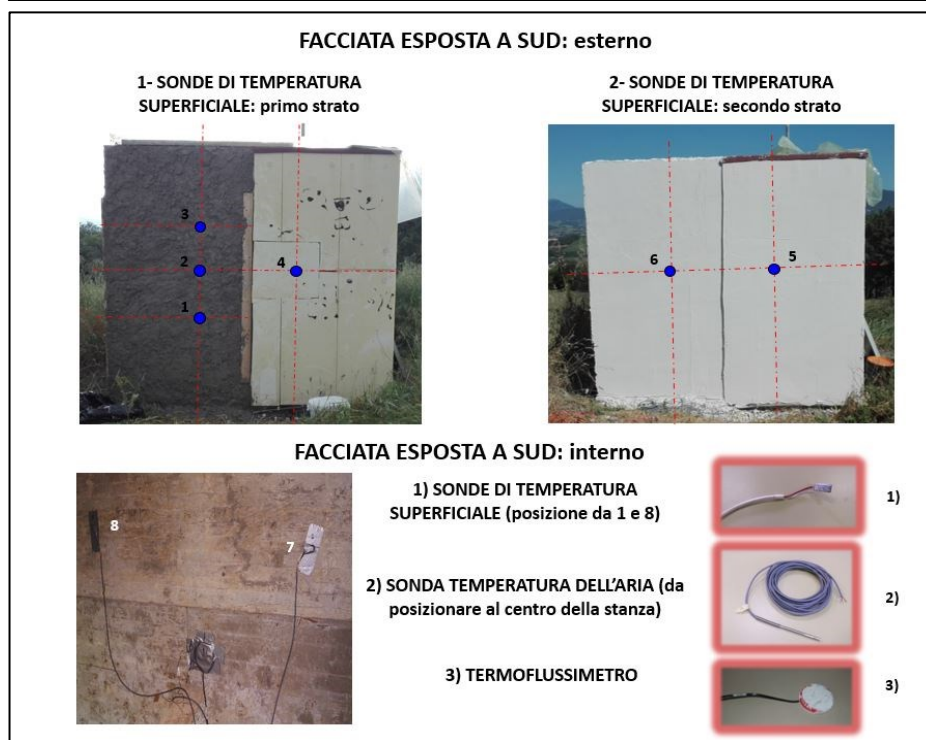
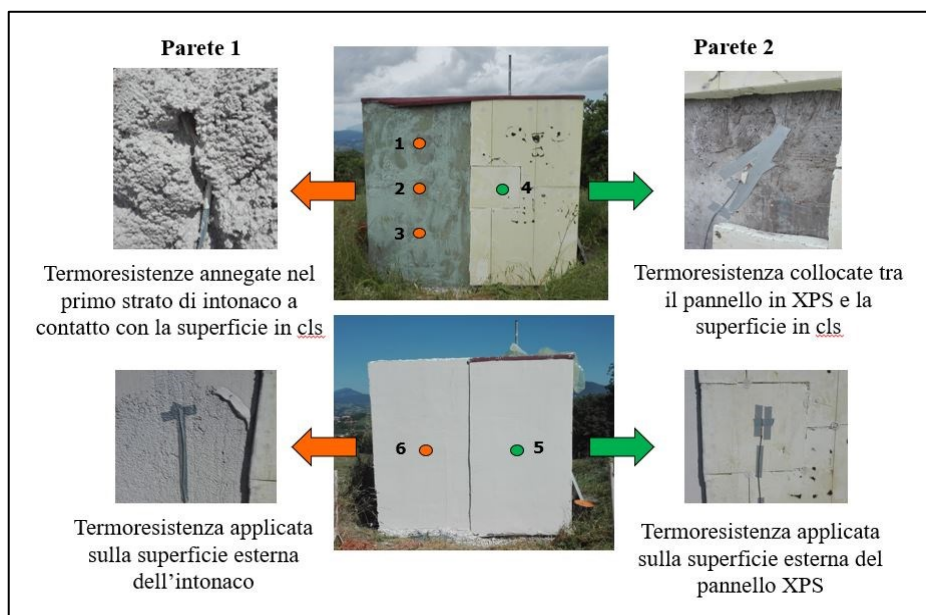
La progettazione dell'installazione delle sonde di temperatura superficiale è stata pianificata in base alle fasi di applicazione dei materiali isolanti, in particolare del termointonaco che ha delle precise modalità di posa in opera e tempistiche da rispettare. Anche se il mock up in scala non è rappresentativo di un vero edificio, è un metodo efficace per valutare il comportamento di una parete, ad elevata capacità termica e isolata, rispetto ai flussi termici e alle temperature superficiali durante la stagione estiva. Al fine di studiare la risposta dinamica dei materiali isolanti applicati sul mock up, non è stato installato alcun sistema di controllo della temperatura interna, di conseguenza la struttura è libera di reagire alle sollecitazioni esterne. In particolare, per studiare nel dettaglio la distribuzione della temperatura negli strati che compongono l'involucro dell'edificio, le sonde sono state collocate in corrispondenza di ogni strato componente le pareti. L'analisi si è concentrata sulle prestazioni della facciata sud-est, che è stata divisa in due superfici: la prima metà è stata isolata con il termointonaco a base sughero nello spessore di 4 cm (Parete 1) e l'altra metà con il pannello XPS nello spessore di 8 cm (Parete 2). Lo scopo è quello di ottenere dei dati da analizzare e confrontare rispetto alle diverse soluzioni di involucro edilizio ipotizzate; per questo motivo un passaggio preliminare è stato

quello di progettare un piano per posizionare in modo appropriato le sonde termiche su ogni superficie oggetto di studio.

1. **Parete 1.** Sulla superficie esterna è stato applicato preliminarmente un primer liquido acrilico per migliorare l'adesione tra la superficie in calcestruzzo (Parete 0) e l'intonaco termico in sughero (materiale 1). Sono state poi posizionate le sonde per il rilevamento della temperatura: la prima nella parte inferiore della facciata, la seconda al centro e l'ultima nella parte superiore. Successivamente, il termointonaco è stato applicato in due strati per un totale spessore di 4 cm di intonaco termico. Trascorso il tempo di stagionatura tale da consentire una certa resistenza superficiale dell'intonaco stesso (circa 14 giorni), è stata posizionata un'altra sonda al centro della facciata, alla stessa altezza di quella interna allo strato e distante in profondità di 4 cm. Contemporaneamente, la superficie è stata portata a finitura con un rasante (materiale 3) al fine di inglobare la sonda e di proteggere la facciata dagli agenti atmosferici.
2. **Parete 2.** Sulla superficie esterna è stata posizionata una sonda per il rilevamento della temperatura al centro della parete a contatto con la superficie del calcestruzzo (materiale 0). Successivamente si è proceduto con l'installazione meccanica dei pannelli XPS mediante fissaggio con dei tasselli e malta per incollare i pannelli stessi. Sull'estradosso dei pannelli è stata posizionata un'altra sonda sempre a metà dell'area. Contemporaneamente, la superficie è stata portata a finitura con un rasante (materiale 3) al fine di inglobare la sonda e di proteggere la facciata dagli agenti atmosferici.

Al fine di monitorare i flussi termici attraverso la facciata sud-est, è stato fissato un termoflussimetro all'interno del vano del mock up al centro della superficie interna. Analogamente, sono state posizionate due termoresistenze anche all'intradosso ciascuna rispettivamente alla stratigrafia con l'isolamento mediante termointonaco e pannello XPS. Tutte le sonde sono state posizionate alla stessa distanza rispetto agli angoli della facciata per evitare effetti di bordo che potrebbero compromettere le misurazioni. Le sonde sul lato esterno della facciata relative all'intonaco sono state collocate in maniera più diffusa per valutare anche l'omogeneità del comportamento del materiale essendo per definizione una miscela eterogenea.

Di seguito, nello **Schema 1**, vengono riassunti i passaggi relativi al posizionamento delle termoresistenze sul lato esterno ed interno della parete sud-est.



Schema 1 – Posizionamento delle sonde di temperatura superficiale su entrambe le pareti isolate con l'intonaco (materiale 1) e con il pannello XPS (materiale 2).

Strumentazione per il monitoraggio

La realizzazione del sistema di monitoraggio è stata improntata fin dall'inizio per essere totalmente autoalimentata essendo la zona di ubicazione del mock up priva di

allaccio elettrico alla rete comunale di Fabriano. In relazione al numero di apparecchiature necessarie alla sperimentazione, è stato indispensabile eseguire un progetto e poi una prova preliminare del nostro impianto elettrico di alimentazione, prima in laboratorio presso il Dipartimento DIISM dell'Università Politecnica delle Marche e poi in situ. La stazione di monitoraggio può quindi contare sull'alimentazione dell'energia solare prodotta durante le ore diurne da un modulo fotovoltaico e nelle ore notturne dalla carica prodotta da una batteria di accumulo. Di seguito uno schema riepilogativo dei collegamenti tra le strumentazioni di controllo necessarie per il mock up (**Schema 2**).



Schema 2 - Schema dei collegamenti tra i componenti del sistema di monitoraggio.

Di seguito viene riportata una descrizione dei componenti appena visti.

1) Modulo fotovoltaico

L'alimentazione del sistema durante le ore diurne con presenza di radiazione solare è assicurata da un modulo fotovoltaico (Fig. 46) in silicio policristallino ad alta efficienza particolarmente adatto in impianti con accumulatori, grazie alla tensione adatta alla ricarica di batterie a 12V. Questo modulo è costituito da 36 celle 155 x 155 mm ed è progettato per lavorare nelle più difficili condizioni ambientali e operative.

Scheda tecnica

Dimensioni: 1485 x 668 x 35 mm

Potenza di picco (W_p): 140 W

Corrente di corto circuito (I_{sc}): 7,85 A

Tensione di circuito aperto (V_{oc}):

Volts 23,9 V

Tensione al punto di massima potenza

(V_{mp}): 18 V

Corrente al punto di massima potenza

(I_{mp}): 7,77 A

Efficienza modulo: 14,2 %

NOCT (Nominal operating cell temperature): 43°C +/-2

Garanzia di potenza: 25 anni sull'80% della potenza min.



Fig. 46 - Modulo fotovoltaico.

2) Batteria di accumulo

La batteria di accumulo è fondamentale per il sistema progettato specialmente nelle ore notturne o nei giorni in cui le condizioni atmosferiche impediscono di avere un apporto solare sufficiente ad alimentare le apparecchiature. S3004 53AH DX è la batteria Bosch (Fig. 47) con listello pianale B13, 1 polo terminale, tensione batteria 12,0 V e capacità nominale da 53,0 Ah. Le batterie Bosch della serie S3 garantiscono la massima sicurezza grazie ad una doppia protezione contro i danni causati da scintille e sono esenti da manutenzione grazie al minimo consumo d'acqua.

Scheda tecnica

- larghezza: 17.5 cm

- lunghezza: 24.2 cm

- altezza: 17.5 cm

- tensione: 12V

- capacità batteria: 53Ah

- corrente di spunto en (a): 470

- n° poli: 1

- polarità: D



Fig.47 – Batteria di accumulo Bosch.

3) Controller di carica solare PWM

Il regolatore di carica solare (Fig. 48) è la soluzione ideale per piccoli e medi impianti isolati di potenza fino a 160W per sistemi a 12V, poiché seleziona in maniera automatica la tensione di lavoro e sono adatti alla carica di batterie. Le spie LED indicano in maniera chiara e immediata lo stato di lavoro del regolatore e degli accessori ad esso connessi (pannelli e batterie). Questo regolatore è in grado di rilevare lo stato di carica della batteria, svolgendo l'importantissima funzione di protezione della batteria dal sovraccarico e dalla scarica profonda. Ideali per applicazioni in sistemi di comunicazione in zone non servite da rete elettrica non connessi alla rete.

Scheda tecnica:

Selezione automatica della tensione (12 o 24V).

Tensione di carica amplificata.

Carica della batteria col metodo PWM.

Protezione dell'eccesso di carica e dalla scarica profonda.

Protezione dalla sovratemperatura.

Protezione dalla polarità inversa (sia per i moduli che per le batterie).

Indicazione tramite LED dello stato di carica della batteria.



Fig. 48 – Regolatore di carica solare PWM.

4) Convertitore DC/DC Step-up con uscita 4-30 V

Per fornire una corrente continua di 12V alle nostre utenze, dataTaker, Pc, stazione meteo Davis, all'uscita del regolatore solare, visto nel punto precedente e in Fig.48, abbiamo collegato uno stabilizzatore per regolare la tensione uscente che arriverà alle nostre strumentazioni (Fig. 49). Con esso si ha la possibilità di utilizzare dispositivi alimentabili in corrente continua usufruendo

di una sorgente di corrente alternata. Un dispositivo chiamato raddrizzatore è in grado di convertire una tensione c.a in c.c.

L'alimentazione può essere anche fornita direttamente da batterie, pannelli solari fotovoltaici generatori.

Un convertitore boost è un convertitore con una tensione d'uscita maggiore di quella in ingresso. Esso viene spesso chiamato anche convertitore step-up, ossia circuito innalzatore di tensione, poiché eleva la tensione in ingresso. Dato che la potenza ($V \cdot I$) deve conservarsi, la corrente di uscita sarà sempre una frazione di quella in ingresso, in genere all'incirca inversamente proporzionale al fattore di elevazione della tensione in uscita, tolte le perdite.

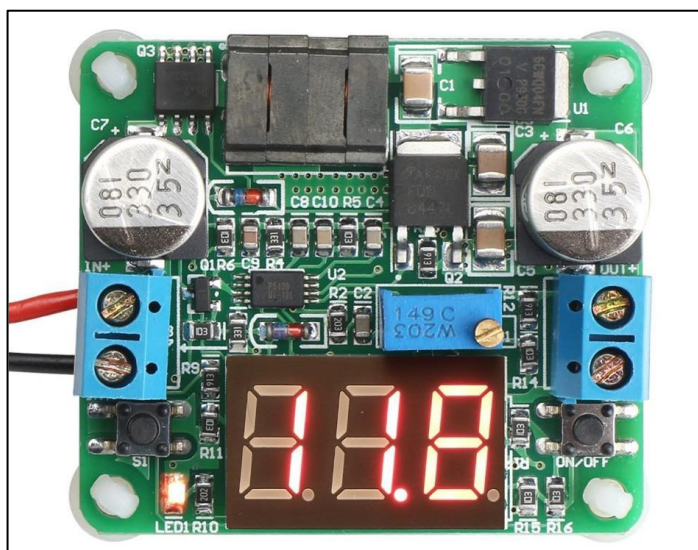


Fig. 49 – Convertitore boost Step -up.

Sistema di monitoraggio, data Taker e pc

Le termoresistenze PT100 superficiali sono state collocate per monitorare superficialmente, sia all'interno che all'esterno, la parete sud-est, la più esposta all'irraggiamento solare. La termoresistenza PT100 ambientale è stata posizionata all'interno del vano del mock up ad un'altezza di 1,50 m rispetto alla quota zero, per controllare la variazione di temperatura del cubo soggetto liberamente ai carichi termici esterni. Allo stesso scopo è stato posizionato il termoflussimetro a contatto con l'intradosso della parete esposta a sud-est, sempre in posizione centrale rispetto all'intera superficie della parete interna.

La strumentazione sopra elencata è stata collegata a un Data Logger ambientale LSI-LASTEM, modello DataTaker DT500 serie 3. Il singolo DataTaker è dotato di

ingressi specifici per una vasta gamma di sensori e calcoli di grandezze derivate utili per queste applicazioni; memorizza i dati dai sensori connessi e supporta diversi protocolli di comunicazione; è composto da 14 ingressi, 10 analogici e 4 digitali, come riportato nello schema della morsetteria (Fig.50) e un ingresso RS232 per connettere l'apparecchio al PC, tramite il quale è stato possibile controllare l'acquisizione e successivamente scaricare i dati memorizzati.

Lo strumento è fornito con una configurazione standard, modificabile tramite PC. Affinché fosse garantita la veridicità delle acquisizioni in vista delle previste elaborazioni future, lo strumento ha richiesto una definizione preventiva, a mezzo di riprogrammazione informatizzata, di alcuni semplici parametri, tra i quali ricordiamo:

- il sistema di misurazione di riferimento;
- l'altitudine;
- la frequenza temporale delle rilevazioni.

L'ultimo di questi parametri permette di definire, in funzione degli obiettivi reali della ricerca, la quantità di dati da ottenere nell'arco di tempo preventivato: ricordiamo che la rata di acquisizione, l'intervallo di tempo che passa tra due misurazioni, può variare tra 1 secondo e 12 ore; il valore memorizzato è la media dei valori acquisiti nell'intervallo imposto.

In questa sperimentazione si è deciso di utilizzare come frequenza temporale delle rilevazioni un intervallo di 5 minuti, tenendo in considerazione che l'analisi dei dati finale sarà espressa su un intervallo orario giornaliero.

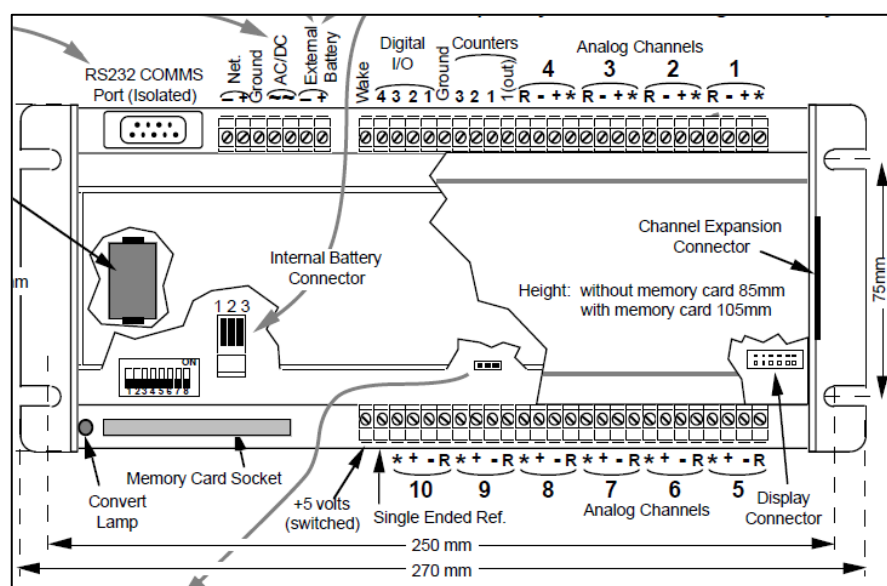


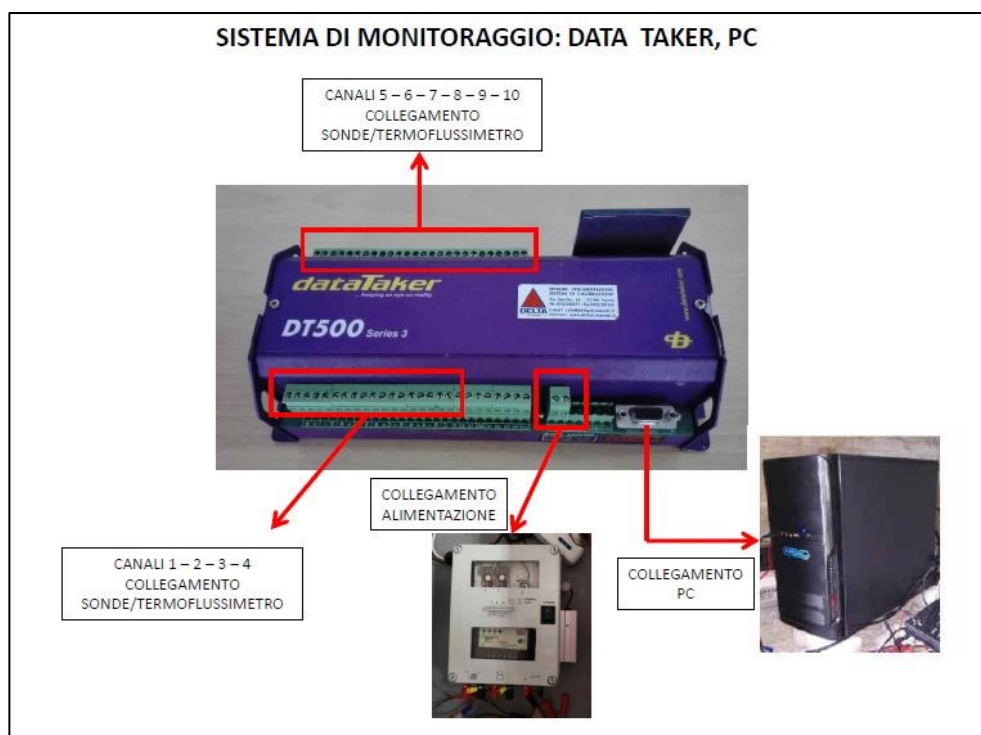
Fig. 50 – Morsettieria contatti dataTaker DT500 serie 3.

Una volta completata la programmazione del Dataaker DT500, esso riceve il dato come segnale elettrico e lo converte nella grandezza voluta.

Le sonde utilizzate durante il periodo di monitoraggio estivo per la rilevazione dei parametri ambientali all'interno dell'edificio sperimentale sono:

- Termoresistenze PT100 per registrare la temperatura superficiale interna /esterna del cubo isolato e non;
- Termoresistenze PT100 ambientali per rilevare la temperatura all'interno dell'habitat;
- Termoflussimetri per valutare il flusso che attraversa le pareti.

Si tratta dunque di sonde in grado di misurare la temperatura superficiale e lo scambio di flusso termico tra interno ed esterno. Anche in questo caso si è ricostruito lo schema di collegamento riportandolo graficamente (**Schema 3**) e testandolo preventivamente in laboratorio e successivamente in situ per verificare la corretta comunicazione tra i dispositivi.



Schema 3 – Schema di collegamento tra il dataTaker DT500 e il pc e collegamento per l'alimentazione elettrica del dataTaker stesso.

Analizziamo nello specifico la tipologia di sonde impiegate nella sperimentazione:

- **Termoresistenze PT100**

Le termoresistenze PT100 superficiali (Fig. 51) sono delle sonde in grado di rilevare la temperatura superficiale sfruttando la variazione della resistività di alcuni materiali al variare della stessa. La piastrina di dimensioni 30x20 mm viene appoggiata alla superficie di cui si vuole conoscere la temperatura tramite una pasta termoconduttiva e/o mediante apposito nastro.

La maggior parte dei trasduttori di temperatura utilizzati in ambito industriale sono di tipo analogico, in quanto sia la temperatura sia le grandezze elettriche di uscita variano con continuità; per la scelta del trasduttore di temperatura è necessario conoscere tutti i dati relativi alle condizioni ambientali in cui il trasduttore dovrà operare, i valori di temperatura che deve rilevare, la precisione che deve mantenere nel corso del suo esercizio.

Inoltre, per le loro dimensioni ridotte, la rapidità di risposta termica e la semplice struttura li rendono economicamente convenienti in diverse applicazioni. Il campo operativo va dai -40°C ai $+80^{\circ}\text{C}$, con un'incertezza di $0,15^{\circ}\text{C}$ e una risoluzione di $0,01^{\circ}\text{C}$.



Fig. 51 – Termoresistenza PT100, prima dell'installazione sulla facciata esterna del mock up.

▪ **Termoresistenza PT100 - ambientale**

Le PT100 ambientali (Fig. 52) o tubolari sono termoresistenze al platino per la misura della temperatura dell'aria, ed hanno lo stesso principio di funzionamento di quelle superficiali. Il campo operativo va dai -40°C ai $+80^{\circ}\text{C}$, con un'incertezza di $0,15^{\circ}\text{C}$ e una risoluzione di $0,01^{\circ}\text{C}$. Alcune accortezze sono necessarie per una corretta misurazione: in particolare è necessario verificare che la sonda non sia vicina a sorgenti di calore altrimenti la misura potrebbe essere alterata. La modalità di collegamento è del tutto analoga a quella della termoresistenza superficiale.



Fig. 52 – Termoresistenza PT100 ambientale installata dentro il mock up.

▪ **Termoflussimetro**

Il termoflussimetro (Fig. 53) è un sensore che permette di misurare il flusso termico che attraversa il componente edilizio su cui la sonda è installata: la sua applicazione principale è la misura in opera della trasmittanza termica degli edifici secondo la ISO 9869. Il diametro del flussimetro è di 80 mm ed uno spessore di 5 mm; il campo operativo va dai -30°C ai $+70^{\circ}\text{C}$, con una sensibilità nominale variabile che varia in base al modello utilizzato. Per una corretta installazione, è necessario posizionare la sonda flussimetrica su una porzione di superficie rappresentativa del componente edilizio del quale si vuole effettuare la misura, lontano da fonti dirette di calore, e per non avere effetti di bordo, è necessario evitare le zone vicine agli spigoli o con anomalie di carattere fisico o geometrico. Il sensore misura il flusso termico solo in corrispondenza del suo punto centrale (elemento sensibile). Si consiglia il posizionamento sul lato

interno della parete al fine di minimizzare gli effetti di disturbo della radiazione solare. La faccia blu del sensore deve essere posizionata a contatto con la parete e la parte rossa, con il lato positivo a vista; il flusso termico, infatti, attraversa la parete, in condizioni estive, dall'esterno all'interno. La sonda va posizionata sulla parete interponendo una pasta conduttiva tra il sensore e la parete, per ridurre la resistenza termica di contatto. Il cavetto della sonda può essere fissato al muro in 2 o 3 punti con del nastro adesivo. La modalità di collegamento è del tutto analoga a quella mostrata per la termoresistenza superficiale.



Fig. 53 – Termoflussimetro applicato al centro della parete interna del mock up.

Sistema di monitoraggio ambientale esterno

La sperimentazione ha previsto anche il monitoraggio dei dati climatici esterni che, contemporaneamente agli altri parametri descritti precedentemente, sono stati tarati con la stessa rata di acquisizione (5 minuti) proprio per poter avere una correlazione diretta. Per l'esterno si è deciso di predisporre una stazione meteo in grado di misurare le grandezze climatiche come temperatura e umidità relativa dell'aria, velocità e direzione del vento, radiazione solare globale sull'orizzontale.

La centralina meteo ha un sistema di comunicazione wireless, nello specifico la Stazione Davis Vantage Pro 2 (Fig. 54) è costituita principalmente da:

- Consolle/ricevitore con ampio display multifunzione e barometro;
- Alimentatore;
- Gruppo sensori ISS (temperatura aria, umidità aria, pluviometro, radiazione solare, velocità e direzione del vento);
- Schermo solare standard a cinque piatti.

Come suggerito nella scheda tecnica del produttore, il radiometro deve essere collocato ad almeno 2 m di altezza da terra, in posizione perfettamente orizzontale e in una zona priva di ombra; ed è per questo che è stato posto sulla copertura piana dell'edificio, sulla quale era stato progettato un palo sul quale fissare la stazione meteo (Fig. 55 - 57).



Fig. 54 – Stazione Davis Vantage Pro 2.



Fig. 55-56 – Posizionamento della Stazione Davis Vantage Pro 2.



Fig. 57 – Collegamento con l'alimentazione ed il sistema di acquisizione e memorizzazione dati.

Al fine di consentire un monitoraggio in continuum dei dati ambientali è stato utilizzato il software “WeatherLink” (Fig. 58) associato alla nostra stazione Davis Vantage Pro 2, un'interfaccia che permette di leggere in tempo reale i dati e salvarli sulla memoria del Pc. I dati vengono automaticamente salvati con intervalli di misurazione di 5 minuti come da noi stabilito e vengono generati file .txt separati per ogni giorno di monitoraggio.

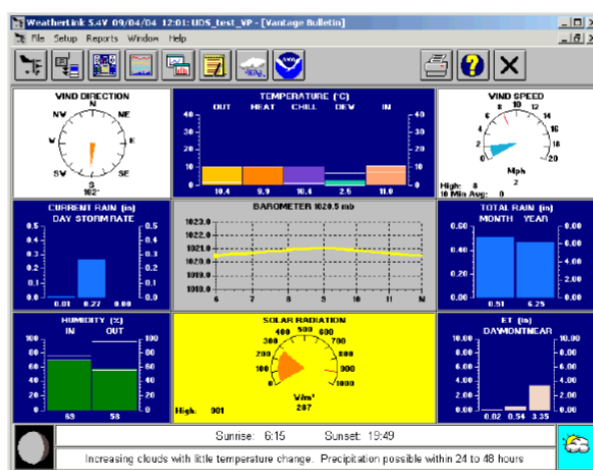


Fig. 58 – Applicazione Weather Link.

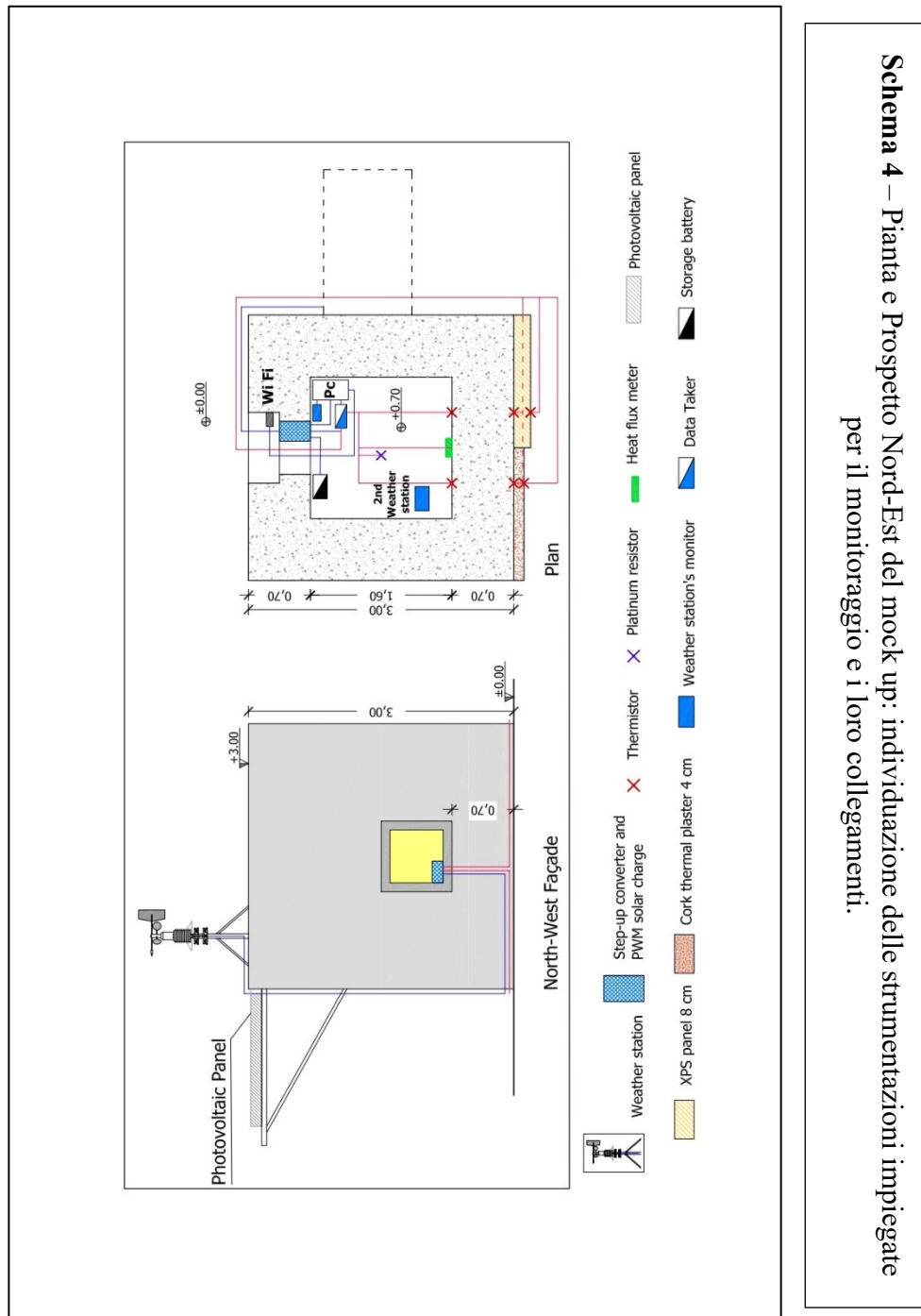
Comunicazione da remoto

Tutti i dati registrati sia dal DataTaker che dalla stazione meteo Davis Vantage Pro 2, sono stati monitorati durante l'acquisizione e scaricati settimanalmente utilizzando un programma per il collegamento da remoto tra pc. Il collegamento è stato programmato con cadenze e orari ben prestabiliti: finestre temporali in cui il pc situato nel mock up dallo stato di standby si attivava per poter essere connesso al nostro pc per il down load dei dati (Fig. 59 – 60).



Fig. 59–60 - Collegamento da remoto tra il pc dell'ufficio e il pc del mock up per il controllo e il down load dei dati acquisiti.

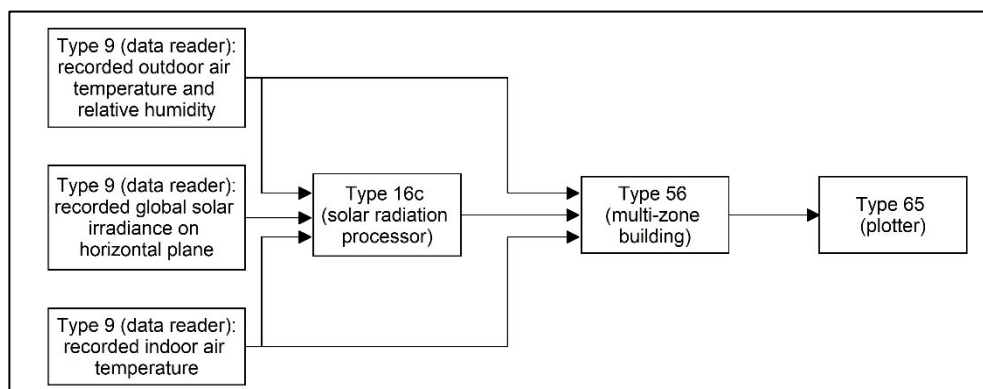
Nella pagina successiva viene riportato l'intero schema di collegamento delle strumentazioni utilizzate per il monitoraggio e la loro collocazione rispetto al mock up (Schema 4).



Metodo analitico: TRNSYS

Per comprendere il comportamento della struttura in Misapor Beton, isolata come descritto nelle sezioni precedenti, è stato necessario creare un modello tridimensionale dell'edificio sperimentale, integrandolo in un ambiente virtuale che rispecchia i dati climatici reali del sito in cui è realizzato. In questo modo è stato possibile fare delle considerazioni tra gli output restituiti dal modello virtuale e quelli misurati sperimentalmente.

Quindi, sono state effettuate diverse analisi termiche dell'edificio simulando il fenomeno fisico attraverso un modello virtuale in TRNSYS, un software di simulazione transitoria che consente di studiare il comportamento termico dinamico di sistemi come gli edifici. L'edificio prototipo, caratterizzato da un'elevata capacità termica, è stato modellato in TRNBuild (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, WI, USA), un'interfaccia per modellazione geometrica, che tiene conto di molteplici parametri: pareti, guadagni, profili di ventilazione e infiltrazione di un edificio con zone termiche singole o multiple. Nello **schema 5** viene visualizzato il diagramma di flusso implementato in TRNSYS.



Schema 5 - Diagramma di flusso del modello di simulazione in Trnsys.

Per la simulazione, i dati ambientali esterni e interni raccolti durante la campagna di sperimentazione sono stati inseriti come input attraverso il componente Type 9. I dati meteorologici esterni (temperatura dell'aria esterna, umidità relativa esterna e radiazione solare globale sul piano orizzontale) sono stati immessi in conformità con il componente Type 16c, un calcolatore di radiazioni solari che implementa il modello di Reindl per ottenere le radiazioni diretta e diffusa orizzontali in funzione della radiazione solare globale sull'orizzontale, della temperatura ambiente,

dell'umidità relativa e dell'altezza solare. Inoltre, il modello Perez 1990 è stato scelto per calcolare l'irraggiamento diretto e diffuso su ogni superficie inclinata del modello.

Il componente Type 56 ha permesso di creare l'edificio modellandone la geometria e le pareti: sono state create le Pareti 0, 1 e 2 e sono state definite le proprietà termofisiche dei materiali che compongono i loro strati, come riportato nelle tabelle 16 e 18 delle sezioni precedenti. Inoltre, è stato impostato un sistema di riscaldamento/raffreddamento con potenza illimitata per mantenere la temperatura dell'aria interna pari ai valori misurati (dati di input); quindi le temperature di set-point di riscaldamento / raffreddamento sono state immesse attraverso il componente Type 9. Non sono stati aggiunti alcun tipo di apporto, ventilazione e profilo di infiltrazione al modello virtuale dell'edificio.

Al fine di confrontare i risultati simulati con i valori misurati sperimentalmente, sono stati analizzati i seguenti dati di output: fabbisogno energetico, temperature superficiali esterne (T_{so}) ed interne (T_{si}) di una parete e il flusso termico (Q_{com}) sulla superficie interna della parete incluse convezione e radiazione verso altre superfici.

3.3 Risultati campagne sperimentali 2018 - 2019

La stazione meteo e tutto il sistema di monitoraggio è stato installato nella prima settimana di maggio 2018 e si è deciso di collaudare il sistema prima di iniziare la campagna vera e propria. Le prime acquisizioni di questo primo mese di "rodaggio" ci hanno consentito di verificare la funzionalità e fattibilità del progetto e di mettere a punto il sistema di alimentazione elettrica formato dal pannello solare e dalla batteria di accumulo: infatti, successivamente è stata agganciata in parallelo una seconda batteria di emergenza. Anche per il sistema di trasmissione dati si è dovuta apportare qualche modifica collocando il modem portatile più all'esterno possibile del volume del mock up ma al riparo da pioggia e umidità per garantire una migliore ricezione del segnale per la connessione internet.

Come anticipato prima nel capitolo precedente, attraverso il sistema di acquisizione installato è stato possibile scaricare i valori delle grandezze monitorate e successivamente elaborare i dati in maniera tale da ottenerne l'andamento nel tempo. I grafici realizzati contengono i valori misurati in sito durante le due campagne di monitoraggio estive in modo da poterli confrontare tra di loro e valutarne l'affidabilità e riproducibilità.

In entrambe le campagne si sono valutati:

1. Dati climatici:

- Temperatura dell'aria esterna;
- Umidità relativa esterna;
- Velocità e direzione del vento;
- Radiazione solare globale.

2. Dati ambientali:

- Temperature superficiali esterne/interne della parete Sud-Est;
- Temperatura dell'aria interna;
- Flusso termico attraverso la parete Sud-Est.

Questo capitolo riporta i risultati ottenuti con le campagne di monitoraggio stagionale del 2018 e del 2019. Tutti i risultati presentati sono stati registrati sperimentalmente fatta eccezione per l'irraggiamento solare sulla facciata sud-est che è stato calcolato partendo dall'irraggiamento solare globale registrato sul piano orizzontale (dati sperimentali) attraverso la combinazione dei modelli di Reindl e Perez, secondo la normativa UNI 10349-1:2016 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata". La UNI 10349-1 fornisce, per il territorio italiano, i dati climatici convenzionali necessari per la verifica delle prestazioni energetiche e termoigrometriche degli edifici, inclusi gli impianti tecnici per la climatizzazione estiva e invernale ad essi asserviti.

La norma fornisce inoltre metodi di calcolo per:

- ripartire l'irradianza solare oraria nella frazione diretta e diffusa;
- calcolare l'energia raggiante ricevuta da una superficie fissa comunque inclinata ed orientata.

Quest'ultimo è stato proprio il nostro caso; ovvero ricondurre l'effettivo irraggiamento solare sulla facciata verticale esposta a sud-est con un'angolazione di circa 45°. Partendo dai dati di input registrati sperimentalmente dalla stazione meteo posta sul tetto del mock up, si sono ricavati i valori dell'irraggiamento sulla nostra facciata attraverso un foglio di calcolo excel impostato con le formule della UNI 10349-1 e facendo girare il modello su TRNSYS che ha restituito come output l'irraggiamento solare a sud-est.

Al fine di confrontare e analizzare il comportamento dei materiali isolanti, la parete P1 e la parete P2 sono state testate nelle stesse condizioni meteorologiche. Inoltre,

confrontando i dati, tendenze simili si possono notare sia nel 2018 che nel 2019, pertanto la seguente analisi dettagliata si riferisce solo alla campagna del 2018. Mentre nell'indice a fine capitolo saranno riportati anche i grafici del 2019.

Risultati sperimentali estate 2018

La campagna di monitoraggio è stata condotta tra il 15 giugno e il 5 settembre 2018. Le temperature medie registrate sono state di 19,6°C a giugno, di 24°C a luglio e di 23,3°C in agosto. Per l'analisi ed il confronto dei dati sono stati scelti due periodi consecutivi di sei giorni nei due mesi più caldi, in modo da essere i più rappresentativi del periodo estivo 2018: 10 – 15 luglio e 2 – 7 agosto.

Per quanto riguarda i giorni rappresentativi di luglio, la temperatura dell'aria esterna più alta registrata è stata di 31,9°C il 14 luglio alle ore 14:00, mentre il valore più basso è stato di 13,6°C il 10 luglio alle ore 06:00 del mattino. La temperatura media dell'aria nei sei giorni è stata di 24,2°C. La variazione massima giornaliera della temperatura si è verificata il 10 luglio con un'oscillazione massima di 15,8°C. L'irraggiamento solare massimo sulla facciata sud-est è stato di 509 Wm⁻² il 10 luglio tra le 10:00 e le 11:00 del mattino.

Per quanto riguarda i giorni più rappresentativi di agosto, la temperatura media dell'aria nei sei giorni considerati è stata di 25,4 °C. Il picco di massimo si è registrato il 7 agosto alle ore 14:00 con un valore di 33,5°C, mentre il picco di minimo è stato pari a 17,3°C il 6 agosto alle ore 05:00. La variazione massima giornaliera della temperatura è stata di 16,0°C il 6 agosto. Infine, l'irraggiamento solare massimo sulla facciata sud-est è stato di 475 Wm⁻² sempre il 6 agosto tra le 11:00 e le 12:00.

I **grafici 1 - 2** mostrano il confronto tra la temperatura dell'aria esterna e l'irraggiamento solare globale calcolato sulla superficie orientata a sud-est durante i periodi selezionati di luglio e agosto. Poiché la superficie analizzata è orientata verso sud-est, l'irraggiamento solare registra i suoi valori massimi intorno alle 10:00 – 11:00 a luglio e tra le 11:00 – 12:00 ad agosto, mentre i valori massimi della temperatura dell'aria sono raggiunti intorno alle 14:00 per entrambi i periodi. Le temperature minime dell'aria sono registrate tra le 06:00, a luglio, e le 05:00 in agosto.

Ai fini di poter valutare correttamente i valori di temperatura superficiale esterna della facciata considerata, essendo questi influenzati dalla capacità del rivestimento esterno di assorbire o meno l'energia solare, è importante valutare anche il comportamento di tale struttura nei confronti dell'irraggiamento solare stesso. Un modello di calcolo per la valutazione della temperatura superficiale è presente nella norma UNI 10357 "Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli

ambienti”: la temperatura detta “sol-air temperature” corrisponde alla temperatura al di sotto dello strato limite d’aria dovuta all’effetto combinato della temperatura dell’aria esterna e dell’irraggiamento solare.

La temperatura sole - aria mostra quindi la correlazione tra la temperatura dell'aria esterna e l'irraggiamento solare: rappresenta infatti un valore di temperatura dell'aria esterna che comprende la radiazione solare incidente, in questo caso quella a sud-est, lo scambio di energia radiante tra il cielo e l'ambiente esterno, e lo scambio di temperatura aria-aria. Quindi, la temperatura sole-aria è stata calcolata (formula 17) a partire dai dati della temperatura dell'aria esterna misurata, dall'irraggiamento solare sulla superficie inclinata con orientamento sud-est, dal coefficiente di assorbimento solare della superficie in oggetto (per le superfici di colore chiaro, solitamente valore assunto $\alpha = 0,30$) e dal coefficiente superficiale di scambio termico h_e ($25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$):

$$Sol_{air-temp} = T_{ext\ air} + \left(\frac{\alpha \times SR_{South-East}}{h_{ext}} \right) \quad (17)$$

Dove:

$T_{ext\ air}$ ($^{\circ}\text{C}$) è la temperatura esterna misurata con la stazione meteo Davis Vantage Pro 2;

α è il coefficiente di assorbimento della radiazione solare incidente sulla superficie esterna;

SR (Wm^{-2}) è l’irradianza solare incidente sulla superficie esterna della parete considerata all’ora t ;

h_e ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) è il coeff. Superficiale di scambio termico esterno.

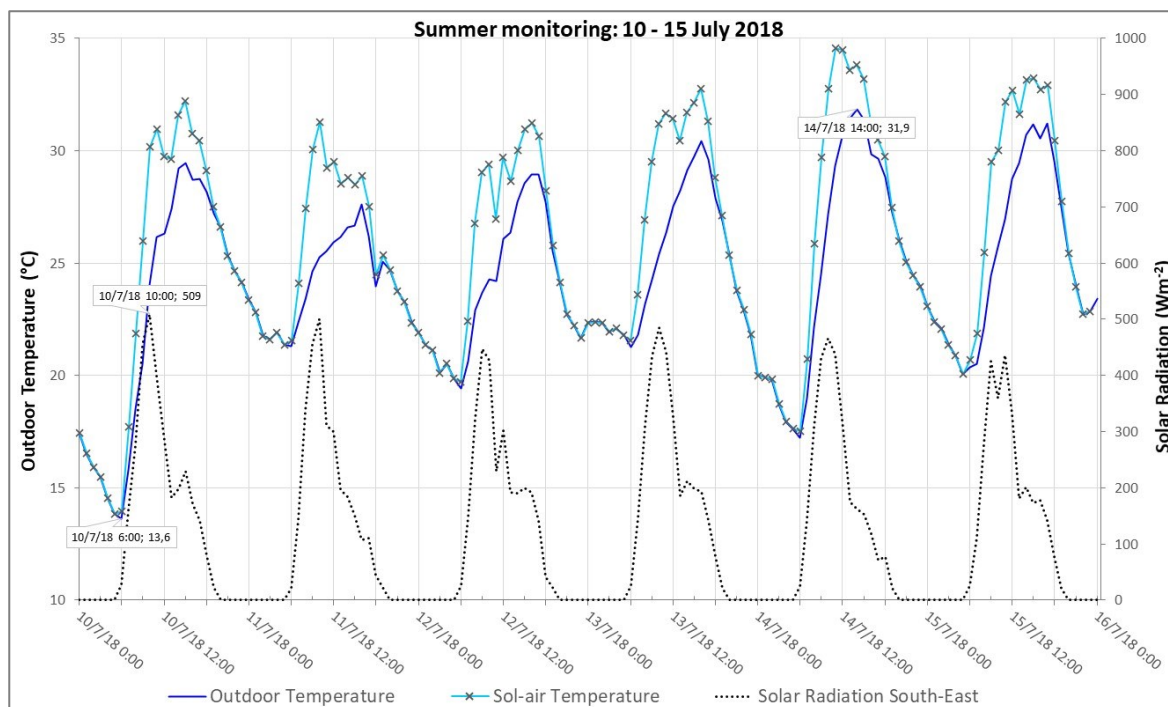


Grafico 1- Relazione tra temperatura dell'aria esterna, irraggiamento solare a sud-est e temperatura sole-aria nel periodo 10 – 15 luglio 2018.

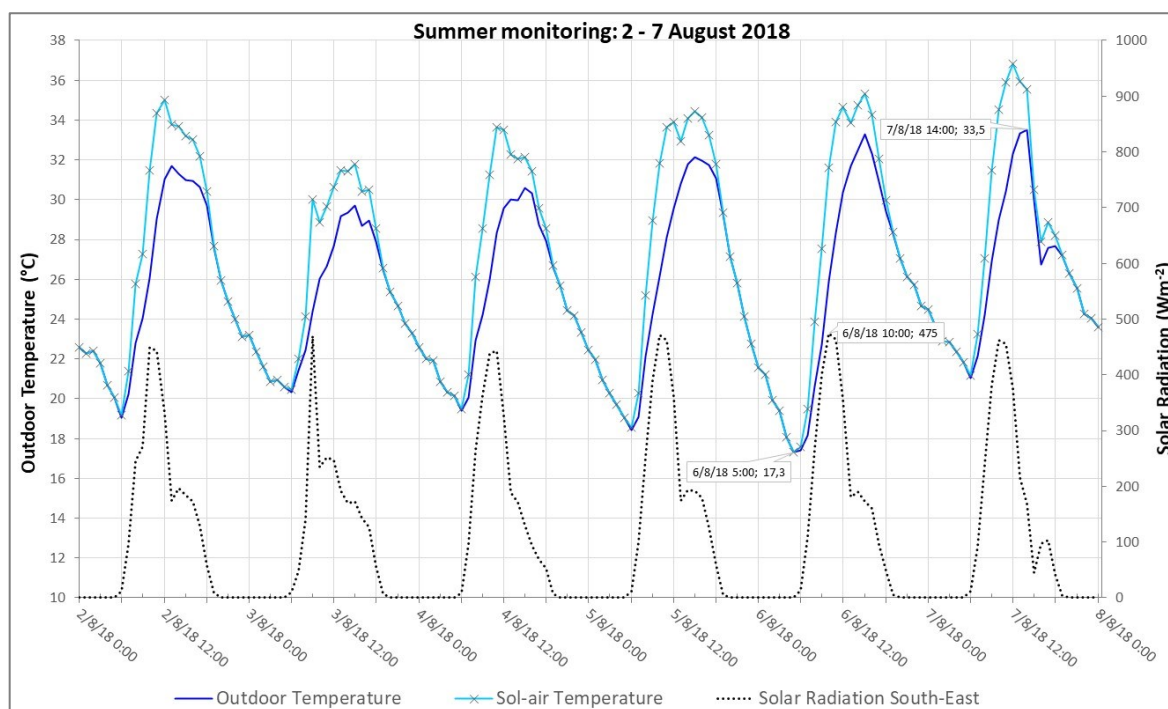


Grafico 2- Relazione tra temperatura dell'aria esterna, irraggiamento solare a sud-est e temperatura sole-aria nel periodo 2 – 7 agosto 2018.

La tipica colorazione bianca dei rivestimenti degli edifici mediterranei è un valido aiuto per ridurre la capacità di assorbimento solare ($\alpha < 0,30$) e mitigare il valore della temperatura sole – aria per l’effetto combinato della temperatura dell’aria esterna, irraggiamento solare incidente sulla superficie e buona riflessione solare. Altra grandezza climatica che è stata presa in considerazione è la velocità del vento: i periodi analizzati nel dettaglio sono stati scelti in modo tale che questo parametro non avesse un’influenza importante sulle temperature superficiali rilevate. Nei **grafici 3 – 4** sono riportati rispettivamente i valori della velocità del vento per luglio e agosto: si può notare che il valore medio per entrambi è piuttosto basso e quindi con scarsa influenza sulle altre grandezze monitorate.

La velocità media nel periodo dal 10 – 15 luglio è pari a 1,72 m/s e si mantiene all’interno di un range che va da 0 a 3 m/s con una velocità massima registrata di 6,05 m/s il giorno 12 luglio alle 16:00 (Grafico 3).

Mentre, nel periodo dal 2 al 7 agosto la velocità media è pari a 0,72 m/s e si mantiene all’interno di un range che va da 0 a 1 m/s con una velocità massima di 3,12 m/s raggiunta il 7 agosto alle ore 18:00 (Grafico 4).

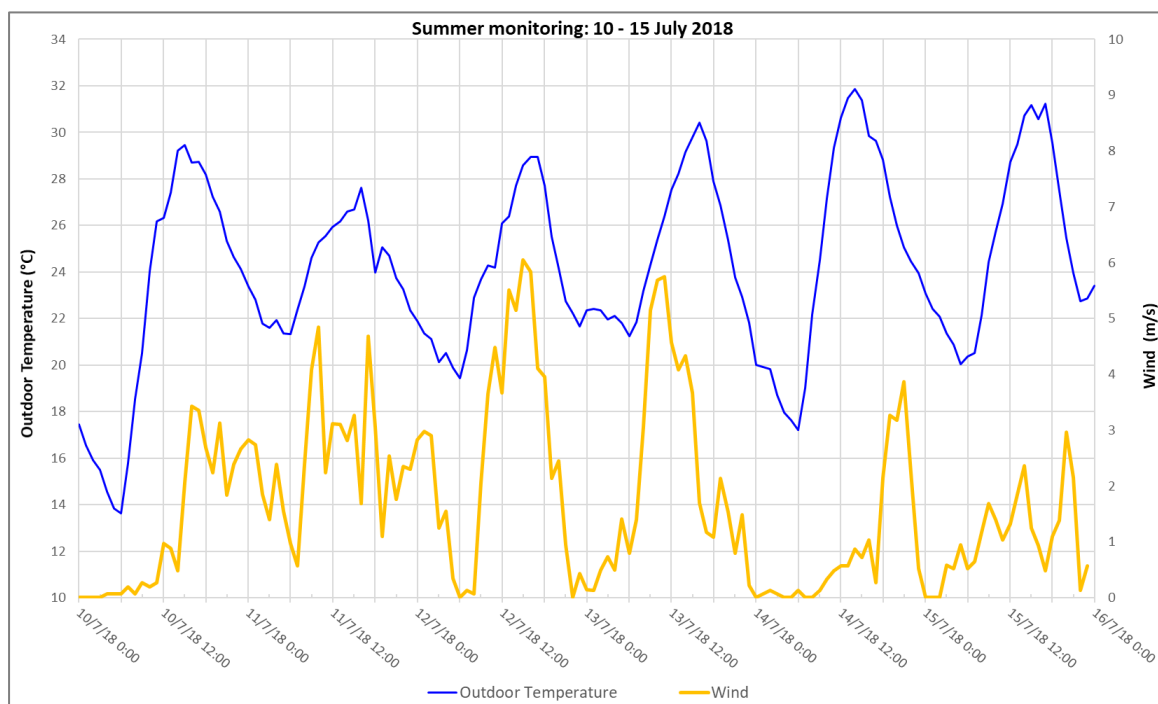


Grafico 3- Andamento della velocità del vento nel periodo 10 – 15 luglio 2018 con evidenza dei valori massimi e minimi in correlazione alla temperatura dell’aria esterna.

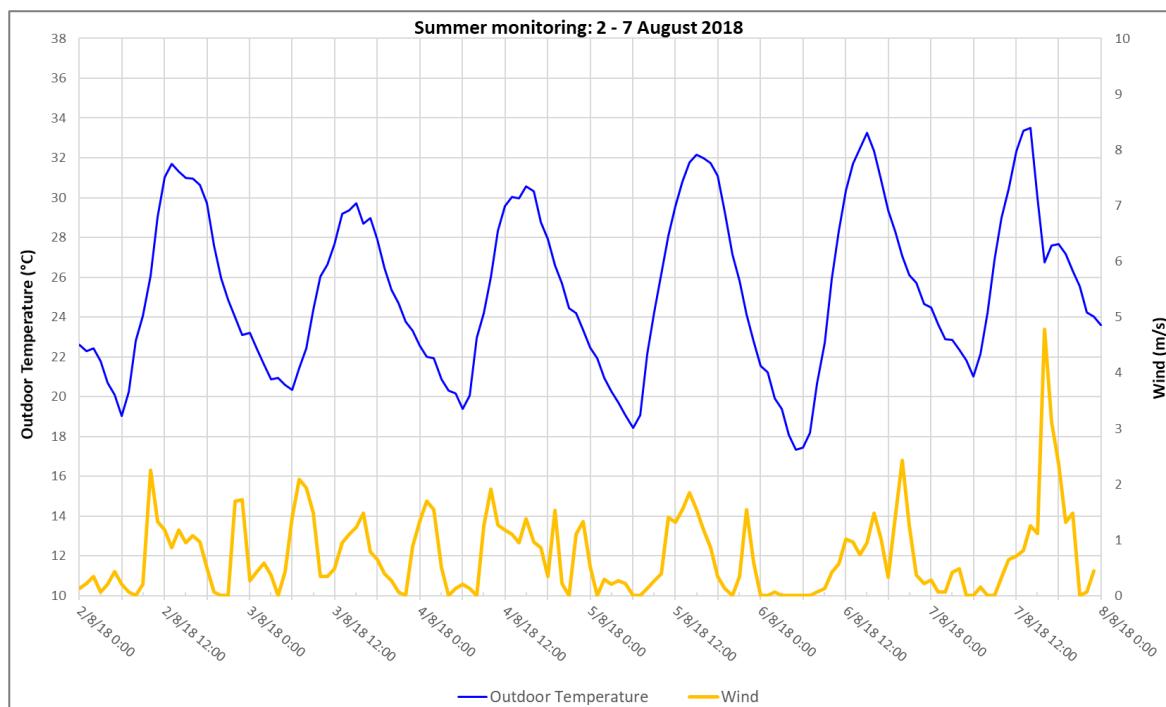


Grafico 4- Andamento della velocità del vento nel periodo 2 – 7 agosto 2018 con evidenza dei valori massimi e minimi in correlazione alla temperatura dell'aria esterna.

Di seguito sono riportati i grafici (Grafico 5 – 6) che mettono in relazione le condizioni climatiche esterne (radiazione solare sud-est, temperatura dell'aria, temperatura sole - aria) con le temperature superficiali esterne rilevate su entrambi gli strati isolanti collocati sulla parete Sud-Est. Nel dettaglio, i dati sperimentali che andremo a mostrare sono le temperature superficiali esterne ed interne delle pareti P1 e P2, il flusso di calore attraverso la parete rispetto all'irraggiamento solare sulla facciata sud-est, la temperatura dell'aria esterna e la temperatura dell'aria interna al mock up.

Il monitoraggio simultaneo dei due diversi sistemi isolanti, P1 e P2, consente di confrontare le due soluzioni nei periodi estivi selezionati. Il grafico 5 mostra un confronto tra le temperature superficiali esterne di P1 e P2 durante il primo periodo analizzato (10 – 15 luglio): la temperatura della parete P1 registra un valore sempre inferiore alla parete P2 durante le ore diurne, mentre si rileva un comportamento opposto durante la notte. Nello specifico, i valori di temperatura superficiale esterna più elevati sono registrati il 15 luglio: ovvero 33,5°C per P1 e 35,5°C per P2. Mentre la massima variazione di temperatura tra i valori massimi e minimi giornalieri registrati è di 15,8°C per P1 e 20,0°C per P2 nella giornata del 10 luglio 2018.

Pertanto, da questa prima lettura dei dati registrati, si può affermare che il sistema isolante con il pannello XPS, parete P2, è più stressato termicamente rispetto alla parete P1, poiché registra i picchi più elevati della temperatura superficiale esterna e mostra delle grandi fluttuazioni di temperatura durante la giornaliera.

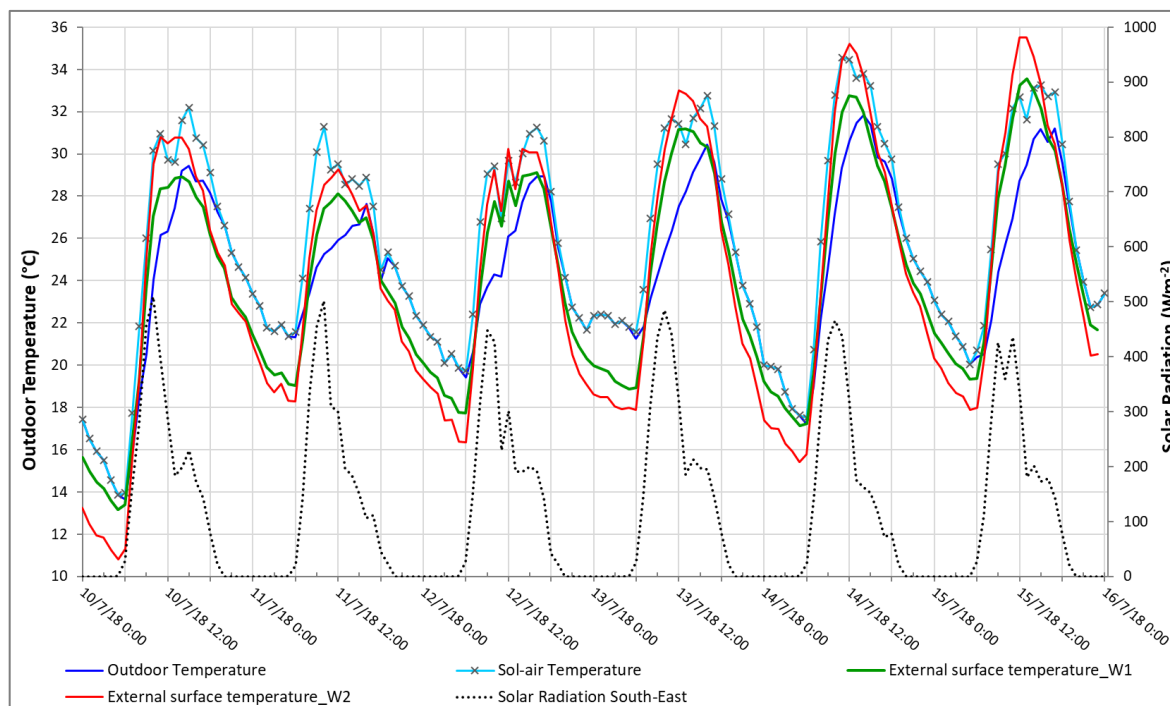


Grafico 5- Monitoraggio nel periodo 10 – 15 luglio 2018: dati climatici e comparazione tra le temperature superficiali esterne dei due sistemi di isolamento con termointonaco in sughero e pannello in XPS, indicati rispettivamente come sistema 1 e 2.

Analogamente, le temperature superficiali esterne durante il secondo periodo analizzato (2-7 agosto) sono indicate nel grafico 6. I valori di temperatura superficiale maggiori sono stati rilevati nella giornata del 7 agosto: picco massimo di 37,2°C per P1 e 39,3°C per P2. Mentre la massima variazione di temperatura tra i valori massimi e minimi giornalieri registrati è di 18,3°C per P1 e 22,3°C per P2 nella giornata del 6 agosto 2018.

Anche in questo caso il sistema 2 isolato con il pannello in XPS risulta essere quello maggiormente stressato termicamente e con maggiori sollecitazioni durante la giornata: la variazione della temperatura considerando il picco di massimo e di minimo è maggiore per lo strato in XPS.

Pertanto, si può affermare che P1 e P2 mostrano un comportamento simile in entrambi i periodi estivi analizzati.

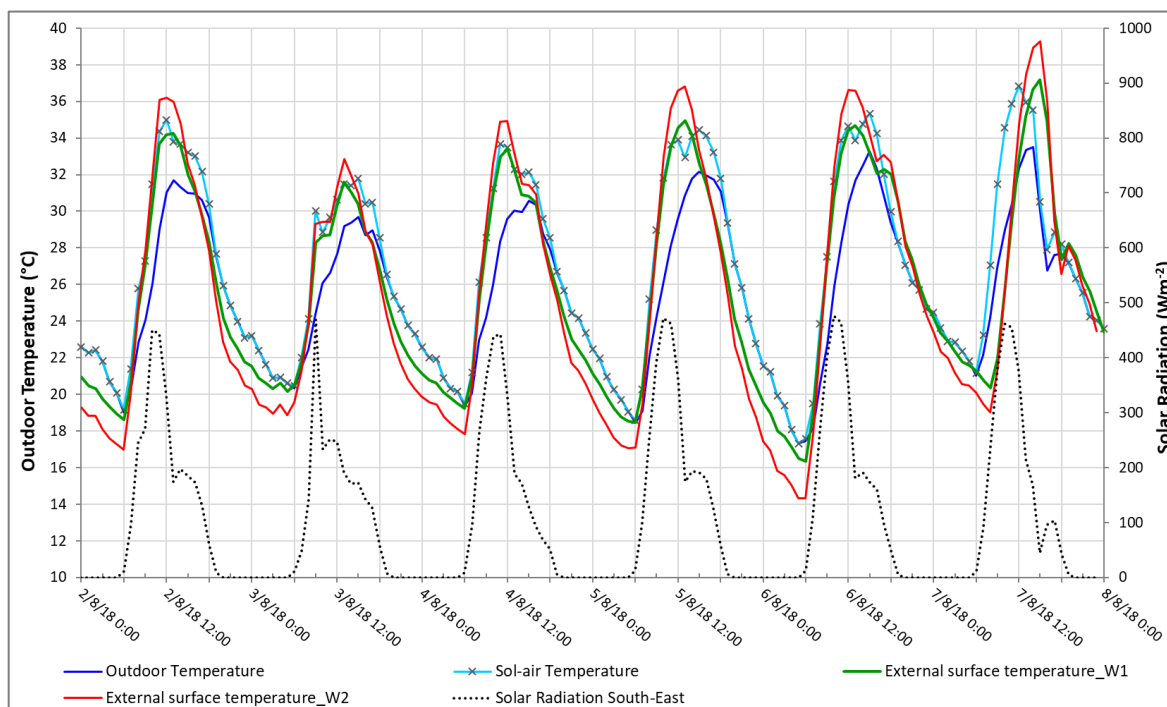


Grafico 6- Monitoraggio nel periodo 2 – 8 agosto 2018: dati climatici e comparazione tra le temperature superficiali esterne dei due sistemi di isolamento con termointonaco in sughero e pannello in XPS, indicati rispettivamente come sistema 1 e 2.

Al fine di analizzare al meglio il comportamento delle singole stratigrafie isolanti, sono riportati di seguito dei grafici dedicati a ciascun sistema: Parete 1 (termointonaco) e Parete 2 (pannello XPS).

I **grafici 7 – 8** riportano i profili della temperatura superficiale esterna, superficiale tra strato isolante e struttura in Misapor beton (Parte 0) e superficiale interna al mock up rispettivamente per ciascun isolante nel primo periodo di riferimento 10 – 15 luglio 2018.

Contrariamente a quanto visto per le temperature superficiali esterne, per le temperature interne tra gli strati di contatto con la struttura (“insulating inner temperature”) l’oscillazione è più marcata per lo strato isolante 1. Infatti, la temperatura rilevata superficialmente tra lo strato 1 e lo strato 0 varia tra 17,3 °C e 28,0 °C durante la giornata nel periodo considerato; mentre la temperatura rilevata

superficialmente tra lo strato 2 e lo strato 0 varia tra 22,1 °C e 25,1 °C. Un risultato atteso poiché il diverso spessore di applicazione dei due isolanti incide su questo parametro essendo la resistenza termica dello strato in XPS doppia rispetto allo strato d'intonaco isolante.

Inoltre, si nota una tendenza quasi lineare per quanto riguarda la temperatura dell'aria interna e la temperatura superficiale interna per entrambi i sistemi isolanti.

In particolare, i dati del sistema P2 mostrano valori molto prossimi a quelli della temperatura dell'aria interna: infatti, le due curve si sovrappongono, mentre la temperatura superficiale di P1 rimane sempre leggermente inferiore a quella della temperatura dell'aria interna.

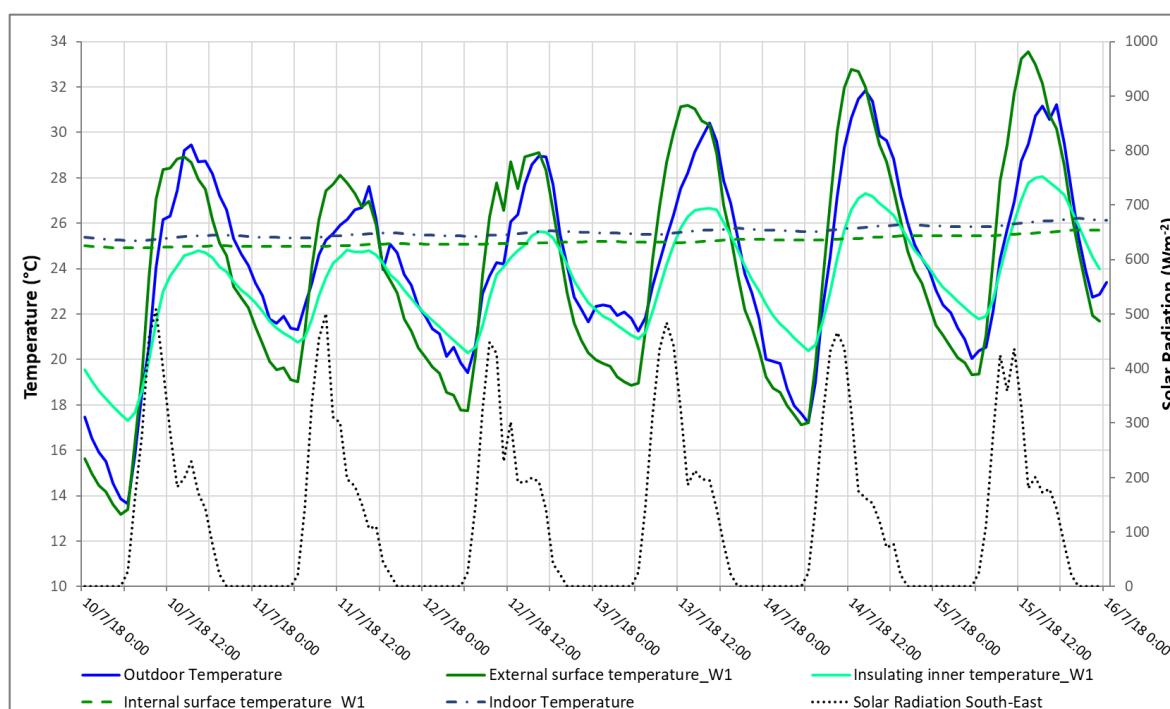


Grafico 7- Monitoraggio nel periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 1 termintonaco (spessore 4 cm): comparazione tra le temperature superficiali registrate negli strati.

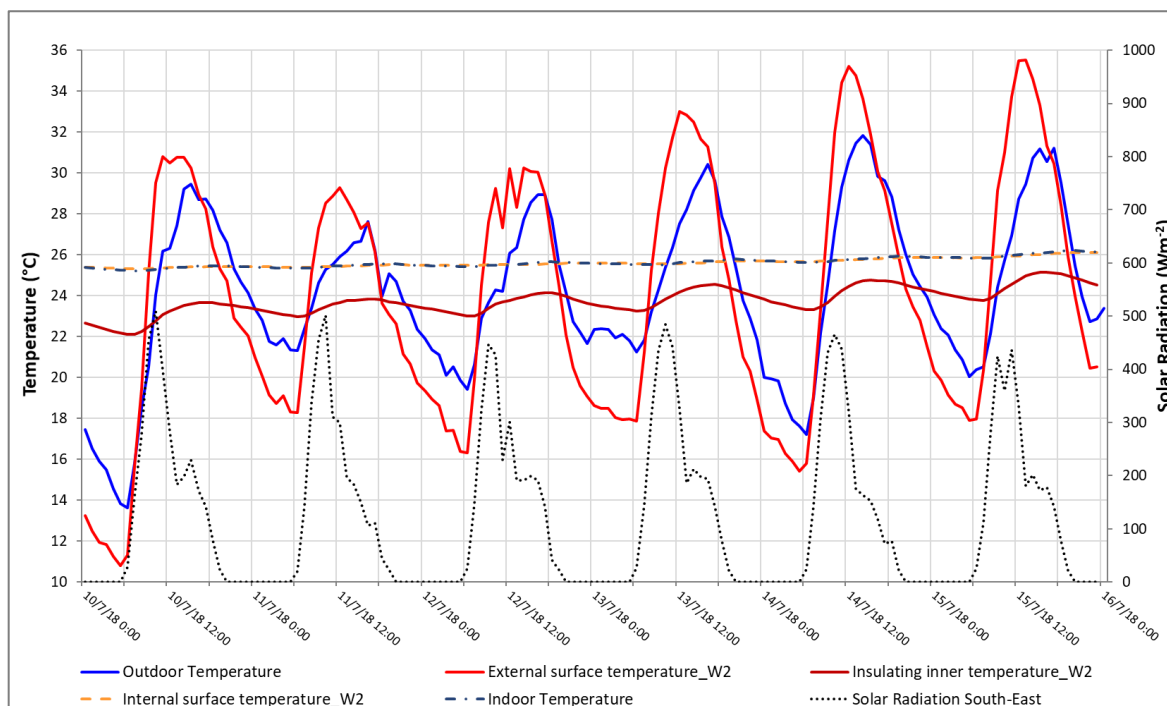


Grafico 8- Monitoraggio nel periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 2 pannello XPS (spessore 8 cm): comparazione tra le temperature superficiali registrate negli strati.

Analogamente, i **grafici 9 - 10** mostrano le temperature superficiali per ciascun strato misurate per la Parete 1 e la Parete 2 nel periodo 2 – 7 agosto 2018, confermando l'andamento registrato precedentemente. Infatti, le temperature superficiali all'interno dello strato isolante P1 e struttura P0 variano tra 21,1 °C e 30,4 °C mentre per la parete P2 e P0 variano in maniera minore tra 25,1 °C e 27,3 °C. Al contrario, la temperatura interna della superficie P1 registra un aumento raggiungendo la temperatura dell'aria interna e quindi anche P2: le tre curve si sovrappongono.

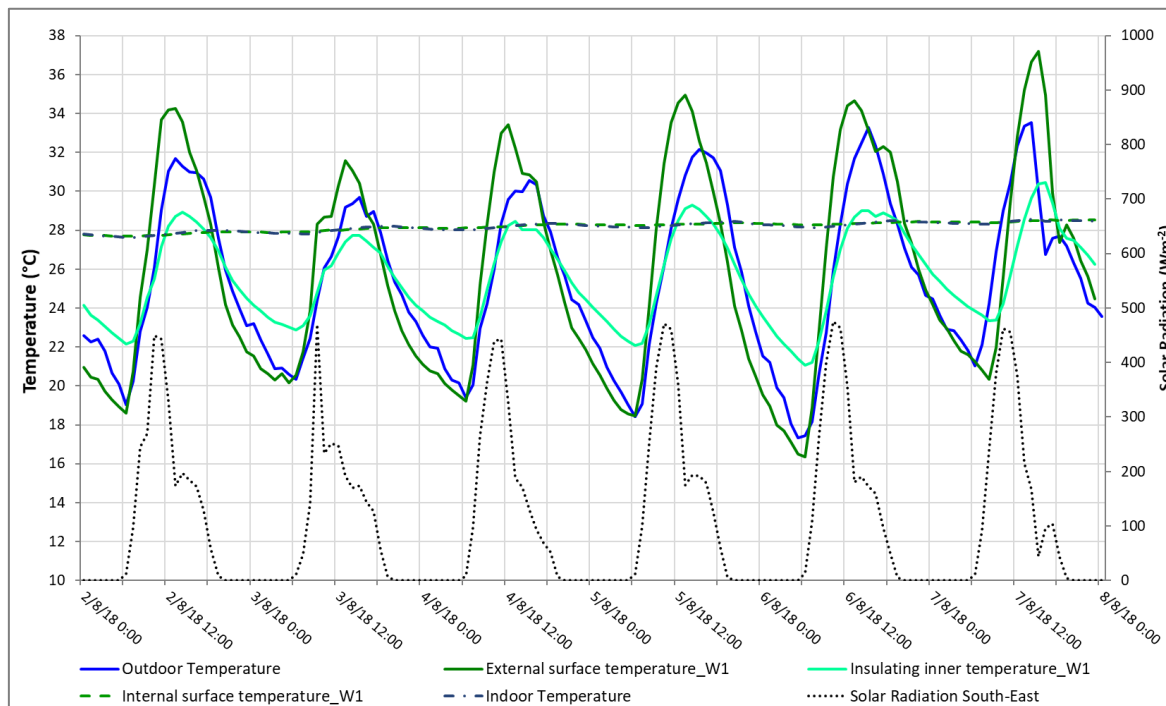


Grafico 9- Monitoraggio nel periodo 2 – 7 agosto 2018, Sistema 1 termointonaco

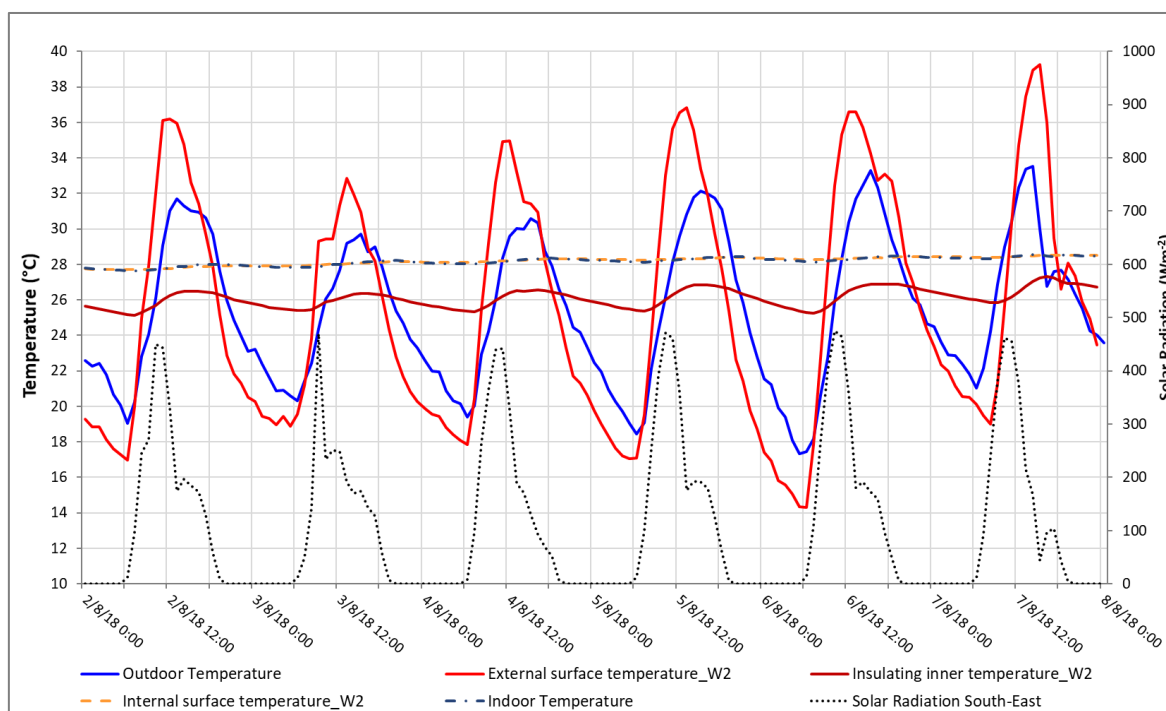


Grafico 10- Monitoraggio nel periodo 2 – 7 agosto 2018, Sistema 2 pannello XPS.

Le rielaborazioni grafiche seguenti (**grafico 11 - 12**) mostrano il comportamento degli strati inferiori dell'isolante, quindi, in relazione allo spessore dello stesso rispetto alla temperatura superficiale tra gli strati, interna, temperatura dell'aria e il flusso termico risultante.

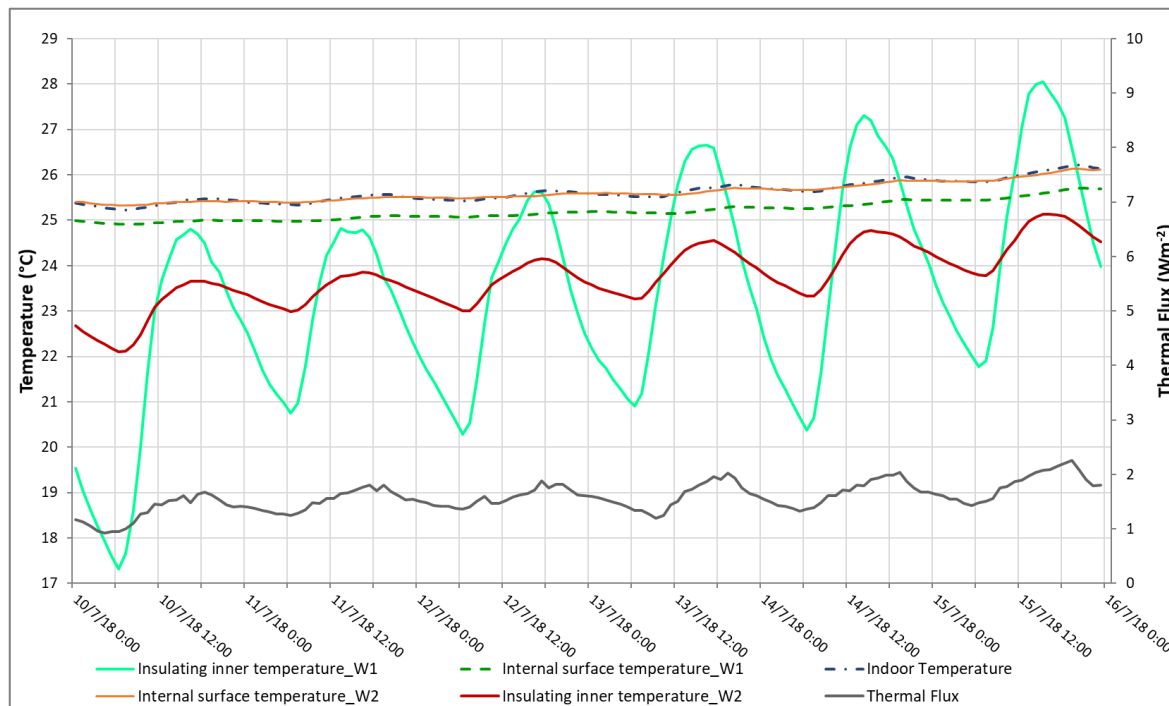


Grafico 11- Monitoraggio periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 1 termointonaco.

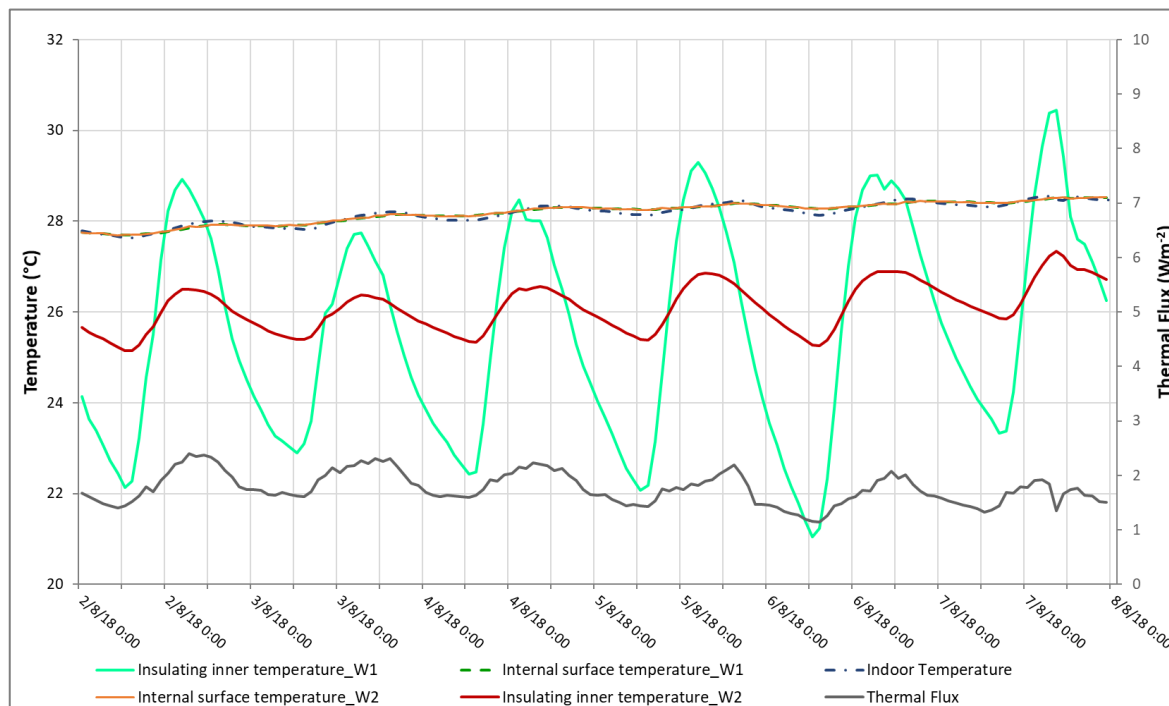


Grafico 12- Monitoraggio periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 2 pannello XPS.

Come precedentemente evidenziato, lo spessore maggiore di isolamento del pannello XPS attenua meglio la variazione della temperatura giornaliera all'interno dello strato anche se all'interno della superficie del mock up entrambe le temperature per i due sistemi di isolamento risultano praticamente stazionarie e infine coincidenti nel periodo estivo di agosto.

Inoltre, i **grafici 11 – 12** mostrano che il flusso termico, misurato sul lato interno della parete attraverso l'involucro sud-est dell'edificio, è sempre in uscita, evidenziando come l'inerzia termica complessiva della parete consenta il rilascio di calore durante l'intera giornata.

Le seguenti **tabelle 20 – 21** riportano i parametri statistici di massimo, minimo, media e deviazione standard.

$$\text{Media } (x_m) \quad x_m = \frac{\sum_{i=1}^N (z_i)}{N} \quad (18)$$

$$\text{Deviazione standard } (\sigma) \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N-1}} \quad (19)$$

Dove

zi: i-esimo valore misurato

yi: i-esimo valore misurato di P2

xi: i-esimo valore misurato di P1

N: numero totale di valori del periodo considerato.

I dati si riferiscono ai due periodi analizzati di luglio e agosto 2018. Come previsto, i valori della deviazione standard per la temperatura superficiale esterna del sistema P2 con XPS sono superiori a quelli del sistema P1 con il termointonaco per entrambi i periodi.

Data	Range Value	Temperatura dell'aria esterna (°C)	Irraggiamento solare sud-est (Wm ⁻²)	Temperatura superficiale esterna P1 (°C)	Temperatura superficiale esterna P2 (°C)	Temperatura superficiale tra P0-P1 (°C)	Temperatura superficiale tra P0-P2 (°C)	Temperatura superficiale interna P1 (°C)	Temperatura superficiale interna P2 (°C)
10 <i>luglio</i> 2018	Max	29,5	509	28,9	30,8	24,8	23,7	25,0	25,4
	Min	13,6	0	13,2	10,8	17,3	22,1	24,9	25,3
	x _m	22,4	130,7	22,0	21,9	21,6	23,0	25,0	25,4
	Σ	5,7	158,9	6,0	7,6	2,8	0,6	0,0	0,0
11 <i>luglio</i> 2018	Max	27,6	501	28,1	29,3	24,8	23,6	25,1	25,5
	Min	21,3	0	19,0	18,3	20,8	23,0	25,0	25,4
	x _m	24,1	120,2	23,5	23,5	23,0	23,5	25,0	25,4
	σ	1,9	155,2	3,2	3,9	1,4	0,3	0,0	0,0
12 <i>luglio</i> 2018	Max	29,0	448	29,1	30,2	25,6	24,2	25,2	25,6
	Min	19,4	0	17,8	16,3	20,3	23,0	25,1	25,5
	x _m	23,8	120,2	23,5	23,5	23,1	23,6	25,1	25,5
	σ	3,1	144,4	4,2	5,1	1,8	0,4	0,0	0,0
13 <i>luglio</i> 2018	Max	30,4	484	31,2	33,0	26,7	24,6	25,3	25,7
	Min	21,3	0	18,9	17,9	20,9	23,3	25,1	25,6
	x _m	24,9	133,4	24,6	24,5	23,8	23,9	25,2	25,6
	σ	3,1	161,5	4,7	5,8	2,1	0,5	0,1	0,1
	Max	31,6	466	32,8	35,2	27,3	24,8	25,5	25,9
	Min	17,2	0	17,1	15,4	20,4	23,3	25,3	25,7

14 <i>luglio</i> 2018	x_m	24,7	121,4	24,7	24,6	24,0	24,1	25,3	25,8
	σ	5,0	156,9	5,5	6,9	2,5	0,5	0,1	0,1
15 <i>luglio</i> 2018	Max	31,2	436	33,5	35,5	28,1	25,1	25,7	26,1
	Min	20,1	0	19,3	17,9	21,8	23,8	25,4	25,9
	x_m	25,2	122,6	25,7	25,6	24,9	24,5	25,5	26,0
	σ	3,8	147,7	5,1	6,3	2,2	0,5	0,1	0,1

Tabella 20 – Dati statistici: monitoraggio 10 – 15 luglio 2018.

Data	Range Value	Temperatura dell'aria esterna (°C)	Irraggiamento solare sud-est (Wm⁻²)	Temperatura superficiale esterna P1 (°C)	Temperatura superficiale esterna P2 (°C)	Temperatura superficiale tra P0-P1 (°C)	Temperatura superficiale tra P0-P2 (°C)	Temperatura superficiale interna P1 (°C)	Temperatura superficiale interna P2 (°C)
2 <i>agosto</i> 2018	Max	31,7	450	34,3	36,2	28,9	26,5	27,9	27,9
	Min	19,0	0	18,6	17,0	22,1	25,1	27,7	27,7
	x_m	25,5	115,5	25,6	25,3	25,4	25,9	27,8	27,8
	σ	4,2	145,0	5,5	6,8	2,3	0,5	0,1	0,1
3 <i>agosto</i> 2018	Max	29,7	470	31,6	32,8	27,8	26,4	28,18	28,15
	Min	20,3	0	20,2	18,9	22,9	25,4	27,9	27,9
	x_m	24,8	94,7	24,9	24,6	25,2	25,9	28,0	28,0
	σ	3,2	122,1	4,0	4,9	1,7	0,3	0,1	0,1
4 <i>agosto</i> 2018	Max	30,6	443	33,4	35,0	28,5	26,6	28,3	28,3
	Min	19,4	0	19,2	17,8	22,4	25,3	28,1	28,1
	x_m	25,0	110,6	25,4	25,1	25,4	26,0	28,2	28,2
	σ	3,7	149,2	4,9	5,9	2,1	0,4	0,1	0,1
5 <i>agosto</i> 2018	Max	32,2	472	34,9	36,8	29,3	26,9	28,4	28,4
	Min	18,4	0	18,5	17,0	22,1	25,4	28,3	28,3
	x_m	25,5	124,1	25,6	25,3	25,5	26,1	28,3	28,3
	σ	4,8	158,6	5,9	7,2	2,5	0,5	0,0	0,0
6	Max	33,3	475	34,7	36,6	29,0	26,9	28,4	28,5
	Min	17,3	0	16,4	14,3	21,1	25,3	28,3	28,3

agosto 2018	x_m	25,1	122,5	26,1	25,9	25,6	26,2	28,3	28,3
	σ	5,3	159,9	6,7	8,1	3,0	0,6	0,1	0,1
	Max	33,5	462	37,2	39,3	30,4	27,3	28,5	28,5
7	Min	21,0	0	20,4	19,0	23,3	25,8	28,4	28,4
agosto 2018	x_m	26,3	112,1	26,7	26,6	26,3	26,5	28,5	28,5
	σ	3,7	157,4	5,3	6,4	2,3	0,5	0,0	0,0

Tabella 21 – Dati statistici: monitoraggio 2 – 7 agosto 2018.

Risultati analitici estate 2018

Al fine di verificare una corrispondenza tra un modello virtuale e i risultati provenienti dal monitoraggio in situ, sono state effettuate delle simulazioni con il programma di analisi dinamica TRNSYS, concentrandoci sugli stessi due periodi estivi di luglio e agosto 2018 analizzati nella sezione precedente.

I grafici che seguono mostrano il confronto tra entrambi i sistemi isolati per i valori registrati delle temperature superficiali esterne e quelli simulati: i risultati evidenziano come il modello dinamico di TRNSYS non riproduca accuratamente le misure sperimentali. Infatti, i valori calcolati delle temperature superficiali esterne sono molto sottostimati rispetto ai valori misurati raggiunti nello stesso periodo temporale.

I **grafici 13a** e **13b** rappresentano l'andamento delle temperature superficiali esterne sul sistema P1 isolato con il termointonaco dove le curve in verde sono i valori misurati in sito mentre le curve in grigio sono quelli calcolati da TRNSYS: la curva dei valori calcolati è sempre al di sotto di quella dei valori misurati. Anche se il modello analitico riproduce abbastanza bene l'andamento della curva di temperatura, ne sottostima il valore di diversi °C soprattutto nel mese di agosto, ovvero quando le temperature si innalzano.

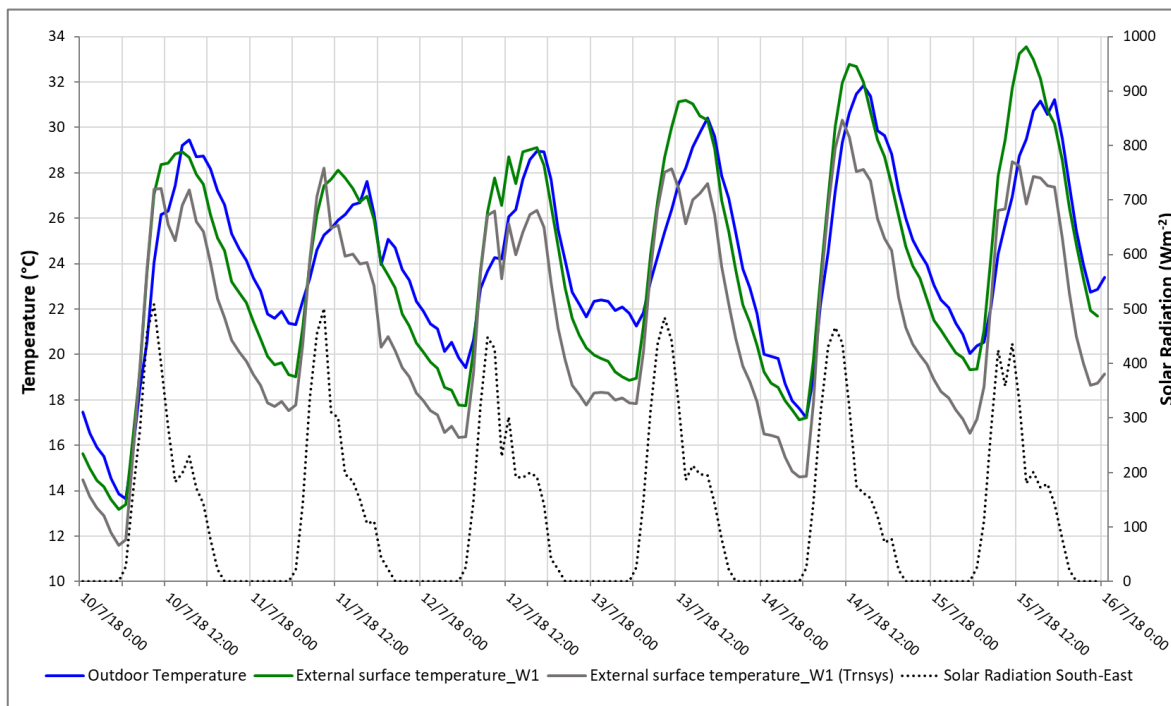


Grafico 13a – Confronto tra valori misurati e simulati su P1: 10 – 15 luglio 2018.

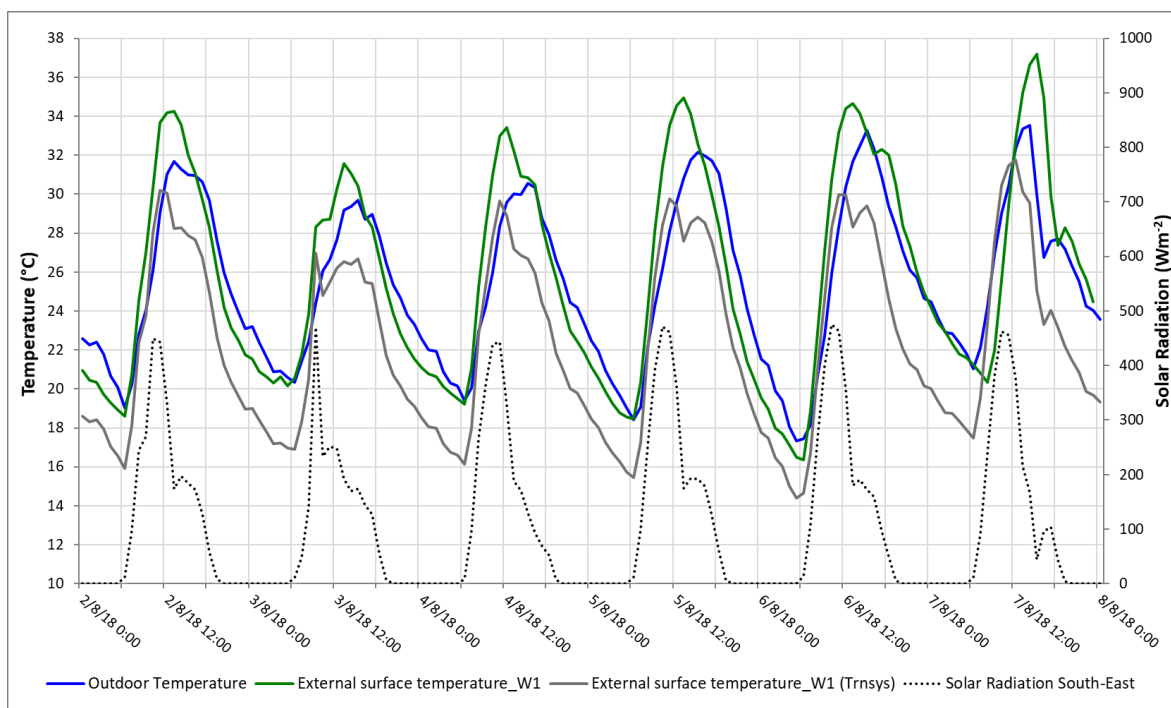


Grafico 13b – Confronto tra valori misurati e simulati su P1: 2 – 7 agosto 2018.

Analogamente i **grafici 14a** e **14b** rappresentano l'andamento delle temperature superficiali esterne sul sistema P2 isolato con XPS dove le curve in rosso sono i valori misurati in sito mentre le curve in celeste sono quelli calcolati da TRNSYS: anche qui la curva dei valori calcolati è sempre molto al di sotto di quella dei valori misurati. In particolare, nel caso della parete P2 la simulazione non riesce a cogliere i picchi massimi di temperatura superficiale ma approssima meglio le temperature superficiali minime rispetto al caso della parete P1 isolata con l'intonaco termico. Infatti, dai **grafici 13a** e **13b** si può notare che la curva dei valori simulati si discosta anche nel caso delle temperature minime superficiali registrate durante la notte e non solo per quel che riguarda i picchi massimi diurni. Al contrario, per il sistema P2 le temperature superficiali minime misurate e simulate non si discostano di molto e l'approssimazione è migliore se non addirittura coincidente in alcuni casi.

Tornando ai **grafici 14a** e **14b**, il modello simulato con TRNSYS nuovamente riproduce abbastanza bene l'andamento della curva di temperatura superficiale ma ne sottostima il valore di diversi °C soprattutto nel mese di agosto, ovvero quando le temperature si innalzano. Le simulazioni effettuate in regime dinamico con il modello di TRNSYS hanno permesso di mettere in luce i limiti di questa modellazione virtuale nel caso di una struttura fortemente inerziale dotata di un buon grado di coibentazione esterna.

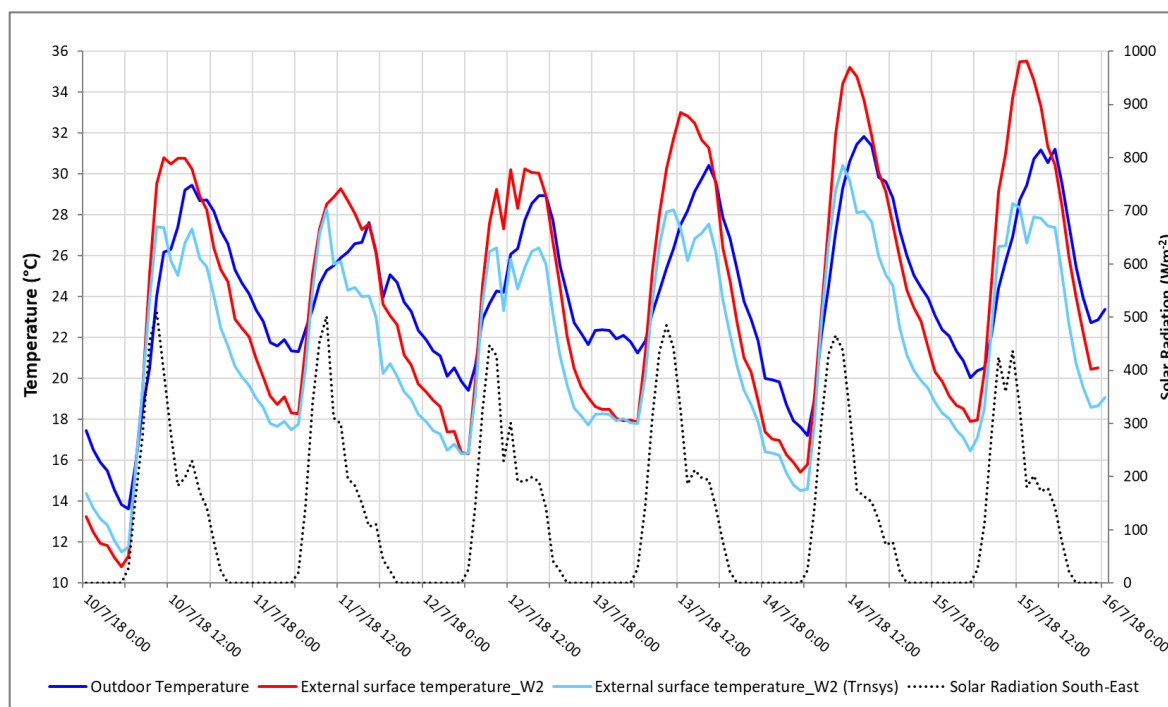


Grafico 14a – Confronto tra valori misurati e simulati su P2: 10 – 15 luglio 2018.

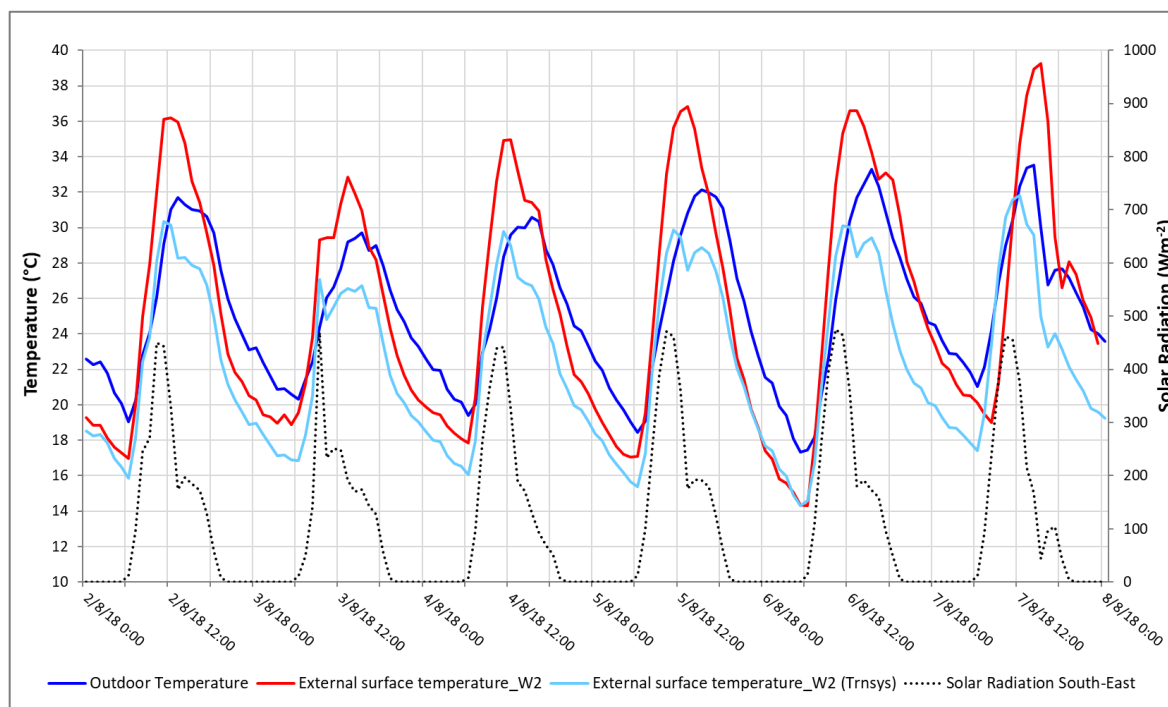


Grafico 14b – Confronto tra valori misurati e simulati su P2: 2 – 7 agosto 2018.

Il calcolo effettuato con il modello virtuale di TRNSYS ha permesso di ricavare i dati orari da poter confrontare con le grandezze misurate sul modello reale del mock up, in particolare sui dati di temperature superficiali esterne ed interne alla parete sud-est studiata. Prendendo come riferimento il giorno in cui si è registrata la massima temperatura superficiale esterna per i due periodi di riferimento analizzati, si possono evidenziare alcune differenze tra il comportamento reale delle pareti e quello virtuale.

Nella successiva **tabella 22** sono riportati i valori riferiti alla giornata del 15 luglio 2018 mentre nella **tabella 23** sono riportati quelli riferiti al 7 agosto 2018.

In entrambi i casi si può osservare quanto segue:

- le temperature superficiali esterne diurne nelle ore centrali di P2 sono sempre maggiori di P1, per i valori misurati;
- le temperature superficiali esterne notturne di P1 sono sempre maggiori di P2, per i valori misurati;
- rispetto al valore massimo registrato di temperatura superficiale esterna la parete P2 si scalda di circa 2°C in più rispetto a P1;
- i valori calcolati con il modello TRNSYS non rilevano differenze sostanziali di temperatura superficiale tra la parete P1 e la parete P2: il modello non riesce a cogliere le variazioni tra il comportamento dell'isolamento a cappotto con il termointonaco rispetto a quello con i pannelli in XPS.

Data e ora	MISURATI		CALCOLATI	
	Ts;out XPS	Ts;out INTONACO	Ts;out INTONACO (trnsys)	Ts;out XPS (trnsys)
15/07/2018				
1	20,31	21,51	18,90	18,84
2	19,86	21,05	18,37	18,31
3	19,16	20,54	18,10	18,04
4	18,69	20,06	17,55	17,49
5	18,51	19,84	17,16	17,10
6	17,90	19,32	16,52	16,45
7	17,97	19,36	17,15	17,10
8	20,35	21,06	18,57	18,56
9	24,69	24,36	22,34	22,39
10	29,16	27,88	26,34	26,45
11	31,00	29,47	26,41	26,48
12	33,73	31,71	28,48	28,58
13	35,51	33,25	28,30	28,36
14	35,52	33,55	26,62	26,64
15	34,60	32,99	27,84	27,90
16	33,33	32,16	27,78	27,82
17	31,32	30,75	27,42	27,45
18	30,45	30,15	27,36	27,39
19	28,42	28,55	25,13	25,11
20	25,91	26,47	22,70	22,64
21	23,96	24,83	20,80	20,73
22	22,25	23,34	19,62	19,54
23	20,44	21,92	18,66	18,58
24	20,53	21,69	18,74	18,68
T MAX (°C)	35,52	33,55	28,48	28,58
T MIN (°C)	17,90	19,32	16,52	16,45
Escursione giornaliera ΔT (°C)	17,62	14,23	11,96	12,12
ΔT_{max} XPS-INT (°C)	1,98		0,10	
ΔT giornaliero max XPS-INT (°C)	3,40		0,16	

Tabella 22 – Dati misurati e simulati a confronto rispetto alla giornata del 15 luglio 2018 quando si è registrata la temperatura superficiale massima sulla parete isolata esposta a sud-est.

Data e ora	MISURATI		CALCOLATI	
	Ts;out XPS	Ts;out INTONACO	Ts;out INTONACO (trnsys)	Ts;out XPS (trnsys)
07/08/2018				
1	23,36	24,19	20,01	19,96
2	22,33	23,37	19,36	19,30
3	21,98	22,95	18,79	18,72
4	21,16	22,31	18,73	18,68
5	20,57	21,79	18,36	18,30
6	20,49	21,59	17,93	17,87
7	20,10	21,26	17,48	17,42
8	19,50	20,79	19,54	19,53
9	19,02	20,35	23,36	23,42
10	21,27	21,96	27,58	27,69
11	25,70	25,59	30,44	30,57
12	30,37	29,41	31,47	31,58
13	34,72	32,81	31,74	31,83
14	37,45	35,19	30,14	30,18
15	38,92	36,63	29,55	29,58
16	39,26	37,18	25,05	24,99
17	35,98	34,94	23,33	23,27
18	29,47	29,91	24,05	24,02
19	26,59	27,36	23,18	23,14
20	28,09	28,26	22,20	22,15
21	27,35	27,59	21,47	21,41
22	25,90	26,42	20,85	20,79
23	24,95	25,62	19,86	19,79
24	23,44	24,49	19,67	19,61
T MAX (°C)	39,26	37,18	31,74	31,83
T MIN (°C)	19,02	20,35	17,48	17,42
Escursione giornaliera ΔT (°C)	20,24	16,84	14,26	14,42
ΔTmax XPS-INT (°C)	2,08		0,09	
ΔT giornaliero max XPS-INT (°C)	3,40		0,16	

Tabella 23 – Dati misurati e simulati a confronto rispetto alla giornata del 7 agosto 2018 quando si è registrata la temperatura superficiale massima sulla parete isolata esposta a sud-est.

I **grafici 15 e 16** confrontano gli andamenti delle temperature superficiali interne tra i valori misurati in sito e quelli calcolati dal modello virtuale in TRNSYS.

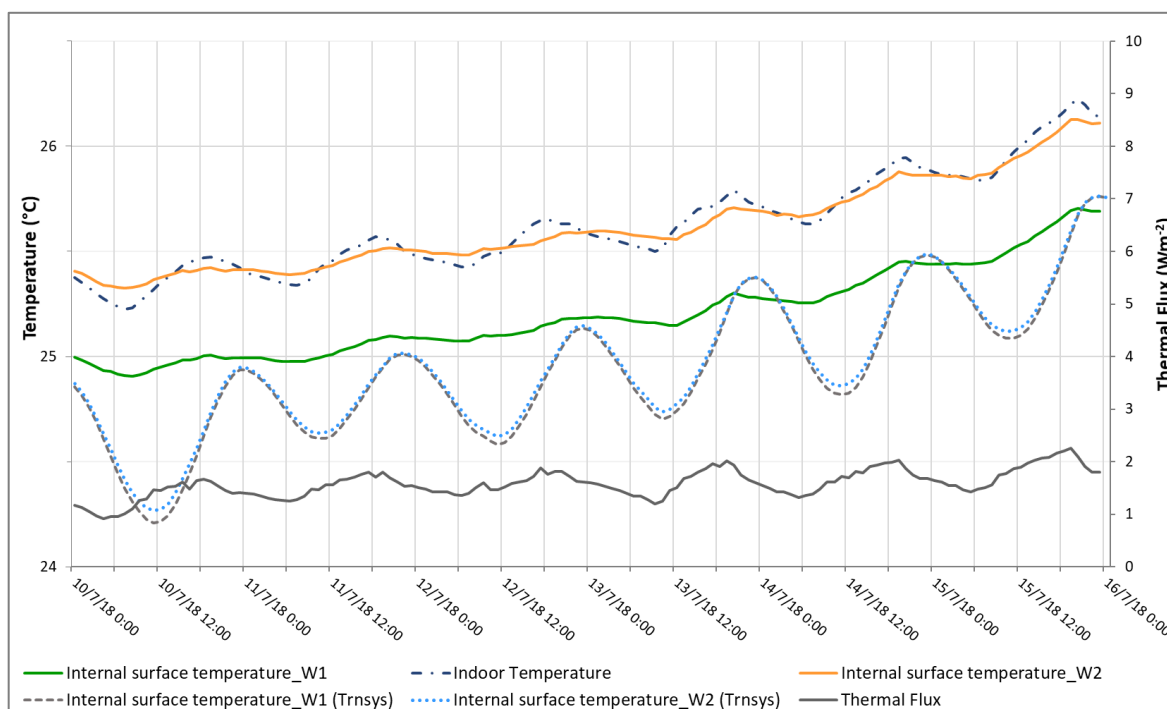


Grafico 15 – Confronto tra i valori misurati e i valori simulati su P1 e P2 nel periodo 10 – 15 luglio 2018.

Nel **grafico 15** riferito al periodo di luglio si evidenzia una differenza, seppur lieve, tra l'andamento della temperatura superficiale della parete P2 rispetto alla parete P1: la prima ha un andamento più oscillatorio con un valore centrale che uguaglia la temperatura dell'aria indoor, mentre la curva relativa alla parete P1 rimane sostanzialmente lineare e al disotto delle prime due.

Al contrario, se analizziamo i valori calcolati dal modello virtuale gli andamenti delle curve, rispettivamente di P1 e di P2, sono sovrapponibili e differenti dall'andamento della temperatura dell'aria indoor. Inoltre, le temperature calcolate sono sottostimate e presentano una grande fluttuazione in termini di andamento sia per P1 che per P2 rispetto alle tendenze misurate, che, al contrario, sono più lineari.

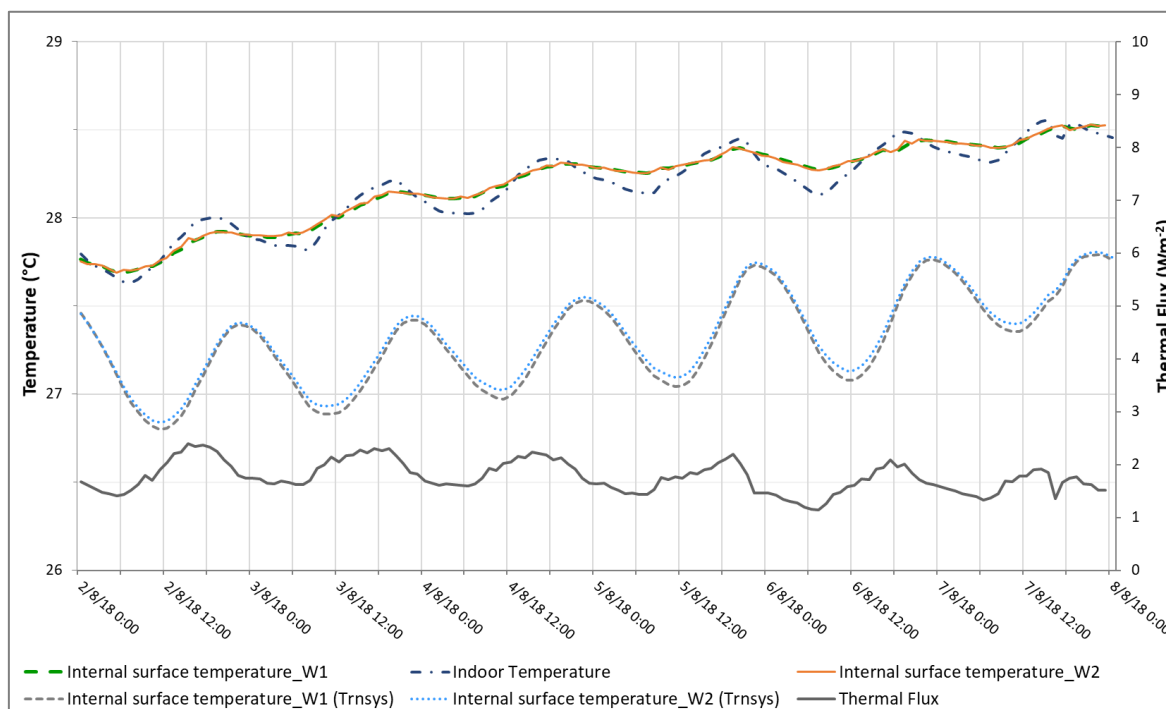


Grafico 16 – Confronto tra i valori misurati e i valori simulati su P1 e P2 nel periodo 2 – 7 agosto 2018.

Nel **grafico 16** riferito al periodo di agosto si evidenziano le stesse differenze per quanto riguarda il confronto tra dati misurati e dati calcolati. Inoltre, come già evidenziato nella sezione precedente, gli andamenti reali delle temperature superficiali interne di P1 e P2 si equivalgono tra loro e alla temperatura dell'aria indoor: l'ambiente interno e le pareti si ritrovano alla stessa temperatura.

In aggiunta, in entrambi i grafici presentati, il flusso termico è sempre uscente e ricalca l'andamento delle temperature esterne: il raffreddamento della struttura in fase notturna permette una continua dispersione termica.

Confronto e osservazioni: monitoraggio mock up Fabriano

La campagna sperimentale qui presentata si propone come obiettivo lo studio del comportamento in regime dinamico di un edificio-modello ad elevata inerzia termica, caratterizzato da due differenti sistemi di isolamento a cappotto e sottoposto alle condizioni climatiche tipiche della regione mediterranea. Il mock up monitorato, come già detto, ha una struttura in calcestruzzo leggero (LWC) con aggregati isolanti provenienti dal riciclo del vetro; con pareti, pavimento e tetto di uno spessore di 70 cm per garantire un'elevata inerzia termica. Pertanto, l'edificio iniziale (P0) è una

struttura massiccia ad alta capacità termica ($840 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Al fine di raggiungere gli standard normativi nazionali per la trasmittanza termica U , sulla facciata sud-est sono stati posati in opera due diversi strati isolanti esterni: un intonaco termico a base sughero e dei pannelli XPS, denominati rispettivamente P1 e P2, caratterizzati da una conduttività termica λ simile, ma da diverso peso specifico ρ .

I dati registrati durante le due campagne di monitoraggio condotte nel 2018 e nel 2019 confermano la ripetibilità dei comportamenti osservati sui due differenti sistemi isolanti. I dati raccolti dimostrano una relazione tra le temperature superficiali esterne monitorate sulle pareti isolate P1 e P2, e le condizioni meteorologiche; ovvero la temperatura esterna dell'aria e l'irraggiamento solare.

I risultati mostrano che il sistema parete P2 subisce una sollecitazione termica più elevata rispetto a P1, come dimostrato dai picchi raggiunti della temperatura superficiale esterna e dalle grandi fluttuazioni della temperatura giornaliera. Questo comportamento è evidenziato anche attraverso i dati statistici presentati in tabella 20 – 21, come la deviazione standard calcolata per la temperatura esterna della superficie. I valori P2 sono rispettivamente del 19,1% e del 18,0% superiori a quelli di P1 nel periodo analizzato di luglio e di agosto 2018.

I risultati elaborati mostrano che il sistema isolato con XPS (P2) si riscalda sempre più velocemente rispetto all'isolamento termico ottenuto con il termointonaco (P1), ma rilascia il calore immagazzinato più rapidamente. Da un'analisi più approfondita delle proprietà di questi due sistemi isolanti, il comportamento si potrebbe spiegare considerando i seguenti fattori.

In primo luogo, la resistenza termica R di P2 ($2,22 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$) è il doppio di quella di P1 ($1,08 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$), poiché i due materiali hanno conduttività termica simile ma il pannello di XPS ha uno spessore doppio dell'intonaco. Ne consegue che uno strato isolante esterno più performante frena la trasmissione del flusso termico verso gli strati interni della parete e quindi la superficie esterna mostrerà un innalzamento della temperatura stessa.

In secondo luogo, si potrebbe prendere in considerazione la capacità termica areale esterne delle due pareti: rispettivamente $15,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e $9,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ per P1 e P2. Questo parametro assume un'elevata rilevanza per una corretta progettazione dell'involucro dell'edificio: come altre ricerche in letteratura hanno mostrato rispetto alla capacità termica areale interna, determinare e fissare progettuualmente questo valore può prevenire e controllare il surriscaldamento dell'aria negli ambienti indoor. Inoltre, è significativo osservare che entrambe le temperature superficiali interne risultano avere un andamento quasi lineare e non risentono di notevoli fluttuazioni come avviene per la superficie esterna, proprio grazie dell'elevata capacità termica dell'edificio. Pertanto, la temperatura dell'aria interna non cambia in modo

significativo e anche le temperature superficiali interne di P1 e P2 rimangono uguali tra loro nel periodo più caldo di agosto.

Contrariamente alla superficie esterna, le temperature superficiali monitorate tra lo strato isolante e la struttura in Misapor Beton (P0) mostrano un comportamento diverso; infatti, P1 mostra fluttuazioni molto più grandi rispetto a P2. Il motivo deve essere ricercato nella relazione tra conduttività termica e spessore; quest'ultimo è infatti pari a 4 cm per l'intonaco e 8 cm per il pannello XPS, come precedentemente affermato.

Al fine di garantire il comfort termico indoor, è di massima rilevanza nei climi mediterranei caratterizzati da un'estate calda, il corretto design dell'involucro dell'edificio. Questo studio sperimentale mette in evidenza l'importanza dell'inerzia termica delle pareti verticali opache relazionandola ad altri due parametri: la capacità termica areale esterna (k_2) e la resistenza termica (R).

Nello specifico, basandoci sui dati monitorati, un alto valore di resistenza termica dell'isolamento esterno combinato a un basso valore di capacità termica areale esterna (k_2), per un edificio massivo, è causa di problemi di surriscaldamento della superficie esterna, non rappresentando, quindi, la migliore soluzione costruttiva. Infatti, una elevata sollecitazione termica, ovvero elevate temperature superficiali esterne, possono causare effetti negativi in termini di durabilità delle facciate come la formazione di microfessure sulla superficie stessa, che a loro volta possono portare a ulteriori problematiche come le infiltrazioni di acqua piovana. Quest'ultime, oltre a minacciare l'integrità della facciata, cioè in termini di adesione e coesione, altera le prestazioni termiche del materiale isolante non garantendo così l'isolamento inizialmente progettato. Infatti, è dimostrato che un moderato aumento di assorbimento d'acqua provoca un'elevata diminuzione della conduttività termica del materiale isolante.

Un ulteriore obiettivo della ricerca è stato quello di verificare la validità di un modello virtuale, implementato in TRNSYS, per lo studio del comportamento delle strutture ad elevata inerzia termica e ben isolate in regime dinamico. I risultati ottenuti mostrano una grande discrepanza tra valori calcolati con il modello simulato e quelli misurati sul modello reale; in effetti, si osserva in termini di valori una sottostima delle temperature superficiali oltre che a un differente andamento delle curve stesse. Inoltre, il modello virtuale non riesce a cogliere le differenze di risposta del sistema isolante in base al diverso tipo di materiale utilizzato approssimando in ugual modo le temperature superficiali del pannello XPS e del termointonaco.

Sulla base di questi risultati, potrebbero essere eseguite ulteriori analisi per quantificare l'influenza della capacità termica areale, sia esterna che interna, e della

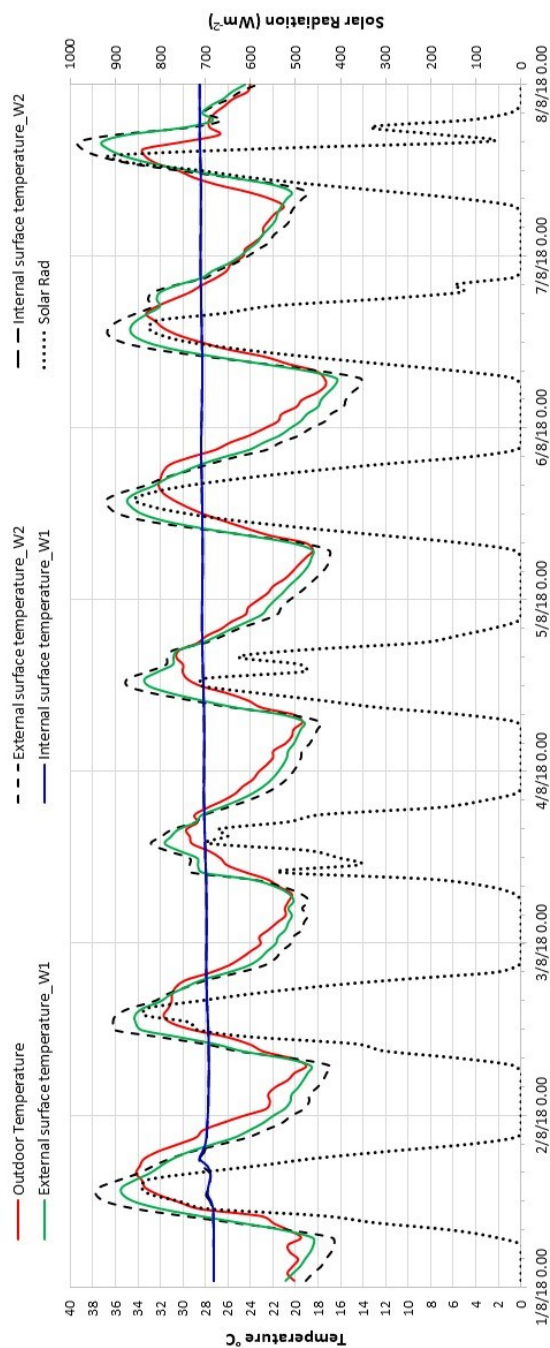
resistenza termica sull'andamento delle temperature superficiali dell'involucro di edifici con elevata inerzia termica e isolamento.

Appendix A.

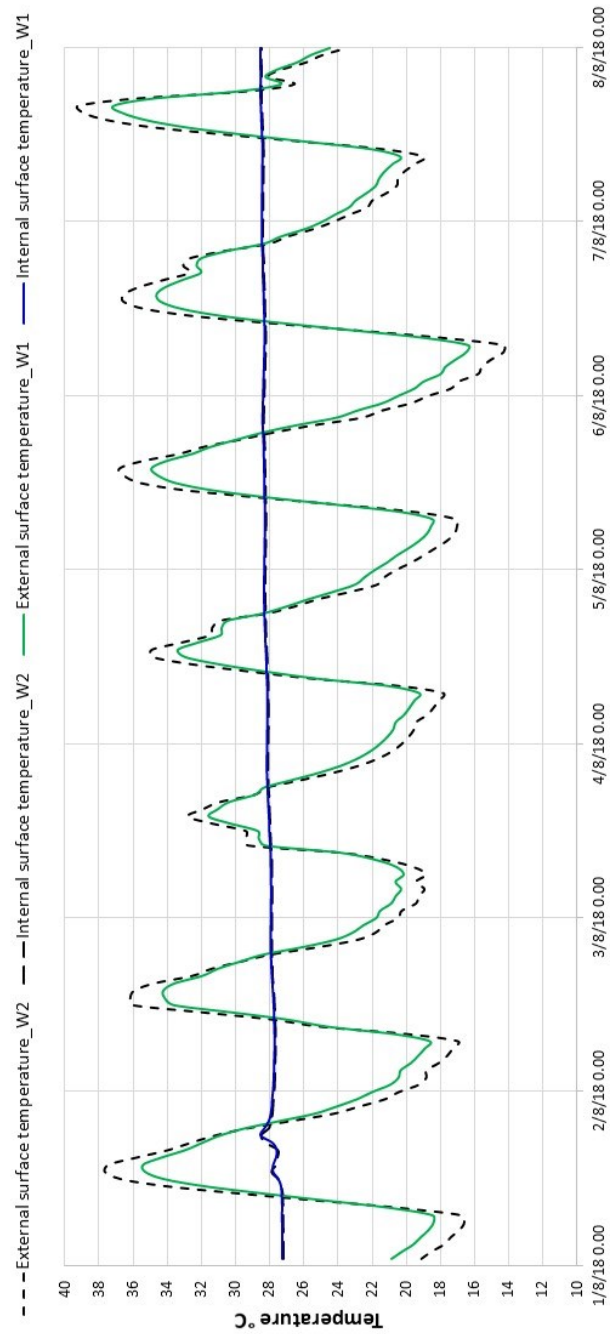
Confronti dati 2018 e 2019:

DATI 2018 sulla costruzione con isolamento: W1 termointonaco – W2 pannello XPS

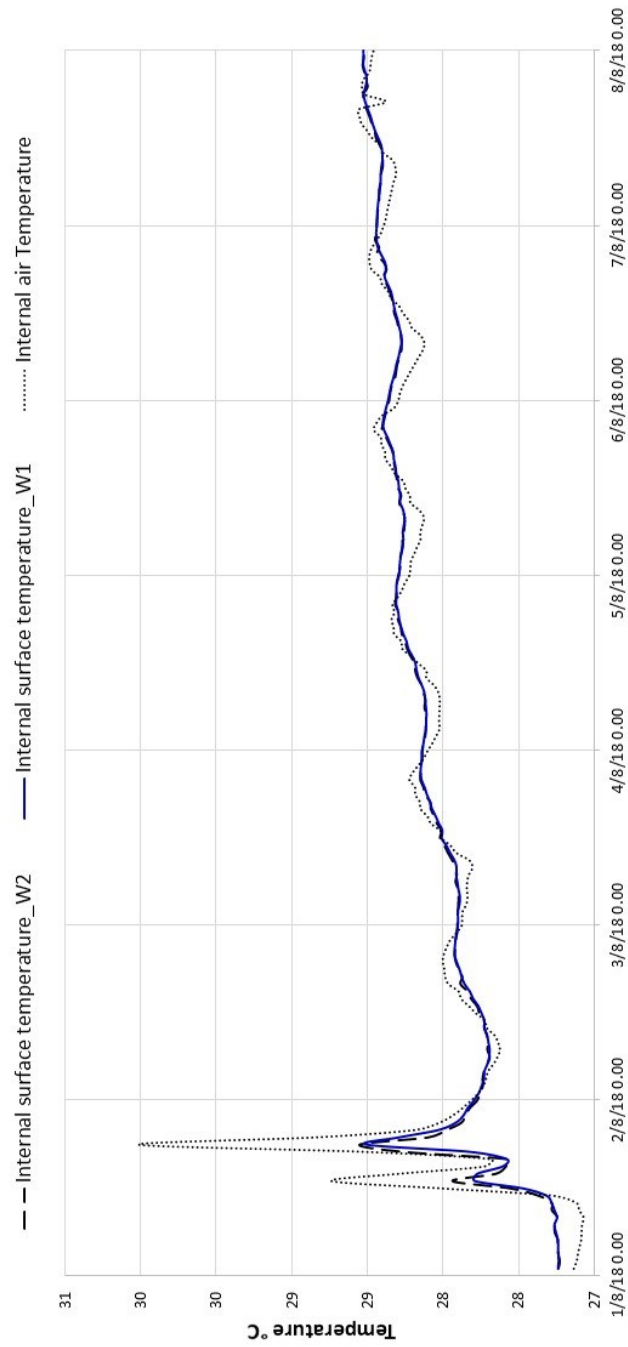
In corrispondenza dei picchi di irraggiamento solare (globale sull'orizzontale), si rilevano le temperature superficiali massime sia per la soluzione d'isolamento W1 che per la soluzione W2.
La struttura più isolata, W2, sollecita maggiormente il materiale all'esterno, in quanto come è possibile notare dal grafico, l'oscillazione giornaliera della temperatura è maggiore nella struttura con XPS mentre è minore nella struttura con intonaco. La struttura intonacata W1 ha un'oscillazione di temperatura giornaliera minore di circa 4°C in meno rispetto alla struttura W2 con XPS nel periodo considerato di maggiore variazione di temperatura, il 6 agosto.



La struttura non isolata possedeva un'iniziale inerzia termica elevata: l'ulteriore isolamento con XPS, struttura W2, non apporta alcun beneficio in termini di sfasamento rispetto alla struttura W1 isolata con l'intonaco, poiché le temperature superficiali interne non risentono delle oscillazioni giornaliere di temperatura mantenendosi pressoché costanti.
Come è possibile notare dal grafico, l'andamento delle temperature superficiali interne di W1 e W2 sono praticamente sovrapponibili nel mese di agosto 2018.

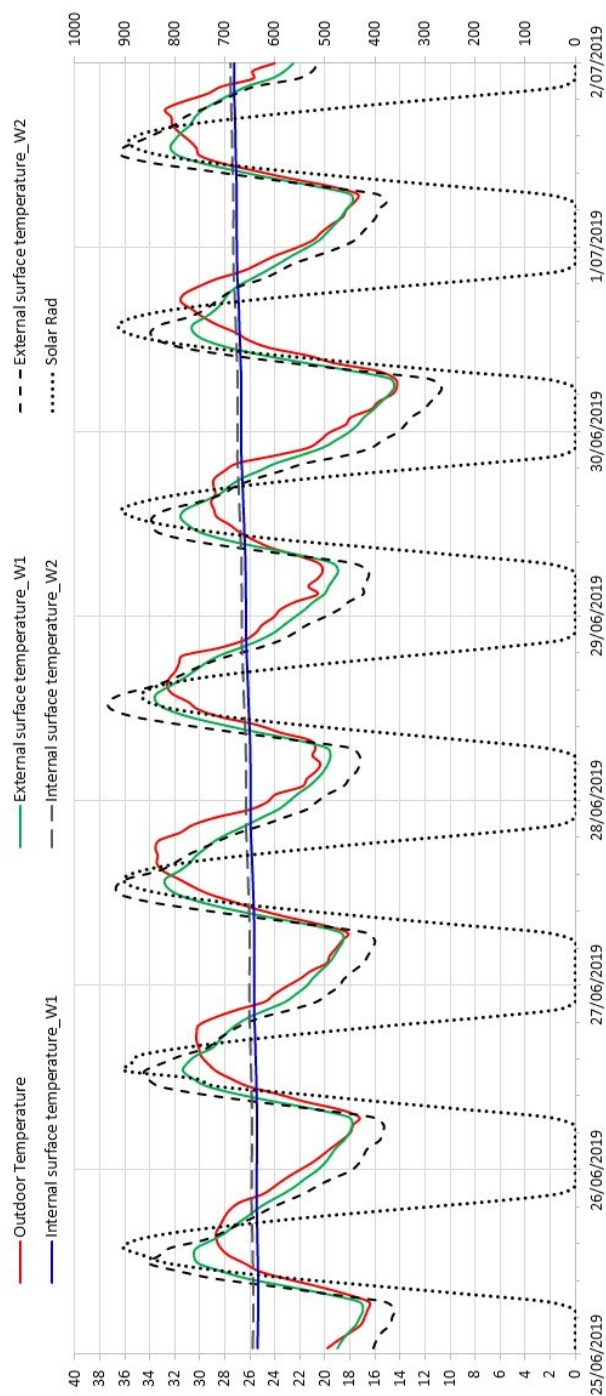


Le temperature interne superficiali W1 e W2 non risentono delle oscillazioni rapide della temperatura interna ma seguono l'andamento generale della stessa. Come è possibile notare dal grafico, l'andamento delle temperature superficiali interne di W1 e W2 sono praticamente sovrapponibili.



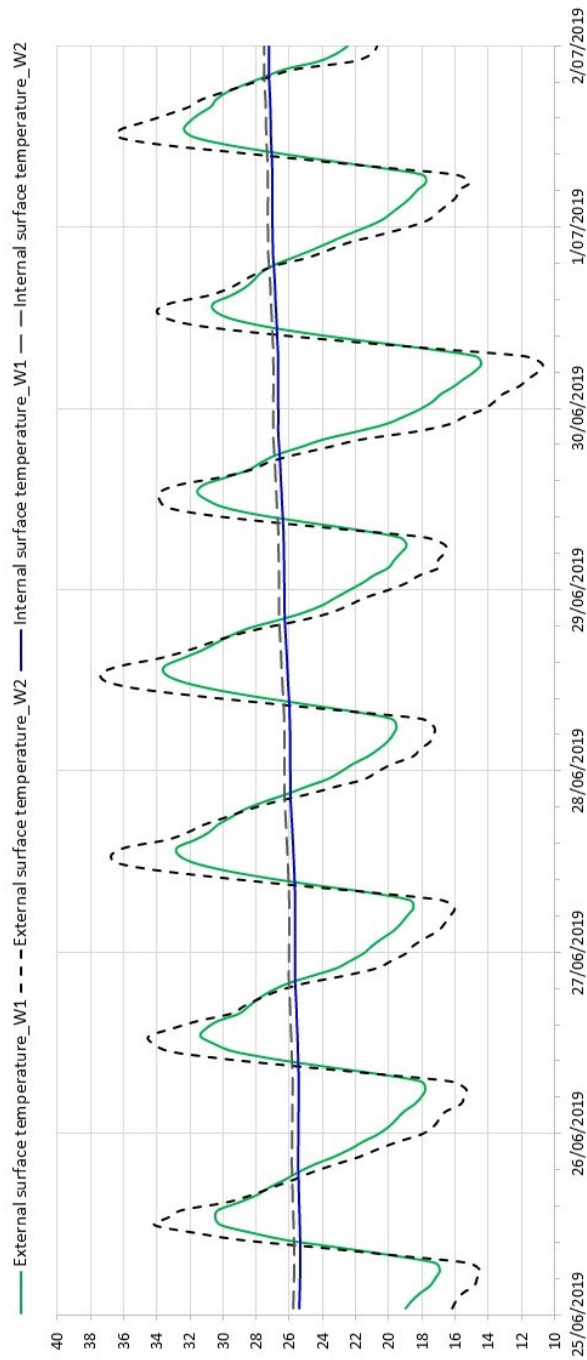
DATI 2019 sulla costruzione con isolamento: W1 termointonaco – W2 pannello XPS

Settimana in cui si registrano i valori di Irraggiamento solare (globale sull'orizzontale) sempre maggiori di 800 W/mq e la giornata con la temperatura esterna più alta, 27 giugno 2019 (T outdoor max 33,6°C). In corrispondenza dei picchi di irraggiamento solare, si rilevano le temperature superficiali massime sia per la soluzione con l'isolamento W1 che per l'isolamento W2. La struttura più isolata, W2, sollecita maggiormente il materiale all'esterno, in quanto l'oscillazione giornaliera della temperatura è maggiore nella struttura con XPS rispetto alla struttura intonacata.

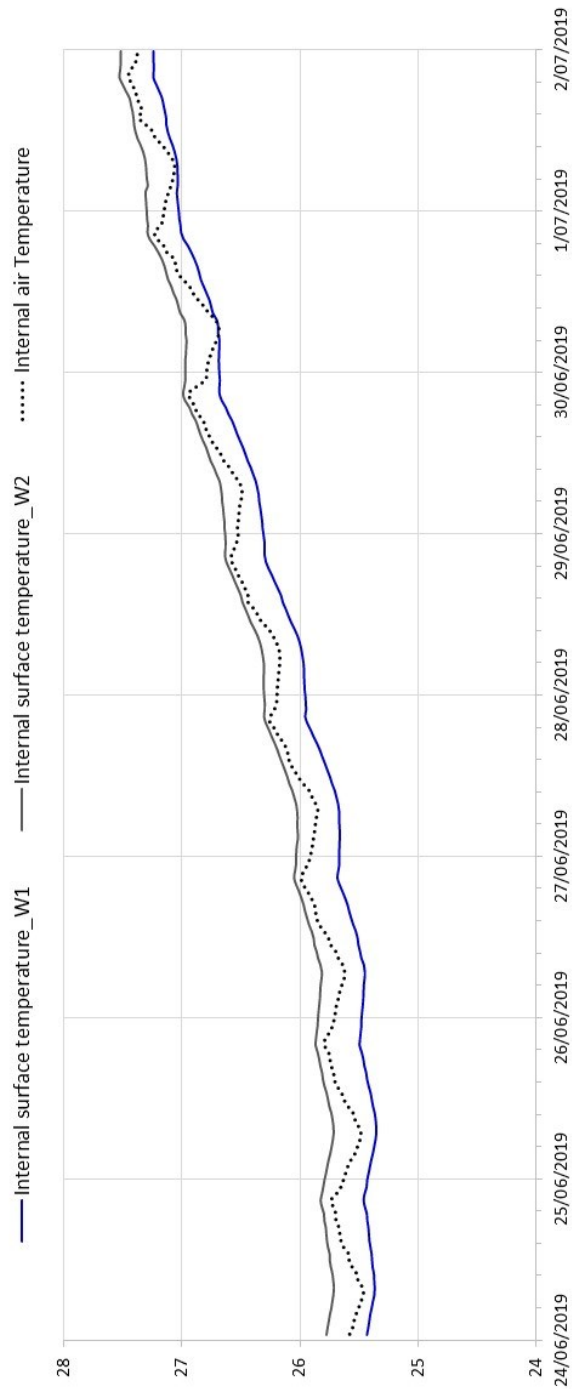


Le temperature superficiali interne non risentono delle oscillazioni giornaliere di temperatura mantenendosi pressoché costanti indipendentemente dal tipo di struttura più o meno isolata, a dimostrazione che l'enorme inerzia della struttura attenua già di per se stessa l'onda termica esterna.

Al contrario esternamente la superficie della struttura più isolata, W2 con XPS, è quella che maggiormente risente delle oscillazioni di temperatura giornaliere mentre la struttura W1 è meno sollecitata.

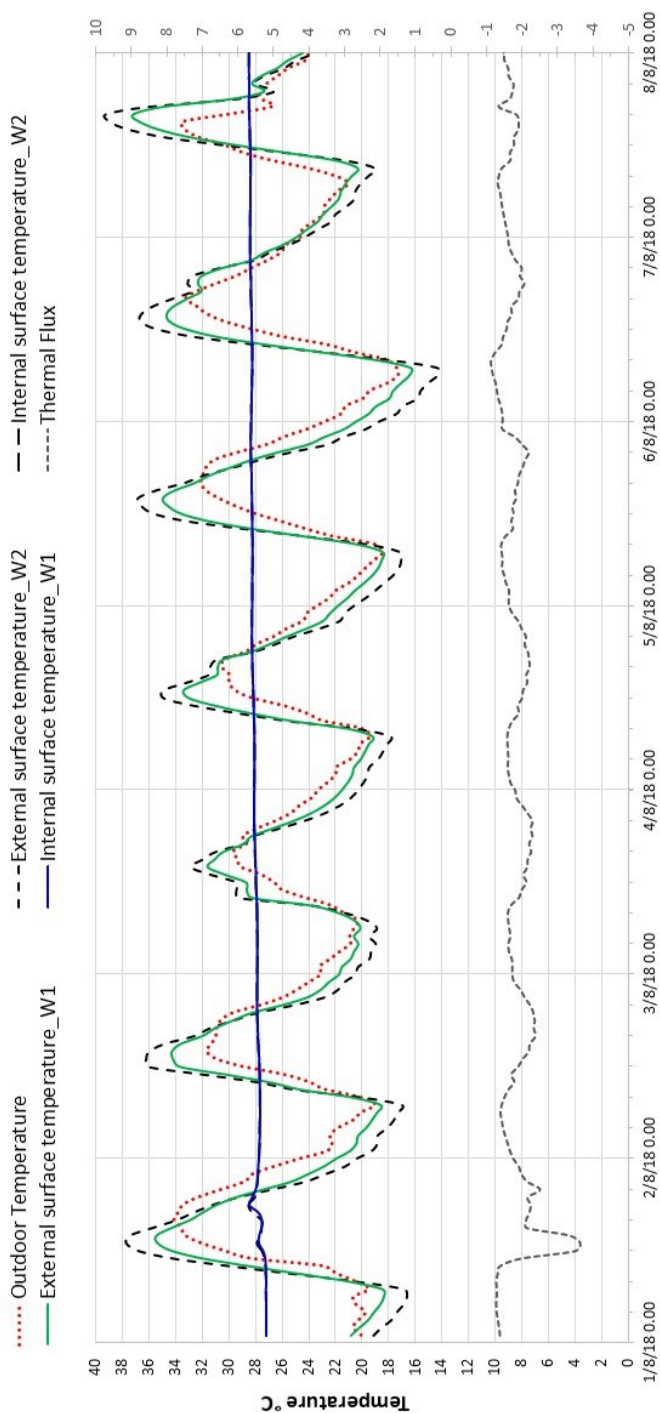


Le temperature superficiali interne si mantengono costanti senza subire variazioni repentine e la temperatura dell'aria interna rimane all'interno del range delle due temperature superficiali.



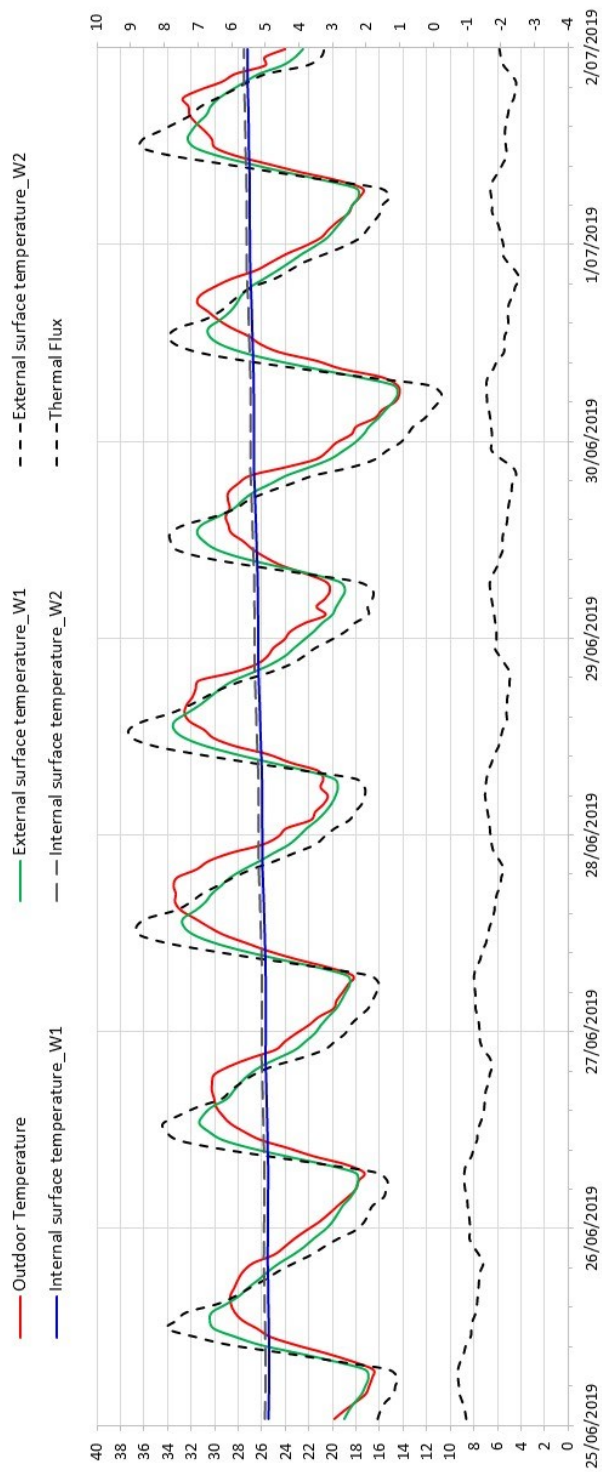
MISURAZIONI FLUSSO TERMICO Agosto 2018

Il flusso termico è sempre uscente in questo periodo: il raffreddamento della struttura in fase notturna permette una continua dispersione termica.



MISURAZIONI FLUSSO TERMICO Giugno-Luglio 2019

Il flusso termico è sempre uscente in questo periodo: il raffreddamento della struttura in fase notturna permette una continua dispersione termica.



List of Figures

- Fig. 38** – Individuazione della zona nella quale è stato realizzato il mock up utilizzato per la sperimentazione.
- Fig. 39** – Individuazione della posizione sul livello del mare: 400 m.s.l.m.
- Fig. 40** – Pianta del Mock up di Fabriano (AN).
- Fig. 41** – Sezione A-A del Mock up di Fabriano (AN).
- Fig. 42** – Sezione B-B
del Mock up di Fabriano (AN).
- Fig. 43** – Predisposizione della casseratura per il getto in cls Misapor Beton.
- Fig. 44** – Sopralluogo Mock up prima dell'inizio della sperimentazione per individuare le problematiche da risolvere e pianificare l'avvio campagna.
- Fig. 45** – Modello 3D del Mock up: vista della facciata esposta a nord.
- Fig. 46** - Modulo fotovoltaico.
- Fig.47** – Batteria di accumulo Bosch.
- Fig. 48** – Regolatore di carica solare PWM.
- Fig. 49** – Convertitore boost Step -up.
- Fig. 50** – Morsettiera contatti dataTaker DT500 serie 3.
- Fig. 51** – Termoresistenza PT100, prima dell'installazione sulla facciata esterna del mock up.
- Fig. 52** – Termoresistenza PT100 ambientale installata dentro il mock up.
- Fig. 53** – Termoflussimetro applicato al centro della parete interna del mock up.
- Fig. 54** – Stazione Davis Vantage Pro 2.
- Fig. 55-56** – Posizionamento della Stazione Davis Vantage Pro 2.
- Fig. 57** – Collegamento con l'alimentazione ed il sistema di acquisizione e memorizzazione dati.
- Fig. 58** – Applicazione Weather Link.
- Fig. 59-60** - Collegamento da remoto tra il pc dell'ufficio e il pc del mock up per il controllo e il down load dei dati acquisiti.

List of Tables

Tabella 14 – Media estiva dei dati metereologici interpolati sulla zona di Fabriano.

Tabella 15 – Scheda tecnica del prodotto Misapor Beton.

Tabella 16 – Caratteristiche termiche e meccaniche dei materiali impiegati nella sperimentazione.

Tabella 17 – Requisiti termici richiesti in base alle zone termiche secondo il D.M. 26 giugno 2015 Appendice B.

Tabella 18 – Proprietà termiche delle 3 pareti studiate e dei singoli strati isolanti.

Tabella 19 – Caratteristiche dei principali sensori impiegati durante il monitoraggio in situ.

Tabella 20 – Dati statistici: monitoraggio 10 – 15 luglio 2018.

Tabella 21 – Dati statistici: monitoraggio 2 – 7 agosto 2018.

Tabella 22 – Dati misurati e simulati a confronto rispetto alla giornata del 15 luglio 2018 quando si è registrata la temperatura superficiale massima sulla parete isolata esposta a sud-est.

Tabella 23 – Dati misurati e simulati a confronto rispetto alla giornata del 7 agosto 2018 quando si è registrata la temperatura superficiale massima sulla parete isolata esposta a sud-est.

List of Diagrams

Schema 1 – Posizionamento delle sonde di temperatura superficiale su entrambe le pareti isolate con l'intonaco (materiale 1) e con il pannello XPS (materiale 2).

Schema 2 - Schema dei collegamenti tra i componenti del sistema di monitoraggio.

Schema 3 – Schema di collegamento tra il dataTaker DT500 e il pc e collegamento per l'alimentazione elettrica del dataTaker stesso.

Schema 4 – Pianta e Prospetto Nord-Est del mock up: individuazione delle strumentazioni impiegate per il monitoraggio e i loro collegamenti.

Schema 5 - Diagramma di flusso del modello di simulazione in Trnsys.

List of Graphics

Grafico 1- Relazione tra temperatura dell'aria esterna, irraggiamento solare a sud-est e temperatura sole-aria nel periodo 10 – 15 luglio 2018 con evidenza dei valori massimi e minimi.

Grafico 2- Relazione tra temperatura dell'aria esterna, irraggiamento solare a sud-est e temperatura sole-aria nel periodo 2 – 7 agosto 2018 con evidenza dei valori massimi e minimi.

Grafico 3- Andamento della velocità del vento nel periodo 10 – 15 luglio 2018 con evidenza dei valori massimi e minimi in correlazione alla temperatura dell'aria esterna.

Grafico 4- Andamento della velocità del vento nel periodo 2 – 7 agosto 2018 con evidenza dei valori massimi e minimi in correlazione alla temperatura dell'aria esterna.

Grafico 5- Monitoraggio nel periodo 10 – 15 luglio 2018: dati climatici e comparazione tra le temperature superficiali esterne dei due sistemi di isolamento con termointonaco in sughero e pannello in XPS, indicati rispettivamente come sistema 1 e 2.

Grafico 6- Monitoraggio nel periodo 2 – 8 agosto 2018: dati climatici e comparazione tra le temperature superficiali esterne dei due sistemi di isolamento con termointonaco in sughero e pannello in XPS, indicati rispettivamente come sistema 1 e 2.

Grafico 7- Monitoraggio nel periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 1 termointonaco (spessore 4 cm): comparazione tra le temperature superficiali registrate negli strati.

Grafico 8- Monitoraggio nel periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 2 pannello XPS (spessore 8 cm): comparazione tra le temperature superficiali registrate negli strati.

Grafico 9- Monitoraggio nel periodo 2 – 7 agosto 2018, Sistema 1 termointonaco.

Grafico 10- Monitoraggio nel periodo 2 – 7 agosto 2018, Sistema 2 pannello XPS.

Grafico 11- Monitoraggio periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 1 termointonaco.

Grafico 12- Monitoraggio periodo 10 – 15 luglio 2018, Sistema 2 pannello XPS.

Grafico 13a – Confronto tra valori misurati e simulati su P1: 10 – 15 luglio 2018.

Grafico 13b – Confronto tra valori misurati e simulati su P1: 2 – 7 agosto 2018.

Grafico 14a – Confronto tra valori misurati e simulati su P2: 10 – 15 luglio 2018.

Grafico 14b – Confronto tra valori misurati e simulati su P2: 2 – 7 agosto 2018.

Grafico 15 – Confronto tra i valori misurati e i valori simulati su P1 e P2 nel periodo 10 – 15 luglio 2018.

Grafico 16 – Confronto tra i valori misurati e i valori simulati su P1 e P2 nel periodo 2 – 7 agosto 2018.

BIBLIOGRAFIA

- [1] U.S. Energy Information Administration (EIA), International Energy Outlook 2019 with projections to 2050, September 2019. <https://www.eia.gov/ieo>
- [2] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the energy performance of buildings.
- [3] H.Yoshino, T. Hong, N.Nord, EA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods, *Energy and Buildings* (2017), 152, 124–136
- [4] A.Antonaia, F.Ascione, A.Castaldo, A.D’Angelo, R.F.De Masi, M.Ferrara, G.P.Vanoli, G.Vitiello, Cool materials for reducing summer energy consumptions in Mediterranean climate: In-lab experiments and numerical analysis of a new coating based on acrylic paint, *Applied Thermal Engineering* 102 (2016) 91-107
- [5] P. M. Congedo, C. Baglivo, G. Centonze, Walls comparative evaluation for the thermal performance improvement of low-rise residential buildings in warm Mediterranean climate, *Journal of Building Engineering* (2020), 28, 101059
- [6] J.C. Gamero-Salinas, A. Monge-Barrio, A. Sanchez-Ostiz, Overheating risk assessment of different dwellings during the hottest season of a warm tropical climate, *Building and Environment* (2020), 171, 106664
- [7] A. Hashemi, N. Khatami, Effects of solar shading on thermal comfort in low-income tropical housing, *Energy Procedia* (2017), 111, 235–244
- [8] S. Pathirana, A. Rodrigo, R. Halwatura, Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate, *Int. J. Energy Environ. Eng.* (2019), 10, 107–120
- [9] Santamouris M, Kolokotsa D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: the state of the art. *Energy Build* 2013; 57, 74-94.
- [10] Van Hooff T, Blocken B, Timmermans HJP, Hensen JLM. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. *Energy* 2016; 94, 811-20.
- [11] T. Kuczynski, A. Staszczuk, Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings, *Energy* (2020), 195, 116984
- [12] F. Harkouss, F. Fardoun, P.H. Biwole, Passive design optimization of low energy buildings in different climates, *Energy* (2018), 165, 591–613
- [13] S. Verbeke, A. Audenaerta, Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2018), 82, 2300–2318
- [14] C. Baglivo, P. M. Congedo, A. Fazio, D. Laforgia, Multiobjective optimization analysis for high efficiency external walls of zero energy buildings (ZEB) in the Mediterranean climate, *Energy Build.* 84 (2014) 483–492

- [15] C. Baglivo, Paolo Maria Congedo, High performance precast external walls for cold climate by a multi-criteria methodology, *Energy* 115 (Part 1) (2016), 561–576
- [16] N. Cardinale, G. Rospi, P. Stefanizzi, Energy and microclimatic performance of Mediterranean vernacular buildings: the Sassi district of Matera and the Trulli district of Alberobello, *Build. Environ.* 59 (2013) 590–598.
- [17] Chengcheng Xu, Shuhong Li, Kaikai Zou, Study of heat and moisture transfer in internal and external wall insulation configurations, *J Build Eng* (2019) 2352–7102
- [18] Prestazioni estive degli edifici (Vol.5 ANIT) – Guida pratica per capire e progettare il comfort e il fabbisogno estivo degli edifici
- [19] S. Verbeke, A. Audenaert, Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2018), 82, 2300–2318
- [20] F. Stazi, A. Vegliò, C. Di Perna, P. Munafò, Experimental comparison between 3 different traditional wall construction and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies, *Energy and Buildings* (2013), 60, 429–441
- [21] M. Rossi, V.R. Rocco, External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity, *Energy and Buildings* (2014), 68, 732–740
- [22] N. Aste, A. Angelotti, M. Buzzetti, The influence of external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, *Energy and Buildings* (2009), 41, 1181–1187
- [23] C. Di Perna, F. Stazi, A. Ursini Casalena, M. D’Orazio, Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads, *Energy and Buildings* (2011), 43, 200–206
- [24] F. Stazi, G. Ulpiani, M. Pergolini, C. Di Perna, The role of areal heat capacity and decrement factor in case of hyper insulated buildings: An experimental study, *Energy and Buildings* (2018), 176, 310–324

CAPITOLO 4. LE PITTURE RIFLETTENTI

4.1 Stato dell'arte

4.1.1 I cool materials

Il progetto di ricerca di dottorato, come descritto nel capitolo precedente, ha avuto come oggetto lo studio di differenti sistemi di isolamento applicati su pareti fortemente inerziali analizzandone il comportamento dinamico, in particolare durante il periodo estivo attraverso due campagne di sperimentazione: estate 2018 ed estate 2019.

Parallelamente a questa sperimentazione, si è aperto un altro filone di ricerca riguardante le pitture riflettenti, ovvero quei materiali che vengono definiti come *cool material*, rivestimenti in grado di non innalzare in modo significativo la propria temperatura superficiale sotto la radiazione solare. Generalmente i cool materials sono caratterizzati da una elevata riflettanza solare, (elevata capacità di riflettere la radiazione solare incidente sul materiale) e di emittanza termica, (elevata capacità di emettere calore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso). L'obiettivo di questa seconda sperimentazione è quello di valutare gli effettivi benefici che i cool materials possono avere una volta applicati su pareti verticali al posto delle tradizionali vernici per esterni, e valutarne la convenienza in termini di costi-benefici-durabilità. Per determinare quanto appena detto, è stata progettata una sperimentazione in situ con l'allestimento di un mock up e parallelamente sono state programmate prove di laboratorio per la caratterizzazione e la scelta di questi materiali dal punto di vista energetico.

Altra problematica strettamente correlata è quella relativa al riscaldamento globale, problema planetario monitorato indipendentemente dalla latitudine e dallo sviluppo economico dei paesi, anche se con intensità e conseguenze del tutto differenti in relazione a questi due fattori di influenza. Nel settore delle costruzioni almeno due sono le tematiche da attenzionare: l'insorgere del fenomeno dell'isola di calore urbana ed il continuo incremento dei consumi per la climatizzazione estiva degli edifici. Lo studio, l'individuazione e l'uso in larga scala di materiali che abbiano specifiche particolarità tecniche rispetto ai fenomeni e alle problematiche sopra descritte, potrebbero portare nel contesto delle aree urbane ad un indiretto risparmio energetico legato all'alta riflettanza solare che contribuisce alla riduzione della temperatura dell'agglomerato abitativo grazie ad un migliore bilancio energetico relativo alle superfici in gioco e favorendo la mitigazione dell'effetto di isola di calore urbana. Inoltre, l'utilizzo di pareti con corrette stratigrafie e il giusto

posizionamento dell'isolamento con materiali che rispondano a condizioni al contorno dinamiche, soprattutto nei climi Mediterranei come il nostro, possono rappresentare la risposta alle problematiche riguardanti il miglioramento dell'efficienza energetica del nostro patrimonio edilizio.

Nel nostro paese a livello normativo il DM 26/05/2015, All.1, art.3.2 comma 3 specifica quanto segue. Al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nonché di limitare il surriscaldamento a scala urbana, per le strutture di copertura degli edifici è obbligatoria la verifica dell'efficacia, in termini di rapporto costi-benefici, dell'utilizzo di:

- a. Materiali ad elevata riflettanza solare per le coperture (cool roof), assumendo per questi ultimi un valore non inferiore a:
0,65 nel caso di coperture piane;
0,30 nel caso di coperture a falde;
- b. Tecnologie di climatizzazione passiva (ventilazione, coperture a verde, ecc).

La riflettanza solare viene definita come la proprietà di un materiale/superficie di riflettere l'irradiazione solare. Si definisce con un valore da 0 a 1 oppure in percentuale %.

La normativa italiana appena citata si concentra solo su un particolare aspetto applicativo di questi materiali ma le potenzialità dei rivestimenti cool sono molteplici: dal raffrescamento passivo dell'edificio all'interno, a quello del microclima locale esterno quando, ad esempio, sono applicati sulle pavimentazioni urbane.

La normativa UNI 10349-1 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata" fornisce, ad esempio, dei valori di riflettanza che si possono assumere per diverse superfici (**Tabella 24**).

Una prima generazione di rivestimenti cool consisteva fondamentalmente in materiali naturali con un elevato valore di albedo, ovvero con un potere riflettente caratteristico molto alto. Generalmente, si tratta di pietre naturali di colore chiaro che potevano essere impiegate sia per le coperture dei tetti sia per realizzare superfici calpestabili. Rispetto al tradizionale uso del bitume come manto di impermeabilizzazione, questi materiali hanno un valore di albedo maggiore intorno a 0,50 – 0,70. Valori decisamente migliorabili rispetto ai materiali di nuova

generazione che da test di laboratorio e sperimentazioni scientifiche riescono a raggiungere valori superiori a 0,80. Questi rivestimenti artificiali cool hanno solitamente un colore bianco ma per gli ambiti applicativi come le murature storiche sono stati ideati anche materiali di colori differenti poiché una massiccia applicazione di pitture bianche avrebbe un impatto troppo invasivo e stravolgerebbe la percezione esterna dell'ambiente costruito, snaturandone il carattere storico-culturale.

Tipo di superficie	ρ
Neve (caduta di fresco o con film di ghiaccio)	0,75
Superfici acquose	0,07
Suolo (crete, marne)	0,14
Strade sterrate	0,04
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Bosco in autunno/campi con raccolti maturi e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,10
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Foglie morte	0,30
Erba secca	0,20
Erba verde	0,26
Tetti o terrazze in bitume	0,13
Pietrisco	0,20
Superfici scure di edifici (mattoni scuri, vernici scure, ecc)	0,27
Superfici chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare, ecc)	0,80

Nota: Valori tratti da B.D. Hunn, D.O. Calefell "Determination of average ground reflectivity for solar collectors" *Solar Energy*, 19, 87 (1977).

Tabella 24 – Valori di riflettanza standard definiti dalla UNI 10349-1 per alcune superfici.

I cool material di nuova concezione sono caratterizzati da un'alta riflettanza all'interno della regione del *non visibile* dello spettro solare (infrarosso), dove viene rilasciata circa la metà dell'energia solare totale: i valori di albedo sono superiori rispetto ai materiali convenzionali dello stesso colore e perciò consentono una riduzione della temperatura superficiale quando sottoposti alla radiazione solare.

Tornando al tema estivo, questo deve essere trattato sia per quanto concerne le caratteristiche dei singoli componenti sia per il comportamento dell'intero immobile. È innegabile che il fabbisogno energetico estivo è influenzato dalla qualità delle strutture e, di conseguenza, analizzarne il comportamento non è di facile approccio

poiché, a differenza del periodo invernale, le temperature esterne sono molto variabili nell'arco della giornata stessa e utilizzare dei calcoli che si basano sulle medie mensili non è realistico. In queste condizioni si rende sempre più necessaria la valutazione del comportamento nel periodo estivo in un regime orario e la norma UNI EN 52016 ne è il riferimento, tenendo conto non solo dei dati orari ma anche della variabilità dei fenomeni nel tempo.

Analizzando il singolo componente, sicuramente lo strato isolante riveste un ruolo importante: generalmente i materiali isolanti che hanno ottime capacità di riflessione dell'energia termica per irraggiamento hanno però ridotti valori di emissività nel campo della radiazione termica, ad esempio $\varepsilon = 0,10$. Sono quindi materiali le cui superfici emettono solo il 10% dell'energia che potrebbero restituire per effetto della loro temperatura. Una vernice con un'emissività di 0,85, ad esempio, non può essere considerata una barriera termica nei confronti della radiazione solare incidente. La commercializzazione di prodotti indicati come "pitture termiche" ha generato molta confusione e una cattiva informazione: vernici di ridottissimo spessore e generalmente alto emissive non possono essere considerati prodotti per l'isolamento termico degli edifici per il comportamento *invernale*.

È invece corretto affermare che una vernice può comportare risparmi energetici legati al consumo di energia per il condizionamento *estivo* nel momento in cui tali rivestimenti presentano un buon valore di SRI (Solar Reflectance Index) e vengono applicate all'esterno. In questo caso è possibile parlare di cool material, ovvero rivestimenti studiati per avere due principali caratteristiche superficiali:

1. Ridotto valore di **assorbimento α** rispetto alla radiazione solare;
2. Elevato valore di **emissività ε** nel campo della radiazione termica.

La combinazione di queste due proprietà consente alla superficie oggetto di irraggiamento solare di non surriscaldarsi e allo stesso tempo di disperdere molta energia per irraggiamento.

Nello schema esemplificativo riportato di seguito in figura (Fig. 61) vengono evidenziati i meccanismi di assorbimento solare e di emissione di radiazione termica al variare delle caratteristiche superficiali del rivestimento distinguendo tra esterno e interno: rivestimento alto riflettente all'esterno: $SRI = 106\% / \alpha = 0,20$ rispetto alla radiazione solare, e rivestimento basso emissivo all'interno: $\varepsilon = 0,10$ rispetto alla radiazione termica.

Questa combinazione risulta efficace per due ragioni: all'esterno la parete si scalda poco poiché riflette gran parte dell'energia solare incidente sulla superficie e all'interno la parete a 20°C scambia poca energia sotto forma di radiazione termica (solo il 10%) con l'ambiente interno. In particolare, se ci soffermiamo su

quest'ultimo aspetto, questa riduzione di scambio può essere considerata una forma di isolamento termico.

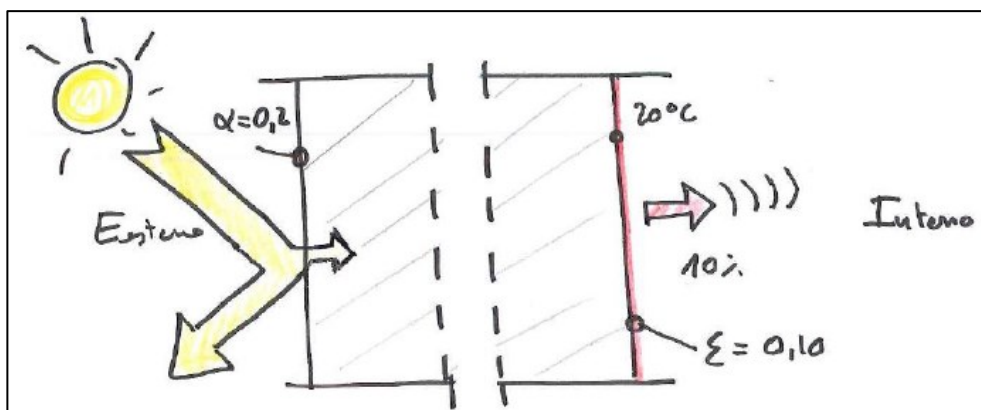


Fig. 61 – Parete con un rivestimento esterno basso assorbente (α) e rivestimento interno basso emissivo (ε).

Al contrario, variando entrambi i rivestimenti interni ed esterni avremo una superficie esterna molto assorbente rispetto alla radiazione solare ($\alpha = 0,90$) e quella interna alto emissiva ($\varepsilon = 0,90$), cioè che scambia molta energia con l'ambiente circostante (Fig. 62). In questo caso otterremo all'esterno una parete che si scalda molto e all'interno la parete a 20°C che scambia molta energia sotto forma di radiazione termica (il 90%) con l'ambiente interno contribuendo al surriscaldamento indoor.

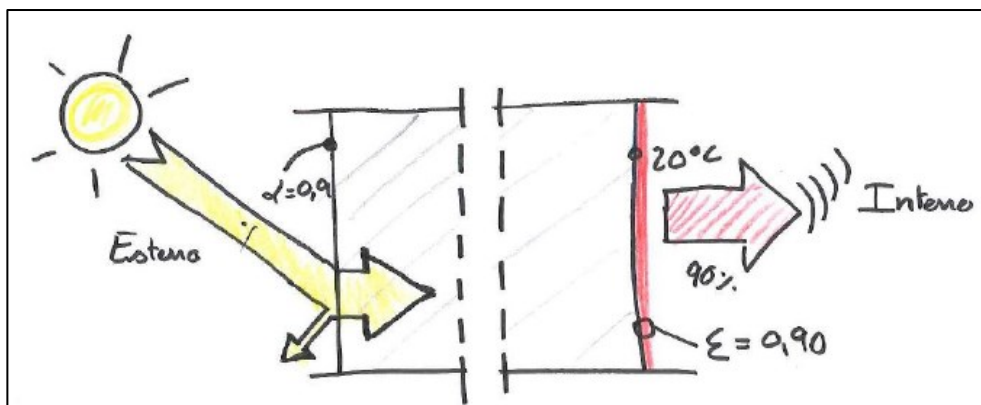


Fig. 62 – Parete con un rivestimento esterno alto assorbente (α) e rivestimento interno alto emissivo (ε).

Queste due proprietà, se ben combinate, consentono alla superficie oggetto di irraggiamento solare di non surriscaldarsi e di disperdere molta energia per irraggiamento. Inoltre, esiste un modello di calcolo che evidenzia in modo efficace

come l'assorbimento solare incide sulla temperatura superficiale di una struttura irradiata dal sole, come già anticipato nella sezione precedente (Cap.3.3 Risultati sperimentali estate 2018, Equazione (17)).

Questo modello di calcolo per la valutazione della temperatura superficiale è descritto nella UNI 10375: la temperatura *sol-air temperature*, ovvero la temperatura che si ha al di sotto dello strato limite d'aria dovuta all'effetto combinato della temperatura dell'aria esterna e dell'irraggiamento solare. Minore sarà il valore di assorbimento solare, minore sarà l'energia assorbita e quindi la temperatura che raggiungerà la superficie.

Il coefficiente di assorbimento solare (α) o di riflessione solare deve essere valutato sul singolo rivestimento attraverso la misura dello spettro di riflessione del rivestimento stesso eseguita mediante spettrofotometro che copra il range solare (UV – visibile – vicino infrarosso). L'emissività (ϵ) delle superfici è generalmente valutata nel range del lontano infrarosso (8 – 14 μm) poiché le temperature superficiali sono intorno ai 300°K. Oltre all'assorbimento conta quindi anche l'attitudine della superficie a disperdere energia sotto forma di irraggiamento verso la calotta celeste. Un parametro che spesso viene utilizzato per la caratterizzazione delle superfici impiegate come *cool roof* è l'indice **SRI Solar Reflectance Index** descritto nella norma ASTM E 1980, che unisce all'assorbimento solare anche l'attitudine della superficie a raffreddarsi (Fig. 63). L'indice SRI descrive la capacità di una superficie irradiata dal sole di non scaldarsi. Si esprime con un numero in percentuale %, che può essere anche superiore a 100 per il sovrapporsi dei due effetti di alta riflessione solare e alta emissività.

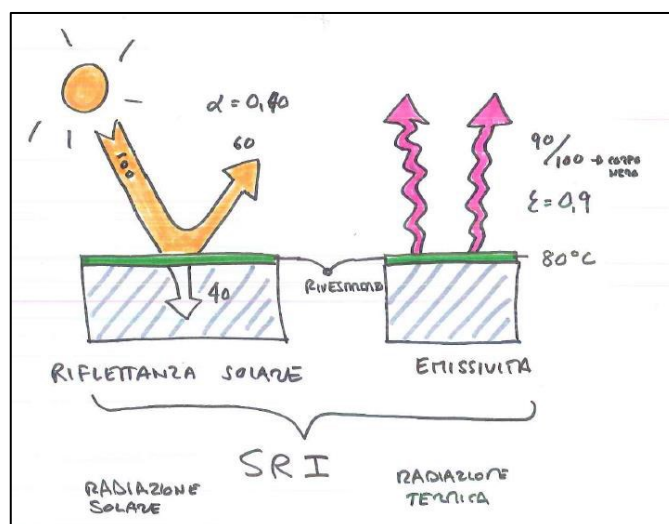


Fig. 63 – Riflettanza solare ed emissività: indice SRI.

Infatti, come detto, l'indice tiene conto, per il rivestimento oggetto di indagine, della riflettanza solare SR e dell'emissività ϵ della superficie. Se il rivestimento è bianco con una riflettanza solare SR pari a 0,80 e un'emissività pari a 0,90, l'SRI (*Solar Reflectance Index*) sarà pari a 100.

Se invece è nero con una riflettanza solare pari a 0,05 e un'emissività di 0,90, il valore di SRI sarà 0.

Rivestimenti particolarmente adatti a ridurre il surriscaldamento delle superfici possono avere SRI maggiori di 100 se il valore di riflettanza SR è superiore a 0,80 o se l'emissività è maggiore di 0,90.

Un rivestimento *cool* è quindi un materiale di rivestimento altamente riflettente che, quando viene applicato su una superficie esposta alla radiazione solare, fa in modo che la radiazione infrarossa IR incidente venga riflessa, con un conseguente minore assorbimento che permette alla superficie di rimanere più fresca rispetto ad un rivestimento tradizionale.

In questo modo, viene ridotta la quantità di energia assorbita da una superficie, con benefici sia per il singolo edificio, sia a livello climatico globale, come accennato in precedenza.

L'applicazione dei rivestimenti cool su di un edificio consente di:

- Ridurre i carichi per il raffrescamento estivo dell'edificio;
- Migliorare il confort termico indoor;
- Aumentare la durata delle strutture in quanto meno influenzate dagli stress termici;
- Ridurre le emissioni di CO_2 nell'atmosfera causati dal funzionamento HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) soprattutto durante il periodo estivo.

Inoltre, se analizziamo la scala urbana, vi sono altri vantaggi che possono essere ricondotti all'impiego dei *cool material* e che incidono sulla salute dei cittadini; in particolare, i rivestimenti *cool* aiutano a mitigare il calore dell'effetto isola urbana in quanto riflettono la maggior parte dell'energia solare incidente minimizzando il calore assorbito e rilasciato da superfici di ambienti costruiti irradiati.

Alta riflettanza solare (o basso assorbimento) ed alta emissività termica sono le caratteristiche necessarie affinché un materiale (o un rivestimento) venga definito *cool*.

4.1.2 Definizioni e standard normativi

La definizione data per un materiale *cool* è quella di un rivestimento caratterizzato da un'alta riflettanza solare (SR) combinata ad un'elevata emissività nell'infrarosso. Definiamo ora queste due grandezze fisiche dandone una breve descrizione.

La **riflettanza solare** (SR) è la capacità che ha una superficie di riflettere la radiazione solare oltre l'emisfero e lo spettro solare. Ogni corpo sottoposto ad irraggiamento termico o luminoso ha una specifica proprietà di riflessione, assorbimento e trasmissione sia del calore radiativo, sia della luce. La **riflettanza** (ρ) rappresenta il potere riflettente di un corpo sottoposto a irraggiamento. Si tratta di un parametro percentuale adimensionale. La somma dei parametri di **riflettanza** (ρ), **trasmittanza** (τ) e **assorbanza** (α) dà come valore sempre 1, ossia:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (20)$$

dimostrabile facilmente in quanto l'intero raggio radiante che giunge sul corpo con la sua energia si frammenta rispettando comunque il principio di conservazione dell'energia: una parte è riflessa, una parte è trasmessa, una parte è assorbita.

L'**emissività nell'infrarosso** (ε) è la capacità del rivestimento di irradiare calore, precedentemente assorbito durante le ore diurne della giornata, verso la volta celeste. L'emissività di un materiale è la frazione di energia irraggiata da quel materiale rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero che si trovi alla stessa temperatura: è la misura della capacità di un materiale di irraggiare energia. Un corpo nero avrebbe ε pari a 1 mentre qualunque oggetto reale ha $0 < \varepsilon < 1$ (corpo grigio). L'emissività dipende da fattori quali la temperatura, l'angolo di emissione, la lunghezza d'onda e le caratteristiche superficiali proprie del corpo osservato. In generale i metalli hanno emissività piuttosto bassa e crescente con la temperatura, mentre i non metalli hanno emissività relativamente elevata e decrescente al crescere della temperatura. Con finitura superficiale si intende sia la rugosità della superficie (valore medio, forma e direzione delle asperità) del corpo che l'eventuale presenza di inclusioni o zone chimicamente o fisicamente alterate. Una rugosità elevata e senza direzioni preferenziali aumenta l'emissività e la rende meno sensibile a variazioni di angolo di emissione. Ne consegue che non è sempre possibile stabilire univocamente l'emissività di un corpo: nel caso ci siano forti variazioni risulta più corretto parlare di **emittanza** in un dato punto, in una certa direzione, a una certa temperatura e a una data lunghezza d'onda. Una tipica semplificazione ingegneristica è quella di considerare che per una stessa superficie l'emissività e il coefficiente di assorbimento non dipendano dalla lunghezza d'onda, così che l'emissività sia costante. Questa è nota come *ipotesi del corpo grigio*. Quando si trattano superfici non nere le deviazioni dal comportamento di un corpo nero ideale sono determinate

sia dalla struttura geometrica sia dalla composizione chimica, e seguono il principio per cui l'emissività uguaglia il coefficiente di assorbimento (principio conosciuto anche come legge di Kirchhoff): in questo modo un oggetto che non assorbe tutta la luce incidente emetterà anche meno radiazione rispetto ad un corpo nero. Entrambe queste proprietà possono essere misurate su una scala 0-1 o 0-100%.

I metodi standard per valutare la riflettenza solare di una superficie sono indicati in diverse normative ASTM a partire dalla norma ASTM E903 che riporta la procedura di calcolo partendo da dati sperimentali in laboratorio ottenuti attraverso spettrofotometro con sfera di integrazione.

Lo standard ASTM C1549 descrive invece la procedura per misurare l'**SR** mediante riflettometro solare portatile tramite metodo in situ o in laboratorio. Inoltre, l'ASTM E1918 descrive il metodo di prova per misurare la riflettenza solare sull'orizzontale o su grandi superfici a bassa pendenza, mediante l'utilizzo di piranometri, quando l'angolo che il sole forma rispetto alla normale è inferiore ai 45°.

Mentre lo standard di riferimento ASTM G173 fornisce il valore normale diretto ed il valore emisferico dello spettro solare (costituita da componenti sia dirette che diffuse) rispetto ad un angolo di inclinazione della superficie di 37°.

Infine, lo standard per la misura dell'emissività termica mediante emissometro portatile è l'ASTM C1371.

Il **piranometro** è uno strumento che misura la radiazione solare basato sul principio della termopila. Questi strumenti a termopila possono misurare: la sola componente diretta, la radiazione globale, la componente diffusa.

Sostanzialmente, il suo funzionamento si basa sulla differenza di temperatura che si registra tra una superficie di colore nero ed una superficie di colore bianco oppure di un corpo avente una opportuna massa termica non esposta al sole. Le due temperature vengono registrate da serie di termopile per migliorare l'affidabilità della misura. La caratteristica peculiare di questi strumenti è quella di consentire la misurazione di un'ampia banda di spettro della radiazione solare, dai 300 nm dell'ultravioletto ai 2800 nm dell'infrarosso.

La procedura standard per il calcolo dell'emissività termica è riportata nella ASTM C1371, ai fini di tale determinazione, viene utilizzato un **emissometro portatile**.

I rivestimenti *cool* più performanti, solitamente, offrono valori di SR intorno a 0,80, valore nettamente superiore rispetto ai rivestimenti neri standard (ad esempio come il bitume) che riflettono una quantità di radiazione inferiore al 10% (SR<10%). Tali rivestimenti sono inoltre caratterizzati da elevati valori di emissività termica (0,80 - 0,90).

Questi due parametri appena descritti influenzano enormemente il bilancio termico di una superficie orizzontale, sia essa un tetto o una pavimentazione urbana esposta alla radiazione solare.

Per determinare tale bilancio, è possibile utilizzare tale formula, supponendo le condizioni stazionarie (21):

$$(1 - SR)I = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c(T_s - T_a) - \lambda \frac{dT}{dx} \quad (21)$$

Dove:

SR: riflettenza solare o albedo della superficie irradiata, valore che va da 0 a 1;

I : irraggiamento solare [W/m^2];

ε : emissività termica, valore che va da 0 a 1;

σ : costante di Stefan-Boltzmann ($5,6685 \times 10^{-8}$ [W/m^2K^4]);

T_s : temperatura superficiale della superficie data [K];

T_{sky} : temperatura convenzionale del cielo [K];

h_c : è il coefficiente di convezione [W/m^2K];

T_a : è la temperatura dell'aria [K];

λ : è la conducibilità termica della stessa superficie [W/mK];

dT/dx ; è il gradiente di temperatura nello strato superficiale, che descrive come la temperatura cambia nella direzione considerata "x".

L'equazione di bilancio precedente (21) mostra che, se il rivestimento *cool* è applicato su un tetto isolato termicamente ed esposto alla radiazione solare, il suo comportamento termico è principalmente influenzato dai valori di riflettenza (SR) ed emissività (ε), essendo la conducibilità (λ) del componente meno importante e quindi trascurabile. In particolare, durante le ore diurne, quando il sole influenza la temperatura superficiale del rivestimento, la riflettenza (SR) è il parametro principale da considerare in quanto, più esso sarà elevato (dipende dal tipo di finitura/materiale), maggiore sarà la quantità di radiazione che verrà riflessa verso la volta celeste, con una conseguente diminuzione della temperatura superficiale T_s . Durante le ore notturne, al contrario, la situazione cambia e il parametro da tenere in considerazione è l'emissività (ε), che rappresenta la capacità della struttura di irradiare il calore accumulato durante le ore di sole verso il cielo (Fig.64).

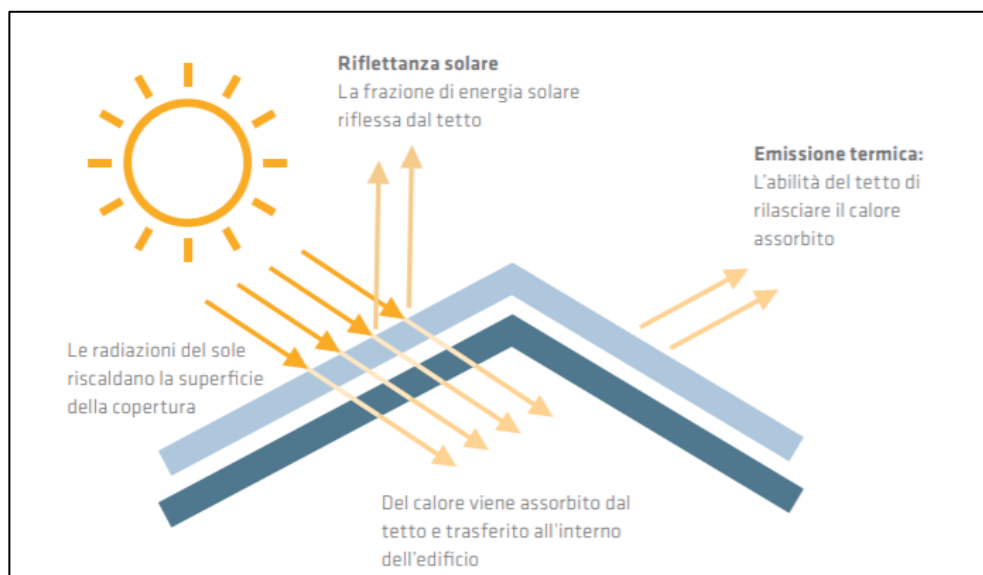


Fig. 64 – Schema che riassume il comportamento di un cool roof.

Poiché i rivestimenti cool sono caratterizzati in modo esaustivo sia da valori di riflettanza solare che di emissività nel campo dell'infrarosso, è stato proposto di determinare, per questa tipologia di materiali, un parametro denominato SRI (Solar Reflectance Index) che accumuni i valori di SR e di ϵ in un unico numero.

L'indice SRI è un valore che viene attribuito ad alcuni materiali da costruzione e tiene conto sia della capacità del materiale di riflettere la radiazione solare, sia della capacità di emettere la radiazione solare assorbita come radiazione termica. La riflessione solare e l'emissività di un materiale, misurate mediante uno spettrofotometro UV-VIS-NIR e un emissometro, conformemente alle norme ASTM E903 e ASTM G173, permettono di determinare la temperatura superficiale stazionaria (T_s) raggiunta dal materiale stesso in determinate condizioni ambientali di irraggiamento solare e ventilazione (definite nella norma ASTM E 1980). Secondo questi standard il calcolo del valore di SRI è dato da (22):

$$SRI = \frac{T_{black} - T_s}{T_{black} - T_{white}} \times 100 \quad (22)$$

Dove T_{black} , T_{white} e T_s rappresentano le temperature raggiunte rispettivamente da una superficie di riferimento nera (fattore di riflessione solare di 0,05, emissività di 0,90 e SRI=0 in condizioni ambientali standard), la temperatura di una superficie di rivestimento bianca (fattore di riflessione solare di 0,80, emissività di 0,90 e SRI=100 in condizioni ambientali standard) e la temperatura del materiale testato in condizioni stazionarie. Per come è definito l'indice SRI, esso ha generalmente un

valore compreso tra 0 e 100 ($0 < \text{SRI} < 100$) anche se sono possibili valori negativi o superiori a 100. Infatti, per i materiali *cool* ad alte prestazioni, essi potrebbero tranquillamente raggiungere un valore SRI superiore a 100, mentre i materiali scuri assorbenti possono presentare dei valori vicini o inferiori allo 0.

Più tale indice è alto, più la superficie esposta all'irraggiamento solare rimarrà "fresca" (ovvero avrà un basso innalzamento di temperatura).

La norma ASTM E 1980-01 prescrive di calcolare l'indice SRI nelle seguenti condizioni ambientali:

- Irraggiamento solare 1000W/m²;
- Temperatura ambientale 37° C (310° K);
- Temperatura del "cielo" 27° C (300° K);
- Ventilazione: debole (0÷2 m/s), media (2÷6 m/s) e forte (6÷10 m/s).

Il calcolo SRI non rappresenta un parametro esaustivo per determinare completamente le prestazioni del rivestimento *cool* in quanto è molto influenzato dai parametri climatologici, come ad esempio le caratteristiche spettrali della radiazione solare, la temperatura ambientale ed umidità relativa, la velocità del vento e tutti gli altri parametri che influenzano principalmente i rivestimenti *cool* come ad esempio precipitazioni e/o inquinamento.

4.1.3 Tipologie di prodotti *cool*

Introduzione

Il mercato dei prodotti edilizi nel settore dei *cool material* inizialmente si è sviluppato e concentrato sulle tecnologie dei *cool roof*: materiali impiegati per l'applicazione su coperture piane ma anche, più recentemente, su tetti inclinati. Principalmente sono prodotti che comprendono membrane, rivestimenti, pitture, o componenti in metallo e piastrelle/tegole da applicare sulle superfici calpestabili o meno delle coperture. Una famiglia rilevante di prodotti per il rivestimento ed impermeabilizzazione delle coperture è sicuramente quella rappresentata dai prodotti liquidi che comprendono vernici solitamente bianche e altamente riflettenti, pitture elastomeriche, poliuretaniche o rivestimenti acrilici di varia natura: il polivinile acetato, lo stirolo butadiene, il vinile versatato, lo stirolo acrilato, il metil metacrilato o acrilico, silossaniche.

Tradizionalmente un tetto rivestito da guaina bituminosa nera ha un valore di riflettanza solare di 0,04 ma che può essere notevolmente trasformato se rivestito con una vernice bianca fino a valori di SR 0,80. Infatti, i rivestimenti bianchi *cool*,

solitamente di natura elastomerica o cementizia, hanno valori di riflessione solare compresi tra 0,70 – 0,85 mentre rivestimenti in alluminio, ovvero contenenti cariche in alluminio disperse in soluzione nella resina, sono capaci di aumentare il valore di SR fino a 0,50.

A livello internazionale il Cool Roof Rating Council (CRRC) è un'organizzazione no profit che si occupa di sviluppare e implementare metodi di certificazione di prodotto, credibili e scrupolosi, sui materiali in merito alle proprietà di riflessione solare ed emissività termica sulle superfici di applicazione che siano esse coperture o pareti esterne degli edifici. Il CRRC fornisce anche materiale formativo e di divulgazione su come tetti e pareti riflettenti al sole possono aiutare a migliorare l'efficienza energetica degli edifici, aumentare il comfort degli occupanti, mitigare l'effetto *Urban Heat Island* e ridurre le emissioni di gas serra. Focus del CRRC è il *Roof Product Rating Program*, un servizio che consente ai produttori di materiali per il rivestimento delle coperture di far testare ed etichettare i prodotti con informazioni sulle proprietà radiative attraverso un programma rigoroso amministrato dal CRRC. Gli enti pubblici, architetti, proprietari di edifici e i committenti si possono affidare alle informazioni tecniche fornite nella Directory dei prodotti classificati CRRC (disponibili al seguente indirizzo <https://coolroofs.org/directory> – vedi Fig.65).

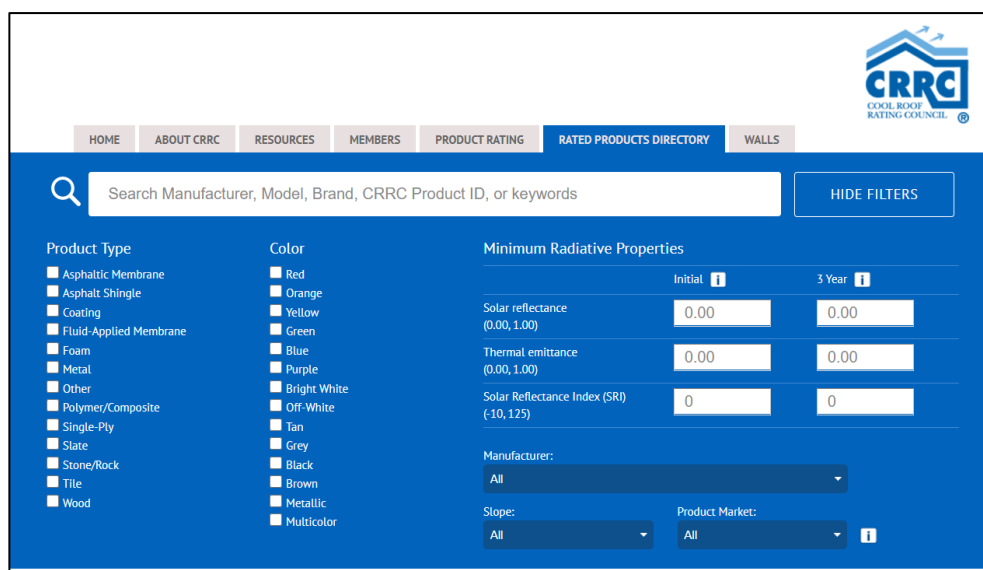


Fig. 65 – Database di prodotti con proprietà *cool* aderenti al progetto del CRRC.

Tra i principali criteri di *Energy Star Roof Products* (Fig. 66) che i materiali devono soddisfare, ricordiamo:

- tetti a bassa pendenza: riflettenza solare iniziale $> 0,65$ e riflettenza solare finale $> 0,50$;
- tetti a forte pendenza: riflettenza solare iniziale $> 0,25$ e riflettenza solare finale $> 0,15$.

Table 1 – Solar Reflectance Specifications for Low-Slope Roof Products	
CHARACTERISTIC	PERFORMANCE SPECIFICATION
Initial Solar Reflectance	$\geq 0,65$
Aged Solar Reflectance	$\geq 0,50$

Table 2 – Solar Reflectance Specifications for Steep-Slope Roof Products	
CHARACTERISTIC	PERFORMANCE SPECIFICATION
Initial Solar Reflectance	$\geq 0,25$
Aged Solar Reflectance	$\geq 0,15$

Fig. 66 – Parametri minimi richiesti nel programma *Energy Star Roof Products* per la certificazione dei prodotti *cool roof*.

Studi sperimentali hanno dimostrato che le superfici con bassa riflettenza solare ed alta emissività nell'infrarosso (ad esempio guaina bituminosa nera, tegola asfaltata, superfici coperte da ghiaia nera), possono raggiungere temperature tra 75-80°C. Mentre superfici ad alta riflettenza solare ma bassa emissività nell'infrarosso (ad esempio tetti non verniciati in metallo, rivestimenti in alluminio) raggiungono comunque temperature fino a 60-70°C. Al contrario, superfici con riflettenza solare ed emissività nell'infrarosso entrambe elevate (rivestimenti *cool* bianchi, membrane impermeabilizzanti bianche, ecc) raggiungono temperature medie di circa 45°C, a seconda delle condizioni locali, e quindi nettamente inferiori a quelle appena descritte, ad evidenza del fatto che questi due parametri devono lavorare insieme per ottenere un sistema realmente efficiente.

Descriviamo ora alcuni dei campi più comuni di applicazione dei *prodotti cool* nell'edilizia e nei quali la ricerca si è maggiormente concentrata raggiungendo interessanti risultati.

Membrane impermeabili cool

La tecnologia del *cool roofing* utilizza membrane impermeabilizzanti, solitamente calpestabili, per incrementare la riflettanza solare delle coperture e quindi sfruttare al massimo il potenziale di raffrescamento passivo. Studi sull'efficienza energetica degli edifici hanno dimostrato che queste membrane cool possono ottimizzare il fabbisogno energetico di un intero anno fino al 19,3%.

L'utilizzo combinato di cariche di biossido di titanio e microsferiche ceramiche all'interno della formulazione di guaine liquide poliuretaniche ha dimostrato un netto miglioramento delle performance rispetto alle formulazioni prive di queste cariche, sia in fase di test di laboratorio che in campo, ottenendo rispettivamente valori di riflettanza solare tra 80 – 85% rispetto alle guaine di partenza con un valore di 26%. Per combattere l'utilizzo dei comuni sistemi elettrici di raffrescamento, una tecnica refrigerante è il raffrescamento radiante passivo quotidiano, *Passive Daytime Radiative Cooling* (PDRC), ovvero il fenomeno per cui una superficie si raffredda spontaneamente riflettendo i raggi solari e irraggiando il calore nell'atmosfera più fredda (Fig. 67).

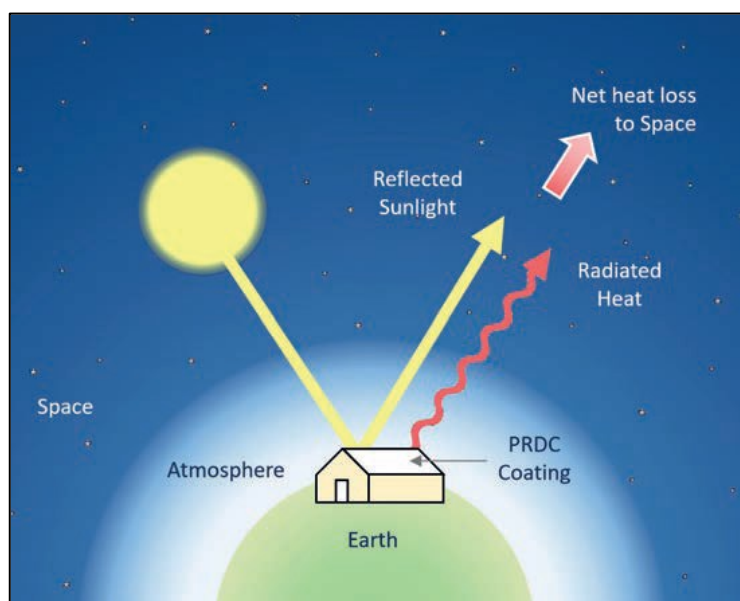


Fig.67 - L'illustrazione mostra come il raffreddamento radiante passivo quotidiano (PDRC) provoca la riflettanza simultanea della luce del sole e l'irraggiamento del calore nell'atmosfera fredda causando una perdita di calore netta. Il processo naturale può raffreddare le strutture fino a raggiungere temperature ambientali inferiori.

Se la riflessione solare SR e l'emittenza termica ε sono sufficientemente elevati, si può innescare una perdita di calore netta anche in condizione di totale esposizione ai raggi solari. Finora, le pitture bianche, poco costose e facili da applicare, sono state il prodotto di riferimento per i PDRC. Queste stesse, tuttavia, contengono pigmenti che assorbono i raggi UV e non riflettono bene le lunghezze d'onda più elevate, tali per cui la loro prestazione in opera risulta modesta. I ricercatori della facoltà di Ingegneria della Columbia University hanno ideato un rivestimento polimerico PDRC per esterni ad alta prestazione dotato di vuoti d'aria di dimensione nanometrica, che funge da rinfrescante naturale dell'aria, di fattibilità produttiva, pigmentabile e da posare in opera come una pittura per tetti, edifici, cisterne d'acqua ecc. La tecnica adottata si basa sul principio chimico tale per cui il polimero viene dotato di struttura porosa simile alla schiuma. I vuoti d'aria del polimero propagano e riflettono la luce a causa delle differenze di indice di rifrazione fra i vuoti d'aria e il polimero circostante. Il polimero diventa bianco ed evita il surriscaldamento solare mentre la sua emittanza intrinseca determina la perdita di calore nell'atmosfera. Questi polimeri vengono definiti *trasparenti* poiché in sostanza i vuoti d'aria che costituiscono lo scheletro del materiale sostituiscono i pigmenti delle pitture bianche e i vuoti d'aria agiscono riflettendo tutte le lunghezze d'onda della luce solare, dagli UV agli infrarossi. I ricercatori hanno riscontrato che l'elevata riflettanza solare ($SR > 96\%$) ed emittanza termica (ε circa 97%) del rivestimento polimerico mantenevano una temperatura più fresca dell'ambiente circostante, in varie condizioni meteorologiche, ad esempio di 6°C nel deserto arido e caldo dell'Arizona e di 3°C nell'ambiente molto umido tropicale del Bangladesh. Inoltre, è stato possibile aggiungere delle tinte per la creazione di rivestimenti polimerici porosi colorati con un ottimo risultato bilanciato tra colorazione e prestazione refrigerante.

Un altro campo di ricerca promettente è quello legato ai pigmenti innovativi. Da sempre la scienza ci ha insegnato che i colori scuri assorbono calore mentre gli oggetti di colore bianco mantengono temperature moderate. La ricerca ha dimostrato che gli ossidi di alluminio di colori scuri uniti al cromo, grazie alla fluorescenza o ri-emissione della luce assorbita, possono mantenere temperature superficiali come gli oggetti di colore bianco. I ricercatori del Berkeley Lab hanno sintetizzato un pigmento rosso rubino che inglobato nelle pitture ha lo stesso comportamento di una pittura bianca. Nel corso di questi ultimi 15 anni, i ricercatori hanno utilizzato pigmenti speciali che riflettono intensamente la luce invisibile prossima agli infrarossi per rendere più scure le superfici e mantenere temperature moderate quando esposte al sole, rispetto alle superfici scure convenzionali, pur senza arrivare ad essere fresche come le superfici bianche.

Questo nuovo lavoro di ricerca ha dimostrato che il raffreddamento fluorescente può intensificare la prestazione di questi pigmenti, riemettendo a lunghezze d'onda superiori parte della luce visibile che la superficie deve assorbire per apparire più scura. L'impiego dei materiali fluorescenti, o fotofluorescenza, per i materiali che mantengono temperature moderate, è un'idea innovativa: tutti i materiali fluorescenti emettono energia, la novità in questo caso è l'uso del processo di fluorescenza per mantenere temperature fresche negli edifici. Quando la luce colpisce un materiale fluorescente, questo reagisce emettendo energia, quindi non soltanto riflettendola passivamente. L'idea alla base era quella di reperire un materiale che potesse assorbire la luce visibile riemettendola totalmente o quasi totalmente nella parte prossima agli infrarossi dello spettro solare. I ricercatori del Berkeley Lab hanno poi sintetizzato la polvere di rubino o ossido di alluminio, con l'aggiunta di varie quantità di cromo per creare differenti tonalità del pigmento rosso. Hanno poi preparato la pittura color rubino derivata dalla polvere (Fig.67), che hanno in seguito applicato sui substrati di color bianco brillante. Quando sono stati esposti alla luce del sole, i campioni di pittura rubino hanno conservato una temperatura moderata come i materiali di tinta bianca. Industrie produttrici di rivestimenti ubicate a Pittsburgh, Pennsylvania, coinvolte nel programma di ricerca sono impegnate nell'esecuzione di test dell'invecchiamento atmosferico dei rivestimenti fluorescenti prototipo. Nel lavoro di follow-up i ricercatori hanno individuato anche materiali blu, anch'essi fluorescenti e hanno dimostrato che essi possono essere associati ad altri colori per fornire pigmenti verdi o neri che mantengono temperature moderate, aprendo così la strada a impieghi sempre più versatili per le pitture *cool roof*.



Fig.68 – Pigmento rosso rubino fluorescente in grado di diminuire la temperatura dei rivestimenti come i pigmenti bianchi.

Gli sforzi più recenti riguardanti la ricerca nel campo delle membrane per tetti *cool* riguarda la proposta di innovative membrane a base di poliuretano dentro le quali sono stati integrati materiali a cambiamento di fase (*Phase Change Material* - PCM), allo scopo di combinare i benefici dell'albedo con quelli relativi al miglioramento sia della capacità di accumulo del calore latente che della durabilità dovuta ad un minor stress termico all'interno della membrana a base polimerica. I risultati hanno evidenziato anche la relativa facilità con cui è possibile includere i PCM all'interno di queste membrane.

In generale, nonostante la buona prestazione energetica di queste soluzioni con *cool materials*, data dalla loro capacità di ridurre le temperature superficiali di picco, queste membrane soffrono della presenza di eventuale sporcizia, dovuta all'atmosfera e all'inquinamento atmosferico, e di crescita biologica, che influenzano i valori di riflettanza solare: tali valori sono stati misurati per 12 diverse membrane di copertura, prima dell'esposizione e dopo 3,6,12,18 e 24 mesi dalla loro applicazione. I risultati hanno mostrato una diminuzione dei valori di riflettanza solare compresi tra 0,14 e 0,22 dopo circa due anni.

Vernici e pitture cool

Una delle soluzioni più efficaci è rappresentata da pitture e rivestimenti in genere poiché hanno posa in opera facile e veloce. Sostanzialmente un prodotto verniciante è costituito da una miscela di quattro tipi di materie prime: un legante polimerico, un mezzo disperdente (base acqua o solvente), un pigmento ed eventuali cariche, additivi. L'introduzione nelle pitture acriliche colorate di pigmenti riflettenti nel campo dell'infrarosso apporta un notevole miglioramento delle prestazioni termiche rispetto alle pitture acriliche tradizionali. Prove in sito hanno dimostrato che le vernici così formulate sono caratterizzate da maggiori valori di riflettanza NIR rispetto a quelle convenzionali e che le temperature superficiali di queste ultime sono superiori di circa 10°C rispetto alle altre quando sono esposte alla radiazione infrarossa. Di conseguenza, un significativo beneficio termico può essere raggiunto sostituendo i pigmenti di colore scuro con pigmenti dello stesso colore ma con proprietà riflettenti nella zona di radiazione infrarossa.

Le pitture termoriflettenti sono prodotti in grado di riflettere gran parte della radiazione solare permettendo quindi di mantenere più freschi gli edifici e di risparmiare sui costi del condizionamento estivo. L'energia irradiata dal sole è distribuita per il 5% nella regione dell'UV (200 – 300 nm), per il 50% nella banda del visibile (380 – 700 nm) e per il 45% in quella del vicino infrarosso NIR (700 – 2500 nm), ne consegue che una comune pittura bianca contribuisca a riflettere solo la quota di radiazione nella banda del visibile, che è appunto la banda che ne

determina il colore. Le pitture tradizionali non sono ottimizzate per migliorare la riflessione della quota di energia irradiata nel campo del NIR.

La *Total Solar Reflectance* (TSR) quantifica la radiazione riflessa da una superficie, ed è calcolata come la media integrale della riflettività spettrale al variare della lunghezza d'onda, pesata con l'irradianza spettrale del sole sulla superficie terrestre. Sperimentalmente, il valore del TSR varia con lo spessore ma oltre i 200 μm le variazioni diventano trascurabili e il valore di TSR può essere considerato costante. Il fattore SRI (Solar Reflective Index) combina in un'equazione il TSR e l'emissività, cioè la quota di radiazione assorbita dalla superficie e riemessa verso l'esterno. Nella pratica, quasi tutte le pitture hanno un valore di emissività di circa 0,90 per cui piccole differenze di emissività sono praticamente irrilevanti. Da queste considerazioni emerge che nell'ambito applicativo dei rivestimenti termoriflettenti la caratteristica di maggior peso sono i meccanismi di riflessione della radiazione solare che caratterizzano la superficie di un materiale rispetto all'altro. Diverse sperimentazioni sono state condotte aggiungendo microsferiche cave di varia natura, principalmente vetro, al posto delle cariche tradizionali (carbonato di calcio) all'interno di pitture acriliche. I risultati ottenuti mettono in evidenza il beneficio apportato dall'inclusione delle microsferiche di vetro sia in termini di TSR che di SRI. In particolare, l'incremento di riflettanza è più evidente nella regione del NIR. Inoltre, si osserva che il valore di TSR aumenta al diminuire delle dimensioni delle microsferiche secondo la legge di Weber: più piccole sono le loro dimensioni, più alta è la loro numerosità e più alto risulta essere il numero di scattering subiti dall'onda durante il suo percorso all'interno del film di pittura (Fig.69).

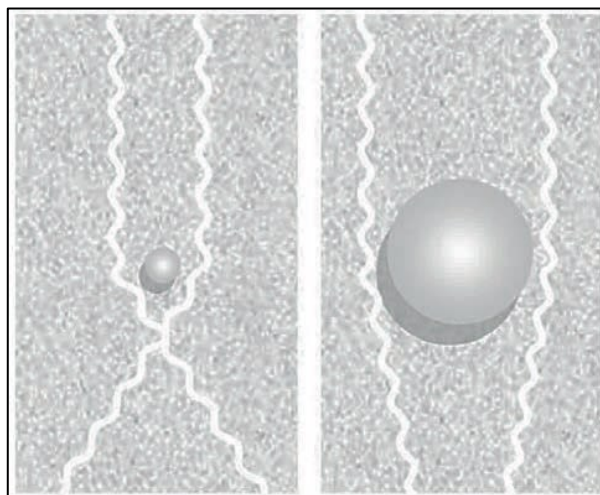


Fig.69 – Efficienza dello scattering in relazione alla dimensione delle microsferiche secondo la legge di Weber.

Ciò aumenta la probabilità che l'onda riemerge dal film. Infatti, quando un'onda elettromagnetica incontra un film di pittura costituito da un certo numero di particelle (in questo caso le cariche e i pigmenti) disperse nel mezzo continuo, subisce degli scattering multipli. Ad ogni scattering l'onda viene deviata con un certo angolo dalla sua traiettoria precedente come descritto dalla legge di Snell (Fig. 70). Solo dopo un certo numero di scattering, l'onda riemerge dal film e viene diffusa nel mezzo esterno. Maggiore è la differenza tra gli indici di rifrazione dei due mezzi, maggiore sarà lo scattering dell'onda elettromagnetica e quindi la probabilità che questa riemerge nello stesso mezzo di provenienza.

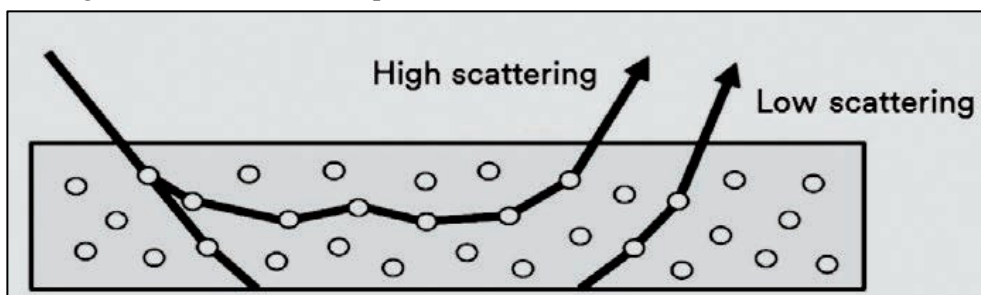


Fig. 70 – Scattering multipli all'interno di un film di pittura.

Piastrelle cool

Un'ulteriore tecnologia applicabile al *cool roofing* è l'utilizzo di piastrelle *cool* (cool tiles), materiali con un notevole potere riflettente che possono essere utilizzati al posto dei rivestimenti dei tetti esistenti. Anche dal punto di vista paesaggistico e di integrazione nei contesti dell'edilizia storica, questi materiali risultano essere molto funzionali grazie al loro basso impatto estetico ed architettonico. Infatti, i tradizionali tetti inclinati sono generalmente realizzati con piastrelle ceramiche dai classici colori che vanno dal rosso mattone all'arancio, che presentano una riflettanza solare molto bassa che può portare al surriscaldamento dell'edificio a causa degli elevati guadagni solari durante il periodo estivo.

Anche se i prodotti liquidi a base polimerica sono predominanti nel mercato dei materiali *cool*, in realtà l'impiego di queste piastrelle/tegole ceramiche può garantire ugualmente delle ottime prestazioni rispetto al raffreddamento della copertura, combinando inoltre, l'aspetto estetico-architettonico: i prodotti ceramici sono caratterizzati da un'elevata emissività termica ed una buona durabilità chimico-fisica. Questo tipo di prodotti si presta alla sperimentazione di smalti colorati da applicare sulla loro superficie per migliorarne le proprietà di riflettanza termica. I risultati ottenuti in situ hanno dimostrato un forte aumento della resistenza termica del tetto, oltre ad un buon controllo sia per quel che riguarda la perdita di calore in

inverno che il surriscaldamento dell'edificio nel periodo estivo. Possono essere installati facilmente su tetti esistenti, come ad esempio i tradizionali tetti a tegole inclinate di edifici storici, senza la necessità di modificare le caratteristiche di quest'ultimo per quel che riguarda sia la struttura che l'aspetto.

Sulla base di queste promettenti sperimentazioni, è stata eseguita l'ottimizzazione delle tradizionali tegole in laterizio con lo scopo di ottenere una riqualificazione energetica rispettando il vincolo per cui è necessario preservare il patrimonio architettonico, ottenendo delle *cool tiles* di argilla con una riflettanza solare pari a 0,75 ma aventi lo stesso aspetto (sia colore che forma) di quelle storiche tradizionali. Tali piastrelle sono capaci di garantire un massimo risparmio di energia primaria per il raffrescamento di circa il 51%, con una perdita di energia termica inferiore al 2%; rappresentano, quindi, una strategia efficace e non invasiva sia per quel che riguarda l'ottimizzazione delle prestazioni termiche degli edifici storici anche in zone con clima temperato, che per la mitigazione del clima urbano in generale. Le sperimentazioni dimostrano che il flusso termico può essere ridotto fino al 70% sostituendo una tradizionale piastrella di cemento con una dalle caratteristiche *cool*. Altri studi hanno dimostrato che una differenza di temperatura superficiale di 14°C può essere raggiunta attraverso un tetto a forte pendenza rispetto ad un tetto scuro convenzionale. Sei differenti piastrelle colorate, caratterizzate da una differenza di riflettanza solare compresa tra 0,15 e 0,41 rispetto alle stesse piastrelle colorate tradizionali, sono state testate in edifici dotati di isolamento ($R=1,9 \text{ m}^2\text{K/W}$): le temperature superficiali sono risultate inferiori di circa 5-14°C con una riduzione del flusso di calore del 13-21%.

Sono disponibili diverse tecniche per aumentare la riflettanza solare delle piastrelle in calcestruzzo: una di queste è basata sull'utilizzo di uno spray a due strati applicato a spruzzo sulle piastrelle, in cui entrambi gli strati sono a base di vernice pigmentata con tecnologia dei polimeri e copolimeri a base di polivinilidene fluoruro PVDF /acrilici. Tale metodo innovativo è stato applicato utilizzando come primo strato un composto con biossido di titanio (TiO_2) e come secondo strato cool uno smalto colorato con debole assorbimento NIR e/o un forte dispersione nel campo NIR, invece di utilizzare le più tradizionali basi acriliche. Le sperimentazioni hanno rilevato un aumento significativo della riflettanza solare iniziale, che varia da 0,26 (marrone scuro) a 0,57 (verde chiaro) per le piastrelle colorate cool, e da 0,18 (marrone scuro) a 0,34 (verde chiaro) per le tegole colorate cool. Per piastrelle in metallo e argilla, che hanno già in partenza un'elevata riflettanza nell'infrarosso, può essere usato uno smalto di finitura che contenga pigmenti riflettenti nell'infrarosso. Mentre per le tegole di cemento grigio, o per qualsiasi aggregato di colore grigio che abbia una bassa riflettanza nell'infrarosso, è stato applicato uno smalto di finitura (o

una mano di fondo) avente come caratteristica un'elevata riflettanza nell'infrarosso, affinché venga incentivata questa proprietà. Attraverso l'applicazione su coperture in metallo e vetroceramica di una sola mano di smalto fresco, è stato possibile raggiungere dei valori di riflettanza rispettivamente pari a 0,50 (per coperture in metallo) e 0,75 (per coperture in vetroceramica). L'applicazione di due mani differenti di prodotto (fondo bianco di titanio rutilo più smalto colorato con pigmenti organici trasparenti) ha portato la riflettanza solare nell'infrarosso su valori vicini allo 0,85.

Inoltre, sono state misurate le proprietà ottiche e le prestazioni termiche di 14 tipi di rivestimenti riflettenti (bianchi e alluminio). Si è constatato che un rivestimento cool può ridurre la temperatura della superficie di una piastrella di cemento bianco di 4° C durante il giorno e di 2° C durante la notte, nel periodo estivo. Perciò, data la grande diffusione delle piastrelle di cemento e di argilla nel costruito esistente, il trattamento di queste superfici può rappresentare una soluzione chiave per la mitigazione dell'effetto isola di calore urbano nelle città storiche o comunque in quei siti in cui l'architettura tradizionale è prevalente, anche se la loro specifica capacità di riflettanza solare è relativamente inferiore rispetto ai rivestimenti cool ad alte prestazioni trattati nelle sezioni precedenti.

4.1.4 Benefici dei *cool materials*

Introduzione

L'applicazione dei materiali speciali ad alta emissività e riflettanza in edifici nuovi ed esistenti, possono migliorare notevolmente l'efficienza energetica durante la stagione estiva (periodo in cui gli apporti termici solari sono maggiori) ed, in genere, durante tutto l'anno. Diversi studi di ricerca si sono focalizzati sulla quantificazione del risparmio energetico ottenibile mediante l'applicazione di strategie *cool roof* in edifici sia residenziali che non. I risparmi ottenuti da questa sperimentazione sono molto variabili e compresi tra il 2-44%, con una media del 20%. Tale variabilità percentuale dipende dal limite delle condizioni specifiche in termini di fenomeni climatici locali, caratteristiche dell'involucro edilizio, fattore di vista verso la volta celeste, tipologia di edificio ed uso, sistemi HVAC e molto altro.

Diversi metodi possono essere utilizzati per quantificare l'effettivo risparmio energetico che si ha applicando all'edificio i sistemi *cool roof*, effettuando una valutazione sperimentale mediante monitoraggio sul campo e analisi numerica. Il monitoraggio sperimentale può essere eseguito tramite il controllo del microclima attraverso l'uso di stazioni interne ed esterne, mentre l'analisi numerica può essere

effettuata con mezzi di simulazione dinamica calibrata che consente di prevedere con precisione il risparmio energetico annuale dovuto all'utilizzo di un sistema di tetto cool con condizioni meteorologiche e scenari variabili, sia in ambito commerciale che in quello residenziale. Ad esempio, il risparmio energetico per il raffrescamento estivo, grazie all'applicazione dei *cool materials*, per 240 regioni degli Stati Uniti è stata calcolata tra il 12-25% per gli edifici residenziali e tra il 7-17% per gli edifici commerciali.

Edifici residenziali

Le soluzioni più comuni per i *cool roof* sono costituite da valori di albedo alti e rivestimenti ad alta emissività o membrane applicate su tetti di edifici commerciali situati in zone a clima mite o caldo. Tuttavia, l'applicazione di soluzioni per il *cool roof* su edifici residenziali inizia a prendere campo diventando sempre più frequente. Infatti, un notevole risparmio energetico può essere ottenuto applicando uno dei sistemi *cool roof* precedentemente elencati, ad un edificio residenziale, con un'efficacia che varia a seconda delle specifiche d'uso dell'edificio, le condizioni locali ambientali, tipologia di sistemi HVAC installati, ecc. In realtà, i *cool roof* rappresentano una tecnica relativamente economica al fine di ridurre i fabbisogni energetici per il raffrescamento estivo dell'edificio, ed in genere possono essere applicati facilmente su tetti esistenti, anche nel contesto di ristrutturazione o manutenzione, rispettando i vincoli sia architettonici che estetici dell'edificio. I risparmi energetici, nei confronti degli apporti termici solari, sono molto importanti soprattutto in quegli edifici storici che non presentano alcun tipo di isolamento sul tetto, e quindi con la radiazione solare diretta che potrebbe portare le temperature interne a livelli di discomfort. È possibile raggiungere un risparmio energetico per il raffrescamento estivo, pari al 15%, applicando un rivestimento cool marrone su piastrelle marroni tradizionali, con riflettanza solare pari a 0,3. Inoltre, una tipologia innovativa di piastrella di argilla con caratteristiche cool è stata sviluppata come test su un edificio residenziale tradizionale sito in centro Italia, al fine di migliorare le condizioni termiche dell'ambiente interno sottostante al tetto. Il monitoraggio sperimentale durante il corso dell'anno ha rilevato una diminuzione del picco massimo del surriscaldamento interno estivo pari a circa 4,7°C. Questa soluzione di tetto cool è stata identificata come idonea per l'implementazione dei tradizionali tetti inclinati realizzati con piastrelle di argilla, producendo dei benefici termici sia in estate che in inverno, anche nei climi temperati.

Continuando nello scenario delle sperimentazioni a livello internazionale, è stato portato avanti per circa un anno un monitoraggio continuo effettuato su due case unifamiliari simili e sviluppate su un solo piano in California, al fine di valutare i

benefici del *cool roof* in termini di temperature, flussi di calore ed usi energetici (copertura con albedo 0,51), rispetto ad un tetto tradizionale (con albedo 0,15). Il risparmio annuo di energia per il raffrescamento estivo dell'edificio in cui è stato applicato il *cool roof*, è risultato pari a 2,82 KWh/m² (pari a circa il 26% del totale), mentre la riduzione della domanda di energia per il raffrescamento nell'ora di punta è risultata essere di 0,88 W/m² (cioè il 37%). Oltre a questo, si è verificata anche una conseguente riduzione delle emissioni del 15%, del 10% e del 22% rispettivamente di CO₂, NO_x e SO₂, che sono stati misurati sulla base del condizionamento annuale. Altre sperimentazioni, hanno analizzato le capacità passive di raffreddamento dei *cool roof* nei climi molto caldi e secchi, dove quasi la metà del consumo di energia elettrica totale è dovuto all'utilizzo di condizionatori per il raffrescamento estivo. I risultati derivanti dell'impiego di tetti con un valore significativo di albedo mostrano un risparmio energetico di circa 826 KWh rispetto ad un convenzionale tetto piano non coibentato.

L'impatto delle soluzioni per ottenere i *cool roof*, come ad esempio l'applicazione di vernici ad alta riflettanza ed emissività sui tetti degli edifici residenziali, è stato valutato anche attraverso analisi numeriche: grazie all'aumento di riflettanza solare (valori compresi tra il 50-92%) del tetto, si è verificata una riduzione massima di temperatura interna compresa tra 2-7,5°C con conseguente risparmio energetico per il raffrescamento di circa il 30%.

I dati ottenuti mediante le numerose sperimentazioni in atto in diversi paesi, e a diverse condizioni climatiche, dimostrano l'importanza di proseguire nella ricerca sul campo e favorire l'impiego di materiali innovativi nel settore dell'edilizia residenziale privata.

Edifici commerciali

I benefici energetici che si possono ottenere applicando un *cool roof* nelle costruzioni ad uso commerciale sono altrettanto significativi e validi in base alla valutazione delle differenti condizioni climatiche. In particolare, un risparmio energetico positivo è stato registrato in quei siti con condizioni climatiche calde e temperate, dove gli inverni sono meno rigidi. Ciò è dovuto principalmente alla minore, e meno intensa, radiazione solare invernale disponibile. I principali vantaggi sono relativi alla riduzione della domanda di energia per il raffrescamento e al miglioramento delle condizioni di confort termico interno, a seconda delle caratteristiche costruttive dell'edificio, delle condizioni meteorologiche esterne e dell'effettivo uso dell'edificio.

Il risparmio energetico, sia per l'aria condizionata che per domanda di energia di picco giornaliera, è pari a circa il 10-30% per gli edifici non residenziali. In

particolare, il risparmio energetico è all' interno del range di circa 250 KWh/anno per gli edifici siti in climi miti, 1000 Kwh/anno per gli edifici siti in climi molto caldi: valori ottenuti aumentando l'albedo del tetto da 0,10 a 0,40.

Mitigazione dell'effetto isola di calore

Studi svolti in tutto il mondo documentano scientificamente che l'aumento dell'albedo dei tetti su larga scala, come ad esempio la scala urbana, può contribuire in modo significativo a mitigare i fenomeni di clima locale come l'*isola di calore urbana*, abbassando le temperature di picco dell'aria locale, grazie al minor trasferimento di calore dalla superficie all'aria ambientale (Fig.71). Sono state eseguite diverse analisi, a vari livelli di scala urbana per mezzo di una modellistica meteorologica, con l'obiettivo di quantificare l'impatto che ha l'aumento dei valori di albedo sulle superfici. In particolare, le simulazioni e gli studi sperimentali sono stati eseguiti per indagare l'impatto che le varie tecniche di trasformazione dell'albedo hanno per quel che riguarda la riduzione della temperatura ambientale.

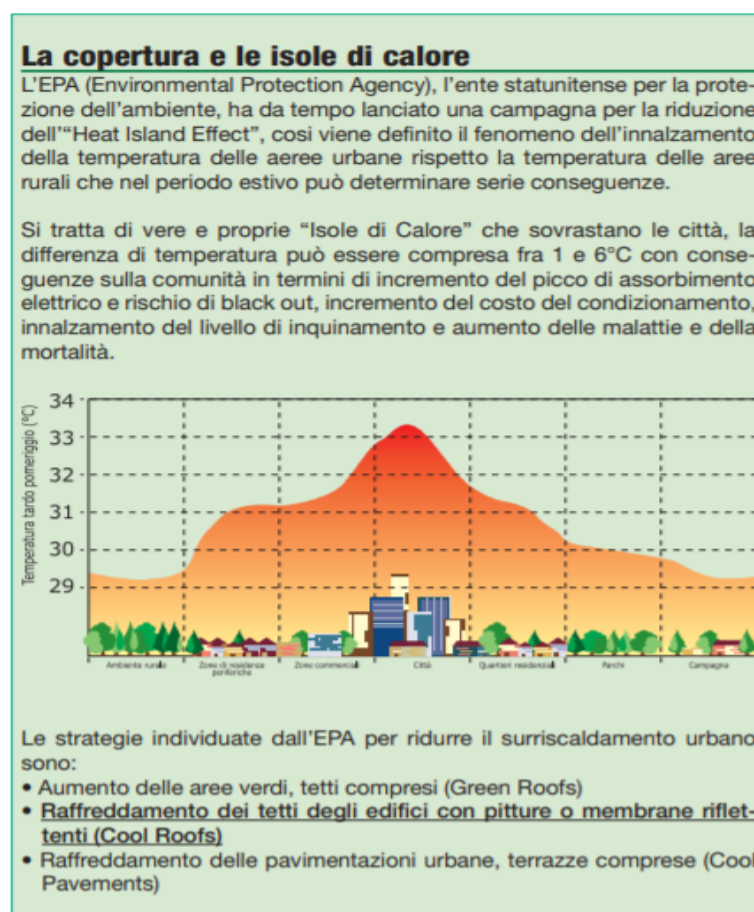


Fig. 71 – Relazione tra coperture e isola di calore urbana.

La maggior parte dei lavori esistenti valutano l'incidenza che l'aumento generale di albedo ha sulla mitigazione delle isole di calore urbane, grazie alla combinazione di cool roof, marciapiedi rivestiti con materiali riflettenti, tetti verdi ed altro ancora. La maggior parte dei lavori esistenti valutano l'incidenza che l'aumento generale di albedo ha sulla mitigazione delle isole di calore urbane, grazie alla combinazione di cool roof, marciapiedi rivestiti con materiali riflettenti, tetti verdi ed altro ancora.

Tra questi studi, che si concentrano sulla valutazione del raffrescamento passivo potenziale dei cool roof come tecnica di mitigazione delle isole di calore urbano, ce ne sono alcuni che si basano sulla valutazione dell'impatto che questi tetti hanno su scala urbana, ed altri che invece indagano sull'impatto della riflettanza dei cool roof sul clima. L'utilizzo di analisi numeriche è servito a calcolare l'impatto dei cool roof nei quartieri con edifici ad altezza media ed alti. In particolare, è stata rilevata una riduzione della temperatura a livello stradale per entrambe le tipologie di edificio in associazione ad una variazione di albedo da 0,20 a 0,50.

Tra questi studi, che si concentrano sulla valutazione del raffrescamento passivo potenziale dei cool roof come tecnica di mitigazione delle isole di calore urbano, ce ne sono alcuni che si basano sulla valutazione dell'impatto che questi tetti hanno su scala urbana, ed altri che invece indagano sull'impatto della riflettanza dei cool roof sul clima. L'utilizzo di analisi numeriche è servito a calcolare l'impatto dei cool roof nei quartieri con edifici ad altezza media ed alti. In particolare, è stata rilevata una riduzione della temperatura a livello stradale per entrambe le tipologie di edificio in associazione ad una variazione di albedo da 0,20 a 0,50.

Ottimizzazione del comfort termico indoor

Le potenzialità applicative dei *cool roof* al fine di migliorare il comfort termico sono state valutate in diversi studi per quantificare i benefici rispetto alle problematiche del raffrescamento estivo e ridurre le ore di discomfort indoor. In genere, le temperature interne estive di punta possono diminuire fino a 2°C in edifici moderatamente isolati, mentre le riduzioni dei carichi di raffrescamento variano tra il 10% e il 40%. Allo stesso tempo, la variazione per il riscaldamento invernale può essere compresa tra il 5% e il 10% a seconda delle condizioni climatiche locali e delle caratteristiche dell'edificio.

La prestazione termica di un tetto in cemento, con e senza rivestimento riflettente, è stata valutata con riferimento ad un edificio in Messico, utilizzando il metodo del volume finito ed i dati climatici medi orari come condizioni al contorno. È stato rilevato che il tetto cool è in grado di ridurre la temperatura superficiale interna fino a 28°C (riferita alle ore 12.00), rispetto al tradizionale tetto in cemento grigio.

Inoltre, altre sperimentazioni condotte in merito alle condizioni climatiche dell'Europa Meridionale, hanno evidenziato che l'uso di materiali cool minimizza lo stress termico dei tetti. Al contrario, i tetti convenzionali presentano una media del flusso di calore sensibile pari a 30 W/m^2 , con picchi massimi di 270 W/m^2 in estate. Pertanto, è dimostrato che i tetti convenzionali, in estate, hanno un range di calore sensibile variabile tra $100\text{-}170 \text{ KWh/m}^2$ rispetto ai tetti riflettenti.

Le pitture con pigmenti in grado di riflettere la radiazione solare nel vicino infrarosso (NIR), rispetto alle vernici convenzionali di colori simili, possono ridurre la temperatura superficiale di oltre 10°C . Uno studio condotto in un edificio scolastico ad Atene, ha mostrato che l'applicazione di un rivestimento, a base di elastomero bianco, sulla superficie del tetto esistente in calcestruzzo, ha portato ad una riduzione dell'aria interna di $1,5\text{-}2,0^\circ\text{C}$ durante l'estate e $0,5^\circ\text{C}$ durante l'inverno. In sud Italia, una riduzione di temperatura dell'aria interna pari a circa $0,9^\circ\text{C}$ è stata raggiunta applicando una vernice cool sul tetto di un edificio pubblico a Trapani. L'applicazione di una vernice cool sul tetto di un edificio della Brunel University (Regno Unito), ha permesso di raggiungere una diminuzione della temperatura interna media dell'aria di circa $3\text{-}4^\circ\text{C}$.

Il miglioramento delle condizioni di comfort termico indoor in edifici residenziali di 27 città di tutto il mondo, e quindi per diverse condizioni climatiche (tra cui mediterranea, umida continentale, arido subtropicale, desertica), sono state studiate aumentando la riflettanza solare da 0,20 a 0,85. Gli studi hanno rilevato una diminuzione delle ore di disagio dal 9% al 100%, insieme ad una riduzione massima di temperatura di $1,2\text{-}3,3^\circ\text{C}$. Queste riduzioni sono risultate di maggiore entità in edifici scarsamente o non isolati.

La bibliografia scientifica include anche molti studi riguardanti il risparmio energetico ottenuto attraverso l'incremento dei valori di riflessione delle superfici delle pareti interne degli edifici. Sono state effettuate diverse misurazioni per esaminare gli effetti della diminuzione del coefficiente di emissione e/o dell'aumento del valore di riflettanza di una pittura murale per interni. Alcuni studi si sono serviti di una camera climatica, dotata sensori di misura, nella quale sono state esaminate e confrontate diverse condizioni come la tipologia di costruzione del muro, la variazione del coefficiente di emissione, al fine di valutare come cambia lo scambio di radiazioni tra le superfici al variare di questi parametri.

Ciò si verifica con un cambiamento della temperatura di tutte le superfici che coinvolge pareti, pavimento e soffitto, ma anche mobili e persone. La diminuzione della temperatura superficiale delle pareti esterne si traduce in un risparmio energetico al diminuire della dispersione termica per trasmissione attraverso le pareti.

Al di là della diminuzione della temperatura superficiale della parete, una variazione dello scambio di radiazioni tra il corpo umano e le superfici interne circostanti consente la riduzione della temperatura dell'aria, a parità di comfort termico. In questo modo il risparmio energetico può essere ulteriormente incrementato.

In conclusione, si può affermare che un aumento del valore di riflettanza della pittura murale per interni si traduce in un risparmio energetico. Poiché l'entità del risparmio dipende in modo significativo dalla temperatura superficiale delle pareti esterne, esiste un diverso potenziale di risparmio energetico, a seconda dell'isolamento dell'edificio: il risparmio energetico è maggiore nel caso di edifici scarsamente isolati. Questi studi condotti anche negli ambienti interni, dimostrano la possibile versatilità dei materiali cool che possono avere un impiego differenziato a seconda del campo d'applicazione e dell'obiettivo da raggiungere (Fig.72).

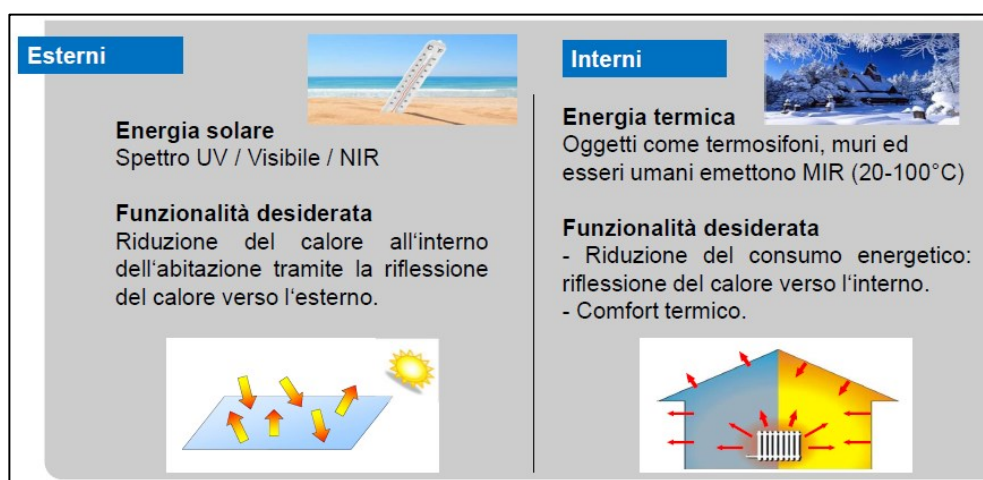


Fig. 72 – Versatilità delle pitture riflettenti in base al campo d'impiego: per interno e per esterno.

Ottimizzazione del comfort termico outdoor

Le analisi dei rivestimenti *cool* in termini sia di effetti sul raffrescamento passivo sia di conservazione del calore all'interno degli ambienti sono state analizzate particolarmente in questo ultimo decennio grazie alla formulazione di materiali altamente tecnologici idonei a soddisfare tale scopo, come abbiamo appena visto nella sezione precedente. Altrettanto importanti sono i risultati che si riferiscono all'effetto che tali tecniche hanno sull'ambiente esterno, soprattutto per quel che riguarda il comfort dei cittadini-pedoni. Sono stati effettuati studi dettagliati sull'effetto di mitigazione *UHI* – *Urban Heat Island* dei rivestimenti cool quando applicati su tetti di edifici e su pavimentazioni esterne, prendendo come ambito di

studio le applicazioni su facciate e pavimentazioni, al fine di valutarne gli effetti sulle percezioni termiche e visive delle persone. In quest'ottica, sono state proposte delle analisi multi parametriche combinate dove sono stati analizzati interventi che possono essere implementati durante la progettazione urbana ed in fase di rinnovamento delle città site nell'area mediterranea (Fig.73).

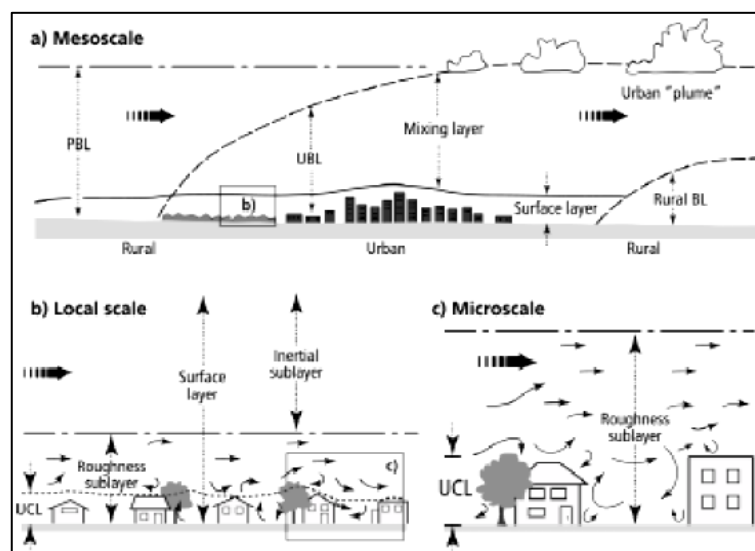


Fig. 73 – Schematizzazione della problematica dell'Urban Heat Island: individuazione dei tre livelli di scambio climatico. PBL- Planetary Boundary Layer, UBL-Urban Boundary Layer, UCL-Urban canopy Layer.

Entrando nel dettaglio, sono stati studiati gli effetti dei parametri chiave del design urbano come, ad esempio, il rapporto altezza/larghezza di un canyon urbano, il fattore di vista verso il cielo, la percentuale di vegetazione, caratteristiche e proprietà dei materiali di pavimentazione. I risultati hanno mostrato l'effetto promettente della progettazione urbana sul clima, simulando un'importante riduzione della temperatura dell'aria esterna, misurata a circa 1,8 metri dal suolo, fino a 1,7°C, ed una riduzione della temperatura superficiale fino a 8,5°C.

All'interno di questo medesimo argomento, è stata studiata la "variabilità della temperatura dell'aria intra-urbana" causata dalle azioni antropogeniche a Pechino, dove è stata quantificata una variazione della temperatura urbana di circa 7°C (effetto del paesaggio + pianificazione urbana). Un'interessante modellazione esterna multi-scala è stata recentemente proposta ed applicata in un caso di studio a Phoenix, dove gli autori hanno evidenziato l'ulteriore necessità di indagini di ricerca sulla interazioni termiche tra gli edifici e l'ambiente mentre stavano investigando su alcuni

sistemi di rivestimento cool; hanno analizzato, in particolare, l'effetto delle proprietà termo-energetiche e radiative che caratterizzano i materiali di pavimentazione cool, come ad esempio la riflettanza solare, la capacità termica e la conducibilità termica. Lo studio ha aiutato a chiarire la necessità di considerare le interazioni termiche edificio-ambiente in ambito di simulazione numerica a livello edificio-edificio e urbano, poiché hanno dimostrato di svolgere un ruolo cruciale nell'influenzare le condizioni termiche nelle aree densamente edificate.

L'interesse scientifico intorno alla possibilità di progettare spazi all'aperto, come ad esempio quartieri, che possano in un certo senso incrementare il surriscaldamento causato anche dai cambiamenti climatici, ha aperto le porte a diverse pianificazioni urbane supportate da analisi del microclima, come base di partenza per la costruzione di quartieri di future città che soddisfino determinati criteri. La valutazione numerica dei vantaggi che si potrebbero avere grazie all'utilizzo di pavimentazioni cool, è ancora in parte incerta, mentre non si hanno incertezze per quel che riguarda i benefici del raffreddamento passivo imputabile ai rivestimenti con alti valori di albedo nelle aree urbane. Sono stati riprodotti modelli sperimentali all'aperto, dove sono state monitorate continuamente le temperature superficiali ed il flusso termico di facciate di edifici simili, con diversi valori di orientamento, riflettanza nell'infrarosso e altezza dal suolo. Essi hanno dimostrato sperimentalmente in che modo le applicazioni di rivestimenti cool possono ridurre, nei canyon urbani, il surriscaldamento superficiale dell'ambiente costruito e, quindi, gli scambi radiativi che causano lo stress termico dei pendoni in condizioni climatiche specifiche. Altri risultati hanno dimostrato le proprietà chiave che influenzano il comportamento delle piastrelle di cemento esposte alla radiazione solare: una di queste proprietà è la capacità di riflettanza solare, capace di ridurre la temperatura superficiale con picchi giornalieri fino a circa 6°C rispetto alle piastrelle realizzate con materiali tradizionali non cool (sperimentazione effettuata nel mese di agosto in Grecia).

Esperimenti su larga scala hanno inoltre confermato tali risultati; i ricercatori si sono concentrati sullo sviluppo di un nuovo parco urbano con l'implementazione di un rivestimento cool per la mitigazione dell'UHI e il miglioramento delle condizioni di comfort termico esterno.

Altri studi numerici e sperimentali, sono stati focalizzati sui benefici di temperatura superficiale prodotti dall'implementazione di rivestimenti riflettenti e piastrelle aventi la caratteristica di riflettere la radiazione solare senza produrre riflessi multipli all'interno dell'ambito urbano, che potrebbero causare abbagliamenti. Questi materiali, conosciuti anche come "materiali retroriflettenti", sono in grado di riflettere la radiazione solare nella stessa direzione di quella in arrivo.

Durabilità dei rivestimenti cool

L'importanza di perseguire uno sviluppo sostenibile soprattutto nel settore dell'edilizia è stato ampiamente discusso e dimostrato a livello mondiale ed è necessario adottare strumenti per quantificare l'impatto ambientale delle attività umane per la produzione di materiali e ridurre le emissioni e il consumo di risorse. La valutazione del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment - LCA*) è una metodologia ormai nota e conosciuta che serve ad investigare gli impatti ambientali dei prodotti ed i loro cicli produttivi di vita. LCA è stato sviluppato per calcolare degli indicatori del potenziale impatto ambientale legato ai prodotti, identificando le opportunità per la prevenzione dell'inquinamento e la riduzione del consumo di risorse considerando l'intero ciclo di vita dei prodotti.

Tuttavia, solo pochi studi applicano questa metodologia per la promozione dello sviluppo sostenibile nel settore edilizio. Alcuni studi si concentrano principalmente sull'energia totale impiegata durante il ciclo di vita degli edifici, con l'obiettivo di identificare le fasi di maggiore utilizzo e spreco dell'energia stessa al fine di sviluppare strategie per la sua riduzione. In effetti, la riduzione al minimo dell'uso di energia è una questione di primaria importanza se si vuole incoraggiare la progettazione di costruzioni che siano sostenibili. Inoltre, negli edifici a basso consumo energetico, l'energia incorporata rappresenta tipicamente una parte significativa del consumo totale di energia. Pertanto, è molto importante prestare attenzione alla scelta dei materiali da costruzione. Il parametro LCA è stato applicato a tre edifici italiani standard, tra cui due edifici residenziali ed un edificio per uffici, includendo tutte le fasi di vita, dalla produzione dei materiali da costruzione, al loro trasporto, montaggio, al loro utilizzo previsto durante la fase operativa, fino alla fine del loro ciclo di vita. I risultati mostrano che la fase operativa ha il maggior contributo per quel che concerne l'impatto ambientale, con valori pari al 77% (per un edificio residenziale) e all'85% (per un edificio adibito ad uffici), mentre l'impatto della fase di costruzione varia da circa il 14% (edificio per uffici) fino al 21% (edificio residenziale).

Quindi, la domanda di energia di un ciclo di vita di un edificio può essere ridotta riducendo significativamente la sua energia operativa attraverso l'uso di tecnologie passive e attive, anche se ciò comporta un aumento di energia incorporata: un uso eccessivo di caratteristiche passive ed attive in un edificio può risultare controproducente. La tecnica LCA è stata utilizzata anche a livello dei materiali: in effetti, la selezione di materiali da costruzione con un alto contenuto di energia incorporata, implica un livello massimo iniziale di consumo di energia nella fase di produzione dell'edificio influenzando, di conseguenza, un consumo energetico futuro al fine di soddisfare la domanda di riscaldamento, ventilazione ed aria

condizionata. La capacità dei materiali da costruzione di influenzare sia il potenziale energetico che quello di riciclaggio degli edifici, è stato studiato per progetti di edilizia ad alta efficienza energetica in Svezia. L'energia incorporata era originariamente stimata in una percentuale del 40% del fabbisogno energetico totale, considerando un ciclo di vita di 50 anni. Era stato dimostrato che tale energia incorporata sarebbe potuta diminuire di circa il 17% o aumentare del 6% solo sostituendo i materiali. La valutazione del ciclo di vita di cinque materiali primari come legno, alluminio, vetro, calcestruzzo e piastrelle in ceramica, è stata condotta in una casa in Scozia, dove è stata effettuata una valutazione dell'energia incorporata e l'impatto ambientale associato. L'energia incorporata di molti materiali da costruzione coinvolti è stata stimata intorno a 227,4 GJ; calcestruzzo, legname e le piastrelle in ceramica sono stati identificati come i materiali coinvolti più costosi con le tre maggiori energie. Il solo calcestruzzo riesce a consumare il 65% dell'energia totale incorporata, con un notevole impatto ambientale.

L'approccio LCA può essere utilizzato anche sui sistemi "tetto". Uno studio ha eseguito un'analisi del costo ambientale del ciclo di vita di un tetto verde rispetto ad uno tradizionale, al fine di analizzare le somiglianze e le differenze nell'ambiente sotto un punto di vista dell'impatto di produzione, del trasporto, dell'installazione, del funzionamento, della manutenzione ed infine dello smaltimento di questi sistemi. Il minor impatto ambientale del tetto "verde" rispetto ad uno tradizionale è stato possibile poiché principalmente collegato alla minore conducibilità termica, grazie alla presenza di vegetazione (albedo maggiore), parametro principale che influenza l'impatto ambientale del sistema di copertura.

Solo pochi recenti studi si sono concentrati sulla valutazione del ciclo di vita dei *cool roof*. Un tetto tradizionale "nero" ed uno "bianco" sono stati utilizzati come caso studio al fine di quantificare l'impatto dell'albedo sul potenziale riscaldamento globale nell'arco di 50/100 anni. L'albedo superficiale è risultato responsabile di una riduzione di CO₂ pari a 110/184 Kg e 131/217 kg, rispettivamente in 50 e 100 anni. Inoltre, è stata registrata una diminuzione di consumo energetico pari a 3,6-4,5 KWh/m² del tetto "bianco" rispetto a quello nero tradizionale. Inoltre, è stato eseguito anche uno studio sulla prestazione igrotermica a lungo termine di un tetto cool a Toronto (ON), Montreal (QC), St. John's (NL), Saskatoon (SK), Seattle (WA), Wilmington (NC) e Phoenix (AZ). I risultati hanno dimostrato che per i climi delle località di St. John's e Saskatoon, i tetti bianchi potrebbero creare dei problemi legati alla formazione di umidità a lungo termine. Tuttavia, per i climi delle località di Toronto, Montreal, Seattle, Wilmington e Phoenix, gli edifici con i tetti bianchi hanno mostrato di avere un basso rischio che si verificano danni da umidità a lungo termine. Infine, sono stati analizzati LCA di diversi rivestimenti naturali e sostenibili

per la realizzazione di tetti caratterizzati da differenti valori di albedo, ad esempio membrana impermeabilizzante in poliuretano, sabbia fine naturale e tegole in argilla bianca. Sia l'impatto ambientale che la valutazione economica, hanno rilevato che la sabbia è il materiale più promettente e sostenibile, da utilizzare come soluzione per la realizzazione di cool roof. Inoltre, la soluzione di tetto rappresentata dall'applicazione di piastrelle in argilla "cool", ha dimostrato di avere il massimo impatto ambientale tra le coperture studiate, nonostante fosse stata realizzata in argilla, un materiale naturale e riciclabile.

Concentrandoci ora sulle prestazioni dei rivestimenti cool durante il corso della loro vita in servizio, bisogna premettere che lo sforzo scientifico finalizzato allo studio delle prestazioni del rivestimento cool si è svolto nell'arco di tempo abbastanza breve di circa 20 anni.

In particolare, diverse ricerche e progetti internazionali portati avanti hanno sottolineato il ruolo degli agenti atmosferici, dello sporco e di eventuali residui, che agiscono negativamente sull'efficacia del rivestimento cool sotto l'esposizione diretta dei raggi solari, identificando gli aspetti chiave che influenzano la durabilità dei rivestimenti cool quando esposti a condizioni ambientali reali. I prodotti inclusi nel database del CRRC (Cool Roof Rating Council) degli Stati Uniti, mostra la loro resistenza agli agenti naturali e all'invecchiamento. Infatti, è stato sviluppato un metodo di invecchiamento riconosciuto a livello internazionale per la simulazione realistica sperimentale dell'esposizione ambientale dei materiali di copertura cool. Infine, rimanendo sempre in questo medesimo ambito, un'importante ricerca ha portato al progetto di studio sperimentale inter-laboratorio con ottimi risultati in termini di ripetibilità e riproducibilità: questi sforzi, hanno prodotto i risultati fondamentali per l'elaborazione di uno standard internazionale come la ASTM D 7897, divenuto il metodo utilizzato in laboratorio per la riproduzione a breve termine dell'invecchiamento dei rivestimenti cool al fine della determinazione della riflettanza solare e dell'emissività termica dei materiali applicati in opera. La prova simula in circa 3 settimane il degrado che un prodotto per roofing subisce naturalmente in 3 anni di esposizione agli agenti atmosferici.

4.2 Obiettivi e fasi della sperimentazione

Il progetto di dottorato ha previsto la sperimentazione in situ attraverso il monitoraggio di due elementi edilizi tra loro complementari: sistemi di isolamento termico e sistemi di rivestimento esterno delle facciate. Entrambi i sistemi sono stati studiati nell'ottica di analizzarne il comportamento dinamico estivo al fine di individuare i componenti edilizi più idonei per la riqualificazione energetica degli edifici. Infatti, come già descritto nelle sezioni precedenti, l'involucro edilizio è composto da una serie stratigrafica di materiali che per la loro natura chimica e per le loro proprietà fisiche determinano il comportamento finale del "pacchetto" parete. Oltre alla necessità di scegliere il prodotto isolante più performante rispetto al contesto climatico in cui l'edificio è ubicato, per il completamento della parete è necessaria l'applicazione di una finitura che sia non solo resistente agli agenti atmosferici, e quindi di protezione agli strati sottostanti, ma anche di contributo al risparmio energetico complessivo.

Come abbiamo dimostrato sperimentalmente nel capitolo precedente (Cap.3 *L'influenza dell'inerzia termica: analisi sperimentale*) l'applicazione di un materiale isolante piuttosto che di un altro può incidere negativamente sul surriscaldamento delle superfici in facciata nel periodo estivo. Per questo motivo lo strato finale di pittura deve essere valutato e scelto con la stessa accortezza e tenendo conto delle necessità e degli obiettivi progettuali che si vogliono raggiungere. Se il fine ultimo è limitare il surriscaldamento delle superfici esterne, in questo caso quelle verticali, occorrerà impiegare *materials cool* in grado di non innalzare in modo significativo la propria temperatura superficiale se esposte direttamente alla radiazione solare. Quindi, i *cool materials* devono essere caratterizzati da una elevata riflettanza solare SR, (elevata capacità di riflettere la radiazione solare incidente sul materiale) e di emittanza termica ε , (elevata capacità di emettere calore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso). L'obiettivo di questo studio sperimentale è quello di valutare gli effettivi benefici che i *cool materials* possono avere una volta applicati su pareti verticali, al posto delle tradizionali vernici per esterni (Fig. 74). L'individuazione e l'uso in larga scala di materiali che abbiano specifiche particolarità tecniche rispetto ai fenomeni e alle problematiche sopra descritte, potrebbero portare nel contesto delle aree urbane ad un indiretto risparmio energetico legato all'alta riflettanza solare. Quest'ultima contribuisce alla riduzione della temperatura superficiale dell'agglomerato abitativo grazie ad un migliore bilancio energetico relativo alle superfici in gioco favorendo la mitigazione dell'effetto di isola di calore urbana. Inoltre, se abbiniamo a questo l'utilizzo di pareti con corrette stratigrafie e il giusto posizionamento dell'isolamento con materiali che rispondano a specifiche condizioni al contorno dinamiche, si potrà ottenere una valida risposta alle

problematiche riguardanti il miglioramento dell'efficienza energetica del nostro patrimonio edilizio.

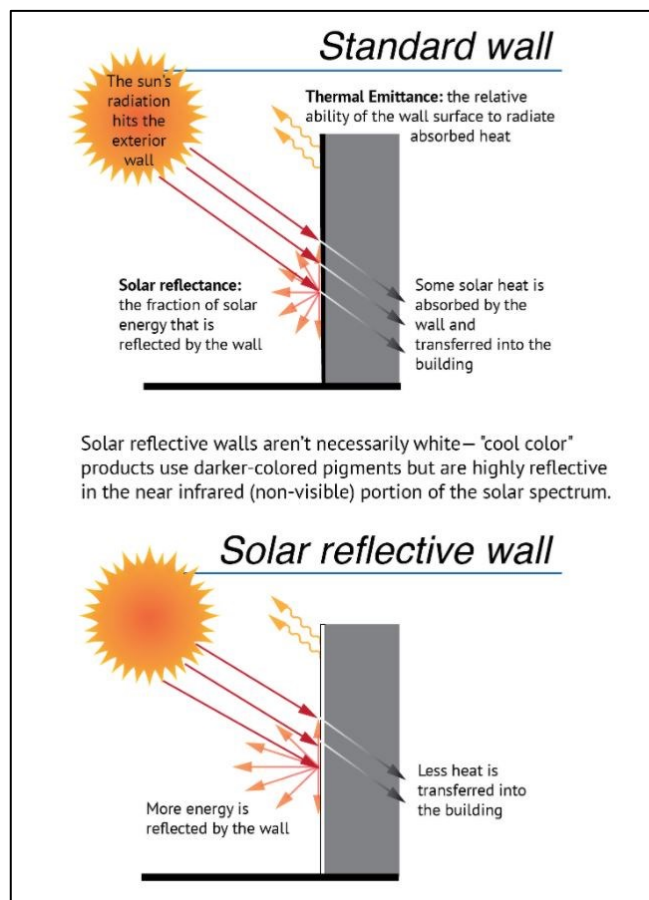


Fig. 74 – Funzionamento di una parete con una pittura per esterni “standard” rispetto ad una parete con una pittura per esterni riflettente.

L'attività sperimentale ha richiesto da una parte un periodo iniziale di analisi degli standard normativi ASTM riguardanti la misurazione in situ dei parametri di riflessione solare (*albedo*), attraverso l'uso di un piranometro impiegato per compiere delle misurazioni sperimentali preliminari, e di studio dei prodotti di rivestimento in commercio. Oltre a queste normative, sono stati analizzati anche gli standard delle prove di laboratorio per la determinazione di questo stesso parametro e di altre proprietà riguardanti la caratterizzazione delle pitture riflettenti come l'emissività nell'infrarosso e gli spettri di riflessione NIR e MIR.

Successivamente si è proseguito con la fase di progettazione e preparazione delle strumentazioni utili all'installazione del monitoraggio, e con la scelta di un mock up sito ad Agugliano (Borgo Ruffini - AN), struttura che per semplicità chiameremo

“serra”, e l’individuazione dei materiali, pitture riflettenti e non, dalle caratteristiche più idonee per essere studiati e monitorati nella fase sperimentale. La sperimentazione ha coinvolto questa struttura in legno, antistante e adiacente ad una casetta in muratura, struttura in legno la cui facciata principale è rivolta a Sud ed è stata tamponata con una serie di quattro pannelli in OSB pitturati con le diverse tipologie di pitture scelte.

Lo studio delle proprietà delle pitture è stato condotto tramite la collocazione delle seguenti strumentazioni:

- DataTaker per l’acquisizione delle informazioni: permette di memorizzare dati in modo automatico su base giornaliera oppure campionati ad un intervallo regolare precedentemente fissato. Ciò permette un’accurata mappatura delle condizioni ambientali che vengono monitorate come ad esempio i parametri esterni meteorologici.
- Termoflussimetri installati sul lato interno dei pannelli (uno per ogni pannello) e collegati al DataTaker.
- Sonde di temperatura installate internamente ed esternamente ai pannelli (due per ogni pannello) e collegate al DataTaker/CEM.

Oltre al posizionamento delle strumentazioni per la misurazione delle temperature superficiali dei pannelli, per ottenere un monitoraggio attento dei flussi termici tra interno ed esterno della parete composta dai 4 pannelli, è stata installata una pompa di calore all’interno della serra in modo da contrastare un surriscaldamento anomalo della temperatura interna dovuta all’esposizione a Sud della parete stessa e mantenere un delta di temperatura significativo tra ambiente interno ed esterno.

Altro fenomeno che è stato oggetto di studio è l’efficacia o meno di sistemi di irrigazione del verde che mitigano l’innalzamento delle temperature superficiali delle facciate verticali tramite l’effetto evaporativo dell’acqua. Per studiare questo fenomeno è stato collocato nell’area di prato antistante la facciata Sud della serra un sistema di irrigazione tramite ugelli che spruzzano acqua in maniera temporizzata e controllata.

Il metodo scelto per la programmazione dei tempi di irrigazione si basa sul controllo di due parametri: l’irradiazione solare globale sull’orizzontale (I_{gh}) e l’umidità relativa ambientale esterna (H.R.%). Il settaggio è stato impostato nel seguente modo:

- Se $I_{gh} > 100 \text{ W/m}^2$ e $H.R. < 90\%$ → irrigazione ON alternando cicli di ON per 1 minuto e di OFF per 10 minuti.

In questo modo nel caso di pioggia (H.R. > 90%) e/o nel caso in cui sia notte o il sole sia coperto causa mal tempo ($I_{gh} < 100 \text{ W/m}^2$) l'irrigazione è in modalità OFF.

4.2.1 Caratterizzazione dei materiali

Il primo passo da compiere prima della progettazione della campagna di misurazioni in campo è la scelta dei prodotti da applicare e studiare. In questo paragrafo saranno descritti i materiali, le materie prime selezionate e le prove di laboratorio condotte per la caratterizzazione preliminare allo scopo di confrontare successivamente i dati di laboratorio con le prestazioni ottenute in opera.

Le misure possibili da effettuare sperimentalmente in situ sono state quattro, tante quanto le aree a nostra disposizione per poter applicare le pitture sulla facciata Sud del mock up di Agugliano.

Per questo motivo la scelta dei prodotti da applicare si è basata sui principi che di seguito elenchiamo:

- Individuazione di una pittura standard di riferimento di colore bianco;
- Scelta di pigmenti bianchi che aumentino le proprietà riflettenti;
- Scelta di cariche e/o pigmenti con proprietà riflettenti;
- Individuazione di tre formulazioni sperimentali di pitture riflettenti da confrontare rispetto a una pittura bianca standard.

Analogamente per quanto avvenuto con il termointonaco impiegato nella sperimentazione sui materiali isolanti, anche in questo caso le pitture impiegate sono state realizzate a partire dallo studio delle singole materie prime che le compongono. Secondo la norma EN 1062 un prodotto verniciante è un prodotto in pasta, liquido o in polvere che, quando applicato su un substrato, forma un film che possiede proprietà decorative e protettive o altre specifiche proprietà. Nel linguaggio comune, i prodotti vernicianti sono detti “vernici” ma tale definizione è tecnicamente errata. Una prima suddivisione può essere fatta a seconda che il prodotto verniciante si presenti trasparente o coprente: in questo modo possiamo classificare i rivestimenti in “vernici” e “pitture”.

La *vernice* si presenta normalmente come un liquido trasparente o semitrasparente incolore o colorato che una volta applicato su una superficie in uno strato sottile, forma un film attraverso un processo fisico o chimico-fisico; tale film lascia intravedere il supporto senza alterare le sue caratteristiche esteriori. Le vernici sono principalmente costituite da resine naturali o sintetiche disciolte o disperse in un veicolo, che può essere acqua o solvente. Il loro campo d'impiego è soprattutto rivolto alla protezione del legno, con applicazioni anche su metalli, pietre naturali, laterizi.

Le pitture sono prodotti vernicianti che oltre all'elemento filmogeno (resina in grado di formare un film) contengono anche i pigmenti e le cariche, le quali conferiscono al prodotto la proprietà di mascherare il supporto su cui viene applicato, modificandone l'estetica. Le pitture vengono impiegate principalmente sulle superfici murali, sui serramenti in legno e per la protezione del metallo.

In generale, una formulazione di un prodotto verniciante è data dai seguenti componenti:

1. Leganti
2. Pigmenti
3. Cariche ed extenders
4. Additivi
5. Diluenti (acqua o solventi).

1. Leganti

I leganti sono costituiti principalmente da resine in dispersione acquosa (o in soluzione di solventi) che da uno stato liquido passano a quello solido durante il processo di essiccazione, cioè dell'evaporazione del veicolo liquido. Il legante deve assolvere alle seguenti proprietà:

- Assicurare l'adesione del prodotto verniciante al supporto sul quale viene applicato;
- Legare i pigmenti e le cariche;
- Conferire specifiche proprietà al prodotto (elasticità, crack bridging, resistenza all'abrasione, ecc);
- Fornire un'adeguata durata nel tempo del prodotto verniciante.

I leganti possono essere classificati in vari modi, ad esempio in base al meccanismo di filmazione, alla natura chimica del solvente o in base alla natura chimica della resina stessa. In relazione al meccanismo di essiccazione e filmazione i leganti possono essere così suddivisi:

- a. Filmazione fisica;
- b. Filmazione ossidativa;
- c. Filmazione chimica.

I prodotti che tratteremo sono pitture con leganti a filmazione fisica. Questo tipo di leganti sono utilizzati principalmente nelle idropitture, smalti, impregnati e fissativi murali all'acqua e al solvente. Se i prodotti sono a base solvente, il processo è di semplice evaporazione del solvente, senza ulteriori processi chimici o fisici. Se al

contrario, come nel nostro caso, i prodotti sono a base acqua, oltre all'evaporazione vi è il fenomeno della coalescenza (Fig. 75).

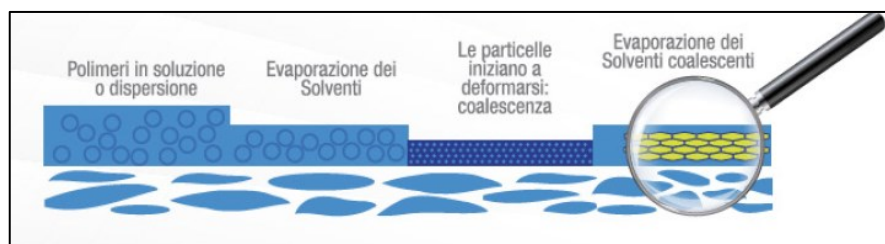


Fig. 75 – Prodotti a base acqua: fenomeno della coalescenza durante la formazione del film secco.

Praticamente mentre l'acqua comincia ad evaporare, le particelle di resina tendono ad avvicinarsi le une alle altre. La tensione superficiale nel liquido rimasto fra le particelle adiacenti aumenta, inizia quindi un processo di modifica strutturale della superficie delle particelle stesse che vengono spinte sempre più le une contro le altre fino a che si incastrano completamente. Essendo la coalescenza un fenomeno essenzialmente fisico, l'acqua non riesce più a separare le particelle una volta che si sono saldate: il processo di essiccazione per coalescenza è quindi irreversibile.

I *prodotti a base acqua* sono i più utilizzati nel campo dei prodotti vernicianti per superfici murali e, come appena detto, il loro meccanismo di essiccazione è principalmente di tipo fisico.

I vantaggi di questo tipo di prodotti sono:

- Sono diluibili con acqua;
- Consentono una facile pulizia degli utensili;
- Essiccano rapidamente;
- Sono ininfiammabili;
- Sono applicabili su supporti di diversa natura;
- Emettono poco odore durante l'essiccazione;
- Sono facili da applicare;
- Sono molto meno pericolosi per l'uomo e per l'ambiente.

Gli svantaggi sono:

- Sono molto sensibili alle condizioni ambientali in applicazione: ad esempio per temperature sotto 5°C o sopra 35°C e umidità relativa dell'aria superiore a 80%;
- In genere hanno un inferiore potere di penetrazione del supporto rispetto ai prodotti a solvente;

- Necessità di conservare gli imballi al riparo dal gelo o da agenti atmosferici.

I leganti all'acqua si possono principalmente dividere in due categorie:

- a. Leganti organici;
- b. Leganti inorganici (minerali).

Le pitture sviluppate sono tutte a base acqua con leganti organici: definiamo meglio cosa sono i leganti organici.

I leganti organici sono polimeri o copolimeri in emulsione acquosa, essiccano per coalescenza, ossia per fusione delle particelle di polimero conseguente all'evaporazione dell'acqua. A film essiccato le molecole del legante sono unite da forze di attrazione chimico-fisiche e da legami chimici.

Le più comuni tipologie di leganti sono:

- **Acriliche**: combinazione di esteri dell'acido acrilico e metacrilico con alcoli quali metanolo, butanolo o alcoli più complessi;
- **Viniliche**: sono rappresentate dall'omopolimero (acetato di polivinile) o derivati dalla combinazione tra l'estere vinilico con monomeri quali il versatico, cloruro o etilene;
- **Stirol-acriliche**: derivate dalla combinazione dello stirene con l'acido acrilico;
- **Silossaniche**: derivati dalla chimica del silicio, modificate con componenti organiche nella fase di polimerizzazione.

I leganti utilizzati nelle formulazioni sia delle pitture riflettenti che in quelle tradizionali sono resine acriliche.

La grande diffusione delle resine acriliche è dovuta sia alla loro versatilità che alle eccezionali caratteristiche di resistenza agli agenti chimici, alle radiazioni UV e all'acqua, superiore a quella delle resine alchidiche, per cui sono ampiamente usate dal settore automobilistico a quello degli elettrodomestici. Tale inerzia chimica è connessa sia con la stabilità della catena polimerica a base di legami C-C sia con la struttura specifica acrilica o metacrilica. Spesso le resine acriliche contengono quantità variabili (fino ad un massimo del 25%) di comonomeri contenenti funzioni reattive aventi lo scopo sia di migliorare l'adesione sul substrato che di permettere di reticolare il film della vernice dopo l'applicazione.

Le resine acriliche si possono suddividere in due grandi categorie: termoplastiche e termoindurenti.

Nella sperimentazione portata avanti sono state impiegate resine acriliche termoplastiche. Sono generalmente impiegate in soluzione e seccano all'aria per

semplice evaporazione del solvente. Si impiegano in genere prodotti a base di copolimeri con metilmetacrilato con peso molecolare variabile da 0,5 a 1 - 105. I prodotti a più basso peso molecolare resistono meno all'invecchiamento, quelli a più alto peso molecolare presentano problemi di applicazione a causa dell'elevata viscosità delle soluzioni. Il polimero può essere additivato di un plastificante, oppure, più spesso, si ricorre ad una plastificazione interna con un comonomero avente Tg (temperatura di transizione vetrosa) più bassa. Spesso si introduce anche un terzo monomero per migliorare le proprietà meccaniche. La terna di monomeri più impiegati è costituita da: metacrilato di metile, acrilato di etile e metacrilato di etile. Il loro difetto è costituito dalla elevata viscosità e quindi dal basso contenuto in solido e basso potere coprente dei prodotti pigmentati ma hanno trovato largo impiego per le superiori caratteristiche di durezza, brillantezza, ritenzione del colore e resistenza all'invecchiamento rispetto ad altre resine.

Nel formulare o nell'utilizzare le pitture all'acqua occorre considerare tre cose:

- perché l'acqua si comporta come un solvente,
- cosa rende le pitture solubili o disperdibili in acqua,
- quali sono le caratteristiche di una pittura all'acqua.

L'acqua ha molti vantaggi: è economica, facilmente reperibile, non tossica, non infiammabile. Di contro ha i seguenti svantaggi: le vernici essiccate hanno tendenza a rimanere sensibili all'acqua e l'umidità influenza la loro essiccazione. In condizioni di forte umidità l'essiccazione è ovviamente rallentata, e viceversa in condizioni di scarsa umidità l'essiccazione è più veloce ed è causa di deformazioni nel film.

La molecola d'acqua è molto polare, in grado di sciogliere polimeri derivanti da monomeri polari come l'alcool vinilico, l'acido acrilico, ecc. La salificazione dei gruppi acidi mediante ammina aumenta la polarità del polimero e quindi la loro solubilità in acqua. Se i monomeri polari non sono contenuti in quantità sufficiente nella resina per conferire la necessaria polarità per la sua solubilità, le resine sono disperse in acqua ed in genere possiedono, a causa della buona polarità, un buon bagnamento dei pigmenti ed ancoraggio sulla superficie da verniciare.

Per agire come precursori di film, le pitture all'acqua devono formare film coerenti, esenti da "vuoti" e aderenti alla superficie. Le soluzioni acquose di polimeri facilmente formano film per semplice evaporazione dell'acqua. Il processo di formazione ed essiccamento del film sono più difficoltosi per le pitture in emulsione e dispersioni colloidali che per quelle in soluzione.

Inizialmente l'essiccazione è controllata dalla diffusione dell'acqua in fase vapore e dipende quindi dall'umidità relativa dell'ambiente. Man mano che questa fase si completa, le particelle del polimero, i pigmenti e gli altri componenti della pittura vengono a contatto tra loro. Per formare un film continuo le particelle del polimero devono deformarsi dalla loro forma sferica, coalescere ed avvolgere le particelle del pigmento.

Perché questo avvenga il polimero deve deformarsi facilmente, questo dipende dalla sua viscosità intrinseca, in particolare al momento del *processo di coalescenza*, e quindi dalla formulazione iniziale della pittura, ed in particolare se sono o non presenti solventi coalescenti. Poiché sia la viscosità del polimero, sia l'efficacia dei solventi sono temperatura dipendenti, ne consegue che la filmazione delle emulsioni è funzione della temperatura e che vi è una temperatura minima (*MFFT Minimum film formation temperature*) a cui avviene la formazione del film, sotto la quale le particelle del polimero non coalescono e non inglobano il pigmento.

Si può assumere con buona approssimazione che la MFFT si approssimi alla Tg del polimero. I fattori che riducono la Tg riducono anche la MFFT, ad esempio l'inclusione di monomeri con Tg basse nel polimero. Occorre però tenere sempre presente che mentre la Tg è una proprietà del polimero e dell'eventuale plastificante, la MFFT è una proprietà dell'intera formulazione.

La MFFT viene determinata applicando la vernice su una lastra di metallo che può essere gradualmente riscaldata o raffreddata per la sua lunghezza. La vernice è lasciata essiccare ed il film è ispezionato. La temperatura della zona della lastra in cui il film di vernice inizia ad essere regolare è determinata come MFFT.

Per motivi di riservatezza non saranno menzionati i nomi commerciali delle resine impiegate ma saranno indicate in modo generico come tipo 1, 2 e così via.

Resina tipo R1

L'emulsione acrilica R1 è stata progettata per la formulazione di prodotti ecologici, a basso odore e quindi idonea anche per pitture per pareti interne. Ha un'eccezionale capacità di legare i pigmenti che consente la formulazione di pitture lisce ad alta concentrazione di volume di pigmento mantenendo una buona resistenza allo sfregamento.

Pertanto, R1 può essere formulato in modo economico in pitture lisce prive di solventi rispetto ad altre tecnologie.

Le pitture murali ad alto contenuto di PVC, *Pigment Volume Concentration*, formulate con R1 mostrano una resistenza eccellente allo sfregamento ad umido dei pigmenti, particolarmente osservabile nei toni profondi, che lo distinguono

ulteriormente da altri prodotti privi di solventi e consentono la formulazione di rivestimenti altamente performanti.

Inoltre, consente la produzione di pitture con buona resistenza alla presa di sporco. La sua composizione completamente acrilica ne consente l'uso in rivestimenti esterni per supporti minerali come muratura e legno.

Proprietà ambientali:

- Formazione di film senza la necessità di coalescenti e solventi;
- Privo di ammoniacca;
- Privo di formaldeide;
- Esente da alchil fenolo etossilato;
- Bassi livelli di monomero residuo e basso odore;

Caratteristiche del prodotto:

- Elevata capacità di legare i pigmenti (bagnabilità);
- Eccellente stabilità meccanica in condizioni di forze di taglio elevate durante la miscelazione;
- Eccellente resistenza allo sfregamento;
- Facile rimozione delle macchie;
- Durabilità agli agenti esterni.

Typical physical properties (not to be used as specifications)	
Solids content %	50 - 51
pH	8,0 – 9,0
Brookfield LV viscosity (spindle 3, 60 rpm)	< 500 mPa * s
Minimum film formation temperature	1°C

Tabella 25 – Principali caratteristiche della resina acrilica R1.

Resina tipo R2

La resina R2 è composta da emulsioni viniliche, stirolo-acriliche e acriliche a base di tensioattivi privi di APEO. Una formulazione che impiega una resina acrilica pura che conferisce un'elevata resistenza ai raggi UV e proprietà non ingiallenti. Utilizzando monomeri e tecnologie speciali, gli acrilici offrono un alto livello di prestazioni, inclusa l'adesione a umido e la resistenza alle macchie per applicazioni impegnative come rivestimenti isolanti per pareti e legno, primer e pitture per facciate. Eccellente capacità di formazione di un film continuo e ottimo potere

legante dei pigmenti per pitture ad alto contenuto di PVC e rivestimenti per esterni. Privo di rilascio di formaldeide e ammoniaca.

Chemistry	Solids (%)	Typical viscosity mPas	MFFT (°C)	pH
Acrylic	50	100	< 5	8 - 9

Tabella 26 – Principali caratteristiche della resina acrilica R2.

Resina tipo R3

La resina R3 è caratterizzata da un elevato contenuto di solido ed è compatibile con lattici acrilici per formulazioni cementizie. Questo prodotto è privo di agenti coalescenti, plastificanti e tensioattivi. Prodotto ideale per la formulazione con il cemento Portland e di altri sistemi a base di leganti idraulici.

Le applicazioni suggerite sono impermeabilizzazioni elastomeriche bicomponenti e membrane cementizie con funzione di barriera agli agenti atmosferici, boiacche sigillanti e di incollaggio nonché adesivi per piastrelle ceramiche resistenti all'acqua e flessibili. Può anche essere utilizzato nella formulazione di membrane impermeabilizzanti monocomponenti, rivestimenti elastomerici per tetti ed emulsioni bituminose liquide.

Caratteristiche del prodotto:

- Eccellente resistenza all'acqua, ai prodotti chimici e agli alcali;
- Buona adesione su supporti minerali;
- Flessibilità alle basse temperature (-20 ° C).

Polymer type	Acrylic copolymer	
Sales specifications	Solids content at 105°C, % (ISO 3251)	50 - 51
	pH (ISO 976)	6,0 – 8,0
	Viscosity at 23°C, mPa*s (Brookfield RVT, spindle 3, 60 rpm) (ISO 2555)	500 - 3500
Other characteristics	Stabilizing system	A / NI
	Minimum film formation temperature, °C (ISO 2115)	< 1

	Tg (DSC), °C	-21
	Density / specific gravity at 23°C, g/ml (ISO 2811)	1,00
	Average particle size, nm (ISO 13321)	300

Tabella 27 – Principali caratteristiche della resina acrilica R3.

Nei successivi paragrafi verranno indicati gli impieghi specifici delle singole resine impiegate nelle formulazioni delle pitture standard e riflettenti oggetto della sperimentazione.

Resina tipo R4

La resina R4 è un polimero acrilico caratterizzato da un'eccellente brillantezza e adesione. La tecnologia di questo particolare tipo di resine fornisce un'eccezionale *block resistance* e un'eccezionale durezza del film con valori di VOC nulli o molto bassi. La *block resistance* è la capacità di una pittura, di una pellicola o di un involucro di evitare un'adesione dannosa tra due superfici, di non aderire a se stessa o ad un'altra superficie al contatto quando viene applicata una pressione.

I suoi vantaggi includono un'eccezionale resistenza alla raccolta dello sporco, un'eccellente resistenza allo sfregamento ed emette bassissimo odore poiché è privo di ammoniaca. Viene utilizzato come polimero strutturato nanoacrilico per la formulazione di rivestimenti da satinati a lucidi, con gloss molto elevato.

Typical physical properties (not to be used as specifications)	
Total Solids content % by weight	49
pH	7,0
Weight per Gallon, lb	8,9
Viscosity, cP	< 500
Minimum film formation temperature	0°C

Tabella 28 – Principali caratteristiche della resina acrilica R4.

2. Pigmenti

I pigmenti sono generalmente prodotti solidi impiegati in forma di polvere di opportuna granulometria, la cui funzione è duplice: colorare e conferire capacità coprente ai prodotti vernicianti in modo da nascondere il substrato su cui il sistema è applicato. Possono essere usati da soli o in miscela fra di loro e vengono aggiunti in questa fase, poiché essendo composti da particelle relativamente grandi debbono essere dispersi finemente affinché possano esercitare al massimo il loro potere coprente. Sono composti organici o inorganici, insolubili (ossidi, cromati, ferrocianuri, ftalocianine, toluidine, azoici, ecc). I pigmenti inorganici offrono solitamente ottime prestazioni, si disperdono con maggiore facilità, sono veramente insolubili. I pigmenti organici, invece, si lasciano preferire per la gamma estesissima di tonalità e per la nitidezza del colore. Tutti i pigmenti, sia organici che inorganici, sono sempre presenti come fase dispersa (eccezion fatta per le finiture trasparenti). Da un punto di vista fisico, la particella di pigmento dispersa nel film di prodotto essiccato rappresenta un punto di discontinuità del film stesso, e quindi ne indebolisce le caratteristiche di resistenza, sia meccaniche che chimiche. Esiste, anzi, una concentrazione critica di pigmento (CPVC, *Critical Pigment Volume Concentration*) al di là della quale il film perde completamente la sua continuità con un decadimento drastico di tutte le sue caratteristiche.

Un pigmento è tanto più pregiato quanto maggiore è la sua resistenza alla luce. Naturalmente il costo varia in proporzione, e a volte raggiunge livelli proibitivi, centinaia di volte superiore alla media. La scelta di un pigmento, quindi, passa per la ricerca di un equilibrio ottimale tra colore, sua conservazione nel tempo, coprenza, costo e assorbimento d'olio.

Tornando al colore, questo è il risultato dell'assorbimento selettivo della luce visibile, nel senso che i pigmenti restituiscono l'energia non assorbita. Ne deriva che i bianchi non assorbono quasi energia mentre i neri non ne restituiscono che in minima parte; i gialli invece che assorbono radiazioni luminose blu, restituiscono una luce che esclude le radiazioni blu, quindi assumerà il colore ad esso complementare, cioè il giallo (colore finale visibile).

Il potere coprente dipende dalla quantità di luce che il pigmento lascia passare; esso aumenta più le particelle sono piccole se però non si superi il limite inferiore di 0,2 micron. Inoltre, esso aumenta proporzionalmente alla quantità di pigmento presente nella formulazione, fino ad un limite superiore, che non si può valicare per non rendere difficoltosa la miscelazione e l'applicazione del prodotto.

Come abbiamo detto, i pigmenti possono essere di natura minerale, cioè inorganici, od organica.

I pigmenti che sono stati utilizzati nella nostra sperimentazione sono tutti di natura inorganica. Sono reperibili in natura come le terre colorate, oppure si possono riprodurre sinteticamente in laboratorio, possono essere ossidi metallici come ferro o nichel oppure molecole costituite da materiali differenti. I principali pigmenti inorganici utilizzati sono:

- BIANCHI:
 - Ossido di titanio anatasio (non resiste all'esterno, sfarina),
 - Ossido di titanio (rutilio, resiste all'esterno),
 - Bianco di zinco, ovvero ossido di zinco.
- NERI:
 - Ossidi di ferro
- COLORATI:
 - Giallo (nichel-titanio, bismunto-vanadato, ossidi di ferro),
 - Blu oltremare (silicato complesso di alluminio),
 - Rossi (ossidi di ferro).

Sempre nel campo dei pigmenti inorganici rientrano le cosiddette terre naturali. A questa categoria appartengono le numerose ocre, gialle o rosse, estremamente stabili e resistenti alla luce. Alle terre naturali appartengono anche alcuni composti chimicamente diversi, come silicati o miscele di ossidi ed idrossidi.

Il processo di dispersione dei pigmenti ma anche delle cariche, che tratteremo nel dettaglio nel paragrafo successivo, è molto importante per ottenere un prodotto verniciante con proprietà ottimali. La macchina più comunemente usata è un miscelatore ad alta velocità.

Durante la dispersione avvengono parecchi processi: la bagnatura della superficie delle particelle solide da parte dei fluidi; l'eliminazione dell'aria negli agglomerati dei pigmenti; la disgregazione meccanica delle particelle associate e la stabilizzazione delle particelle più piccole che si sono formate per prevenire la flocculazione.

Il miscelatore ad alta velocità (Fig. 76) deve avere alcune caratteristiche:

- Il diametro della girante (elica) deve essere di un terzo rispetto al diametro del contenitore.
- L'altezza della girante dal fondo del contenitore deve essere un mezzo del diametro della girante.
- L'altezza dell'impasto deve essere al massimo due volte il diametro della girante.

- Il numero dei giri della girante deve essere scelto in base al diametro della stessa: la velocità periferica, a seconda della formulazione, deve essere compresa fra 13 m/sec e 30 m/sec.

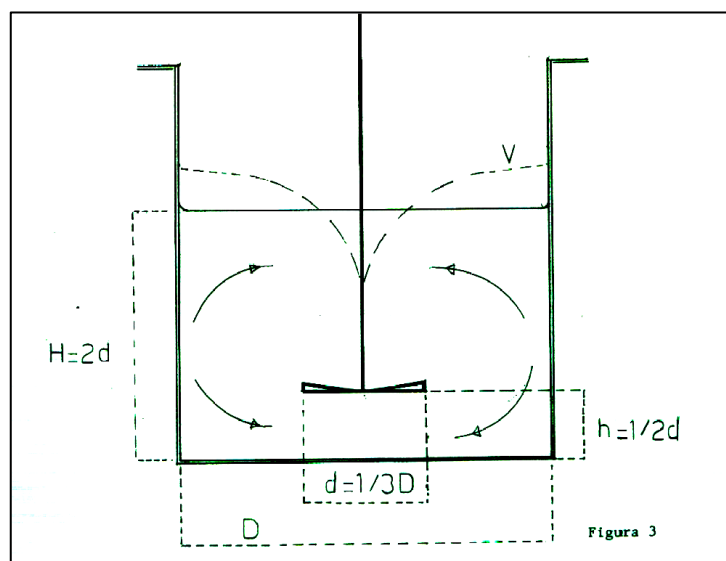


Fig. 76 – Caratteristiche del miscelatore ad alta velocità da impiegare nella formulazione di prodotti vernicianti per una dispersione ottimale dei pigmenti e delle cariche.

Poiché la raffinazione maggiore delle particelle si ottiene fra i 15 e 30 minuti di dispersione, si può capire perché si dice che ogni prodotto è figlio della macchina che lo ha generato e perché ogni miscela necessita di un accurato collaudo e, se il caso, di opportuni aggiustamenti. Essi possono consistere nella regolazione del pH, della viscosità e nell'eliminazione dell'aria. Il pieno effetto di questi agenti si raggiunge nel corso delle 12 ore successive. Per motivi di riservatezza non saranno menzionati i nomi commerciali dei pigmenti impiegati ma saranno indicate in modo generico come tipo 1, 2 e così via, differenziando tra tradizionali e riflettenti e per tipologia di pigmento (natura chimica).

PIGMENTI TRADIZIONALI

Titanio tipo T1 e T2

Il pigmento di biossido di titanio (formula chimica TiO_2) è un pigmento bianco inorganico che può essere impiegato in una vasta gamma di usi finali. L'uso più comune è nei rivestimenti e nelle plastiche, rappresentando oltre l'80% del consumo globale. In commercio i produttori offrono una vasta gamma di pigmenti di biossido

di titanio che variano principalmente per il grado di purezza/contenuto della materia prima espresso in percentuale %. Il titanio di **tipo T1** è un pigmento di biossido di titanio rutilo che offre una brillantezza eccezionale, un'elevata forza colorante e opacità sia nelle finiture lisce a base acqua sia a base di solvente.

Di seguito è riportata la tabella (Tab.29) con le principali caratteristiche tecniche del pigmento.

Application	Flat architectural coatings, solvent and water based coatings, low gloss flexographic inks.
Typical physical properties	
TiO ₂ content %	87
Density:	
Specific gravity	3,7
Bulk	0,6 kg/L or 37 lbs/cu.ft.
Oil absorption	37
pH	8,0
Specific resistance, Kohms-cm	7
Average particle size, μm	0,21
Specification:	
ASTM D476	Type III
ISO 591-1:2000	R3

Tabella 29 – Principali caratteristiche del biossido di titanio tipo T1.

Il titanio di **tipo T2** è un pigmento di biossido di titanio rutilo con un'ottima durevolezza e progettato per fornire un'eccezionale resistenza al gesso e all'ingiallimento, nonché alla ritenzione del colore e della brillantezza nelle applicazioni esterne.

Oltre alle sue ottimali caratteristiche di resistenza agli agenti atmosferici, offre un'elevata brillantezza, un'eccellente potere opacizzante e un'eccezionale disperdibilità. In particolare, è consigliato per l'uso in applicazioni di rivestimenti e materie plastiche dove è richiesta la durevolezza esterna.

Di seguito è riportata la tabella (Tab.30) con le principali caratteristiche tecniche del pigmento.

Application	Automotive topcoat, high performance industrial maintenance coatings, coil coatings, aerospace coatings, marine coatings, powder coatings, vinyl coatings, vinyl fencing.
Typical physical properties	
TiO ₂ content %	91
Density:	
Specific gravity	4,0
Bulk	0,8 kg/L or 50 lbs/cu.ft.
Oil absorption	19
pH	7,5
Specific resistance, Kohms-cm	7
Average particle size, µm	0,23
Specification:	
ASTM D476	Type IV, V, VI
ISO 591-1:2000	R2

Tabella 30 – Principali caratteristiche del biossido di titanio tipo T2.

PIGMENTI RIFLETTENTI

Pigmento di alluminio A1

Il pigmento innovativo utilizzato nella sperimentazione è un prodotto progettato per contribuire a ridurre il consumo energetico degli edifici utilizzandolo nelle formulazioni delle normali pitture sia da interno che da esterno. È un pigmento di alluminio rivestito in modo tale da ridurre drasticamente l'effetto metallico ed il tipico colore, permettendo la realizzazione di molteplici colori senza perdere le sue proprietà riflettenti. L'impiego di questo pigmento riflettente, così come riportato da scheda tecnica del produttore, è duplice:

- **Efficienza nel comfort interno:** riflette il calore verso l'interno della stanza riducendo l'energia emessa dal corpo umano per lo scambio di calore, in questo modo migliora la sensazione di comfort termico invernale;
- **Efficienza nelle emissioni:** se applicato all'esterno riduce l'emissione del calore agendo sulla riduzione dell'acqua di condensa che si forma superficialmente a causa dell'elevata fluttuazione delle temperature superficiali giornaliere e, di conseguenza, riduce la formazione e la crescita di alghe e muffe sulle facciate.

Di seguito sono riportati degli schemi esemplificativi sul funzionamento che questi pigmenti riflettenti dovrebbero avere all'interno di una pittura (Fig. 77 e 78)

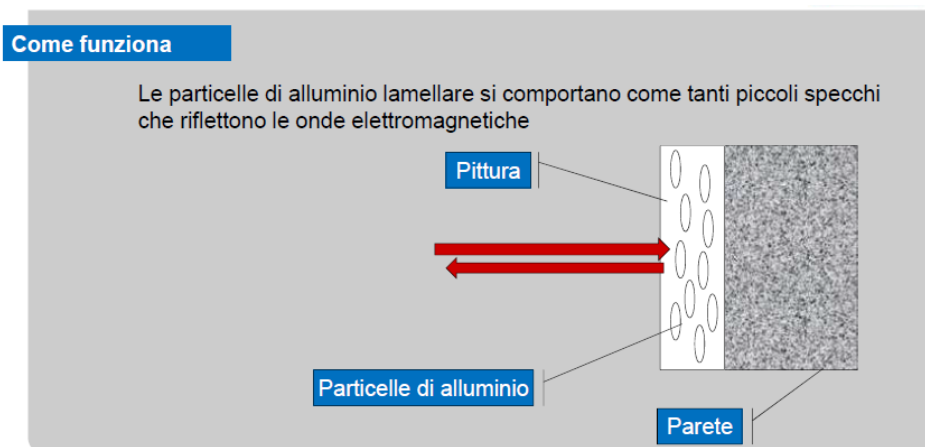


Figura 77 – Comportamento riflettente delle particelle di alluminio.

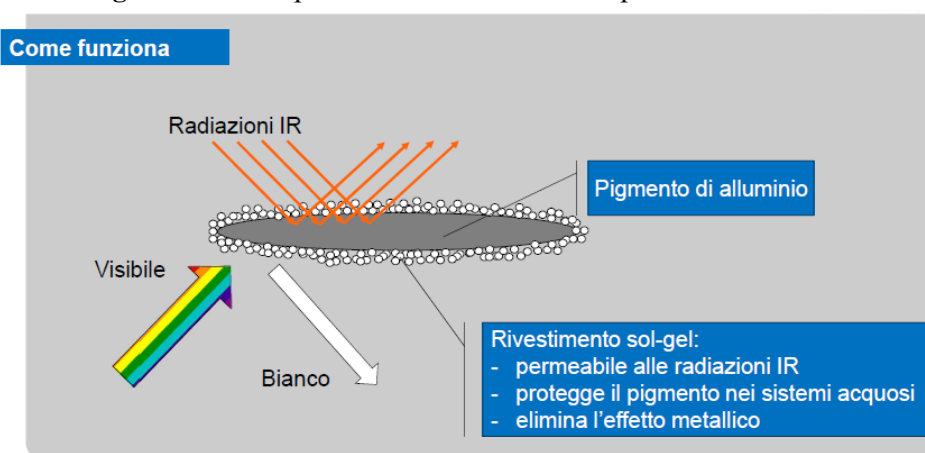


Figura 78 – Rivestimento in sol-gel della particella di alluminio.

Gli studi sperimentali condotti dall'azienda produttrice del pigmento in alluminio dimostrano una migliore performance delle pitture che inglobano il pigmento rispetto a una tradizionale pittura bianca. La pittura in alluminio applicata su diverse tipologie di substrato, più o meno rugoso, ottiene valori di riflessione migliori (curve in rosso, verde e blu) rispetto a una pittura bianca tradizionale (curva in grigio). Di seguito è riportato il grafico dello spettro di riflessione MIR condotto sulle pitture (Fig. 79).

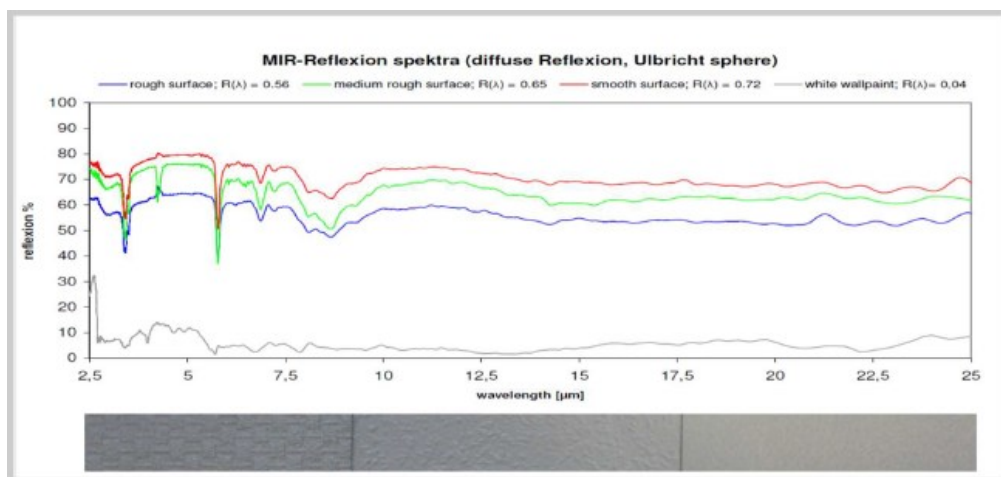


Figura 79 – Grafici dello spettro di riflessione nella zona di infrarosso MIR: le curve in rosso, verde e blu rappresentano l’andamento di una pittura in alluminio, applicata su tre tipologie di supporto più o meno liscio, rispetto a ad una tradizionale bianca, curva in grigio.

Infine, riportiamo la curva granulometrica del pigmento utilizzato che si presenta come una polvere molto sottile di colore grigio chiaro ed inodore (Tab. 31).

Typical properties	
TI00288 D10	20,0 – 28,0 µm
TI00288 D50	44,0 – 54,0 µm
TI00288 D90	70,0 – 84,0 µm
Total shelf life in month: 24	

Tabella 31 – Curva granulometrica particelle di alluminio: passante al setaccio D10, 50, 90.

3. Cariche ed extenders

Le cariche sono costituite da prodotti meno costosi dei pigmenti e permettono di migliorare le caratteristiche estetiche e reologiche del sistema e/o di ridurre la quantità necessaria di pigmento. Spesso presenti, non impartiscono né colore né coprenza, e costituiscono la parte più povera della formula. Nei fondi, negli stucchi e talvolta nelle finiture, svolgono un’importante funzione di “riempimento” e facilitano le operazioni di livellamento e di carteggiatura.

Riallacciandoci al discorso fatto nel paragrafo dedicato ai pigmenti, a differenza di quest’ultimi, non hanno un potere colorante e sono caratterizzati da dimensioni variabili che vanno da 1 a 5 micron con punte anche più elevate.

Le funzioni che le cariche svolgono in un prodotto verniciante sono le seguenti:

- a) Impartiscono opacità;
- b) Aumentano la permeabilità al vapore acqueo del film;
- c) Facilitano la carteggiatura degli stucchi;
- d) Impediscono la formazione in barattolo di sedimenti duri;
- e) Migliorano la resistenza all'esterno;
- f) Favoriscono una migliore distribuzione delle particelle di pigmento aumentandone il potere coprente (funzione degli Extender);
- g) Riducono il costo formula del prodotto.

Le loro caratteristiche determinano le proprietà fisiche, meccaniche, gli spessori, il riempimento e l'aspetto superficiale di una pittura o rivestimento. Le cariche più frequentemente impiegate sono le seguenti riportate in tabella (Tab. 32): si tratta di cariche inorganiche tradizionali che non hanno specifiche proprietà di riflessione a differenza di altre che descriveremo sempre in questa sezione.

CARBONATO DI CALCIO	È il prodotto più antico usato come carica minerale, è insolubile in acqua e inerte alla maggior parte dei veicoli oleoresinosi, ma è sensibile agli acidi diluiti. Il carbonato di calcio si trova in natura sotto diverse forme: calcite, marmo, bianco Meudon, ecc.
BARITE	È solfato di bario, è una delle cariche chimicamente inerti per eccellenza, con alto peso specifico (circa 4 kg/l).
TALCO	È un silicato di magnesio di forma lamellare, è una delle cariche più tenere tra tutte quelle utilizzate. Ha una buona resistenza agli agenti chimici e aumenta la plasticità dei prodotti.
CAOLINO	È un silicato di alluminio, in combinazione con l'ossido di titanio aumenta il potere coprente nei prodotti vernicianti.
OSSIDO DI SILICIO	È una carica inerte, trasparente, principalmente utilizzata sotto forma di quarzo per conferire riempimento e doti di durezza.
MICA	È un silicato di alluminio e potassio, di forma lamellare, molto utilizzata nei prodotti per esterno per la sua resistenza agli agenti atmosferici.

FELDSPATO	Chimicamente è un silicato di alluminio e sodio, è impiegato nel settore dei prodotti vernicianti in sostituzione delle farine fossili per la sua elevata resistenza agli agenti atmosferici.
------------------	---

Tabella 32 – Principali tipologie di cariche ed extenders inorganici

CARICHE TRADIZIONALI

Quarzo K1

Il quarzo è il terzo minerale in ordine di abbondanza fra i costituenti della litosfera, infatti è circa il 12% di tutte le rocce. Si presenta di dimensioni estremamente varie dai cristallini microsferici fino ai grossi cristalli ed alle masse compatte. Impurezze a parte, è costituito principalmente da Biossido di Silicio SiO_2 . In generale l'uso di polvere di quarzo in varie granulometrie è dovuto alla sua grande compattezza ed alla sua inerzia a reagire. Il quarzo ventilato, in particolare, è utilizzato nella preparazione di smalti, cavi elettrici, fibre di vetro, colorifici, detergenti in polvere e liquidi e molto altro ancora.

Di seguito sono riportate le tabelle (Tab.33 e 34) con le principali caratteristiche tecniche di questo pigmento.

Typical physical properties	
Colore - Appearance	Bianco - white
Punto di bianco R457 – white point	83%
Punto di assorbimento olio – place Oil absorption	20%
Superficie specifica – specific surface	0,38 m^2/gr
Densità apparente – bulk density	1,20 ton/mc
Densità assoluta – absolute density	2,60 ton/mc
pH	8
Durezza - hardness	7,0 Mohs

Tabella 33 – Principali caratteristiche fisiche del quarzo K1.

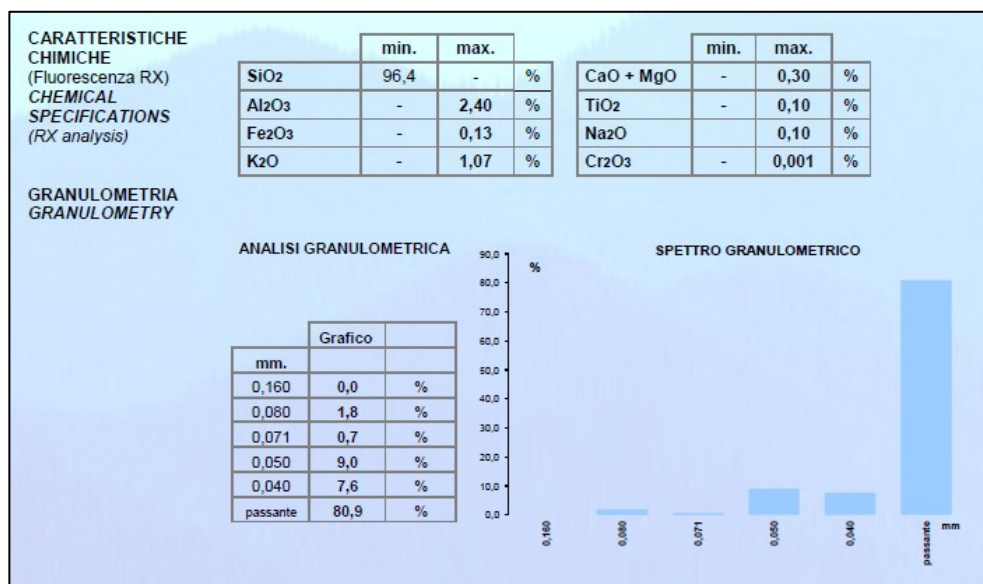


Tabella 34 – Principali caratteristiche chimiche e curva granulometrica del quarzo K1.

Talco K4

Esistono alcuni silicati naturali detti a struttura lamellare la cui composizione è del tipo seguente: sul piano esiste uno strato infinito di gruppi SiO₄ ad anello esagonale con gli OH⁻ al centro dell'esagono ed i vertici fuori dal piano del disegno; se due piani del genere si confrontano negli interstizi si possono inserire cationi diversi (Al⁺³, Mg⁺²) formando strutture a tre piani (Fig.80). Nel Talco tutti gli interstizi sono occupati da Mg, formando aggregati lamellari, facilmente sfaldabili, non attaccabili dagli acidi.

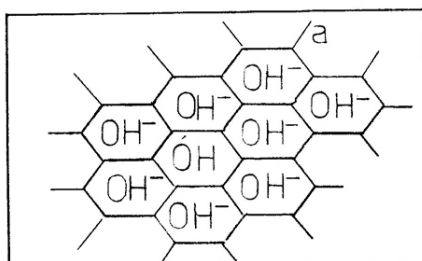


FIG. 7/A : Struttura Planare

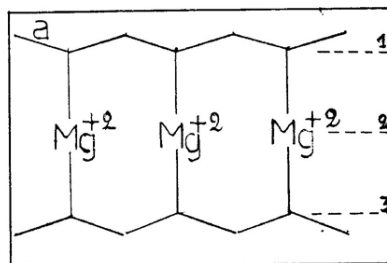


FIG. 7/B:Struttura a tre strati

Figura 80 – Schema delle possibili strutture dei silicati naturali.

Di seguito la tabella riassuntiva dei dati tecnici del talco impiegato nelle formulazioni sperimentali (Tab.35).

Typical physical properties	
Density (DIN 53193)	2,8 g/cm ³
Bulk density (MI 93003)	0,28 g/cm ³
Tapped density (MI 93003)	0,40 g/cm ³
Specific surface (BET) (DIN 66131/2)	8 m ² /g
Hardness (Mohs scale)	1
Oil absorption (MI 93005)	50 g/100 g
Moisture content at 105°C (MI 93005)	0,2%
Chemical analyses	
SiO ₂	61%
MgO	32%
CaO	0,2%
Fe ₂ O ₃	0,4%
Al ₂ O ₃	0,4%

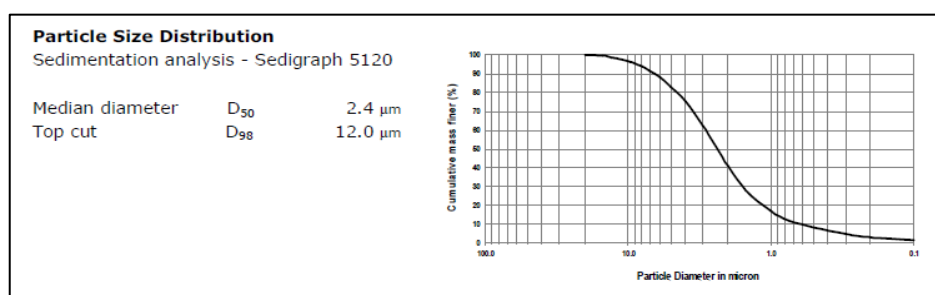


Tabella 35 – Principali proprietà del talco K4.

Carbonato di calcio K5 e K6

Il carbonato di calcio, CaCO₃, è una delle cariche più diffuse e utilizzate nelle costruzioni; è insolubile in acqua e inerte alla maggior parte dei veicoli oleoresinosi ma è sensibile agli acidi diluiti.

Approfondimenti su questa carica sono stati già esposti e documentati nel **Cap. 2 I materiali isolanti** al paragrafo 2.5.3 *Materiali tradizionali e innovativi* alla sezione *III Aggregati*. Riportiamo le tabelle riassuntive delle caratteristiche tecniche relative alla granulometria delle due tipologie di carbonato impiegati nella formulazione di una finitura minerale riflettente per esterni che verrà esposta nei paragrafi successivi riguardanti le formulazioni sperimentali prodotte e testate in laboratorio (Tab. 36 e 37).

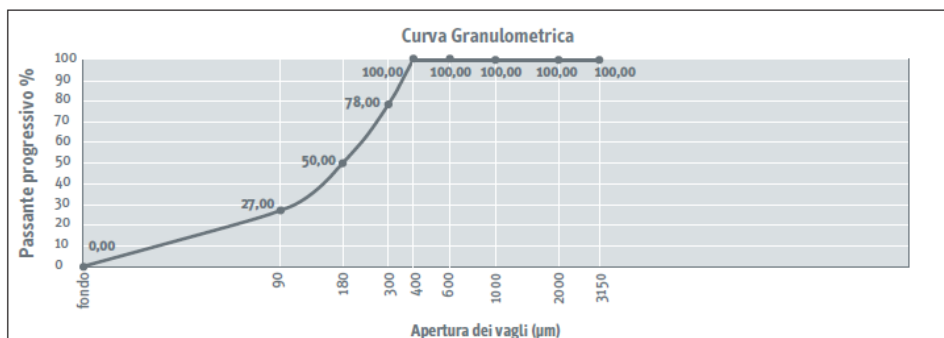


Tabella 36 – Principali proprietà del carbonato di calcio più fino K5.

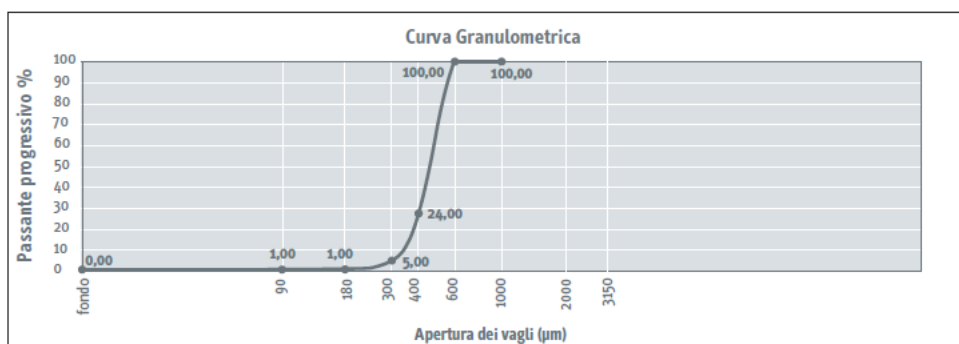


Tabella 37 – Principali proprietà del carbonato di calcio più granulare K6.

CARICHE RIFLETTENTI

Sfere di vetro cave S1

La prima tipologia di cariche riflettenti scelta sono delle microsfele di vetro cave che uniscono le proprietà termiche a quelle di riflessione. La dispersione-diffusione delle radiazioni di un pigmento è in funzione della differenza tra l'indice di rifrazione del pigmento e quello della resina nella quale è disperso. Maggiore è la differenza, migliore è la riflettanza. In genere le resine organiche, come quelle viste precedentemente e utilizzate nella sperimentazione, hanno un indice di rifrazione tra 1,45 e 1,60. L'indice di rifrazione dei comuni pigmenti varia da 1,45 a 2,8. Il biossido di titanio rutilo TiO_2 è il pigmento bianco più efficiente per la diffusione della luce nel visibile dovuto al suo alto indice di rifrazione (2,8) e alla dimensione delle sue particelle che è circa la metà della media della lunghezza d'onda della banda del visibile (Fig.81).

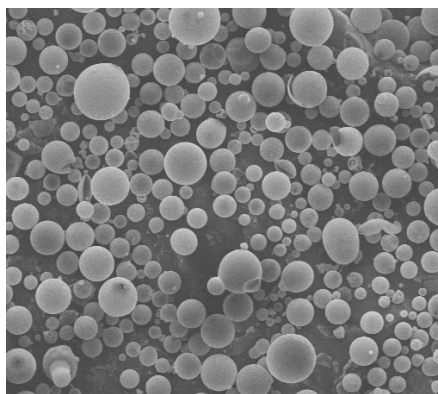


Figura 81 – Sfere di vetro cave S1: densità 0,22 g/cm³ e diametro max 75 micron.

Grazie alla struttura cava le microsfele in vetro S1 hanno un basso indice di rifrazione, vicino a 1,0, molto più basso rispetto alle comuni resine e quindi è possibile aspettarsi nel visibile e nel vicino infrarosso una diffusione più efficiente. Riportiamo una tabella che riassume le principali caratteristiche del prodotto mettendo a confronto i benefici e i vantaggi nell'impiego (Tab. 38).

Caratteristiche	Vantaggi	Benefici
Basso peso specifico.	Riduzione pesi nei compound e nei composti.	Materiali più performanti.
Forma sferica (superficie minima in rapporto al volume)	Minimo fabbisogno di resina per la bagnabilità.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rapida dispersibilità nei composti; ▪ Minore incremento di viscosità a parità di volume additivato; ▪ Ritiri ridotti conseguenti al minor fabbisogno di resina; ▪ Inseribilità in sistemi a spruzzo, per colata e per stampaggio; ▪ Consente maggiore quantità di carica (di riempimento ad uguale viscosità).
Vetro chimicamente stabile	Bassa alcalinità	▪ Compatibile con la maggior parte delle

		resine comunemente usate; ■Stabilità di vita di prodotto e scorrevolezza.
	Non combustibile. Non poroso. Ottima resistenza all'acqua.	Nessun rischio incendio. Non assorbe resina. Può essere usato per produrre emulsioni stabili.
Varietà di tipi	Flessibilità nella scelta per soddisfare varie esigenze di lavorazione del prodotto.	Selezionabilità dei tipi per soddisfare i parametri desiderati.
Sfere di vetro speciali	Alto rapporto resistenza/peso. Costanza nel volume dei vuoti.	Bassa probabilità di rottura nei diversi processi.

Tabella 38 – Principali caratteristiche e benefici applicativi.

Le principali caratteristiche fisiche sono invece descritte nella Tabella 39, mentre da un punto di vista strettamente chimico le sfere S1 sono assimilabili a quelle del vetro al borosilicato di calce sodata.

Densità media g/cm ³	Target crush strength (90% survival, psi)	Dimensioni (micron)			
		Distr. per vol 10%	Distr. per vol 50%	Dist. per vol 90%	Diametro massimo
0,22	400	20	35	60	75

Tabella 39 – Principali proprietà fisiche delle sfere di vetro cave S1.

Perle espanse di silice S2

La carica S2 è una perla silicatica espansa di origine completamente inorganica, inerte e leggero, è un prodotto coperto da brevetto internazionale e ha elevate caratteristiche di isolamento termico e di resistenza al fuoco (Euroclasse A1). Sono perle silicate espanse eco compatibili che incapsulano aria, ottenute attraverso un

221

innovativo processo di espansione della silice amorfa, con applicazione nei settori industriale ed edilizio. La carica S2 essendo un prodotto a base di silice, presenta un'elevata inerzia chimico-fisica, ed è quindi utilizzabile con qualsiasi tipo di materiale legante. L'impiego di queste cariche permette di ottenere prodotti finiti leggeri, termicamente isolanti e con ottima resistenza al fuoco. Data l'elevata finezza, la regolarità della forma delle particelle sferiche e l'elevato grado di bianco delle stesse, confrontabile con le cariche S1 in vetro cavo, si è ipotizzato di impiegarle nella sperimentazione per la realizzazione di una formulazione di un rivestimento a base calce che fungesse anche da rasante livellante e protettivo per lo strato d'isolamento a cappotto nelle facciate degli edifici (**Fig. 82**).



Figura 82 – Perle silicate espanse S2.

Nella tabella di seguito riportata sono riassunte le caratteristiche principali di queste sfere (Tab. 40).

Typical physical properties	
Granulometria	(0,01 – 0,5 mm) $\pm 15\%$
Massa volumica in mucchio	(35 kg/m ³) $\pm 15\%$
pH	11
Conducibilità termica λ	0,030 W/mK
Reazione all'attacco batterico	Ottima resistenza all'attacco di muffe e alghe
Classe di reazione al fuoco	A1
Colore	bianco
Caratteristiche bio	Certificate IBR

Tabella 40 – Principali proprietà fisiche delle perle silicatiche espanse S2.

CARICHE TERMICHE

Polverino di sughero TH1

Il sughero (**Fig. 83**) è una risorsa naturale, sostenibile, ecologica e rispettosa dell'ambiente in quanto è biodegradabile e rinnovabile al 100%. Ha ottime proprietà fisico-chimiche, meccaniche e un'elevata elasticità. La sua struttura compatta e indeformabile lo rende impermeabile ai liquidi e ai gas. È un ottimo isolante sia termico che acustico e inoltre ha buone caratteristiche di isolamento nei confronti delle vibrazioni. Questa materia prima è stata già studiata e utilizzata nella sperimentazione legata alla formulazione dei termintonaci e in particolare per l'intonaco termico oggetto del monitoraggio descritto nel Capitolo 3. In merito alle peculiarità dell'aggregato si può far riferimento alla sezione III Aggregati del par. 2.5.3 Capitolo 2.

Nella formulazione della pittura riflettente analizzata nelle sezioni successive si è utilizzata una granulometria compresa tra 0 – 0,5 mm con un peso specifico medio di 80 kg/m³.



Figura 83 – Polverino di sughero naturale: granulometria 0 – 0,5 mm.

Perlite TH2

La perlite utilizzata per la realizzazione delle pitture sperimentali è una perlite espansa a finissima granulometria, naturale, atossica, inerte, leggera, termoisolante. Non combustibile, ottenuta con un processo di espansione termica di una varietà specifica di roccia vulcanica effusiva (**Fig.84**). Questa materia prima è stata già studiata e utilizzata nella sperimentazione legata alla formulazione dei termintonaci e in particolare per l'intonaco termico oggetto del monitoraggio descritto nel Capitolo 3.

In merito alle caratteristiche chimiche del materiale si può far riferimento alla sezione II Filler del par. 2.5.3 Capitolo 2 e alla tabella 41 di seguito.



Fig. 84 – Perlite espansa in polvere: granulometria nominale 0 - 150 μm .

Typical physical properties	
Aspetto	Solido granulare
Granulometria	0 – 150 μm nominali (metodo laser)
Densità a caduta libera	100 – 160 kg/m^3
Densità compattata	130 – 200 kg/m^3
Colore	bianco
Conduttività termica	0,040 – 0,060 W/mK
Reazione al fuoco	Classse A1 – non combustibilità
Calore specifico	837 J/kg $^{\circ}\text{K}$
Punto di fusione	1200 $^{\circ}\text{C}$
pH	6,5 – 7,5
Solubilità	Insolubile in acqua, in acidi organici e minerali, a basse ed alte temperature. Solubile in alcali forti, a seconda della temperatura e del tempo di contatto e in acido fluoridrico.

Tabella 41 – Principali caratteristiche chimico-fisiche.

4.2.2 Caratterizzazione delle pitture

Una volta individuate le materie prime, sia quelle tradizionali che quelle più innovative e dalle proprietà riflettenti, si è passati alla messa a punto delle formulazioni da testare in laboratorio per selezionare le pitture più interessanti da monitorare successivamente in sito sul mock up di Agugliano.

Come abbiamo descritto nei paragrafi precedenti, con il termine materiali *cool* si intende una gamma di materiali che va dai rivestimenti, finitura di copertura, facciate e pavimenti da esterno, dotati di particolari caratteristiche radiative che li rendono adatti a riflettere e disperdere un'elevata quota di energia solare.

I materiali *cool* sono caratterizzati da:

- **elevata riflettanza solare** (elevata capacità di riflettere la radiazione solare incidente sul materiale);
- **elevata emissività termica** (elevata capacità di emettere calore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso).

L'alto potere di riflessione di questi materiali può dipendere dall'uso di pigmenti ad elevata riflettanza nella porzione infrarossa dello spettro solare, di cariche e/o extenders con particolari caratteristiche fisico-tecniche: l'azione combinata di queste materie prime consente al prodotto finale di abbassare la propria temperatura superficiale durante le ore diurne.

Invece, l'elevata emittanza consente al materiale di raffreddarsi durante la notte, irradiando il calore assorbito durante il giorno.

A parità di altri fattori (radiazione solare incidente, riscaldamento per convezione e/o induzione), una superficie con queste caratteristiche rimarrà più fresca sotto l'effetto diretto del sole rispetto ad un'altra superficie.

L'altro parametro che è stato valutato è il **Solar Reflectance Index SRI**, indice che tiene conto sia della capacità del materiale di riflettere la radiazione solare, sia della capacità di emettere la radiazione solare assorbita come radiazione termica.

Pertanto, le prove di laboratorio preliminari sono state condotte al fine di analizzare questi tre parametri fondamentali su tipologie di materiali molto differenti tra loro, sia dal punto di vista d'impiego delle materie prime sia dal punto di vista di prodotto finale.

Materiali impiegati per le prove

I prodotti impiegati per la valutazione dell'efficacia dei materiali *cool* sono tutte formulazioni sperimentali rispetto ai rivestimenti scelti come campioni di riferimento con i quali attuare un confronto in termini di performance. Partendo da formulazioni base di pitture, si sono apportate modifiche sostituendo di volta in volta alle materie prime tradizionali dei materiali con caratteristiche riflettenti o comunque che potessero migliorare la miscela in termini di omogeneità, dispersione delle cariche e dei pigmenti, coprenza e applicabilità. In base alle ricerche effettuate nel campo delle materie prime, descritte nella sezione precedente, si sono effettuate le

sostituzioni all'interno delle formule di partenza tradizionali trasformandole in "riflettenti".

Nel prospetto riportato di seguito (Tab.42), è stata individuata la pittura di riferimento e le 3 pitture riflettenti (P1, P2, P3), oltre che a un rasante a base calce con cariche termiche e riflettenti (R1).

Le modifiche che hanno interessato le pitture e il rasante sono state in particolare orientate a sostituire o modificare alcune specifiche materie prime:

- il talco K4 come carica/extender a creare una miscela con una struttura lamellare chiusa ma altamente lavorabile;
- cariche riflettenti in sostituzione totale o in percentuale rispetto alle cariche tradizionali: sfere di vetro cave S1 per le pitture e perle silicatiche espanse S2 per il rasante;
- sostituzioni con resine polimeriche idonee all'impiego per rivestimenti esterni con performance e resistenze maggiori agli agenti esterni.

In questa prima fase di formulazione si è lasciato il titanio tipo R2: un pigmento con un più elevato contenuto di principio attivo (91% di TiO₂). Quindi i confronti sono stati fatti a parità di pigmento utilizzato proprio per analizzare l'influenza delle sole cariche a seconda che abbiano proprietà riflettenti o meno.

RIFERIMENTO			
MATERIE PRIME			
Titanio T2			
Resina tipo R1			
Carica termica TH2			
P1 - Riflettente	P2 - Riflettente	P3 - Riflettente	R1 - Riflettente
MATERIE PRIME	MATERIE PRIME	MATERIE PRIME	MATERIE PRIME
Titanio T2	Titanio T2	Titanio T2	Calce idrata
Resina tipo R2	Resina tipo R4	Resina tipo R2	Resina in polvere
Sfere di vetro cave S1	Sfere di vetro cave S1	Resina tipo R3	Carbonato di calcio K5
Talco K4	Talco K4	Sfere di vetro cave S1	Carbonato di calcio K6
		Polverino di sughero TH1	Perle silicate espanse S2

Tabella 42 – Prospetto delle formulazioni dei rivestimenti riformulati con materie prime più performanti in ottica di migliorare le proprietà riflettenti dei prodotti rispetto alla pittura di riferimento.

Di seguito riportiamo le applicazioni dei prodotti selezionati e la preparazione dei campioni per le prove di laboratorio per la caratterizzazione delle proprietà riflettenti.



Fig. 85 – Pittura di Riferimento (Rif 0) con cariche termiche TH2 applicata a pennello su un pannello 150 mm x 150 mm.



Fig. 86 – Pittura P1 con le sfere S1 riflettenti applicata a pennello su un pannello 150 mm x 150 mm.



Fig. 87 – Pittura P2 con le sfere S1 riflettenti applicata a pennello su un pannello 150 mm x 150 mm.



Fig. 88 – Pittura P3 con le sfere S1 riflettenti e la carica termica TH1 applicata a spatola su un pannello 150 mm x 150 mm.

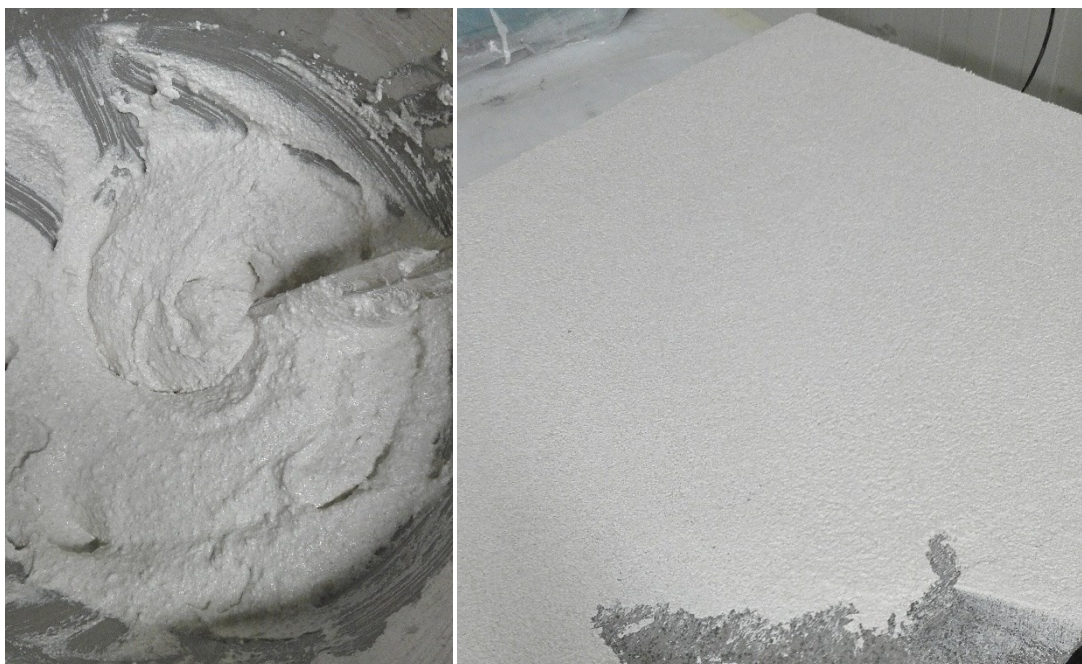


Fig. 89 – Rasante R1 con cariche riflettenti termiche S2 applicato a spatola su un pannello di prova.

Esclusa la pittura di riferimento bianca utilizzata come riferimento, le altre formulazioni sono del tutto sperimentali o in fase di implementazione per una futura industrializzazione e sono state realizzate ad hoc per lo studio del comportamento in termini di riflessione e di emissività termica.

Le più interessanti e promettenti formulazioni, anche dal punto di vista commerciale e di fattibilità produttiva, sono state collaudate con una fase di industrializzazione preliminare per valutarne la fattibilità e il ciclo produttivo. Inoltre, sono stati realizzati anche dei test applicativi su supporti reali in piccoli mock up realizzati nell'azienda produttrice.

In particolare, i due prodotti che sono stati testati dal punto di vista applicativo e di lavorabilità sono la pittura in sughero P3 con le cariche riflettenti S1 e il rasante termico-riflettente R1 con le cariche S2. La scelta è stata dettata da alcune principali motivazioni dovute al fatto che il focus dell'azienda produttrice è sulla materia prima sughero:

- realizzare un sistema termoisolante con un ciclo di prodotti totalmente biocompatibili e innovativi: termointonaco, rasante, pittura;
- realizzare un rasante e una pittura con proprietà termiche e riflettenti che fungessero, alternativamente l'uno all'altra, da finitura esterna a corredo del sistema isolante realizzato con il termoinconaco a base sughero.



Fig. 90 – Applicazione del rasante R1 su un muretto sul quale era stato applicato precedentemente il termointonaco a base sughero. Obiettivo: valutare l'applicabilità e lavorabilità del prodotto, grado di finitura finale e resistenza agli agenti atmosferici (il muretto era all'esterno e non protetto).



Fig. 91 - Applicazione della pittura in sughero con sfere riflettenti P3 su una parete interna precedentemente preparata con un fissativo idoneo alla successiva applicazione del rivestimento. Obiettivo: valutare l'applicabilità e lavorabilità del prodotto, grado di finitura finale e comfort termico interno (sensazione di soft touch e parete "calda").

Metodi di prova e strumentazioni

Lo scopo della presente sperimentazione consiste nel verificare e confrontare le prestazioni dei materiali scelti per valutare l'effettiva efficacia di alcune materie prime rispetto ad altre, in particolare per quanto riguarda le cariche definite riflettenti sulla base delle schede tecniche dei produttori. Una volta conseguiti i risultati di laboratorio, saranno fatte delle considerazioni per la scelta delle pitture da applicare in sito per il monitoraggio sperimentale.

I. Determinazione della Riflettanza solare (SR)

La riflettanza solare è definita come il rapporto tra la radiazione solare riflessa da una superficie e la radiazione solare incidente: è una quantità adimensionale variabile tra 0 e 1 (o tra 0 e 100%). In generale, per i materiali opachi, la riflettanza solare dipende dalle proprietà dello strato superficiale più esterno (< 1 mm) e non dal supporto.

Le norme di riferimento possono essere differenti in base alla tipologia di strumentazione e di tecnica utilizzata oltreché della tipologia di materiale da investigare.

Le misure mediante spettrofotometro UV-Vis-NIR operano nel campo di riflettanza spettrale tra 250 e 2500 nm; le normative di riferimento sono l'ASTM E903 – Standard Test Method for solar absorptance, reflectance and transmittance of Materials using Integrating spheres, ISO 9050 – Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors e, infine, EN 410 – Glass in building. Determination of luminous and solar characteristics of glazing.

Altra metodologia di misura è mediante riflessometro solare, strumentazione che opera illuminando (illuminazione diffusa) il campione per mezzo di una sorgente interna attraverso un'apposita apertura (diametro 25 mm). La riflettanza solare è totale, non spettrale, ed è direttamente restituita dalla ponderazione delle misure di sensori integrati, operanti a diverse lunghezze d'onda, per confronto con campioni di riferimento. Infatti, il segnale riflesso viene rilevato attraverso la medesima apertura dai sensori operanti a differenti lunghezze d'onda. Lo strumento restituisce direttamente la riflettanza solare (SR) e viene calibrato per confronto con campioni di riferimento a riflettanza nota. Il suo utilizzo è relativamente agevole e rende possibili anche le misure in opera. Lo svantaggio è che non restituisce informazioni sulla risposta spettrale delle superfici misurate.

Normativa di riferimento è la ASTM C1549 – Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using portable solar

reflectometer. Questo è lo standard normativo utilizzato per le prove eseguite in laboratorio e la strumentazione impiegata per le misure (Fig. 92 e 93).

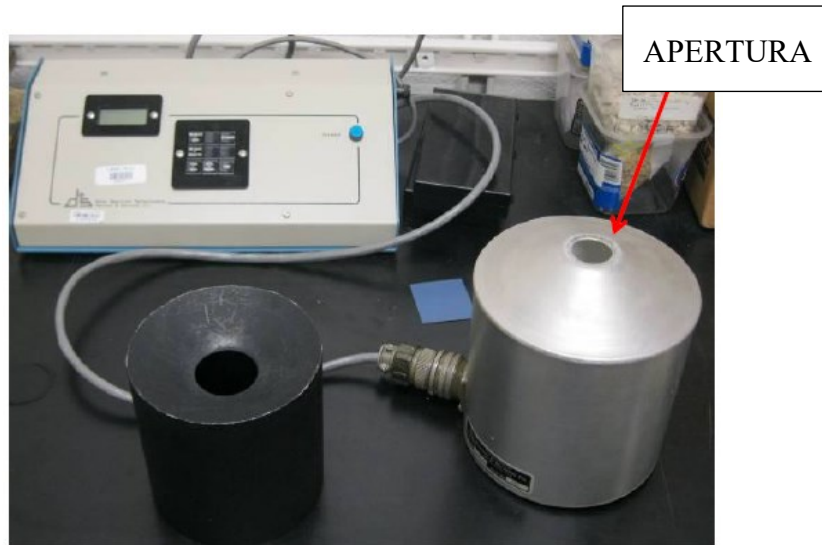


Fig. 92 – Riflettometro solare (Standard ASTM C1549).



Fig. 93 – Riflettometro solare (Standard ASTM C1549): utilizzabile anche per le misure in opera.

Ulteriore standard che è possibile impiegare è quello relativo alla misura della riflettanza solare con albedometro: standard ASTM E1918 – Standard test method for measuring solar reflectance of horizontal and low-sloped surfaces in the field. Lo strumento utilizzato per la misura è un albedometro: è formato da 2 piranometri, orientati in direzioni opposte che misurano la radiazione solare totale incidente dall'altro e quella riflessa dal basso. Consente misure in esterno su qualsiasi superficie misurando un'area con un diametro almeno di 4 m e ad un'altezza dall'area di prova di 0,50 m. Richiede però, condizioni di cielo sereno ed elevata altezza solare ($> 45^\circ$). Lo spettro solare è quello ambientale al momento della misura e non uno standard. Tra gli svantaggi è che anch'esso non dà informazioni sulla risposta spettrale.

II. Determinazione dell'Emissività termica (ϵ)

L'emissività è definita come il rapporto tra la radiazione termica emessa da una superficie e la massima radiazione termica che può essere teoricamente emessa alla medesima temperatura: quantità adimensionale variabile tra 0 e 1 (o tra 0 e 100%). Anche per la misura dell'emissività termica esistono numerosi metodi, ne riportiamo di seguito i due più utilizzati.

Misurazione tramite emissometro IR applicando lo standard ASTM C1371 – Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometer. L'emissometro IR misura l'emissività per confronto tra due campioni di riferimento ad emissività nota (un disco basso emissivo e uno alto emissivo): è un metodo indiretto. Il campione deve essere piano e con un diametro maggiore di 5,7 cm. Gli standard e il campione sono posti su un dissipatore di calore e mantenuti a temperatura ambiente.

Misurazione tramite emissometro TIR secondo EN 15976 – Flexible sheets for waterproofing. Determination of emissivity. Anche in questo caso la misura avviene per confronto tra due campioni di riferimento sempre basso emissivo e alto emissivo. Un sensore a infrarossi con range operativo da 2,5 a 40 μm rileva la radiazione IR emessa da un radiatore emisferico stabilizzato a 100°C e quindi riflessa dal campione mantenuto a temperatura ambiente. Intervallo di misura $0,02 < \epsilon < 0,98$.

Quest'ultimo è lo standard normativo utilizzato per le prove eseguite in laboratorio per la determinazione di ϵ e la strumentazione impiegata per le misure (Fig. 94).

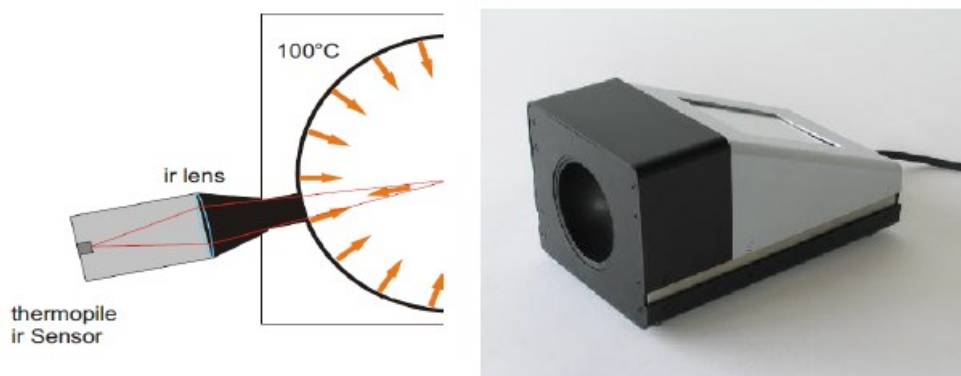


Fig.94 – Emissometro TIR (Standard EN 15976).

I due standard normativi ASTM C1371 e EN 15976, rispettivamente americano ed europeo, differiscono poiché il primo restituisce un'emissività emisferica totale mentre la seconda restituisce un'emissività near-normal che sfrutta il principio TIR della radiazione termica infrarossa. Esistono delle curve di correlazione che permettono di passare dall'emissività normale a quella totale.

III. Determinazione SRI

La determinazione del Solar Reflectance Index (SRI) è fondamentale per caratterizzare un materiale riflettente e attribuirgli proprietà *cool* poiché sintetizza sia le proprietà riflesse che emissive del prodotto. Questo indice viene definito dallo standard **ASTM E1980** Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces.

Nella formula di SRI, l'indice viene calcolato utilizzando tre distinti valori di coefficiente di scambio termico convettivo h_c , pari a $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ in condizioni di ventosità bassa ($v < 2 \text{ m/s}$), $12 \text{ W/m}^2\text{K}$ in condizioni di ventosità media ($2 \text{ m/s} < v < 6 \text{ m/s}$) e $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ in condizioni di ventosità alta ($6 \text{ m/s} < v < 10 \text{ m/s}$).

L'SRI è valutato in una scala in cui una superficie di riferimento nera con bassissima riflettanza è caratterizzata da $\text{SRI} = 0$ ($\text{SR} = 0,05$ e $\varepsilon = 0,90$), mentre una superficie di riferimento bianca con elevata riflettanza è caratterizzata da $\text{SRI} = 100$ ($\text{SR} = 0,80$ e $\varepsilon = 0,90$).

Risultati di laboratorio

Le analisi sperimentali svolte sui rivestimenti formulati sono state articolate nei seguenti punti:

1. Misura della riflettanza solare sulla superficie normalmente esposta all'atmosfera dei campioni in esame, effettuata in conformità all'ASTM C1549 tramite riflettometro solare portatile;
2. Misura dell'emissività termica sulla superficie normalmente esposta all'atmosfera dei campioni in esame, effettuata in conformità alla EN 15976 tramite emissometro TIR;
3. Valutazione del Solar Reflectance Index (SRI) della superficie normalmente esposta all'atmosfera dei campioni in esame, effettuata in conformità all'ASTM Standard E1980 sulla base dei valori di riflettanza solare ed emissività termica precedentemente misurati.

L'analisi sperimentale è stata svolta su campioni in forma di lastre piane di dimensione 150 mm x 150 mm per i seguenti materiali:

- I. Pittura di riferimento: Rif. 0 spessore applicato 13,0 mm;
- II. Pittura P1 spessore applicato 22, 3 mm;
- III. Pittura P2 spessore applicato 22,3 mm;
- IV. Pittura Pe spessore applicato 24,1 mm;
- V. Rasante R1 spessore applicato 13,8 mm.

Di seguito riportiamo la tabella (Tab. 43) dei risultati sperimentali ottenuti e dei confronti tra le performace ottenute tra la pittura di riferimento e quelle riflettenti (Tab. 44).

CODICE ID	Solar Reflectance SR (%)	Infrared Emittance IE	Solar Reflectance Index SRI (%)
Rif 0	78,9	0,813	96,9
P1	85,9	0,847	107,7
P2	85,6	0,844	107,2
P3	84,0	0,84	99,5
R1	85,6	0,856	102,7

Tabella 43 – Valori misurati in laboratorio sui materiali selezionati: SR (%), emissività termica ϵ e SRI (%).

Confronti tra le formulazioni			
$\Delta SR\%$	$\Delta IE\%$	$\Delta SRI\%$	
8,9	4,2	11,1	$\Delta(\text{Rif0-P1})$
8,5	3,8	10,6	$\Delta(\text{Rif0-P2})$
6,5	3,3	2,7	$\Delta(\text{Rif0-P3})$
8,5	5,3	6,0	$\Delta(\text{Rif0-R1})$

Tabella 44 – Confronto percentuale tra i valori ottenuti per la pittura di riferimento e i rivestimenti riflettenti: in tutte le formulazioni sperimentali si riscontra un miglioramento delle performance rispetto alla pittura Rif 0.

Le misurazioni condotte hanno confermato il basso valore di riflettanza SR (78,9%) per la pittura di riferimento Rif 0 nella quale non vi erano cariche riflettenti ma solamente il pigmento bianco titanio T2 e la carica termica TH2. Tutte le altre formulazioni che hanno incluso la sostituzione delle cariche tradizionali con cariche riflettenti, S1 per le pitture e S2 per il rasante, hanno dimostrato un miglioramento per tutte le proprietà analizzate: SR, emissività termica e SRI.

In particolare, possiamo evidenziare come tra la formulazione P1 e quella P2 il cambio di resina non influenzi le performance riflettenti delle pitture. Inoltre, partendo dal presupposto che le pitture P1 e P2 sono l'implementazione della formulazione di riferimento Rif 0, nelle quali la carica termica è stata sostituita in parte con le sfere cave riflettenti S1 e in parte con il talco K4, è evidente il notevole miglioramento di tutti i parametri misurati, incremento dovuto all'introduzione delle cariche S1. Da sottolineare il valore di SRI che passa da 96,9% della pittura di riferimento a 107,7% e 107,2% rispettivamente per P1 e P2 con un incremento che dal 10,6% al 11,1%. Parallelamente migliorano anche i valori di SR ed emissività termica dimostrando che il miglioramento dell'SRI è dovuto ad entrambi i parametri e che l'effetto positivo delle cariche si ripercuote su entrambi gli aspetti: riflettanza solare ed emissività termica.

Anche la pittura P3, caratterizzata da cariche in sughero e dalle stesse cariche riflettenti delle pitture P1 e P2, mostra dei buoni risultati rispetto alla pittura tradizionale Rif 0 con un incremento di tutti e tre i valori anche se l'SRI rimane modesto rispetto agli altri prodotti sperimentali. In particolare, l'SR non aumenta di molto (84%) molto probabilmente proprio a causa della presenza del sughero che depotenzia l'effetto sia dei pigmenti bianchi che delle sfere riflettenti, anche se il risultato complessivo è comunque positivo con un incremento dell'SRI del 2,7%.

Infine, inaspettatamente anche il rasante R1 ha dimostrato ottimi valori in linea con le pitture P1 e P2, nonostante un approccio formulativo totalmente differente e utilizzando una carica S2 che non è stata sviluppata specificatamente per migliorare i valori di riflettanza ma principalmente con proprietà termoisolanti.

4.2.3 Mock up sperimentale

Le misure sperimentali di laboratorio, descritte nel paragrafo precedente, hanno dimostrato l'efficacia dell'impiego di materiali con proprietà riflettenti all'interno di formulazioni tradizionali di rivestimenti. Il passo successivo della ricerca portata avanti è verificare che queste performance misurate in laboratorio siano confutate in opera attraverso la realizzazione di facciate verticali naturalmente esposte alla radiazione solare e agli agenti atmosferici. Per fare ciò, si è realizzato un mock up presso una struttura in legno sita in Borgo Ruffini, una frazione di Agugliano (AN) (Fig. 95).

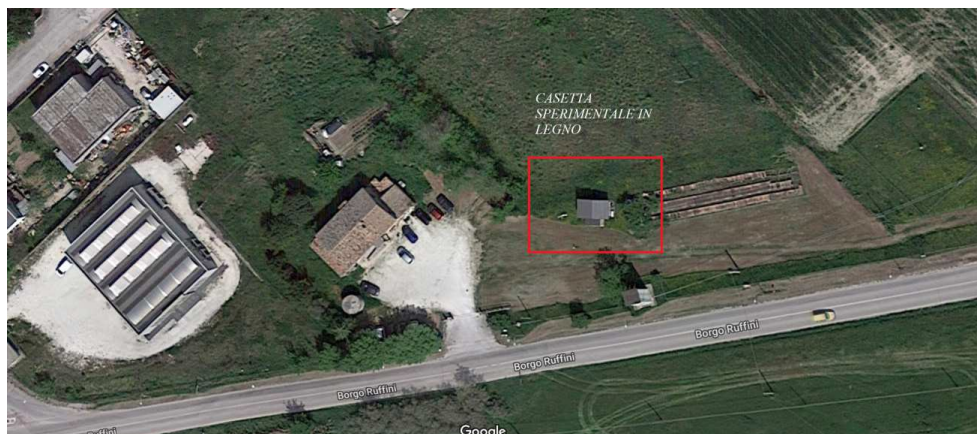


Fig. 95 – Collocazione e identificazione della struttura impiegata nella sperimentazione in sito.

La struttura complessiva è formata da una casetta principale in muratura alla quale è stata annessa una struttura leggera in legno sulla parete esposta a Sud. Tale struttura, realizzata completamente in legno, ha quindi l'intera facciata esposta a Sud e modulabile con dei pannelli che possono essere cambiati di volta in volta in base alle esigenze di studio e alle ricerche portate avanti. Precedentemente alla sperimentazione attuale sulle pitture riflettenti, la struttura si presentava con un telaio di montanti e traversi in legno tamponati da lastre di vetro per ricreare un effetto interno tipo "serra" (Fig. 96).



Fig. 96 – Situazione iniziale del mock up sperimentale prima delle campagne di sperimentazione sulle pitture riflettenti.

Per la sperimentazione in oggetto si è provveduto a sostituire i quattro vetri superiori con dei pannelli in OSB da rivestire esternamente con le pitture da monitorare in sito, mentre la parte inferiore è stata tamponata con delle lastre di materiale isolante ad altro spessore.

Con il termine OSB (Oriented Strand Board) si indica un materiale a base legno costituito da diversi strati, a loro volta composti da trucioli di legno prevalentemente lunghi e stretti (strand) assemblati con un legante (colla). Gli strand degli strati esterni sono paralleli al lato longitudinale o trasversale del pannello. Un rapporto lunghezza/larghezza degli strand di 10:1 contribuisce a migliorare le proprietà di resistenza a flessione nella direzione dell'orientamento degli strati esterni.

Gli strand dello strato interno possono essere orientati in maniera casuale oppure, di norma, in direzione perpendicolare agli strand degli strati esterni. L'applicazione principale dei pannelli OSB la ritroviamo nell'edilizia in legno e, in particolare, nel rivestimento di costruzioni leggere (sistemi intelaiati) oppure per la costruzione di pavimenti.

In commercio esistono quattro categorie di OSB (Fig. 97) in funzione della resistenza meccanica e dell'umidità del luogo di impiego del prodotto:

- OSB 1, non strutturale;
- OSB 2, pannelli strutturali a uso luogo asciutto;
- OSB 3, pannelli strutturali a uso luogo umido (collante melaminico);

- OSB 4, pannelli strutturali a uso luogo umido e per carichi pesanti (collante poliuretano).

Nella nostra sperimentazione si è scelto di utilizzare quattro pannelli OSB tipo 3, al posto dei vetri superiori, aventi dimensioni: larghezza 68,7 cm, lunghezza 158,5 cm e spessore 0,90 cm.



Fig. 97 – Pannelli OSB tipo 3.

Realizzazione dei pannelli: i materiali

Nel paragrafo precedente sono stati riportati i risultati ottenuti in laboratorio su alcuni rivestimenti e si è determinata l'influenza positiva dell'impiego di alcune tipologie di cariche e pigmenti rispetto a materiali più tradizionali.

Per questi motivi si è scelto di utilizzare un'altra pittura come riferimento che rappresentasse la categoria delle pitture bianche tradizionali generalmente in commercio e che identificheremo come la nuova P1: pittura acrilica all'acqua. Di seguito, in tabella 45 viene riportata la scheda tecnica della pittura con i principali parametri tecnici.

Infatti, rispetto alla pittura di riferimento, Rif 0, precedentemente utilizzata, questa idropittura non presenta l'utilizzo in formulazione di cariche termiche ma solamente di cariche e filler più tradizionali di origine carbonatica o quarzite.

Inoltre, il titanio TiO_2 utilizzato, la componente di pigmento bianco, è di tipo più commerciale: titanio R1. Mentre per le altre formulazioni di pitture riflettenti il titanio R1 viene sostituito con il tipo R2: pigmento con un più elevato contenuto di principio attivo (91% di TiO_2), quindi con un alto punto di bianco e di gloss, e un maggiore potere coprente.

Typical physical properties	
Aspetto	Liquido
Resa	0,30 kg/m ²
Tempo di attesa tra 1° strato e 2° (20°C; 40% UR)	4 ore
Temperatura di applicazione	+5/+35°C
Umidità massima	70%
Tempo di asciugatura (20°C; 40% UR)	5 ore
Resistenza ai cicli di invecchiamento (Weathering test) UNI EN ISO 11507	1680 ore (>10 anni)
Permeabilità al vapore acqueo UNI EN ISO 7783	$\mu = 88$ $s_D = 0,05$ m Classe I – alta traspirabilità
Contenuto in solidi	65%
Temperatura minima di filmazione	+5°C

Tabella 45 – Scheda tecnica della pittura tradizionale bianca P1.

Delle pitture riflettenti analizzate precedentemente si è scelto di tenere solo la pittura in sughero con le sfere di vetro cave che aveva dato dei risultati incoraggianti dal punto di vista di SR e emissività termica, essendo, inoltre, il rivestimento più innovativo e in linea con i principi di biocompatibilità e sostenibilità ambientale. Per questo motivo si è deciso di affiancare a questa pittura, rinominata P2, la sua versione non riflettente, denominata da qui in avanti P3: con cariche in sughero ma priva di sfere di vetro cave (Fig. 98).

Sempre nell'ottica di mettere a confronto pitture tra loro molto differenti sia per tipologia di rivestimento sia nell'uso di materie prime di diversa natura chimica, si è proceduto con la formulazione di una pittura acrilica con pigmenti in alluminio, descritti nella sezione precedente dedicata ai materiali e denominati A1. La pittura in alluminio è stata formulata ad hoc per questa sperimentazione, vista la peculiarità dei pigmenti in alluminio e anche l'elevato costo. Questo rivestimento è stato denominato P4 e anch'esso applicato su uno dei quattro pannelli OSB da posizionare in opera sul mock up di Agugliano (Fig. 99).



Fig. 98 – Pittura P3 non riflettente con cariche in sughero.



Fig. 99 – Pittura P4 riflettente con cariche in alluminio.

La tabella (Tab. 46) di seguito riporta la nomenclatura utilizzata per le pitture impiegate nel monitoraggio che stato svolto nel periodo estivo del 2019 sul mock up e le principali materie prime che caratterizzano le miscele.

P1 - BIANCA	P2 - Riflettente	P3 - NON Riflettente	P4 - Riflettente
MATERIE PRIME	MATERIE PRIME	MATERIE PRIME	MATERIE PRIME
Titanio T2	Titanio T2	Titanio T2	Titanio T2
Resina tipo R1	Resina tipo R2	Resina tipo R1	Resina tipo R1
Quarzite K1	Resina tipo R3	Resina tipo R2	Resina tipo R3
Talco K4	Sfere di vetro cave S1	Quarzite K2	Pigmento riflettente A1
	Polverino di sughero TH1	Polverino di sughero TH1	

Tab. 46 – Elenco e principali caratteristiche delle pitture monitorate nella campagna sperimentale condotta nel periodo estivo del 2019.

Misure di laboratorio preliminari

I materiali impiegati nel monitoraggio sperimentale condotto sui pannelli applicati in opera sul mock up di Agugliano sono stati caratterizzati con delle misure di riflettanza solare con spettrofotometro condotte in laboratorio. Per queste misure di riflettanza il campo spettrale analizzato è molto ampio e va da 0,80 μm a 25 μm , indagando quindi sia nel range NIR (IR vicino) che in quello MIR (IR medio). La valutazione della misura spettrofotometrica fornisce informazioni più complete sul comportamento dei diversi materiali rispetto alla misura della riflettanza solare (SR). Di seguito sono riportati i grafici degli spettri misurati sui campioni di pittura testati (Grafico 17 – 18).

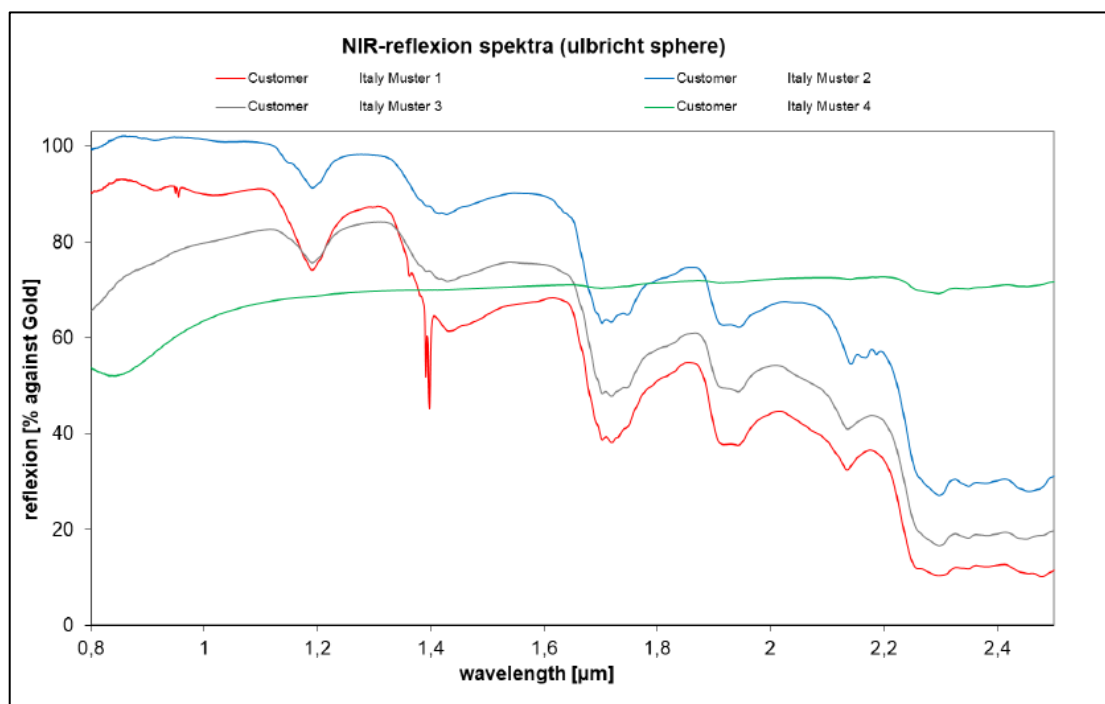


Grafico 17 – Riflettività spettrale NIR valutata per le pitture P1, P2, P3 e P4.

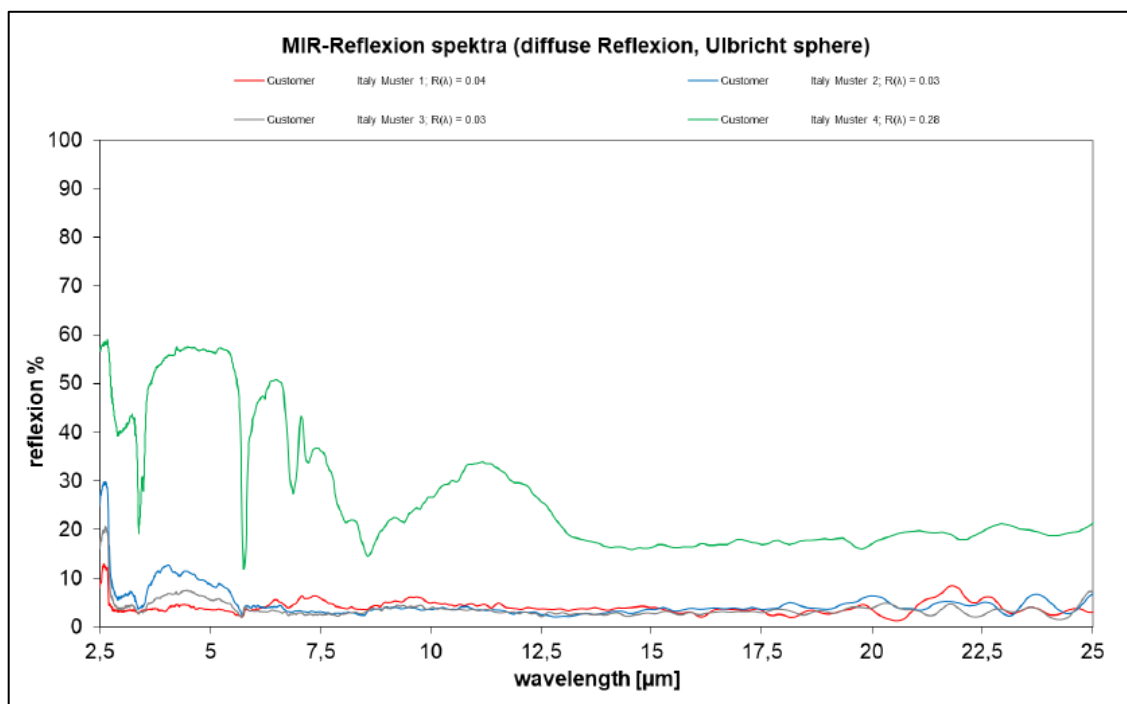


Grafico 18 – Riflettività spettrale MIR valutata per le pitture P1, P2, P3 e P4.

Lo spettro di riflessione riportato nelle tabelle è suddiviso in due intervalli di lunghezze d'onda in cui ricade la radiazione solare: 0,80 - 2,50 μm (NIR) e 2,50 - 25 μm (MIR).

La parte di spettro di maggiore interesse per valutare l'efficacia di un materiale *cool* è quella del NIR (Grafico 17).

Scomponendo il grafico in intervalli di lunghezza d'onda possiamo notare:

- 0,80 μm < λ < 1,4 μm: la pittura P2 (sughero + cariche riflettenti) ottiene il miglior risultato con valori di SR tra 90 - 100%, a seguire la pittura P1 (riferimento) e la P3 (sughero), infine con valori di SR < 70% la P4 (alluminio);
- 1,4 μm < λ < 1,9 μm: la pittura P2 (sughero + cariche riflettenti) continua ad essere quella con i valori migliori di SR, al contrario si inverte la curva tra P1 e P3; quest'ultima supera la curva di P1 ma i valori di SR di entrambe crollano sotto il 60% mentre la curva di P4 rimane costante su un valore prossimo al 70%;
- 1,9 μm < λ < 2,5 μm: la tendenza s'inverte e la pittura P4 (alluminio), rimanendo costante, supera tutte le altre curve che invece subiscono un

rapido decremento per valori oltre 2,2 μm . In ordine decrescente abbiamo P2, P3 e infine P1.

Dall'analisi dello spettro NIR c'è da rilevare il comportamento del tutto singolare della pittura P4 con le cariche in alluminio che non raggiunge picchi di riflettanza elevati come P2 ma si mantiene praticamente costante su tutta la lunghezza d'onda considerata.

Per quanto riguarda lo spettro MIR (Grafico 18), anche qui, scomponendo il grafico in intervalli di lunghezza d'onda possiamo notare:

- $2,5 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$: la pittura P4 (alluminio) ottiene i migliori risultati mentre le pitture P2 e P3 hanno dei picchi iniziali ma poi decrescono rimanendo sopra la curva di P1;
- $5 \mu\text{m} < \lambda < 25 \mu\text{m}$: la pittura P4 (alluminio) rimane quella con i valori di SR migliori, SR circa 20%, mentre le altre pitture sostanzialmente rimangono tutte sotto il 10% con andamenti analoghi.

L'analisi dello spettro è molto interessante per capire il comportamento della riflessione nell'infrarosso e di approccio per passare allo studio dei materiali applicati in campo in situazioni reali. Nel paragrafo successivo verranno descritte le strumentazioni impiegate per il monitoraggio in sito, l'allestimento del mock up, metodo e dati rilevati dalla campagna di monitoraggio.

Applicazione e installazione dei pannelli

Dopo aver scelto le pitture da utilizzare e preparati i quattro pannelli OSB di supporto, le pitture sono state applicate a pennello, in due mani a incrociare così come da buona prassi applicativa (Fig. 100).



Fig. 100 – Fasi applicative delle pitture sui pannelli OSB prima di essere installati.

Una volta che le pitture erano completamente asciutte, si è proceduto con l'installazione dei pannelli sui montanti della struttura in legno del mock up posizionandoli seguendo l'ordine da sinistra verso destra: pannello P1 (pittura P1), pannello P2 (pittura P2), pannello P3 (pittura P3) e infine pannello P4 (pittura P4). Nella figura sottostante (Fig. 101) è riportato il mock up ad installazione completata con l'ordine dei pannelli descritto.

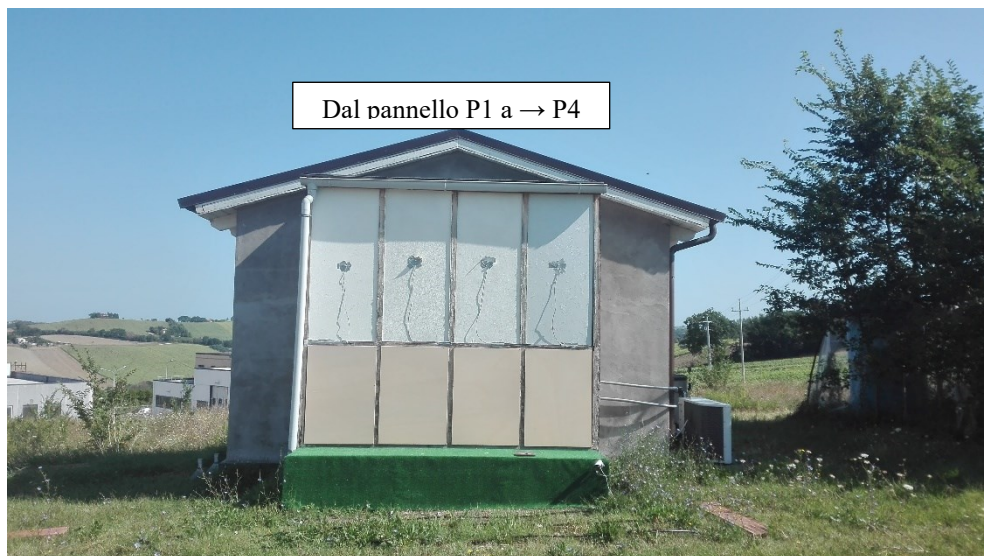


Fig. 101 – Prospetto Sud del mock up dopo aver installato i 4 pannelli OSB con le pitture oggetto del monitoraggio.

4.2.4 Sistema di monitoraggio

L'indagine termoflussimetrica rappresenta un metodo non invasivo che permette la misurazione in opera del flusso termico che attraversa una superficie e delle sue temperature superficiali (interna ed esterna). Questa indagine avviene tramite uno strumento, il termoflussimetro (cioè il misuratore del flusso termico) che misura il passaggio di calore attraverso un elemento, solitamente una parete verticale. La strumentazione necessaria è formata da una unità centrale (DataTaker) che registra i dati misurati dalle due unità secondarie (sonde di temperatura superficiale) che sono poste una all'interno e una all'esterno dell'elemento da misurare. Infine, si posiziona la piastra fluxsimetrica (che è il "cuore" del sistema) vicino alle sonde interne, possibilmente fissandola all'elemento con una pasta conduttrice e del nastro adesivo che la tenga ben salda alla parete. A questo punto il sistema è installato correttamente (Fig. 102) e può iniziare a registrare i valori della temperatura esterna, di quella interna e del flusso passante. L'indagine, per avere un valore consistente e veritiero, deve essere prolungata per almeno 72 ore consecutive (standard di riferimento ISO 9869). Al termine i dati possono essere utilizzati per restituire il valore di trasmittanza in opera.

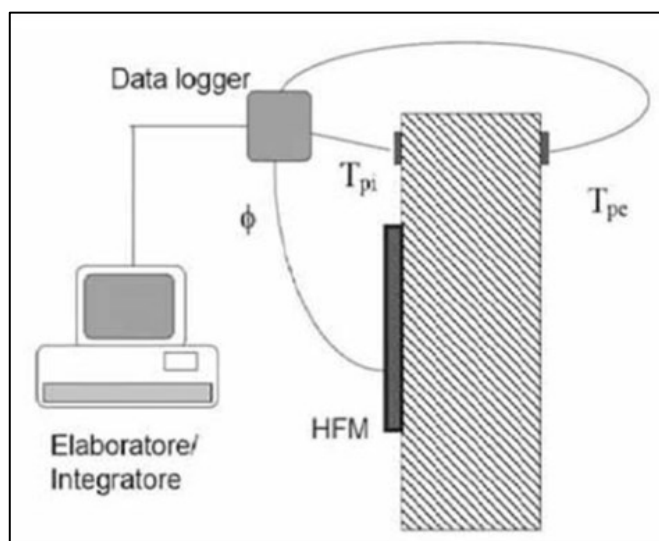


Fig. 102 – Schema d'installazione del sistema di monitoraggio termoflussimetrico.

Lo scopo della nostra sperimentazione è quello di determinare le prestazioni dei pannelli rivestiti con le pitture scelte, definendone la temperatura superficiale interna, quella esterna e il flusso termico passante attraverso di essi. Tali valori di temperatura e flusso verranno poi confrontati tra loro al fine di trarre le dovute conclusioni in merito alla convenienza o meno dell'applicazione di una pittura *cool*,

pannelli P2 e P4, sulle pareti rispetto ad una pittura tradizionale, in questo caso il pannello P1. Di seguito sono descritte nel dettaglio le strumentazioni necessarie a questa fase della sperimentazione.

Tabella riassuntiva dei principali parametri dei sensori che andremo a descrivere:

Misura	Tipo di sensore	Posizione	Precisione	Range
Dati ambientali				
Temperatura dell'aria	Termoigrometro	Stazione meteo	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	Da -30 a 70°C
Umidità Relativa	Termoigrometro	Stazione meteo	$\pm 2,5\%$	Da 0 a 100%
Pressione atmosferica	Piezoelettrico	Stazione meteo	0,5 hPa	800-1100 hPa
Velocità del vento	Anemometro	Stazione meteo	-	Da 0 ms^{-1} a 75 ms^{-1}
Direzione del vento	Anemometro	Stazione meteo	-	$0 - 270^{\circ}$
Radiazione solare	Radiometro	Stazione meteo	$< 5\%$	Da 0 a 2000 Wm^{-2}
Condizioni climatiche interne				
Temperatura dell'aria	Termoresistenza al platino	Centro della stanza	$\pm 0,05^{\circ}\text{C}$	Da -40°C a 80°C
Prestazioni dell'involucro dell'edificio				
Flusso di calore	Termoflussimetro	Superficie interna della parete sud	$\pm 3\%$	$\pm 2000 \text{ W m}^{-2}$
Temperatura superficiale	Termoresistenze PT100	Esterno, rivestimento interno, superficie interna sud	$\pm 0,05^{\circ}\text{C}$	Da -40 a 80°C

Tabella 47 – Principali caratteristiche dei sensori utilizzati nella sperimentazione.

Data Taker

Pur non essendo un sensore vero e proprio, rappresenta uno strumento molto importante di acquisizione ed elaborazione delle informazioni che possono essere trasferite poi ad un computer.

Può essere paragonato ad un registratore di dati ed è un dispositivo elettronico digitale, di piccole dimensioni, che registra dei dati campionandoli ad intervalli regolari attraverso un sensore interno oppure collegato ad uno esterno, alimentato da

una batteria interna ed equipaggiato con un microprocessore ed una memoria per l'acquisizione dei dati. Uno dei principali vantaggi di usare un data taker, è la possibilità di memorizzare dati in modo automatico su base giornaliera oppure campionati nel tempo. Una volta attivati, questi strumenti possono essere sistemati nel luogo d'interesse e lasciati a registrare in maniera automatica per tutta la durata di acquisizione dei dati. Ciò permette un'accurata mappatura delle condizioni ambientali che vengono monitorate come ad esempio parametri esterni meteorologici.

Il DataTaker utilizzato per la nostra campagna di monitoraggio è un DT500 (Fig. 10) ed è stato impostato per registrare dati ogni 10 secondi.

Il DataTaker CEM Series 3 è un apparecchio complementare al DataTaker DT500, e serve ad incrementare il numero di canali che si possono utilizzare per collegare i vari sensori. Va collegato direttamente con il DataTaker mediante l'utilizzo di un cavo-dati e risulta essere autoalimentato (non necessità di alimentazione diretta a differenza del DT500). Ogni CEM ha a disposizione 10 canali.

L'ampliamento dei canali è stato necessario poiché vi erano due sperimentazioni contemporanee sul mock up e inoltre, il DataTaker principale era impiegato nell'acquisizione dei dati meteorologici esterni mentre i canali della CEM sono stati utilizzati per collegare parte dei sensori di temperatura applicati ai pannelli.



Fig. 103 – Strumentazione di controllo, registrazione e monitoraggio dei dati: in evidenza il DataTaker DT500 interno alla struttura in muratura adiacente al mock up in legno esposto a Sud.

Termoflussimetro

Il termoflussimetro (cioè misuratore del flusso termico) è uno strumento che misura il passaggio di calore attraverso l'elemento oggetto del monitoraggio ed è collegato al DataTaker. Nella campagna di sperimentazione condotta si è scelto di installare un termoflussimetro sul lato interno di ciascun pannello (Fig. 104).



Fig. 104 – Installazione dei termoflussimetri per ciascun pannello: termoflussimetri e sonde di temperatura PT100 devono essere collocati alla stessa altezza e uno accanto all'altro.

Termoresistenze PT100

Sonde di temperatura installate internamente ed esternamente ai pannelli (due per ogni pannello) e collegate al DataTaker/CEM.

La sonda di temperatura (cioè misuratore di temperatura) è uno strumento che serve a misurare la temperatura di una qualsiasi superficie. Nel nostro caso utilizzeremo termoresistenze PT100. Nella fase preliminare della nostra sperimentazione si è scelto di installare sonde interne e sonde esterne per ciascun pannello (vedi Fig.104).

Termoresistenze PT100 ambientale

La sonda di temperatura aria (cioè misuratore della temperatura dell'aria) è uno strumento che serve a misurare la temperatura di un qualsiasi ambiente. Nel nostro caso utilizzeremo una termoresistenza al platino che verrà fissata al soffitto della serra e posizionata a circa metà altezza della stanza, allo scopo di monitorare la temperatura ambientale.

Stazione meteo

La valutazione dei parametri ambientali esterni è stata possibile grazie alla stazione meteo adiacente al mock up (Fig.105) collegata al DataTaker DT500 posizionato all'interno della casetta. I dati registrati con un intervallo impostato di 10 secondi erano monitorabili in tempo reale con l'interfaccia LabView attraverso il pannello di controllo riportato in Fig. 105. I dati rilevati sono stati:

- temperatura dell'aria esterna;
- umidità relativa U.R. %
- pressione sul livello del mare;
- direzione e velocità del vento;
- Irraggiamento solare globale orizzontale.



Fig. 105 – Stazione meteo posizionata adiacente al mock up sperimentale: nella foto le varie fasi di allestimento preparatorie all'inizio della campagna di monitoraggio.

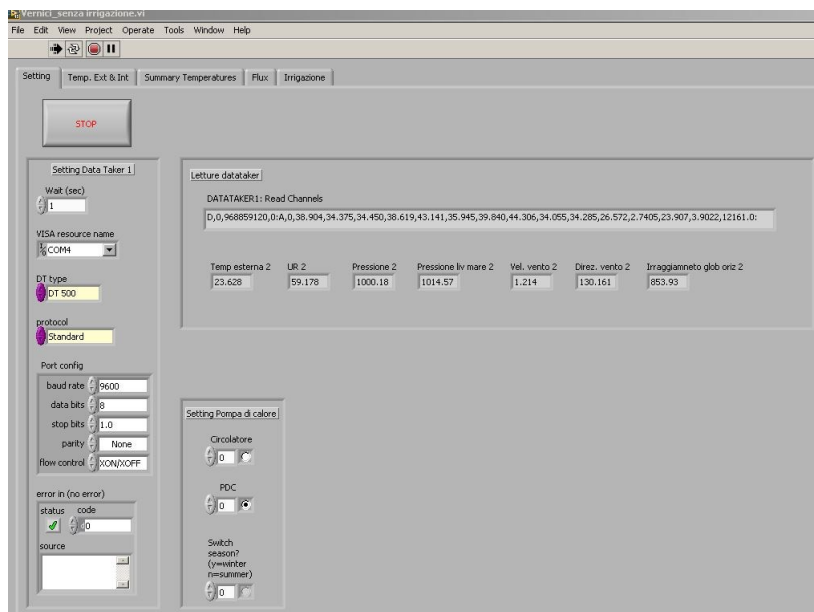


Fig. 106 – Pannello di acquisizione e controllo dati: interfaccia LabView.

Sistema di irrigazione del verde

Altro fenomeno oggetto di studio è stata la componente del raffrescamento passivo evaporativo attraverso un sistema di irrigazione e nebulizzazione dell'acqua posizionata davanti alla facciata monitorata esposta a Sud. Per studiare questo fenomeno è stato collocato nell'area di prato antistante la facciata Sud della serra un sistema di irrigazione tramite ugelli che spruzzano acqua in maniera temporizzata e controllata (Fig. 107).

Il metodo scelto per la programmazione dei tempi di irrigazione si basa sul controllo di due parametri: l'Irradiazione solare globale sull'orizzontale (I_{gh}) e l'umidità relativa ambientale esterna (H.R.%). Il settaggio è stato impostato nel seguente modo:

- Se $I_{gh} > 100 \text{ W/m}^2$ e H.R. $< 90\%$ → irrigazione ON alternando cicli di ON per 1 minuto e di OFF per 10 minuti.

In questo modo nel caso di pioggia (H.R. $< 90\%$) e/o nel caso in cui sia notte o il sole sia coperto causa mal tempo ($I_{gh} < 100 \text{ W/m}^2$) l'irrigazione è in modalità OFF. Per la programmazione e il controllo dei parametri impostati si è utilizzato il programma LabView che ha permesso la temporizzazione automatica del sistema di irrigazione in base alla parametrizzazione descritta (Fig.108).



Fig. 107 – Sistema di irrigazione predisposto davanti alla facciata sud del mock up dove sono collocati i pannelli monitorati.



Fig. 108 – Interfaccia di controllo LabView per la temporizzazione del sistema di irrigazione in base ai parametri di controllo programmati.

Sistema di raffrescamento interno alla serra

Oltre al posizionamento delle strumentazioni per la misurazione delle temperature superficiali dei pannelli, per ottenere un monitoraggio attento dei flussi termici tra interno ed esterno della parete composta dai 4 pannelli in OSB, è stata installata una pompa di calore (Fig. 108 – 109) all'interno della serra in modo da contrastare un surriscaldamento anomalo della temperatura interna dovuta all'esposizione a Sud

della parete stessa e mantenere un delta di temperatura significativo tra ambiente interno ed esterno.



Fig. 109 – Sistema di raffreddamento: pompa di calore.



Fig. 110 – Sistema di raffreddamento all'interno della serra: ventilconvettore.

Il sistema di raffrescamento, anche se funzionante, non aveva abbastanza potenza per poter raffrescare adeguatamente l'ambiente a causa delle troppe dispersioni termiche dovute alla configurazione stessa della struttura in legno.

Riepilogo sensori applicati ai pannelli

Il monitoraggio dei quattro pannelli ha previsto l'impiego della seguente sensoristica:

Fig.111 – Elenco dei parametri monitorati:

Time [s]
TINT_PAN4
TINT_PAN3
TINT_PAN2
TINT_PAN1
TEXT_PAN4
TEXT_PAN3
TEXT_PAN2
TEXT_PAN1
TARIAINT1
TARIAINT2
FLUX_PAN4
FLUX_PAN3
FLUX_PAN2
FLUX_PAN1
CONTATORE
Temp esterna
UR
Pressione
Pressione liv mare
Velocità Vento
Direzione vento
Irraggiamento

- Termoflussimetri:
 - Termoflussimetro lato interno pannello P1 con la pittura bianca di riferimento;
 - Termoflussimetro lato interno pannello P2 con la pittura in sughero con sfere di vetro cave riflettenti;
 - Termoflussimetro lato interno pannello P3 con la pittura in sughero bianca;
 - Termoflussimetro lato interno pannello P4 con la pittura con pigmento riflettente in alluminio.
- Sonde PT100 per la temperatura superficiale:
 - Sonda lato interno pannello P1 con la pittura bianca di riferimento;
 - Sonda lato interno pannello P2 con la pittura in sughero con sfere di vetro cave riflettenti;
 - Sonda lato interno pannello P3 con la pittura in sughero bianca;
 - Sonda lato interno pannello P4 con la pittura con pigmento riflettente in alluminio.
 - Sonda lato esterno del pannello P1 con la pittura bianca di riferimento;
 - Sonda lato esterno pannello P2 con la pittura in sughero con sfere di vetro cave riflettenti;
 - Sonda lato esterno pannello P3 con la pittura in sughero bianca;
 - Sonda lato esterno pannello P4 con la pittura con pigmento riflettente in alluminio.

Riepilogo schema pannelli

Prima di riportare i dati registrati durante il monitoraggio estivo del 2019, riepiloghiamo anche lo schema di posizionamento dei pannelli e la loro numerazione (Fig. 112) poiché la stessa nomenclatura è stata adottata per indicare le grandezze misurate in opera.



Fig. 112 – Schema posizionamento e numerazione dei pannelli studiati.

4.3 Risultati campagna sperimentale 2019

Il progetto di ricerca sui cool materials ha previsto una fase di studio e preparazione dei materiali e del mock up da monitorare che ha impegnato all'incirca da dicembre a luglio 2019. La fase di attivazione di registrazione dei dati è iniziata il 6 agosto 2019 ma dall'8 agosto al 12 agosto si è rilevato un problema sulla temporizzazione dell'irrigazione che è rimasta sempre accesa non rispettando il ciclo di on-off impostato, ovvero 1 minuto on e 10 minuti off. Il problema è stato poi risolto e le misurazioni ripartono correttamente dal 13 agosto fino all'8 settembre 2019.

Inoltre, per poter verificare se il sistema di irrigazione apportasse un effetto di mitigazione delle temperature superficiali in facciata, dal 27 agosto in poi il sistema è stato spento del tutto e i dati acquisiti sono senza irrigazione.

Di seguito riportiamo alcuni dei grafici elaborati tenendo in considerazione le relazioni tra: temperatura dell'aria esterna, irraggiamento solare, irrigazione on o off, temperature superficiali rilevate esternamente ed internamente per ciascun pannello, temperatura interna dell'aria nel mock up. I grafici sono stati elaborati singolarmente per ciascun giorno sia mediando i dati rilevati ogni 10 secondi e trasformandoli in dati medi orari (h), sia lasciando gli andamenti registrati ogni 10 secondi per analizzare meglio l'andamento delle curve per ciascun materiale.

Inoltre, poiché dall'analisi preliminare dei dati sperimentali risulta che la temperatura dell'aria interna è quasi sempre maggiore della temperatura dell'aria esterna (anche nelle ore notturne), i flussi registrati sono sempre uscenti. Infatti, come detto precedentemente, il sistema di pompa di calore non è riuscito ad erogare abbastanza potenza per poter raffrescare adeguatamente la serra interna. Per questi motivi, i dati relativi al flusso non sono stati graficati in quanto non significativi.

Successivamente, sulla base di giornate in cui si è rilevata una radiazione solare globale simile, si è fatta una comparazione tra i dati rilevati mentre il sistema di irrigazione era acceso rispetto ai dati registrati mentre l'irrigazione era spenta per capire se c'è una correlazione rispetto all'andamento delle temperature superficiali esterne dei pannelli.

I grafici non riportati in questa sezione saranno inseriti nel paragrafo conclusivo del capitolo di questa sperimentazione.

GRAFICI CON IRRIGAZIONE ON

Grafico 19 - 6 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

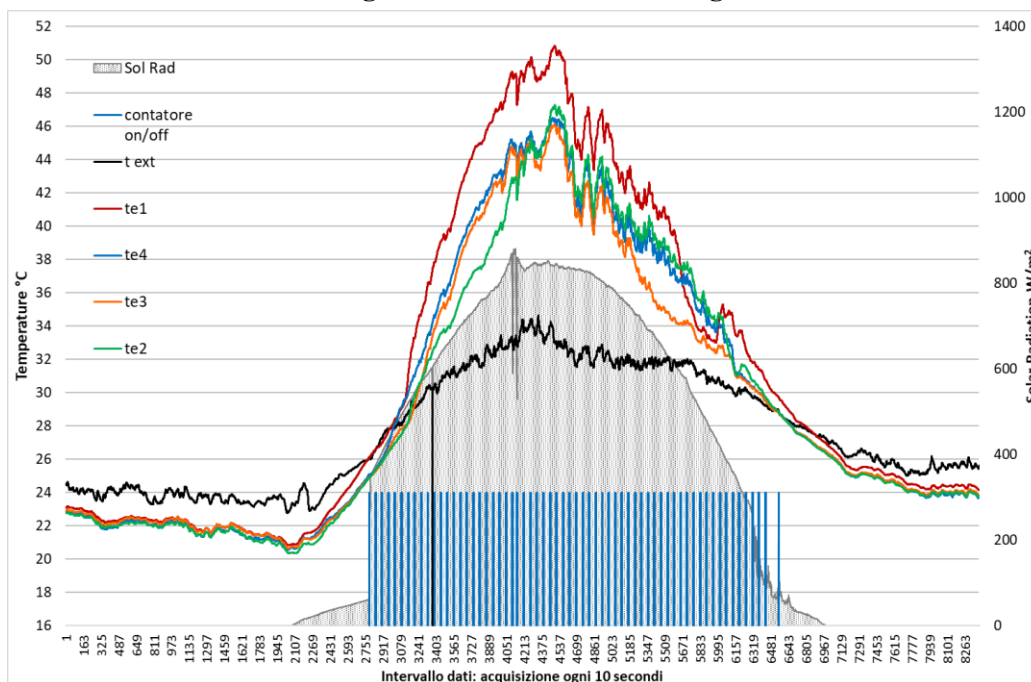


Grafico 20 - 6 agosto 2019: intervallo orario

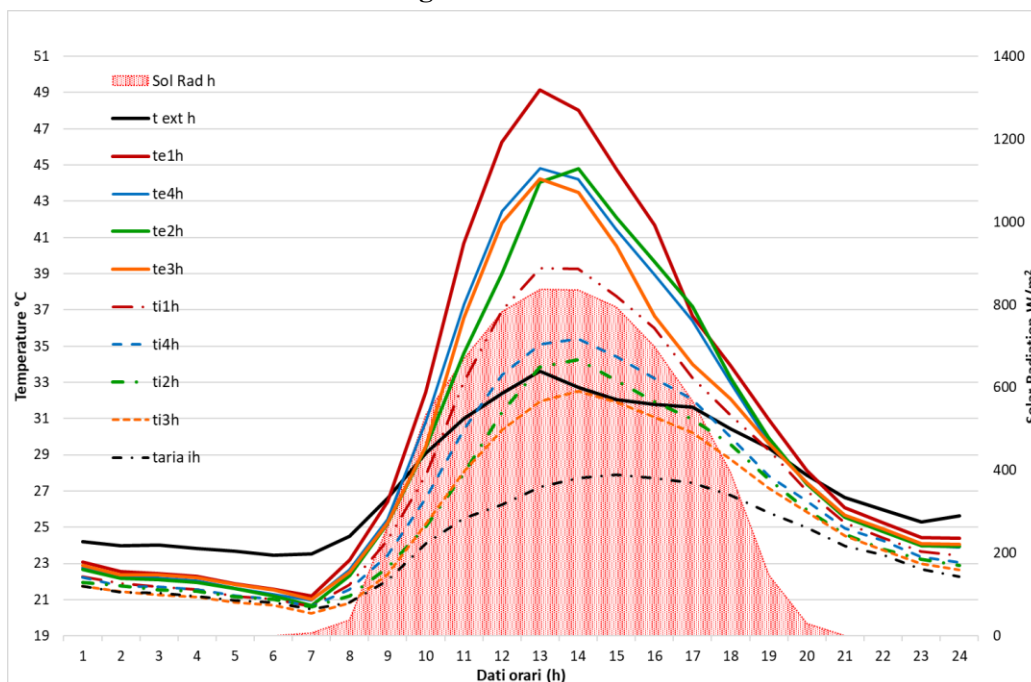


Grafico 21 - 13 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

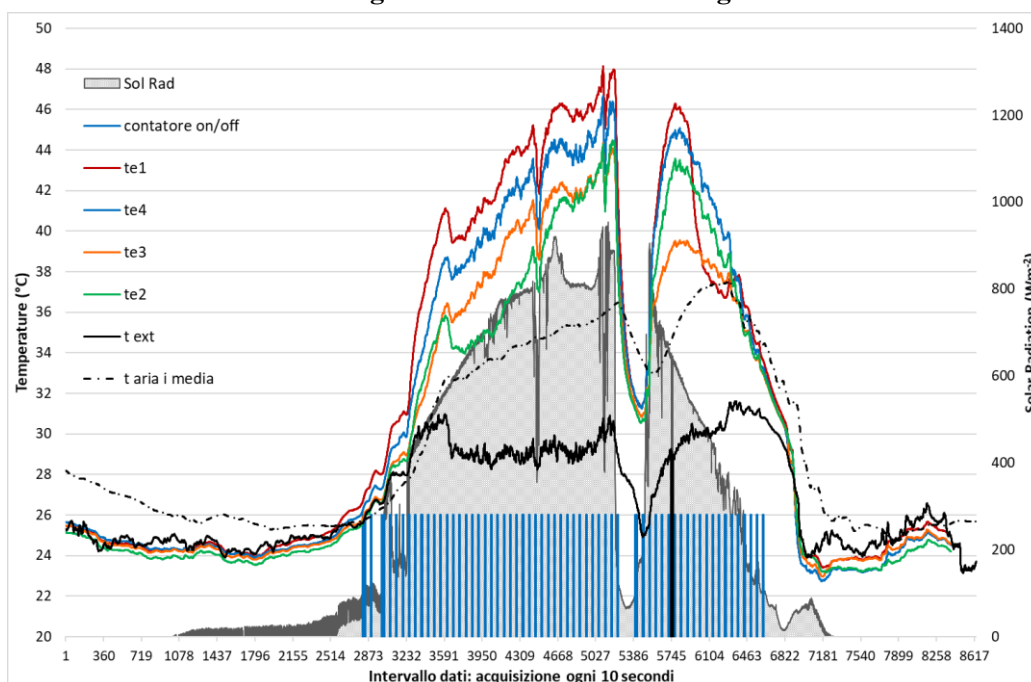


Grafico 22 - 13 agosto 2019: intervallo orario

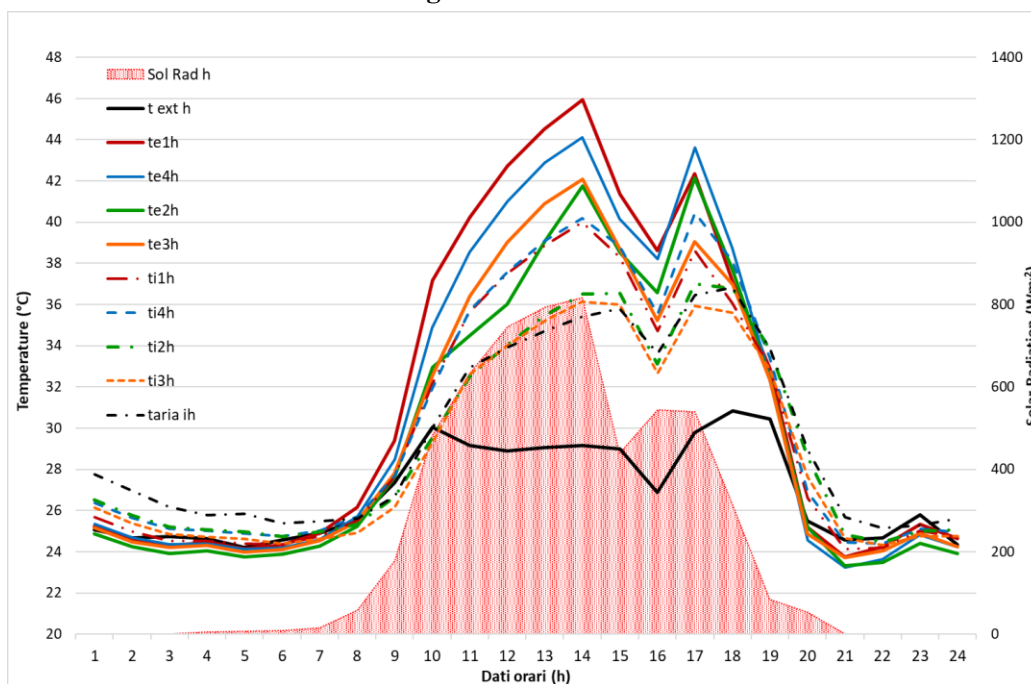


Grafico 23 - 14 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

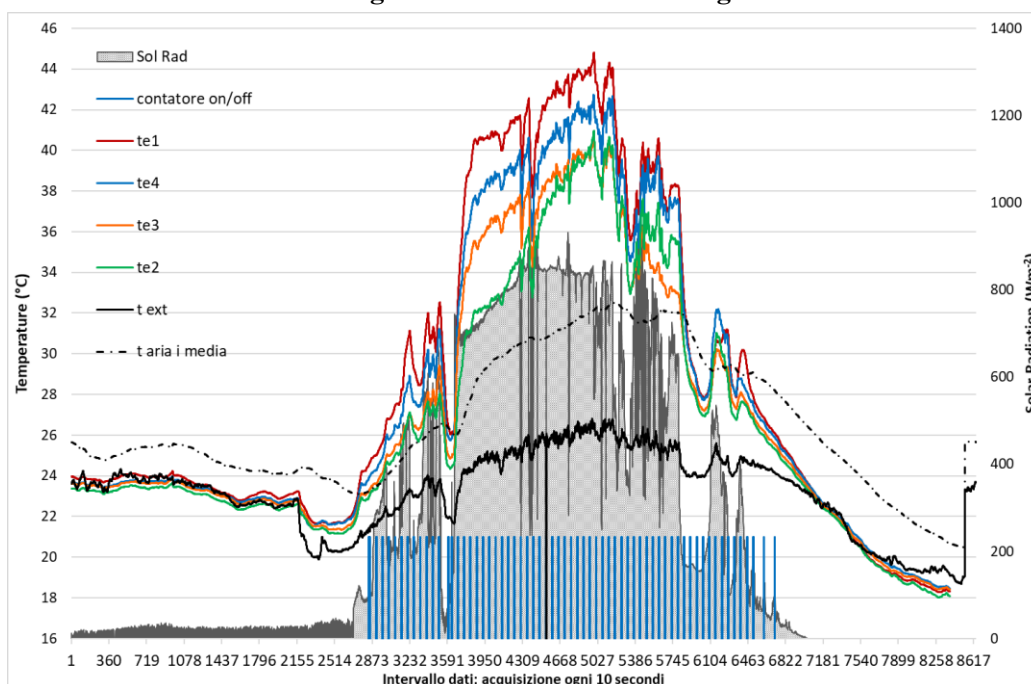


Grafico 24 - 14 agosto 2019: intervallo orario

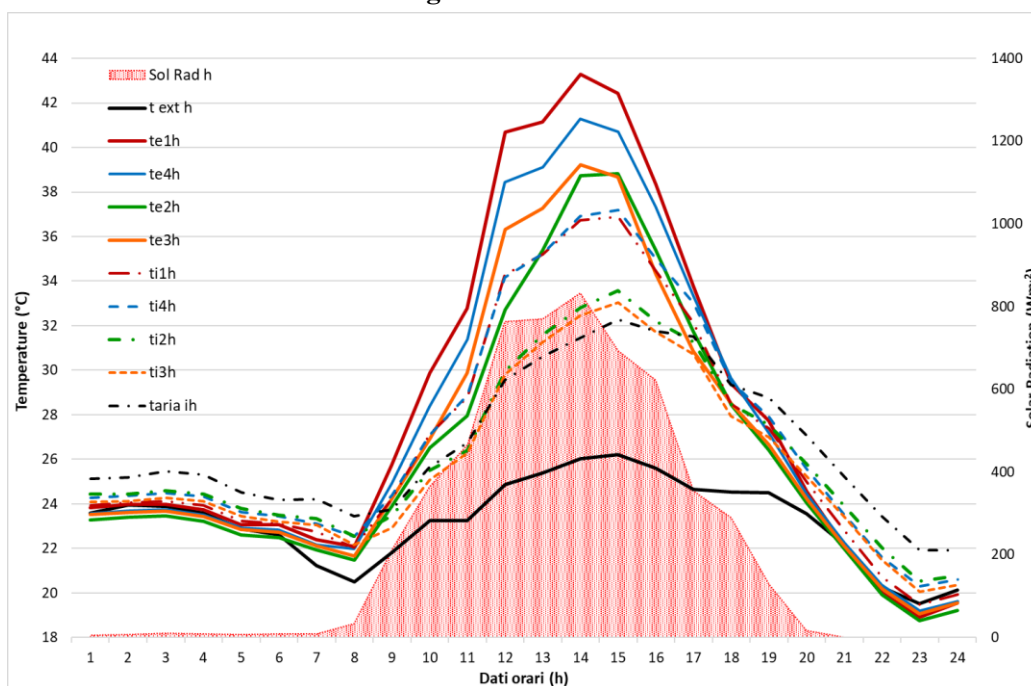


Grafico 25 - 15 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

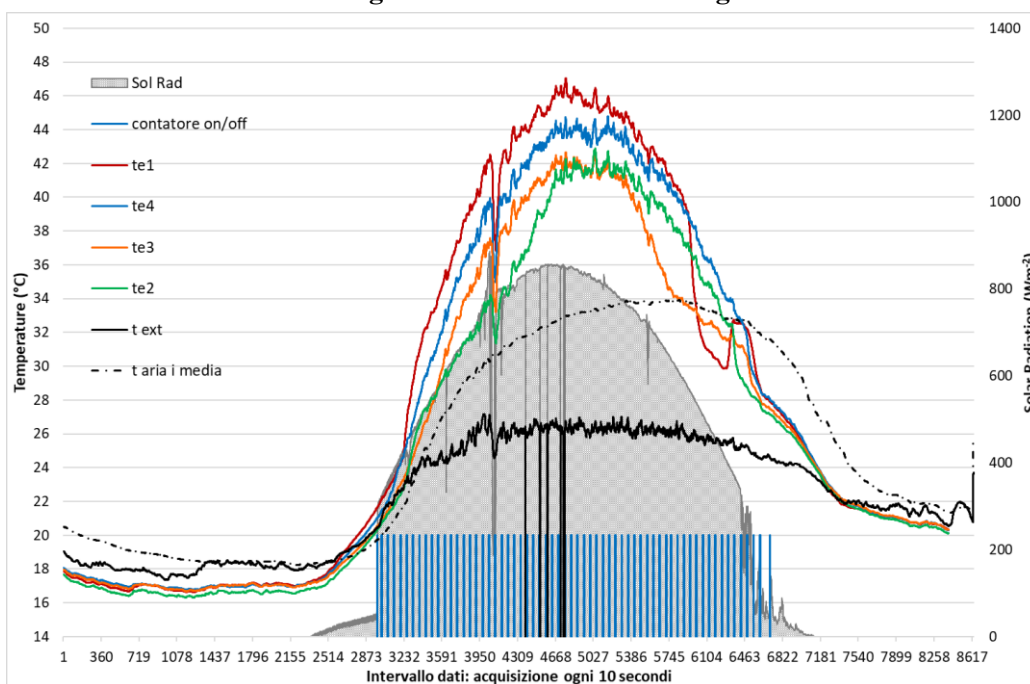


Grafico 26 - 15 agosto 2019: intervallo orario

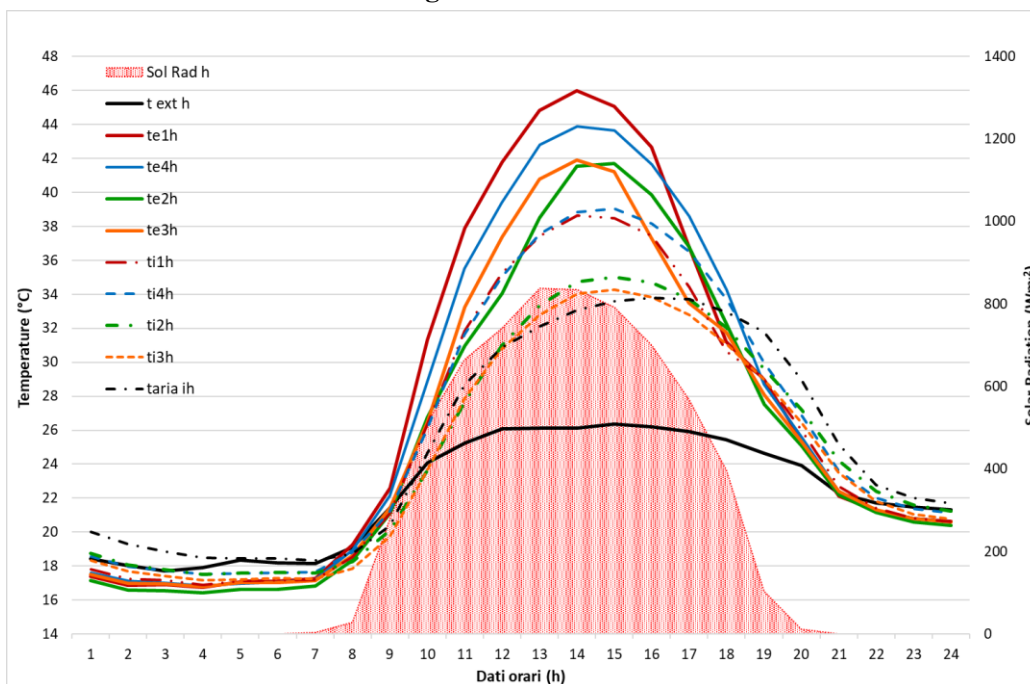


Grafico 27 - 16 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

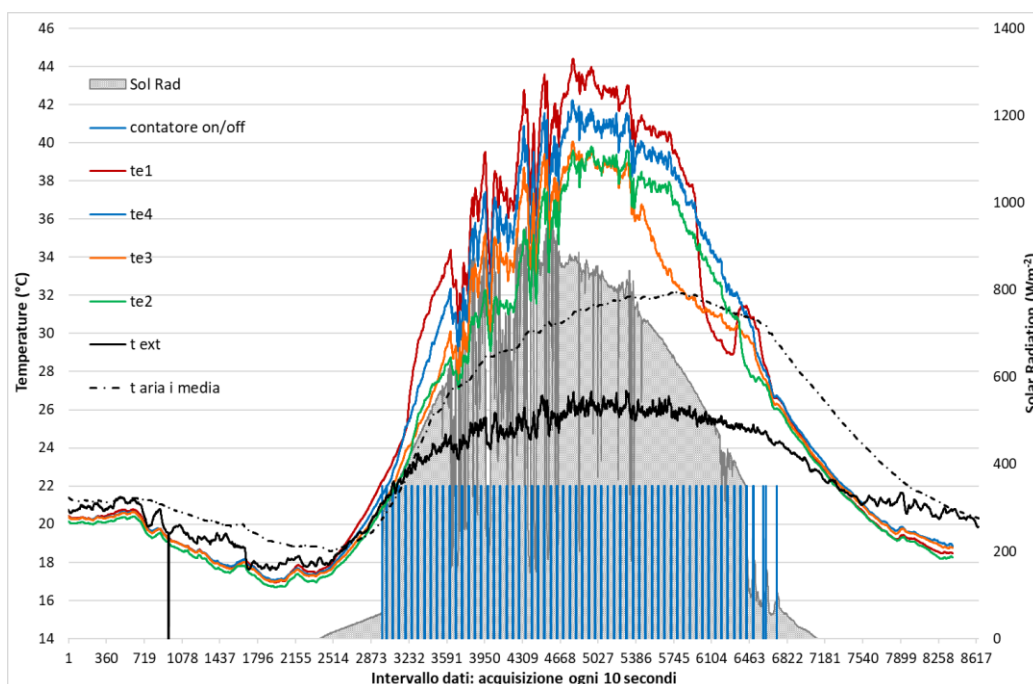


Grafico 28 - 16 agosto 2019: intervallo orario

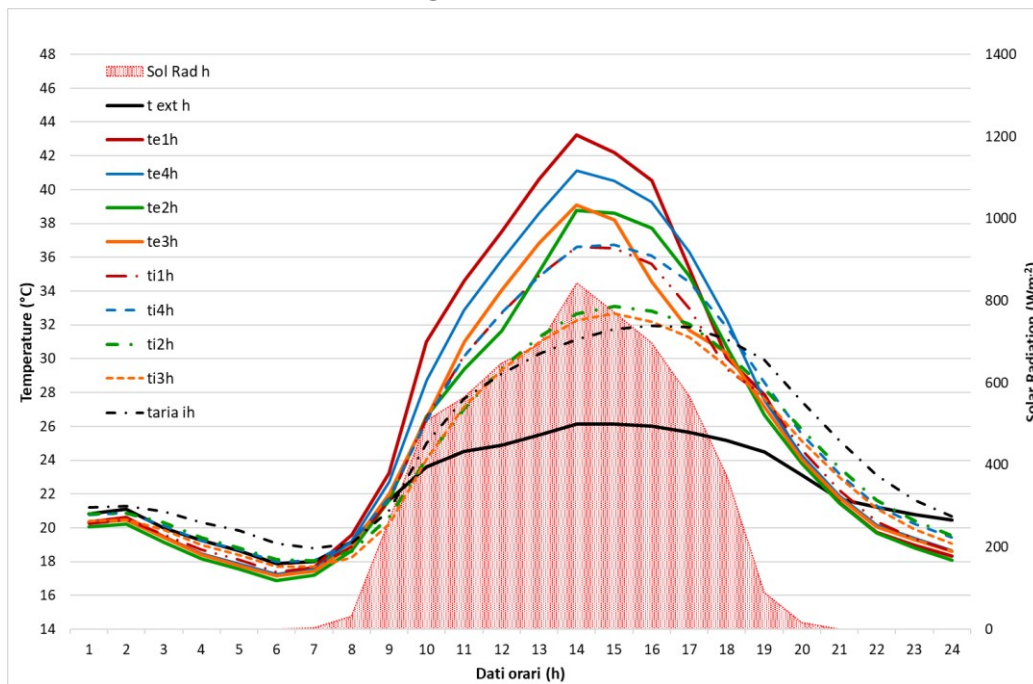


Grafico 29 - 17 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

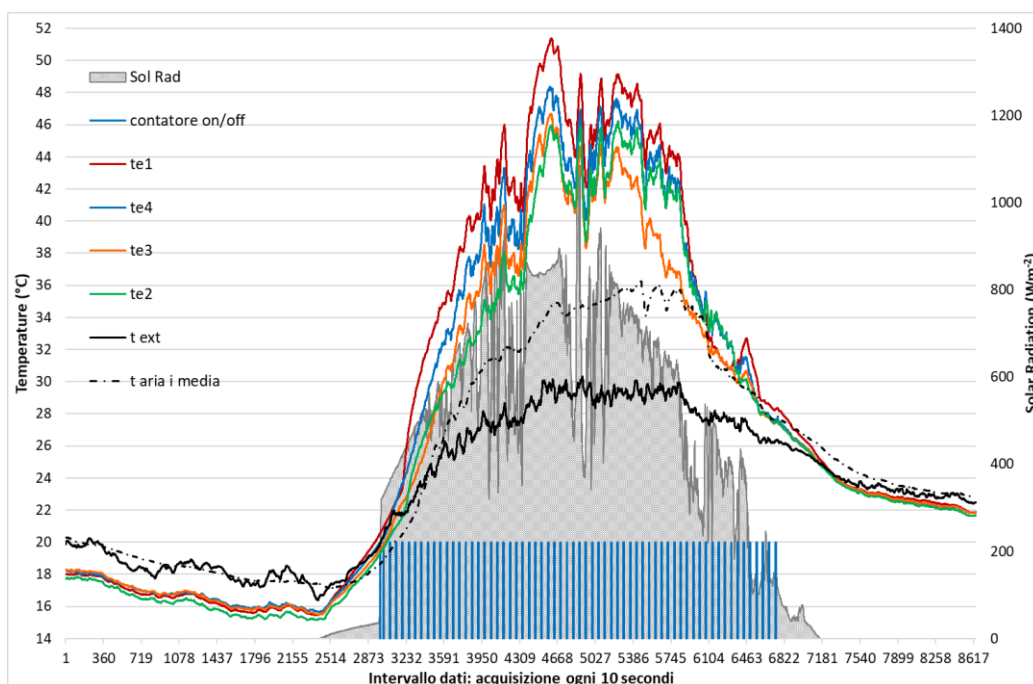


Grafico 30 - 17 agosto 2019: intervallo orario

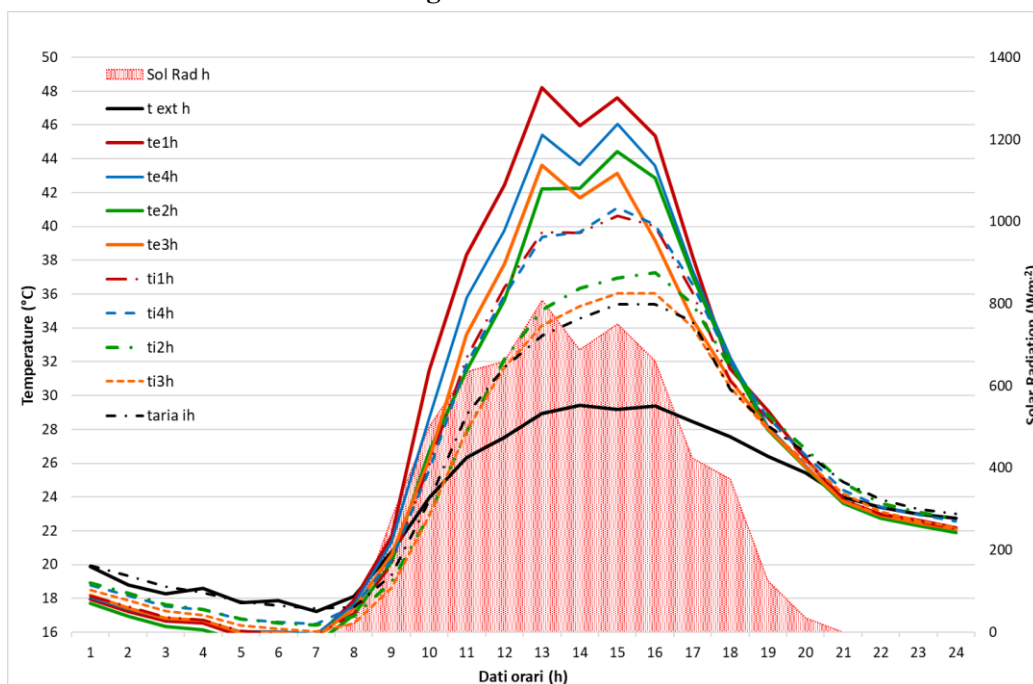


Grafico 31 - 18 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

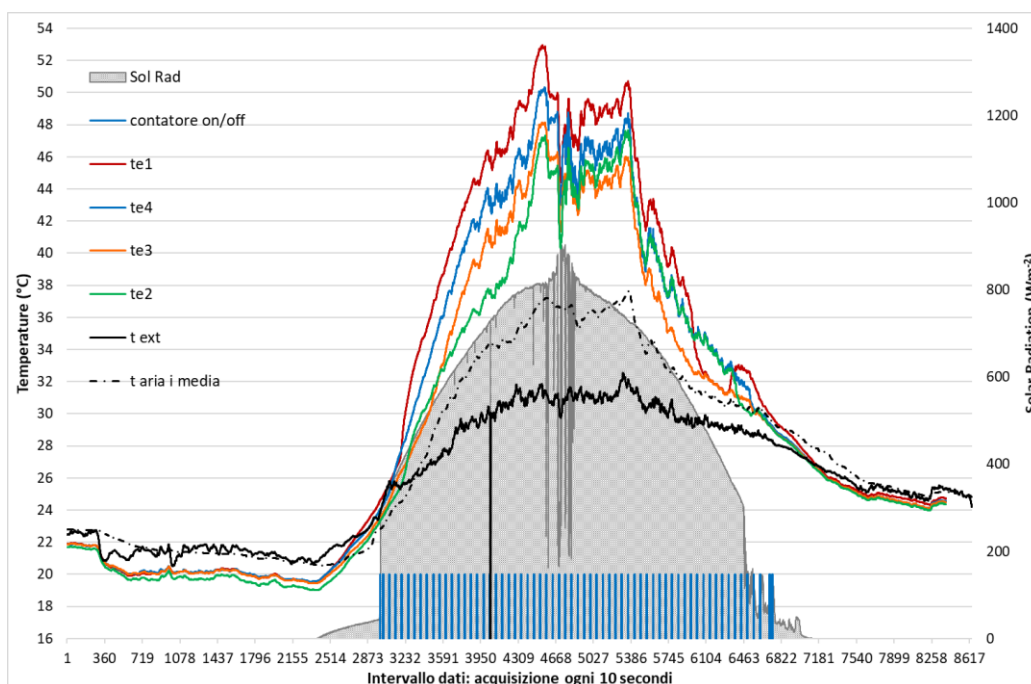


Grafico 32 - 18 agosto 2019: intervallo orario

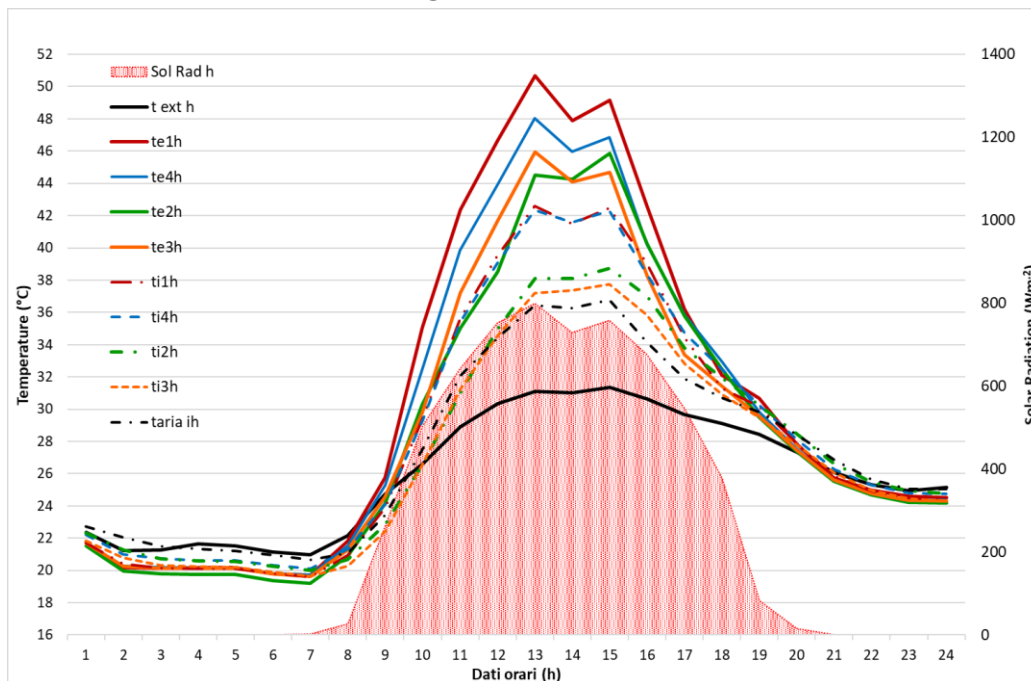


Grafico 33 - 19 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

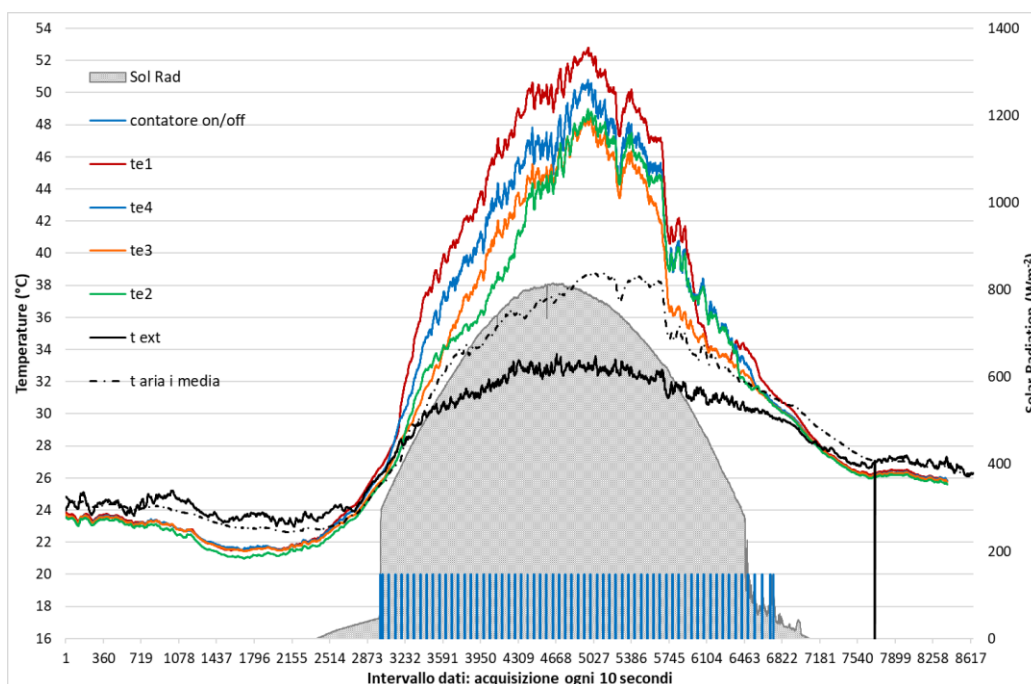


Grafico 34 - 19 agosto 2019: intervallo orario

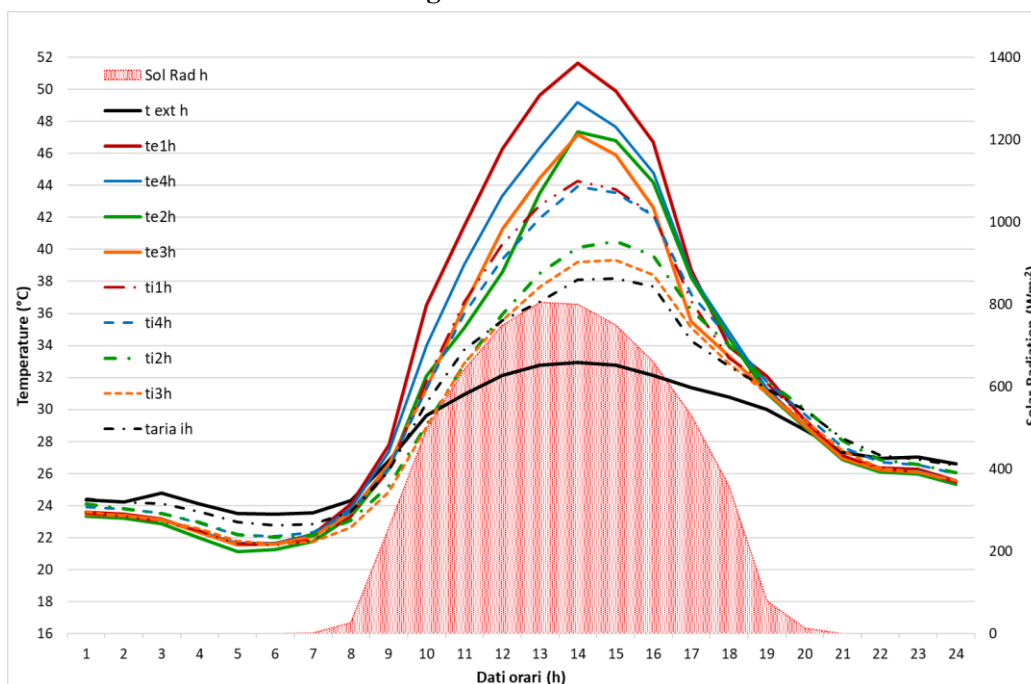


Grafico 35 - 20 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

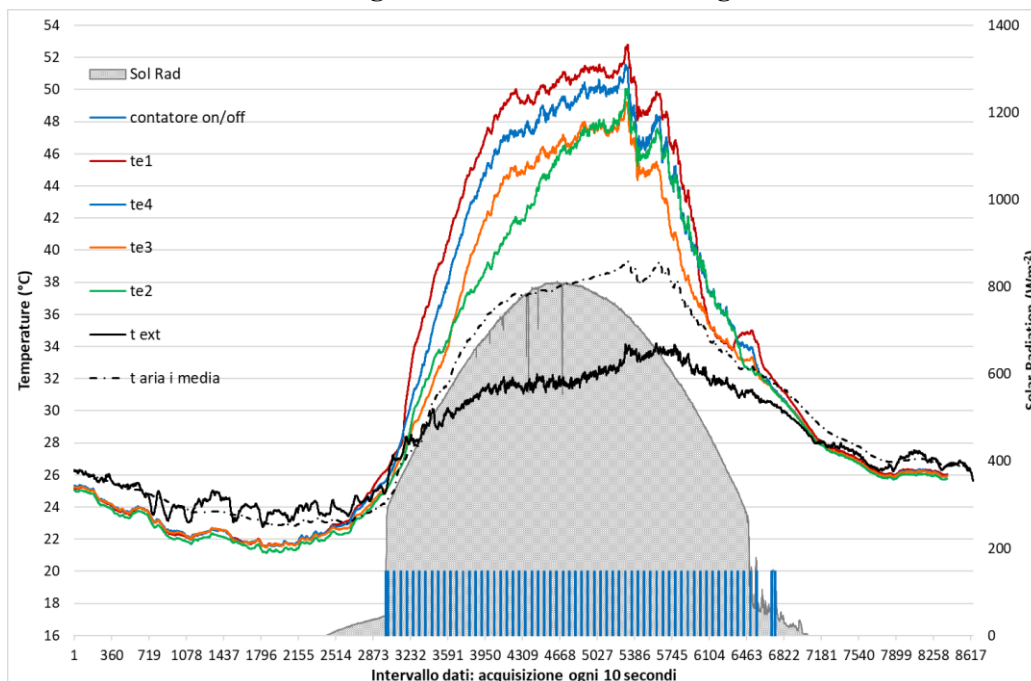


Grafico 36 - 20 agosto 2019: intervallo orario

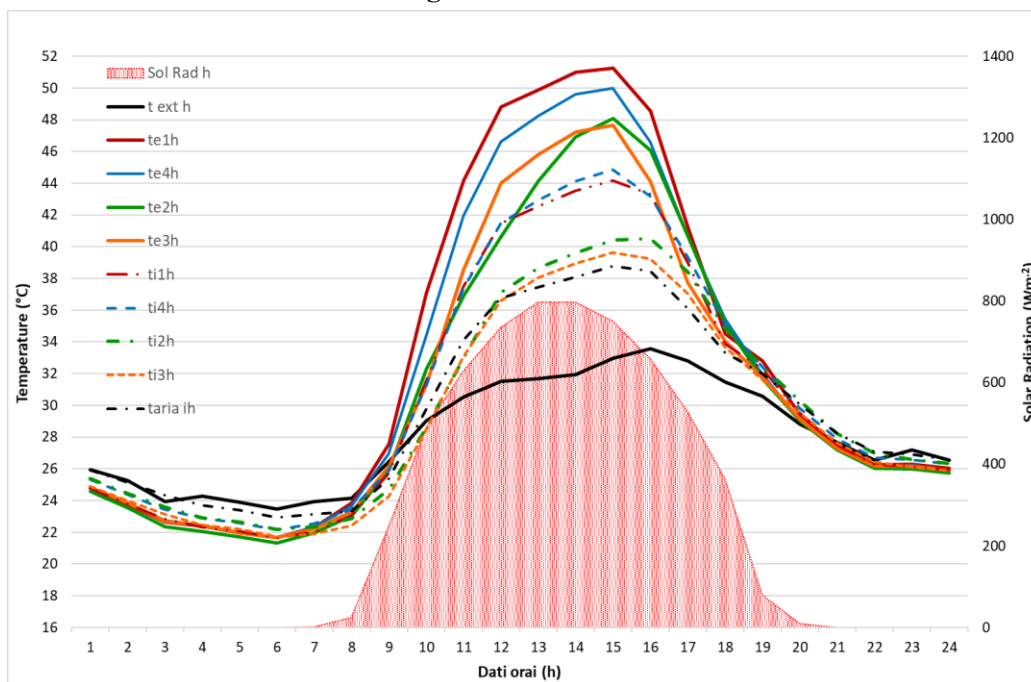


Grafico 37 - 21 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

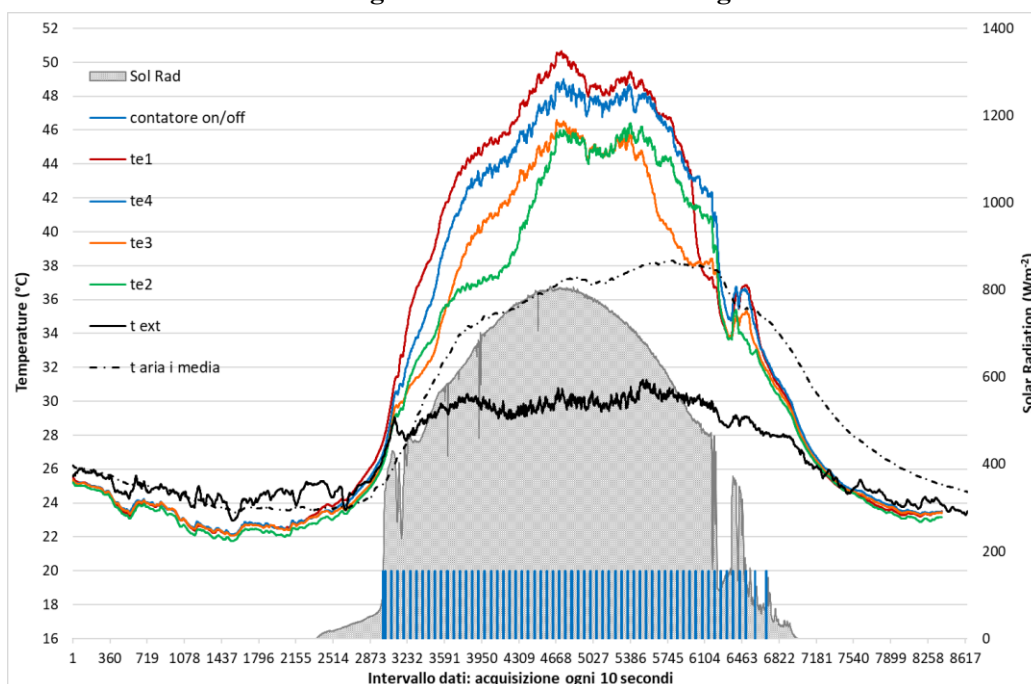
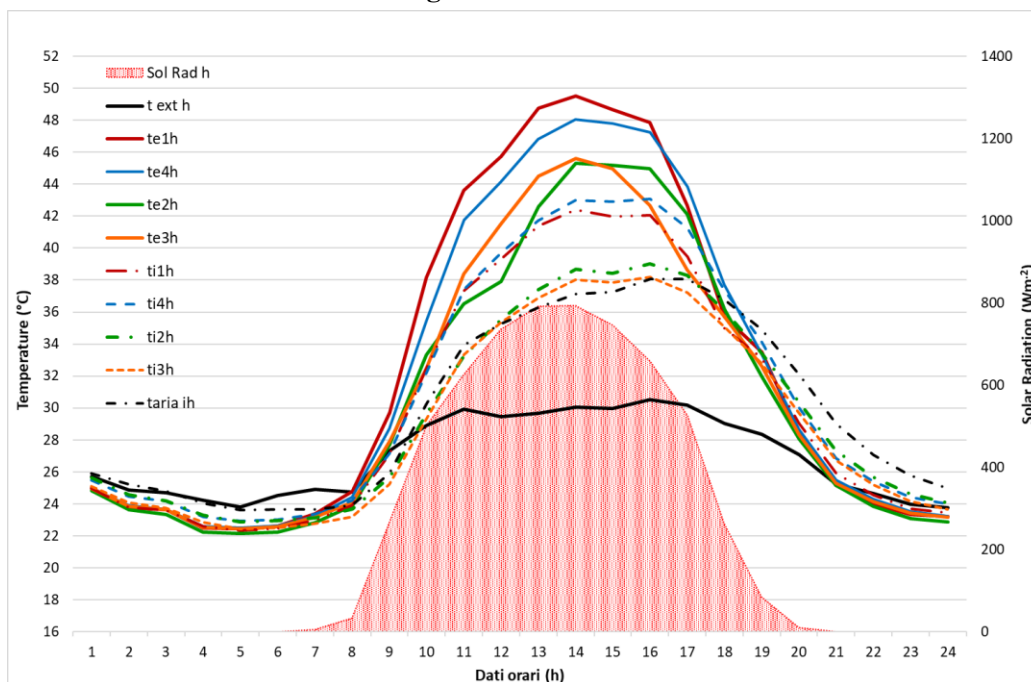


Grafico 38 - 21 agosto 2019: intervallo orario



GRAFICI CON IRRIGAZIONE OFF

Grafico 39 - 27 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

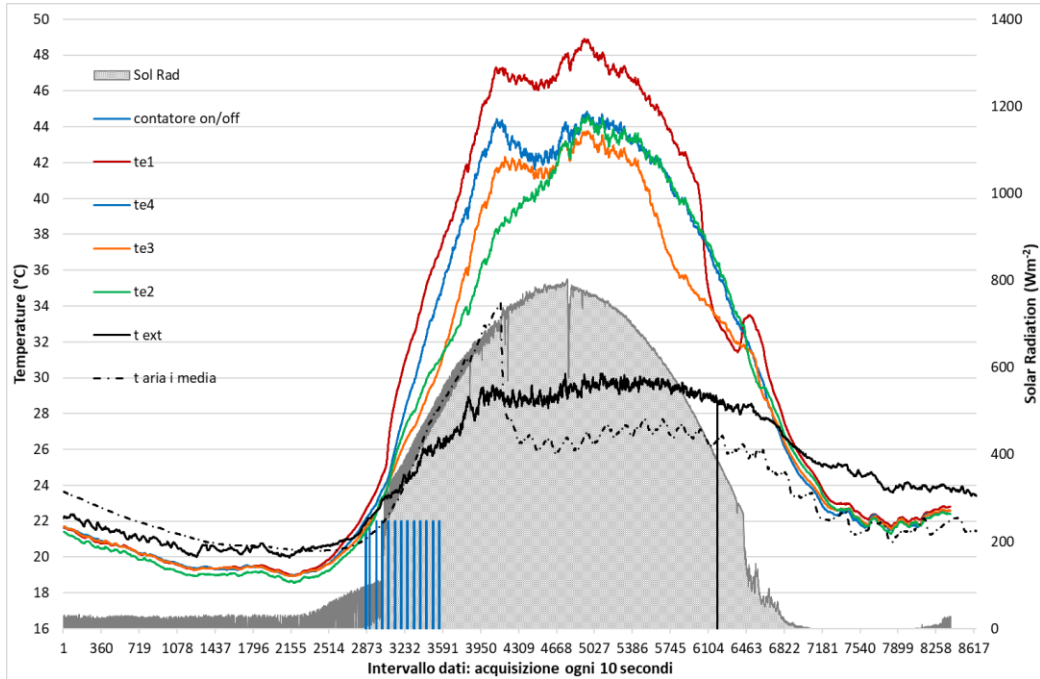


Grafico 40 - 27 agosto 2019: intervallo orario

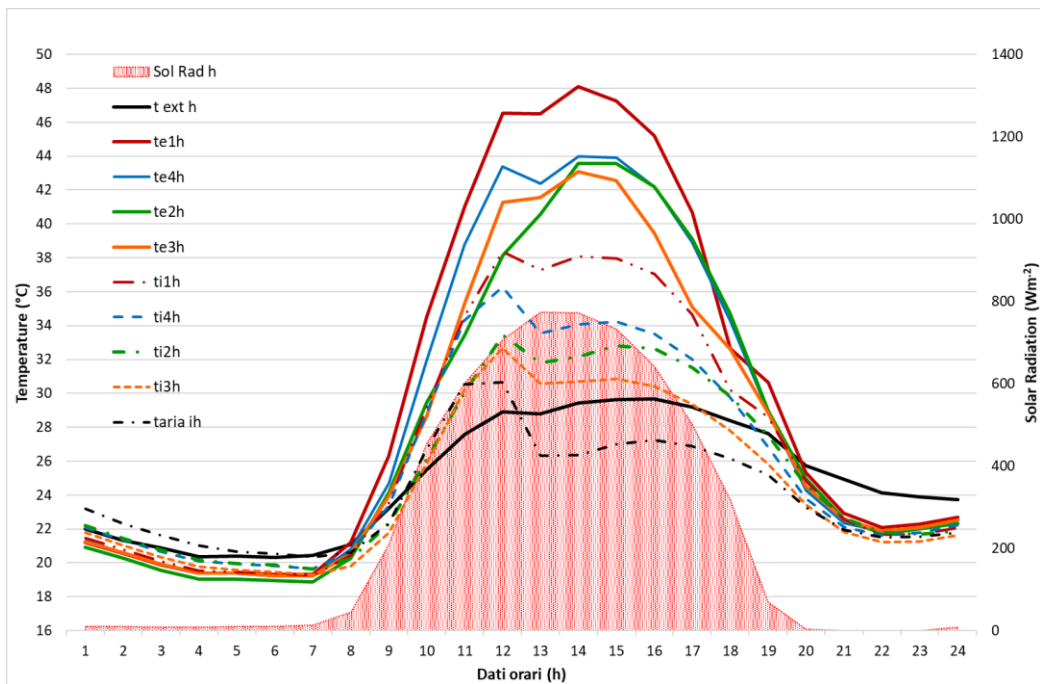


Grafico 41 - 28 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

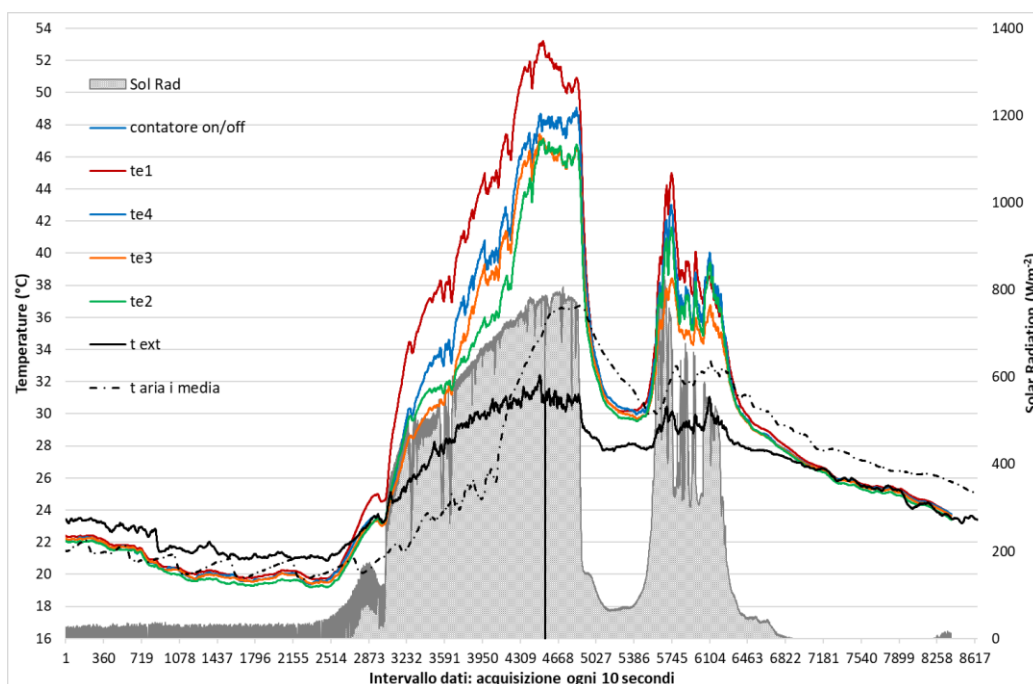


Grafico 42 - 28 agosto 2019: intervallo orario

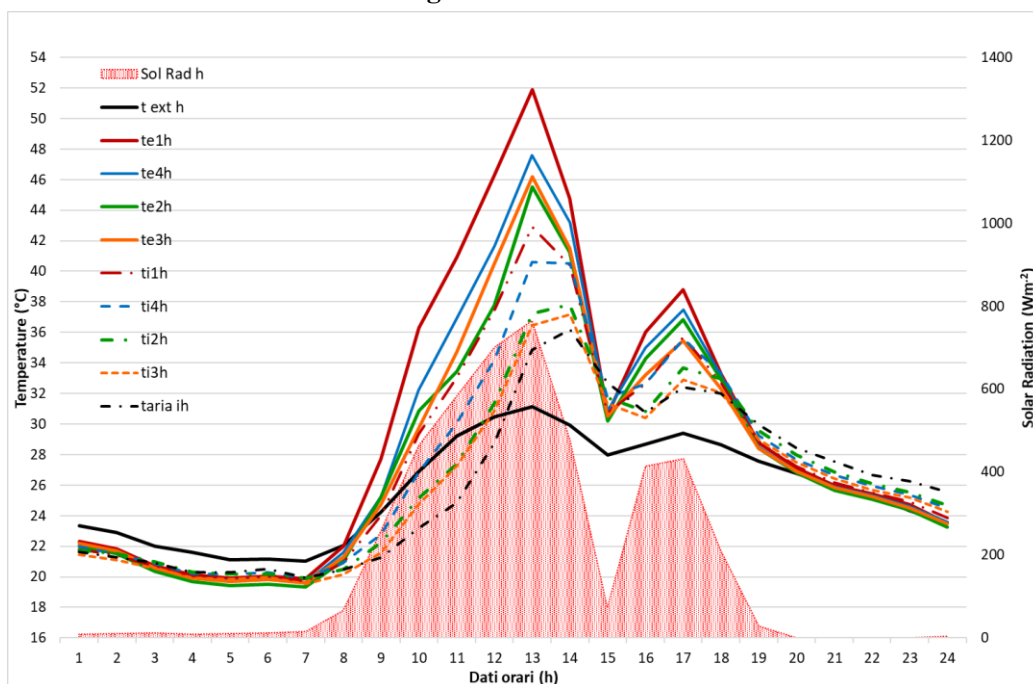


Grafico 43 - 29 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

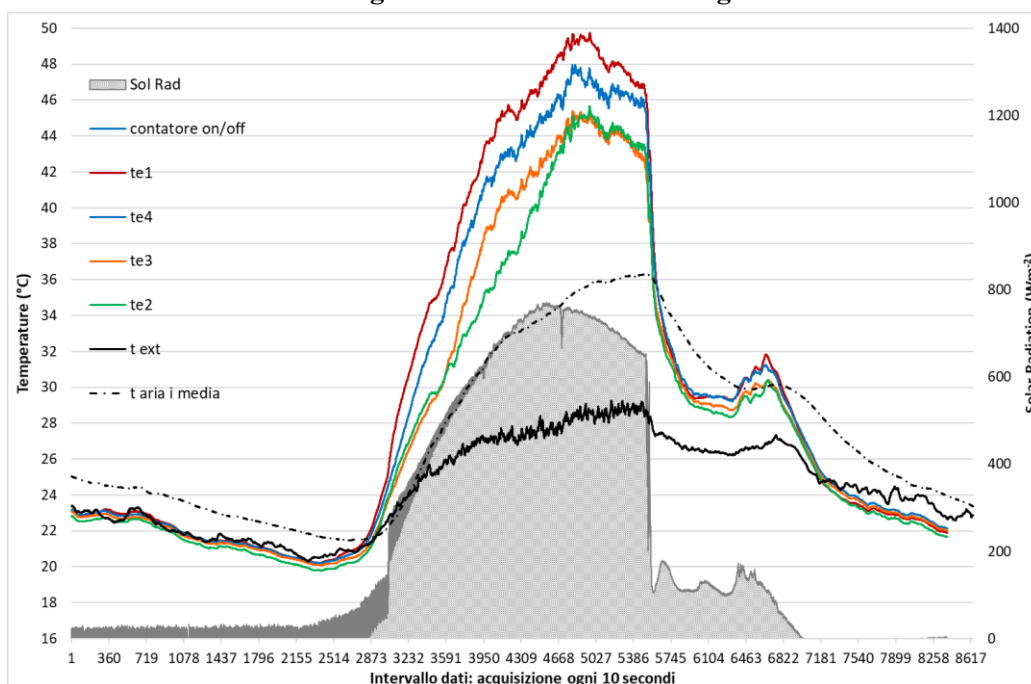


Grafico 44 - 29 agosto 2019: intervallo orario

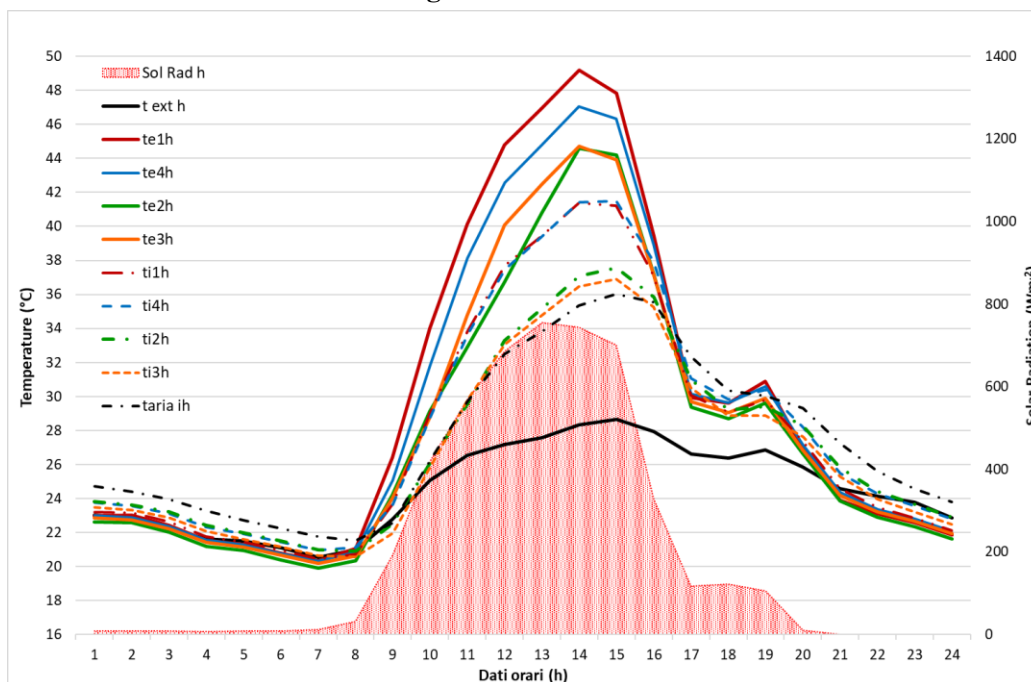


Grafico 45 - 30 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

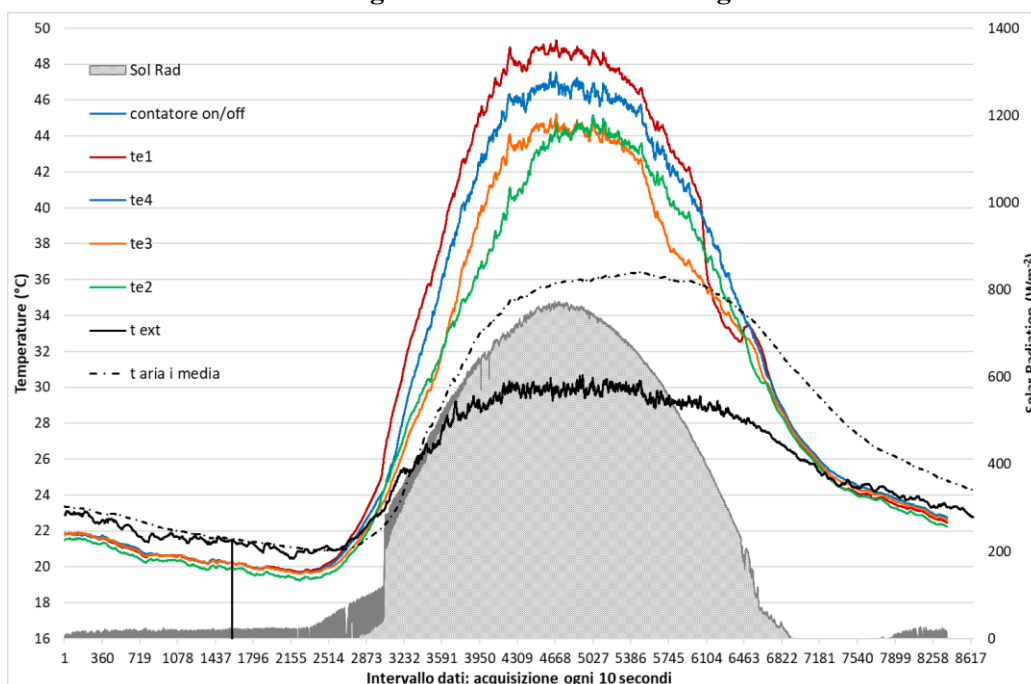


Grafico 46 - 30 agosto 2019: intervallo orario

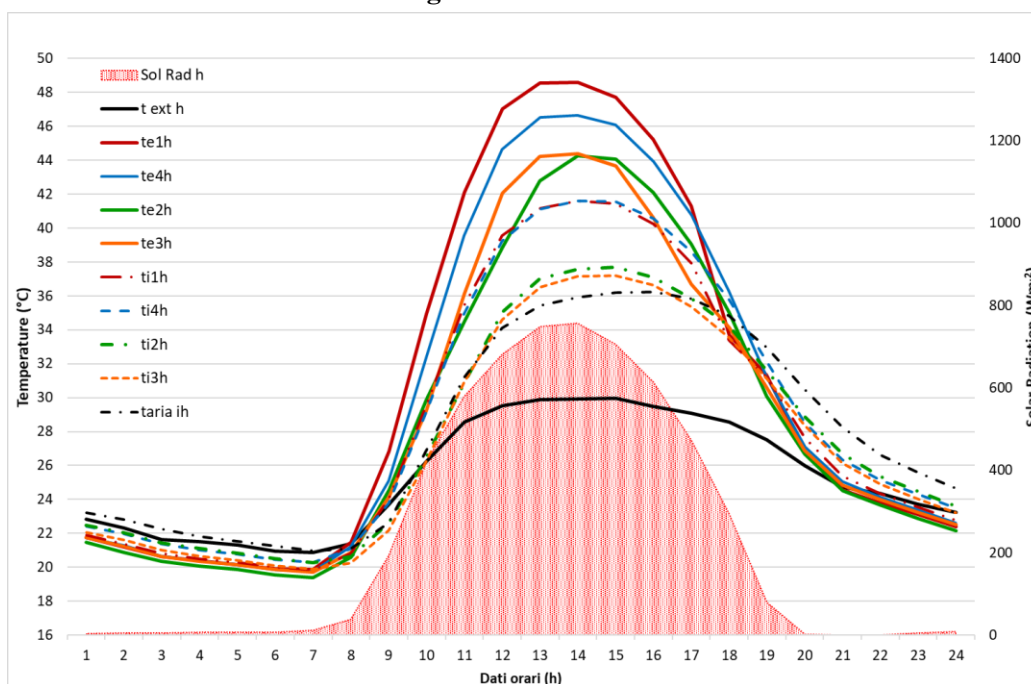


Grafico 47 - 31 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

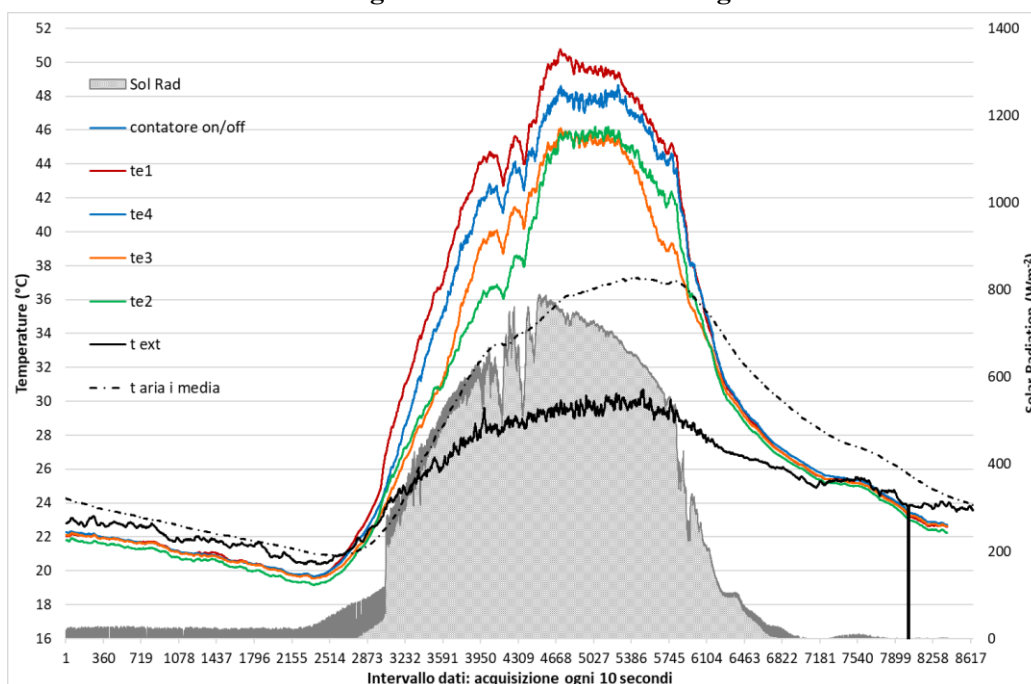


Grafico 48 - 31 agosto 2019: intervallo orario

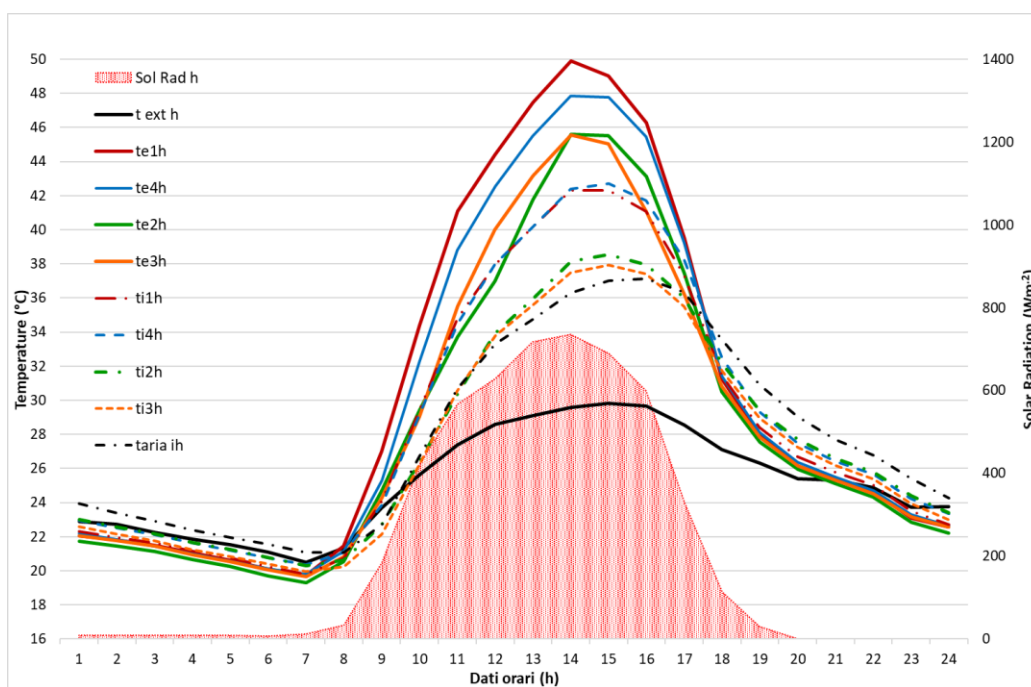


Grafico 49 - 1 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

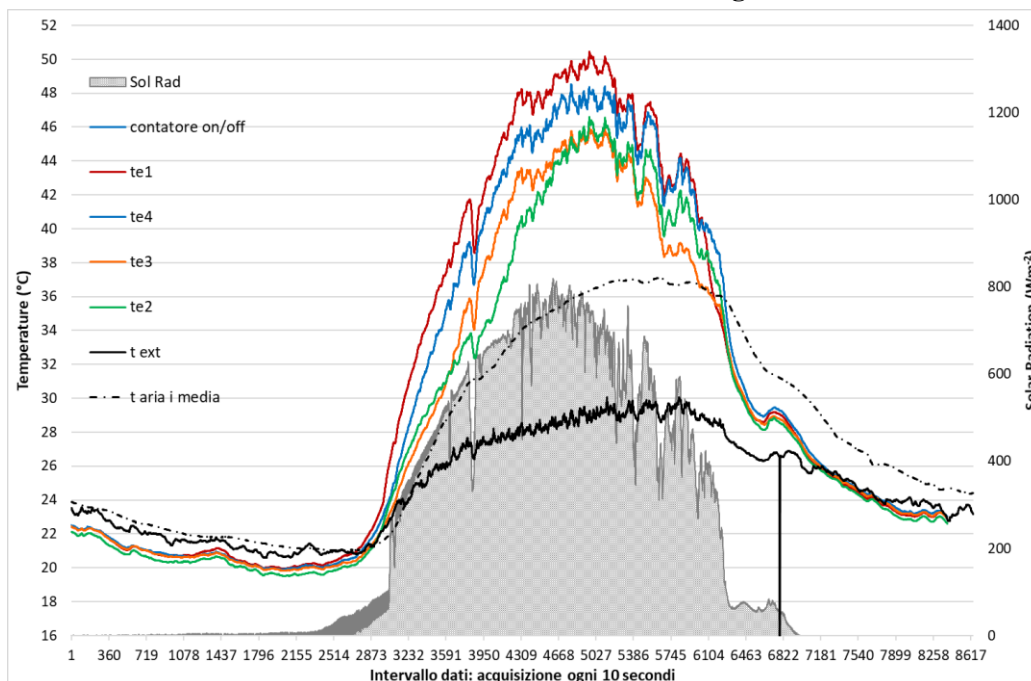


Grafico 50 - 1 settembre 2019: intervallo orario

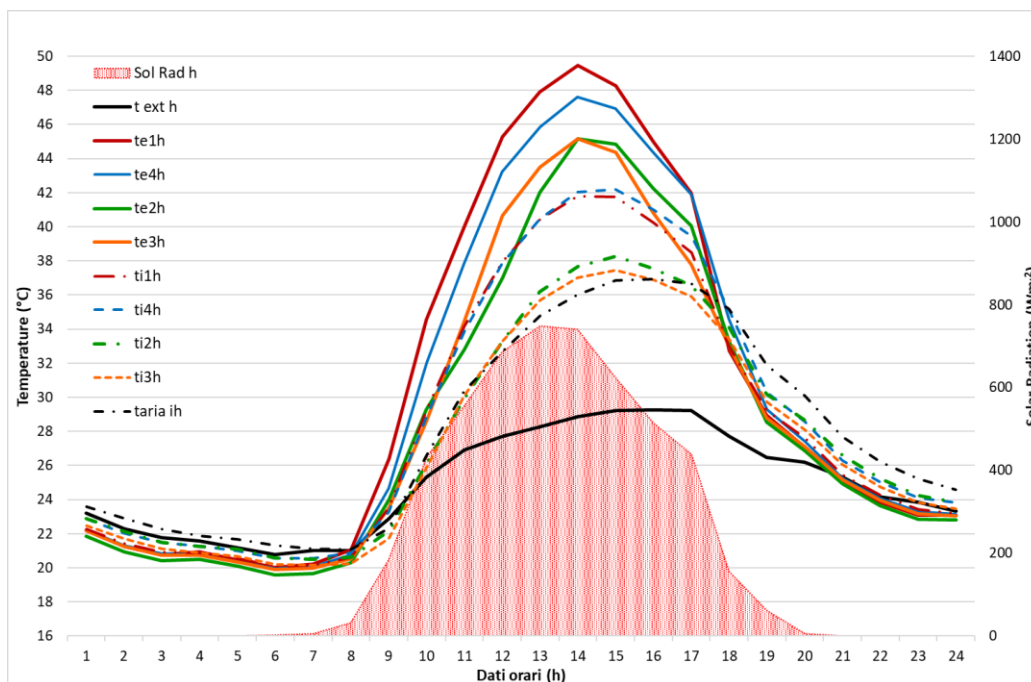


Grafico 51 - 2 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

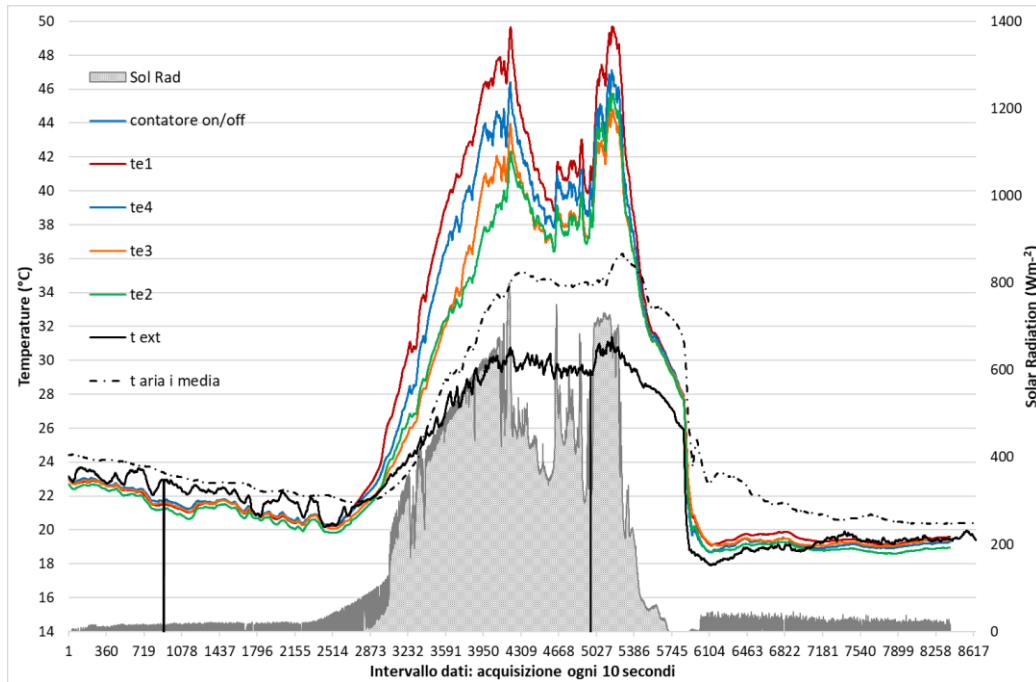


Grafico 52 - 2 settembre 2019: intervallo orario

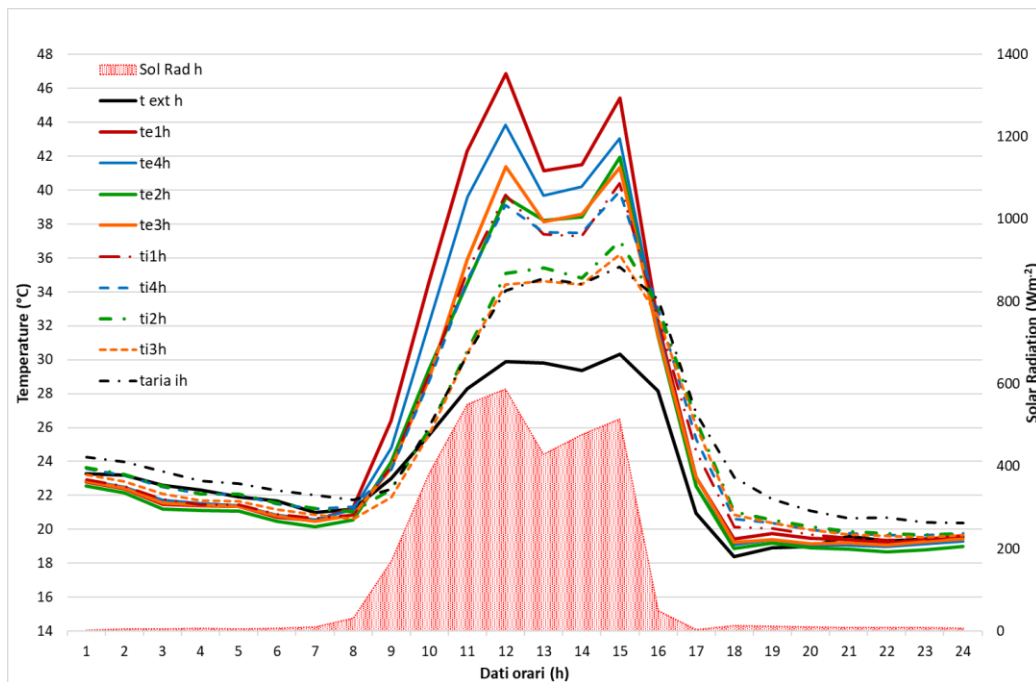


Grafico 53 - 8 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

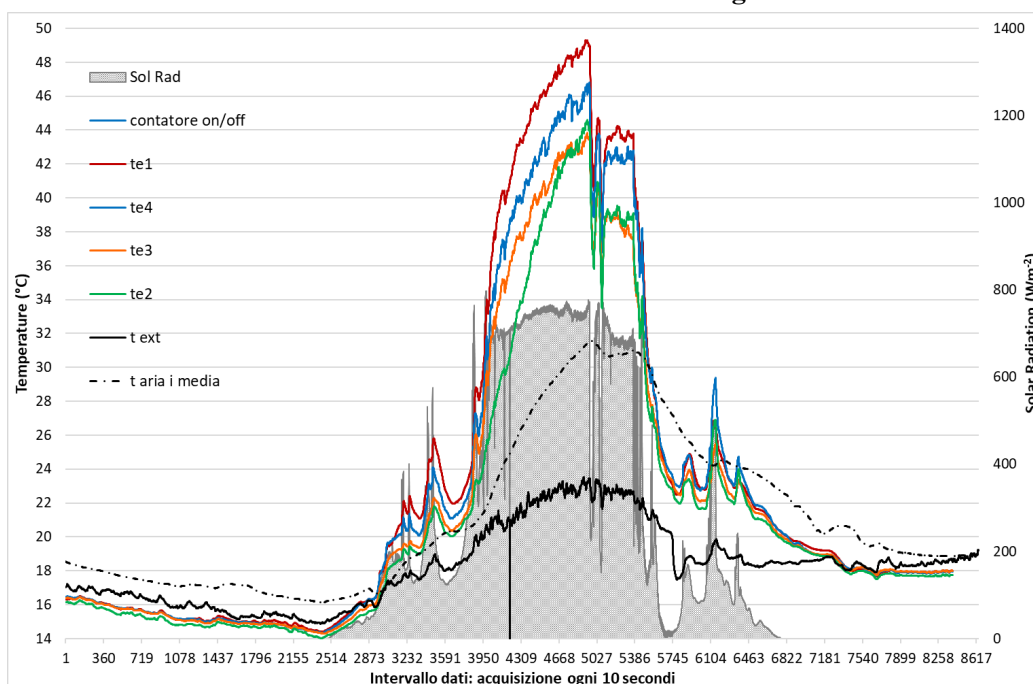
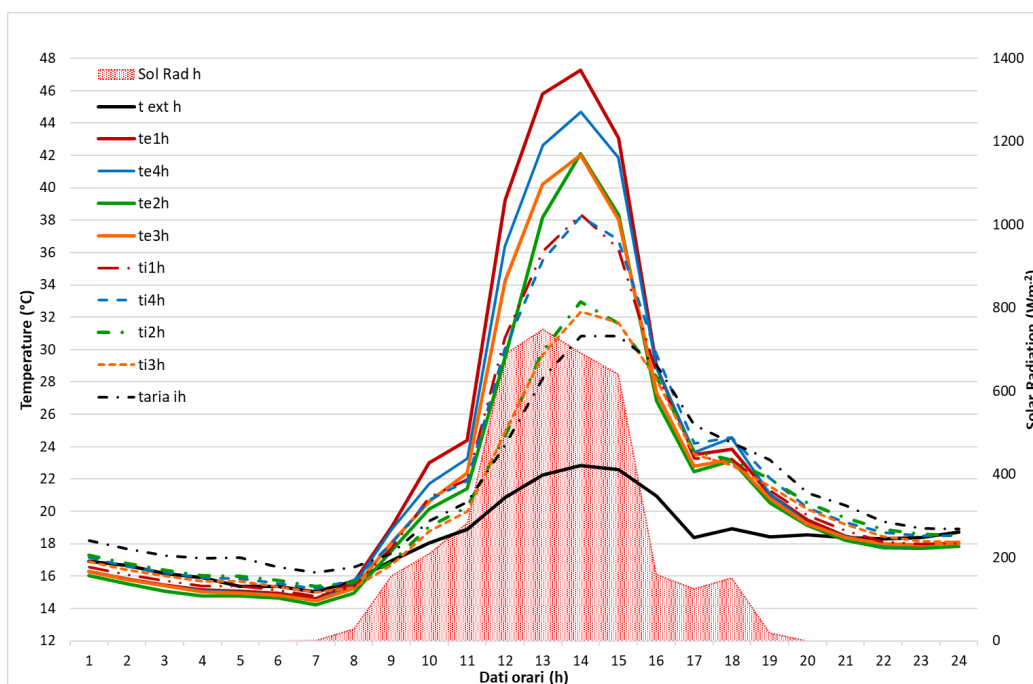


Grafico 54 - 8 settembre 2019: intervallo orario



Considerazioni

L'analisi dei dati sperimentali raccolti conferma solo in parte quanto osservato dal comportamento delle curve spettrali NIR e MIR condotte in laboratorio. Infatti, il monitoraggio in sito delle pitture ha evidenziato le seguenti risposte:

✓ **Temperature superficiali esterne:**

In tutti i grafici analizzati la pittura di riferimento bianca tradizionale P1 è quella che ha registrato i valori maggiori, temperature oltre i 50°C: è la prima a crescere di temperatura e generalmente l'ultima anche in fase di raffrescamento. Questo conferma quanto riscontrato dal punto di vista dell'analisi spettrale dimostrando che non è sufficiente una pigmentazione di colore bianco per poter agire come un cool material e riflettere la massima radiazione solare incidente.

Contrariamente a quanto ci si aspettava, la seconda pittura che ha dato i risultati peggiori è stata la pittura con il pigmento riflettente in alluminio P4. Infatti, subito dopo P1, è questo pannello che ha raggiunto i picchi di temperatura superficiale con un andamento analogo alle curve di P1: la prima a salire di temperatura e l'ultima anche in fase di raffrescamento, alternandosi con P1.

Per quanto riguarda le temperature superficiali esterne, i valori migliori sono stati ottenuti con le pitture a base sughero con e senza cariche riflettenti: P2 e P3. Entrambi i pannelli raggiungono temperature di picco simili ma si può notare un comportamento differente per la pittura P2, quella con le cariche riflettenti S1. Infatti, il pannello P2 sembra sfasare il raggiungimento della temperatura superficiale di picco e la temperatura cresce in maniera più lenta nel tempo. In alcuni grafici (vedi ad esempio grafici orari 26 – 29 – 31 - 37 – 45), oltre al fenomeno dello sfasamento, le curve P2 e P3 sono speculari una rispetto all'altra se consideriamo la temperatura di picco raggiunta: il pannello P2 raggiunge la stessa temperatura di P3 ma con un ritardo di 1 – 2 ore.

Inoltre, in generale sia il pannello P2 che quello P3 hanno temperature sempre inferiori ai pannelli P1 e P4, in media dai 2 ai 4 °C in meno.

✓ **Temperature superficiali interne:**

Anche all'interno della serra ritroviamo all'incirca gli stessi andamenti generali riscontrati all'esterno. L'analisi dei grafici evidenzia che i pannelli che raggiungono le temperature più elevate sono sempre quello con la pittura P1 e con la pittura P4: le due pitture hanno andamenti molto simili, infatti

in molti casi le curve sono quasi sovrapponibili e alcune volte la curva P4 supera P1.

Le curve relative ai pannelli P2 e P3 confermano, rispetto alle altre, il buon andamento anche all'interno raggiungendo temperature superficiali più basse e generalmente minori dai 2°C ai 4°C, come già visto per le temperature esterne. In particolare, si può notare che la temperatura dei pannelli P2 e P3 rimane vicina a quella dell'aria indoor con un andamento simile. Le due pitture a base sughero sembrano rallentare il passaggio di calore dall'esterno verso la superficie interna del pannello probabilmente grazie sia allo spessore maggiore con cui questi rivestimenti vengono applicati sia alla presenza di cariche termiche e/o riflettenti.

A causa della struttura estremamente leggera in legno del mock up, l'ambiente interno esposto a Sud risente moltissimo della radiazione solare in estate e senza un sistema di raffrescamento adeguato (pompa di calore insufficiente) la temperatura interna registrata è stata praticamente sempre maggiore della temperatura esterna dell'aria, anche durante le ore notturne.

Confronti irrigazione ON/OFF

L'altro aspetto che si voleva indagare era l'efficacia che un sistema di irrigazione del verde potesse avere rispetto a un contributo evaporativo che apportasse un effetto di abbassamento delle temperature superficiali rilevate in facciata. Per poter fare un confronto tra i dati rilevati con il sistema di irrigazione on e il sistema in off, si è cercato di selezionare delle giornate che avessero caratteristiche di radiazione solare globale simili e successivamente anche di temperature esterne non troppo diverse tra loro (Tab. 48 e Grafico 53).

Le giornate così individuate sono: 19 agosto e 21 agosto con irrigazione on e 27 agosto e 30 agosto con irrigazione off.

21-ago				27-ago				30-ago				19-ago			
con irrigazione ON				con irrigazione OFF				con irrigazione OFF				con irrigazione ON			
Sol Rad matrice	freq	Text matrice	freq	Sol Rad matrice	freq	Text matrice	freq	Sol Rad matrice	freq	Text matrice	freq	Sol Rad matrice	freq	Text matrice	freq
700	6926	25	3211	700	7157	25	4591	700	7370	25	4558	700	6892	25	2791
750	467	28	1794	750	459	28	1327	750	526	28	1196	750	409	28	1840
800	814	30	2437	800	773	30	2669	800	498	30	2402	800	619	30	770
850	187	31	1145	850	5	31	53	850	0	31	484	850	474	31	897
900	0	32	53	900	0	32	0	900	0	32	0	900	0	32	796
950	0	33	0	950	0	33	0	950	0	33	0	950	0	33	1266
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280

Tab. 48 – Analisi dei dati di radiazione solare (Sol Rad) e temperatura esterna (Text) in base alla frequenza dei valori registrati per poter scegliere le giornate con gli andamenti più simili.

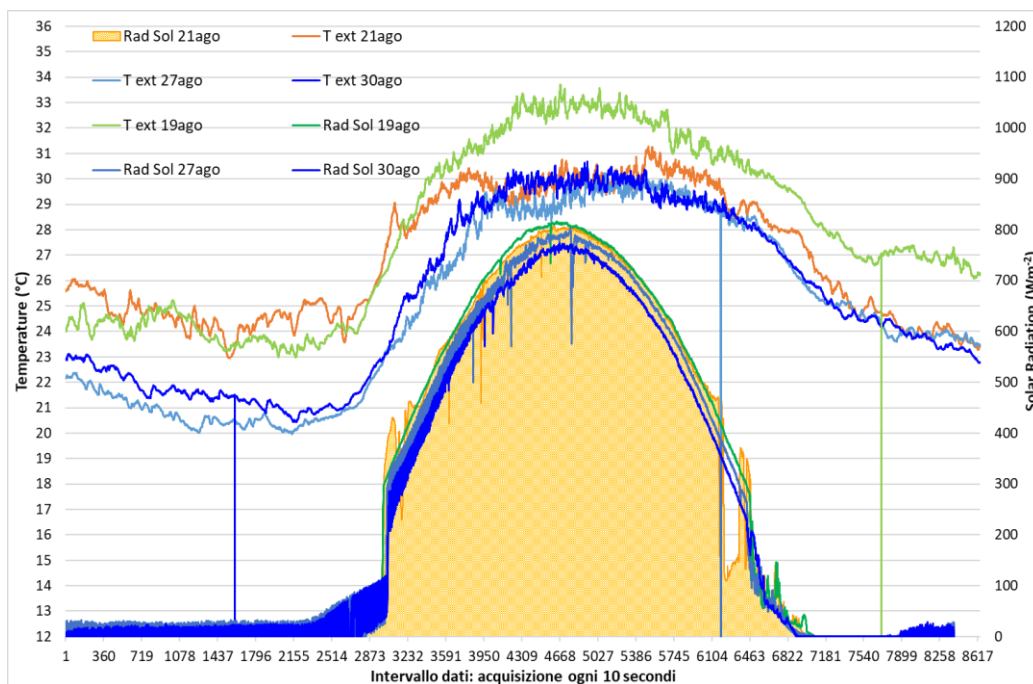


Grafico 55 – Confronto delle radiazioni solari e delle temperature delle giornate scelte per confrontare gli andamenti delle temperature superficiali esterne dei pannelli.

Mettendo a confronto le giornate selezionate non c'è modo di stabilire un effetto positivo della presenza del sistema di irrigazione, infatti non si riscontra alcun abbassamento della temperatura superficiale dovuto al fatto che l'irrigazione sia attiva. Molto probabilmente ciò è dovuto al fatto che il getto degli ugelli e la loro posizione si trovava molto più in basso e troppo lontani dalla facciata per poter risentire dell'effetto evaporativo dell'acqua.

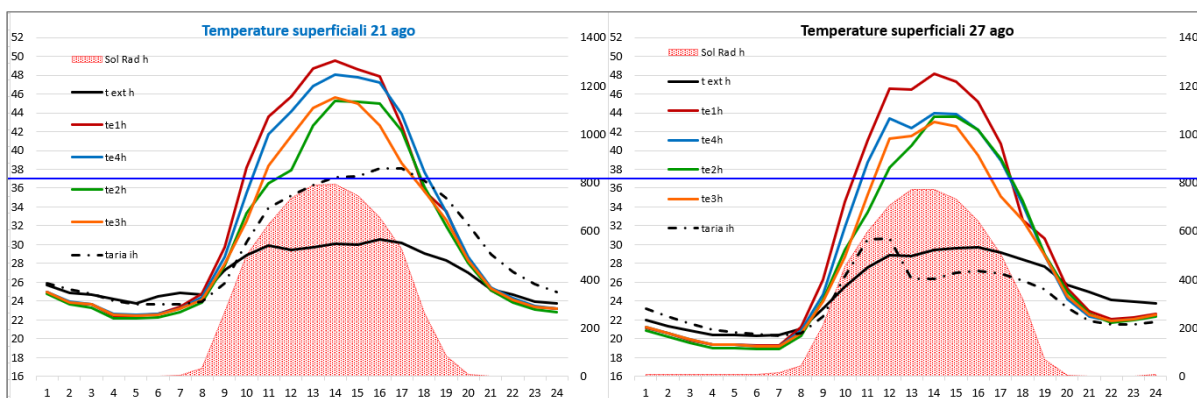


Grafico 56 – Confronto tra 21 agosto e 27 agosto.

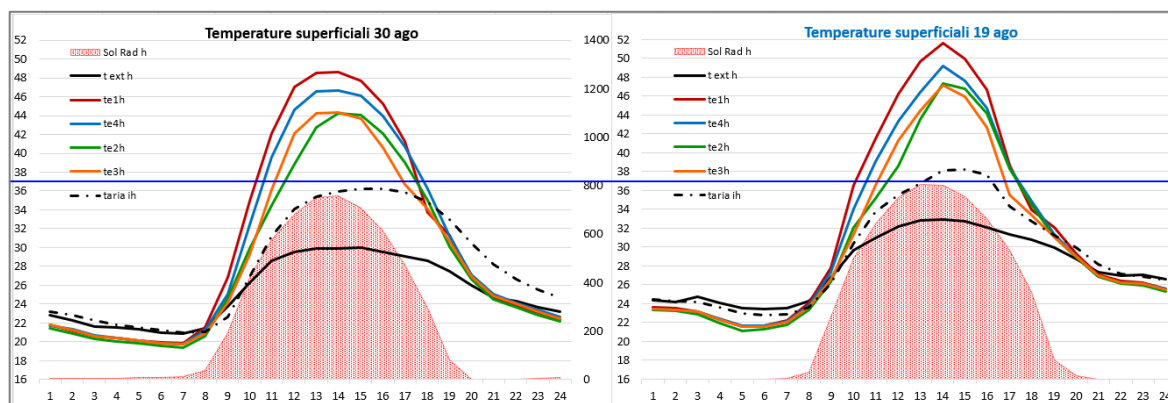


Grafico 57 – Confronto tra 30 agosto e 19 agosto.

Conclusioni finali

La sperimentazione in campo sui pannelli con differenti tipologie di pitture per esterno ha portato alla luce alcuni aspetti d'interesse e ne ha confermati altri:

- Le pitture con soli pigmenti bianchi e cariche tradizionali hanno un effetto molto limitato sulla mitigazione delle temperature superficiali;
- L'utilizzo di cariche con sfere di vetro cave ha effetti migliorativi sia in termini di riflessione solare SR, emissività termica IE e SRI come visto dalle analisi di laboratorio ma trova riscontro anche nell'applicazione pratica come dimostrato dal monitoraggio in campo delle temperature superficiali esterne ed interne del pannello P2;
- L'impiego dei pigmenti in alluminio non ha ottenuto invece riscontro dall'analisi dei dati registrati durante il monitoraggio del mock up. Probabilmente la formulazione va riconsiderata sia in termini di dosaggio del pigmento stesso sia per l'utilizzo di cariche/extenders che migliorino la texture finale della pittura aumentandone le proprietà riflettenti;
- L'utilizzo della carica in sughero sembra essere efficace dal punto di vista termico rallentando il passaggio di calore dall'esterno alla superficie interna;
- Il sistema di irrigazione non ha fatto rilevare miglioramenti in termini di abbassamento delle temperature superficiali: la sperimentazione dovrebbe adottare un sistema spray di acqua collocato più vicino alla facciata da monitorare e ad una altezza maggiore essendo la facciata stessa rialzata di 1 m circa da terra.

Appendix B.

GRAFICI CON IRRIGAZIONE ON

Grafico 58 - 22 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

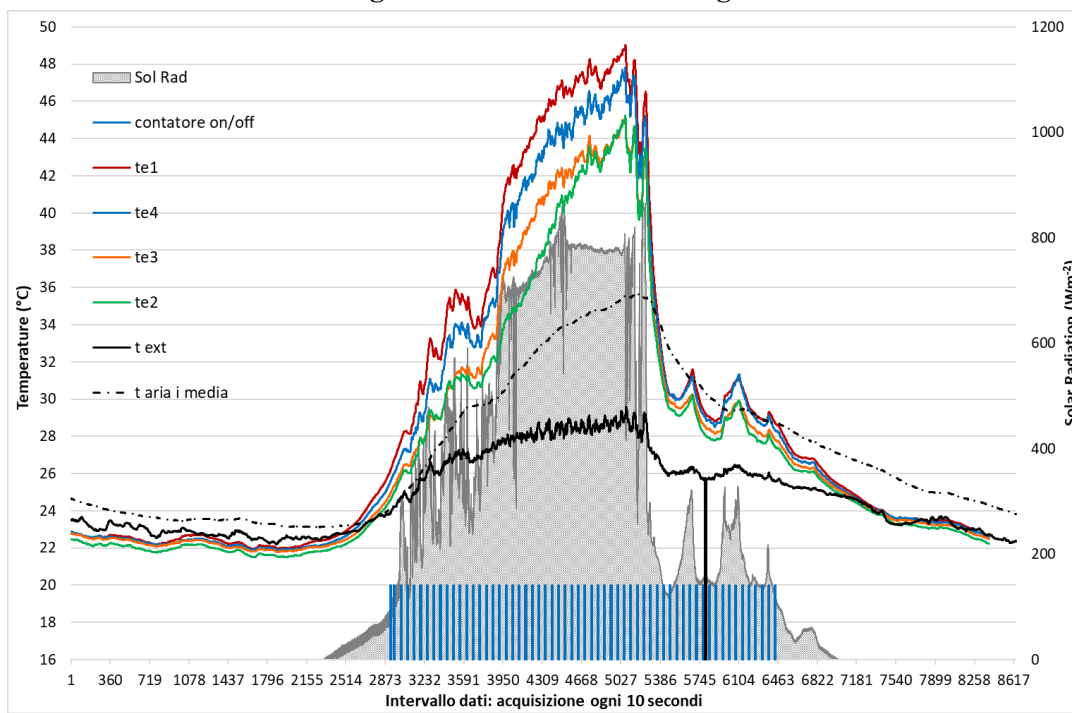


Grafico 59 - 22 agosto 2019: intervallo orario

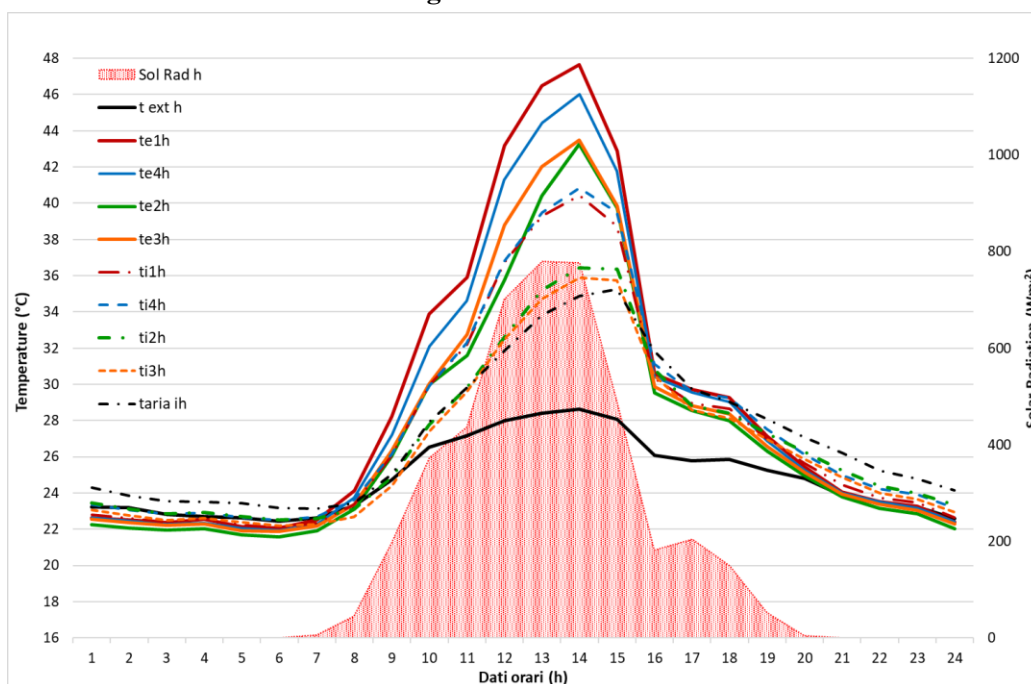


Grafico 60 - 23 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

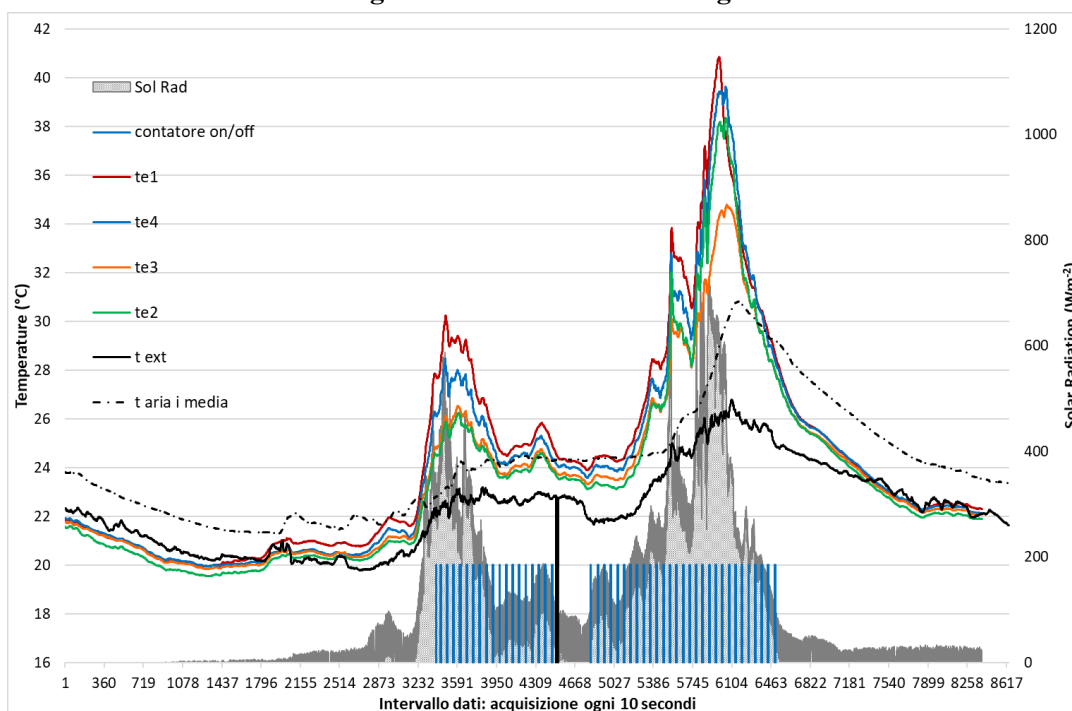


Grafico 61 - 23 agosto 2019: intervallo orario

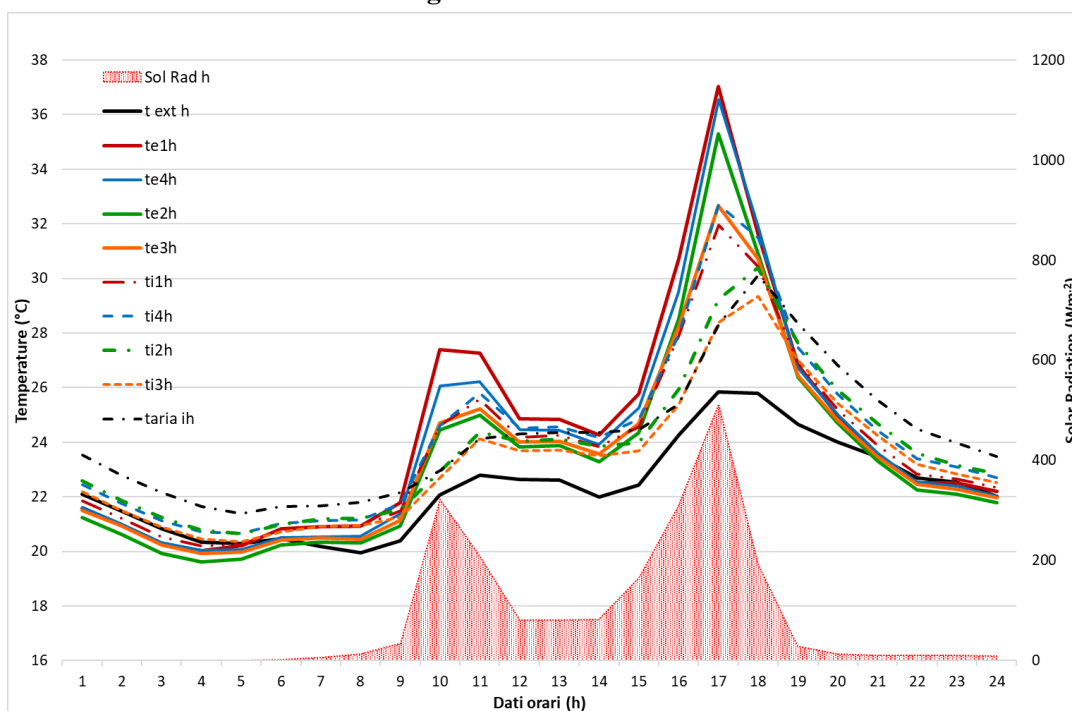


Grafico 62 - 24 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

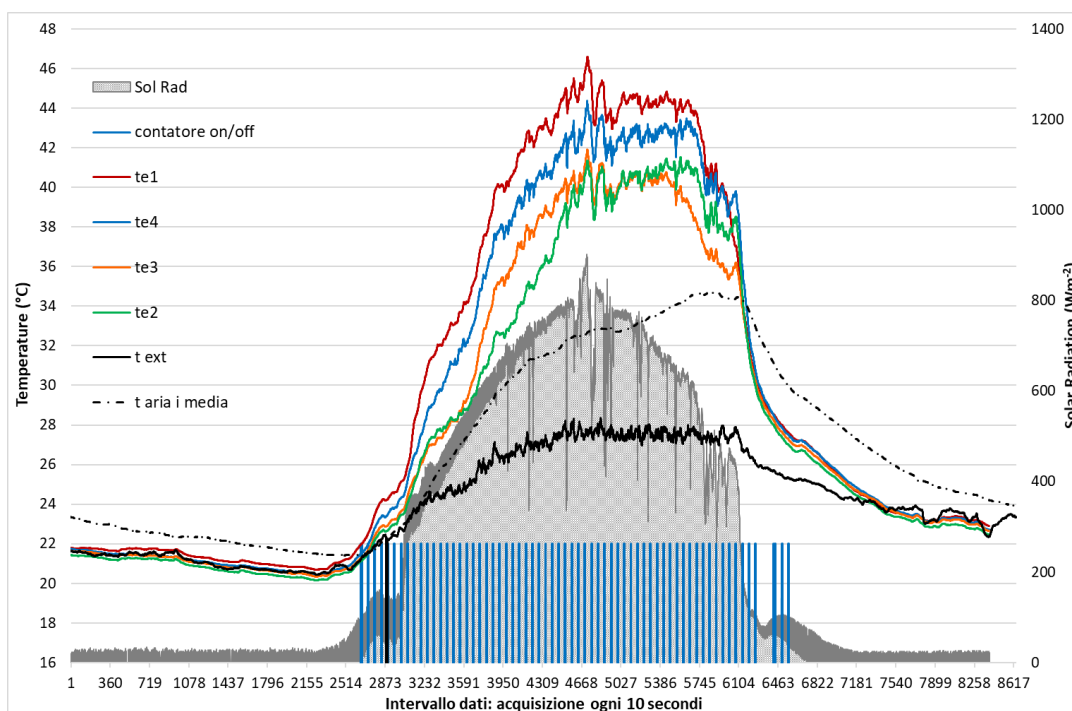


Grafico 63 - 24 agosto 2019: intervallo orario

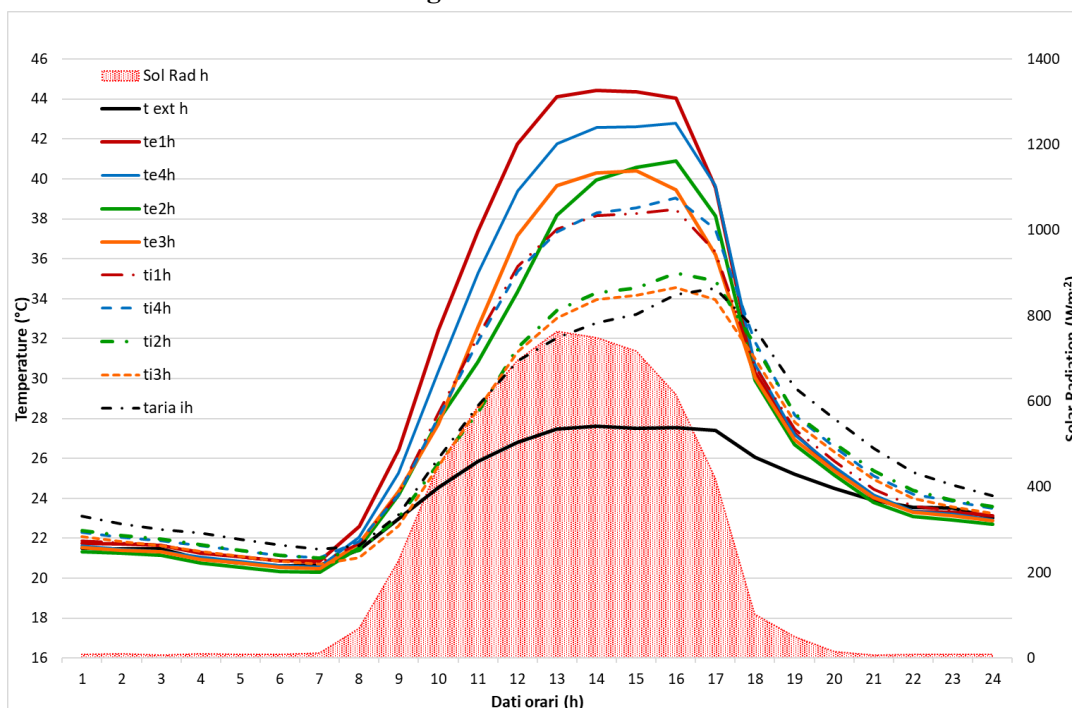


Grafico 64 - 25 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

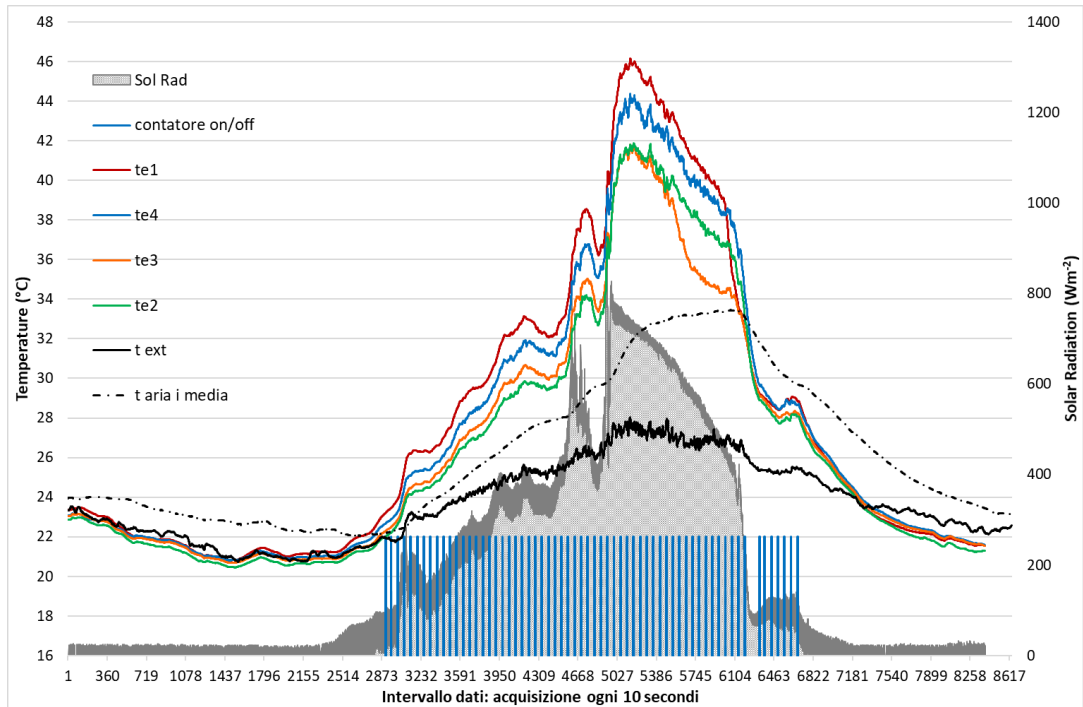


Grafico 65 - 25 agosto 2019: intervallo orario

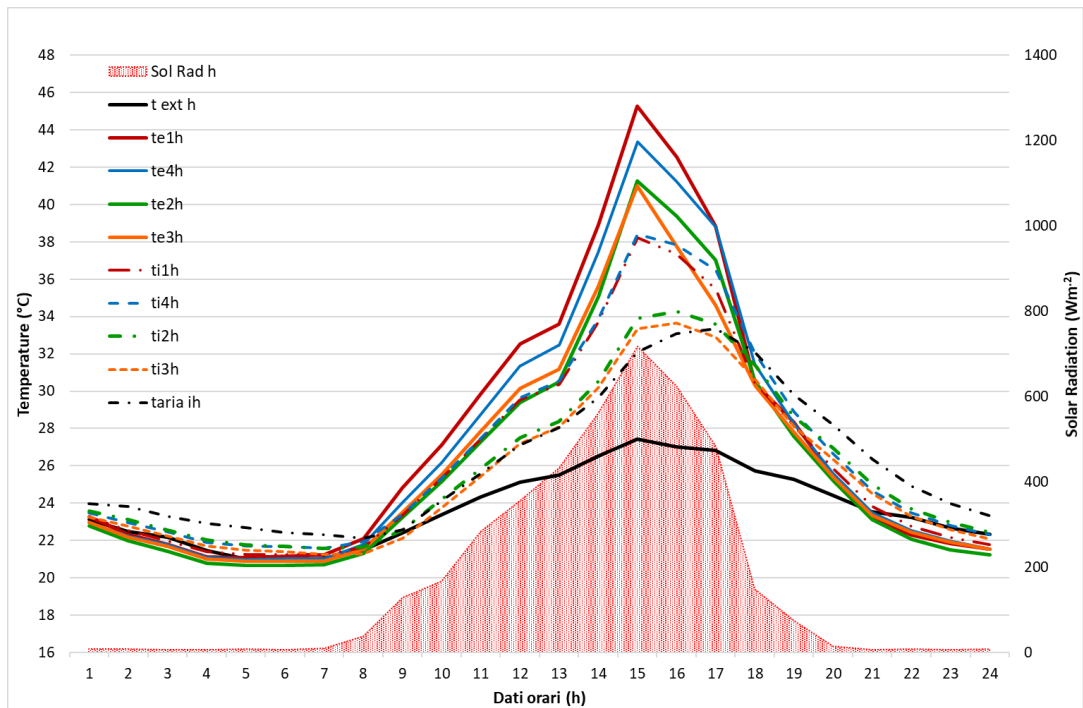


Grafico 66 - 26 agosto 2019: intervallo dati ogni 10 sec

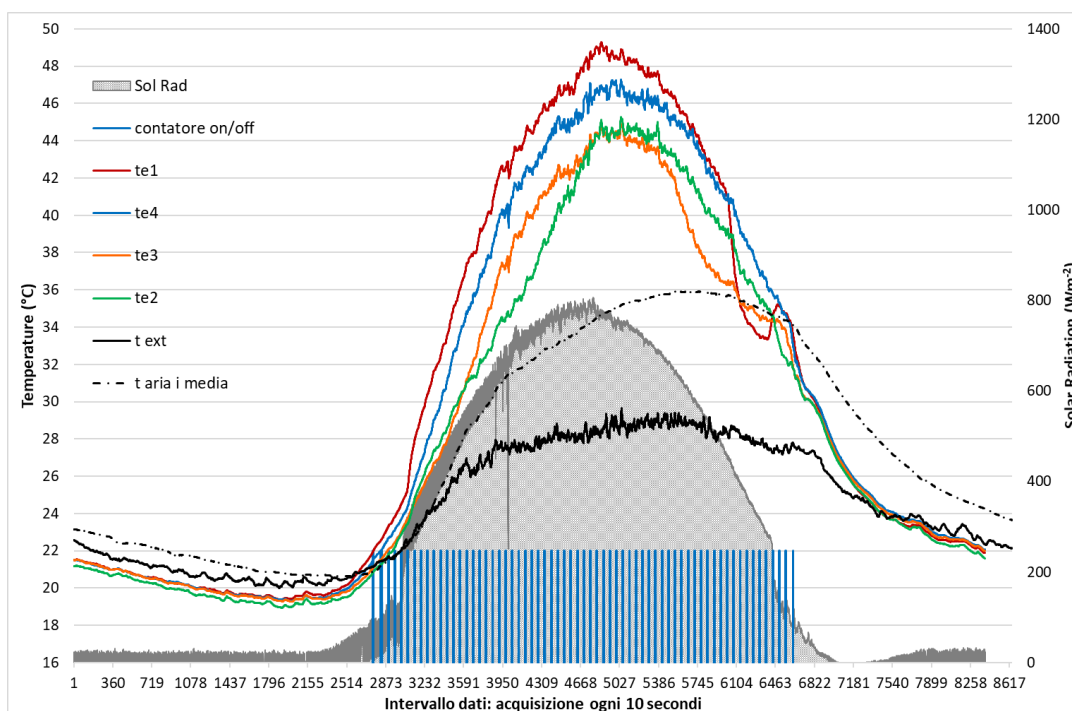
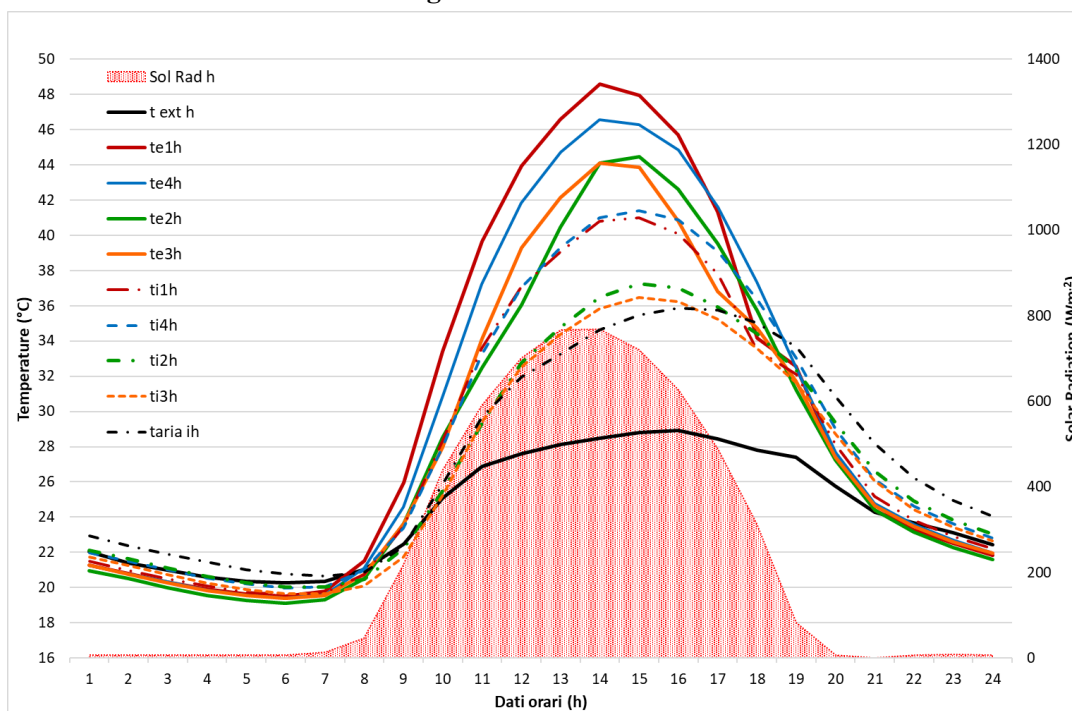


Grafico 67 - 26 agosto 2019: intervallo orario



GRAFICI CON IRRIGAZIONE OFF

Grafico 68 - 3 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

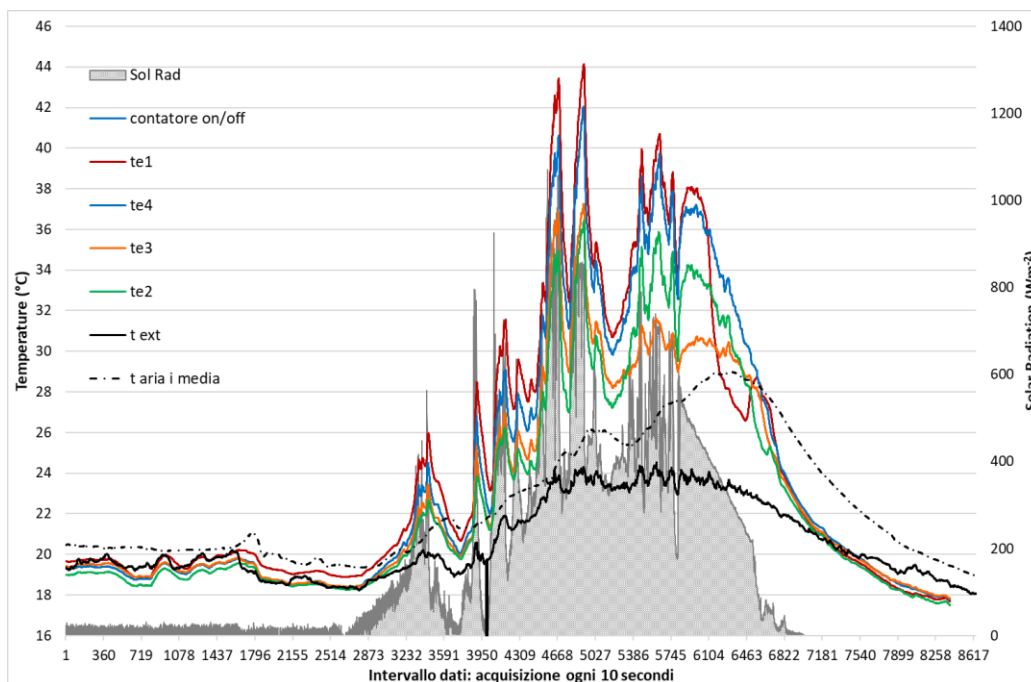


Grafico 69 - 3 settembre 2019: intervallo orario

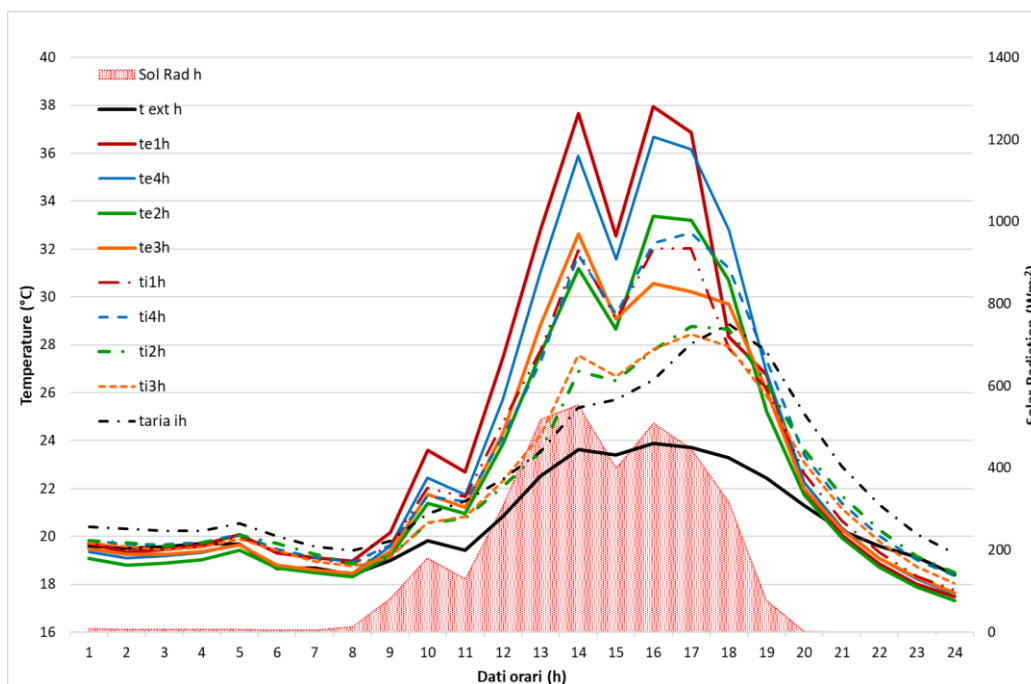


Grafico 70 - 4 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

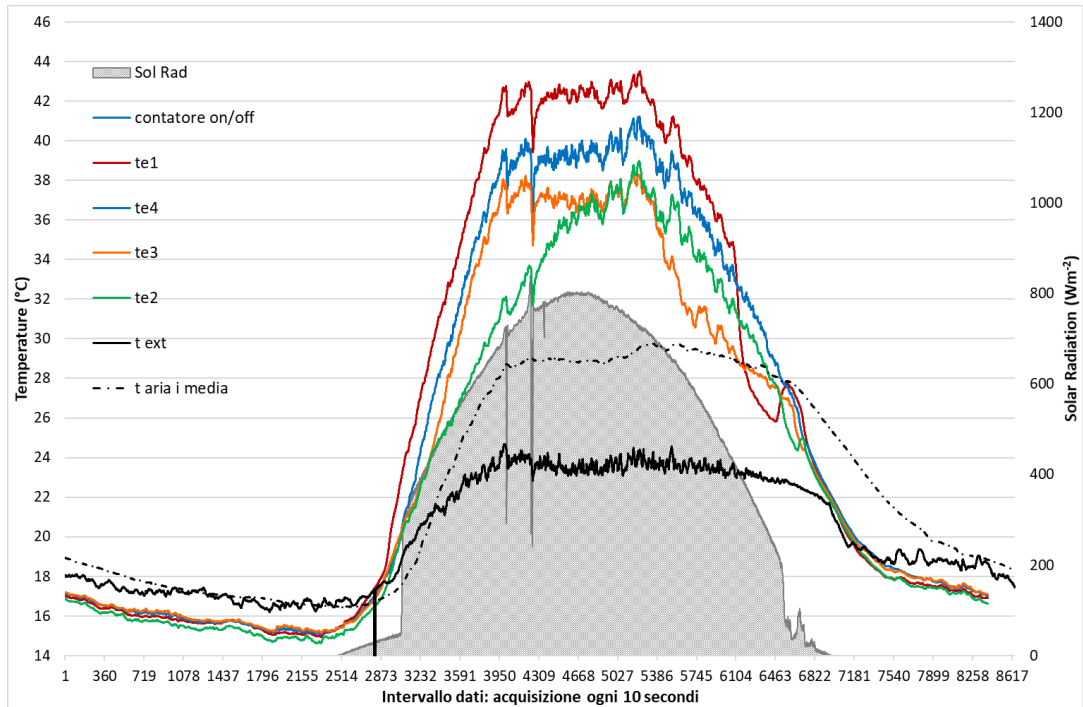


Grafico 71 - 4 settembre 2019: intervallo orario

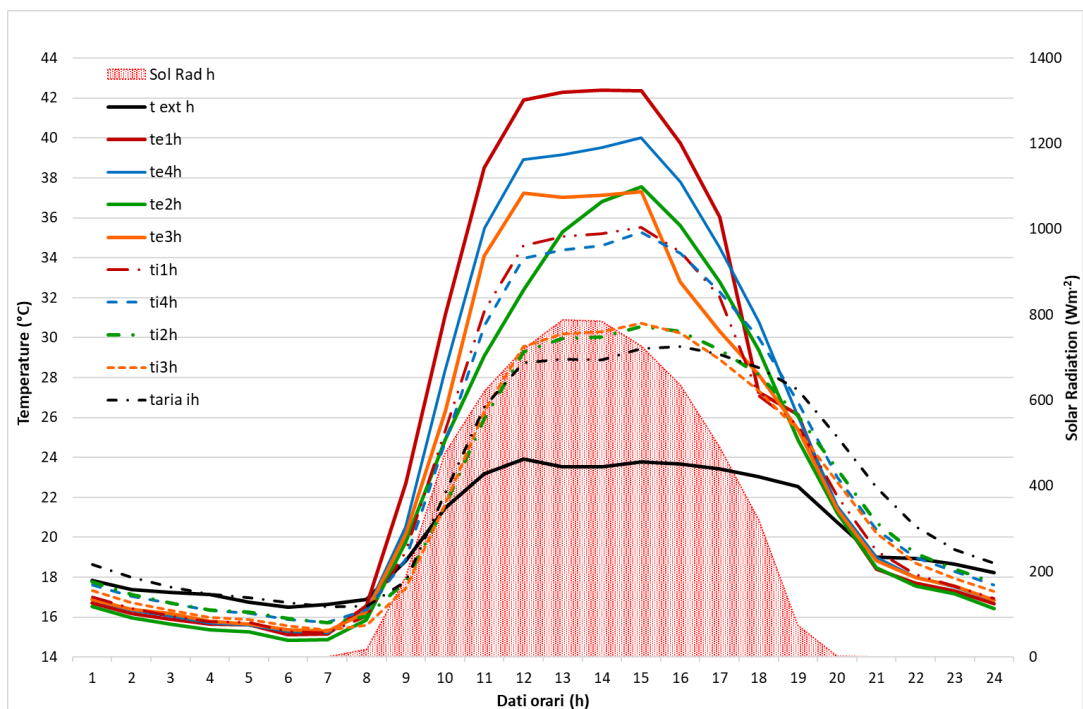


Grafico 72 - 5 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

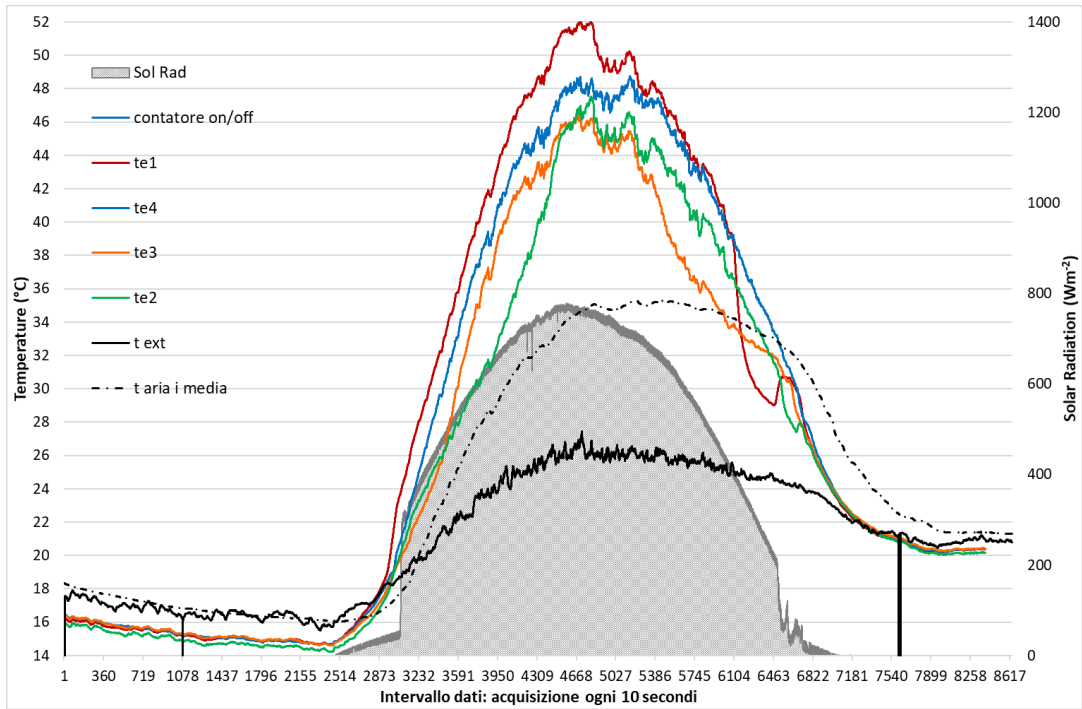


Grafico 73 - 5 settembre 2019: intervallo orario

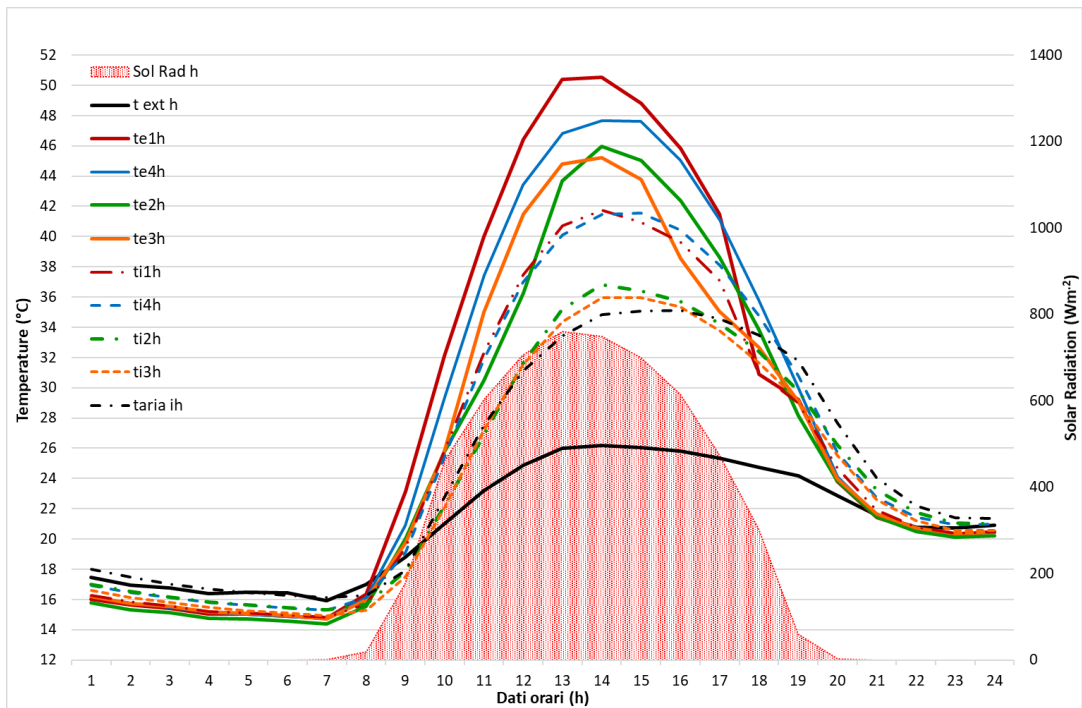


Grafico 74 - 6 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

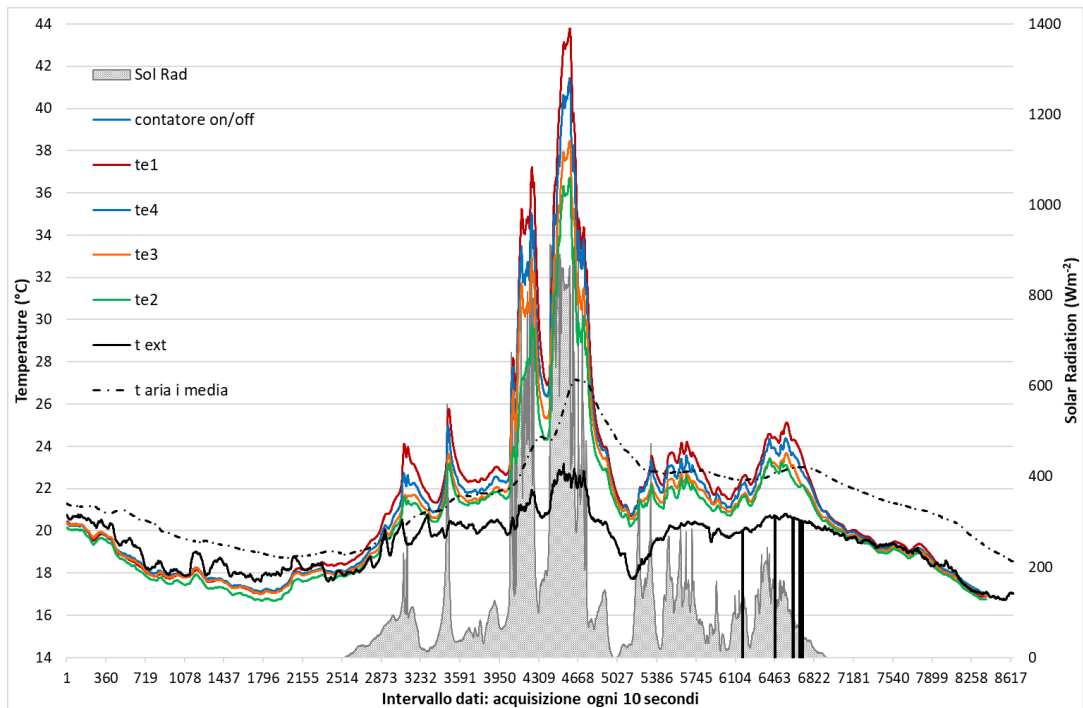


Grafico 75 - 6 settembre 2019: intervallo orario

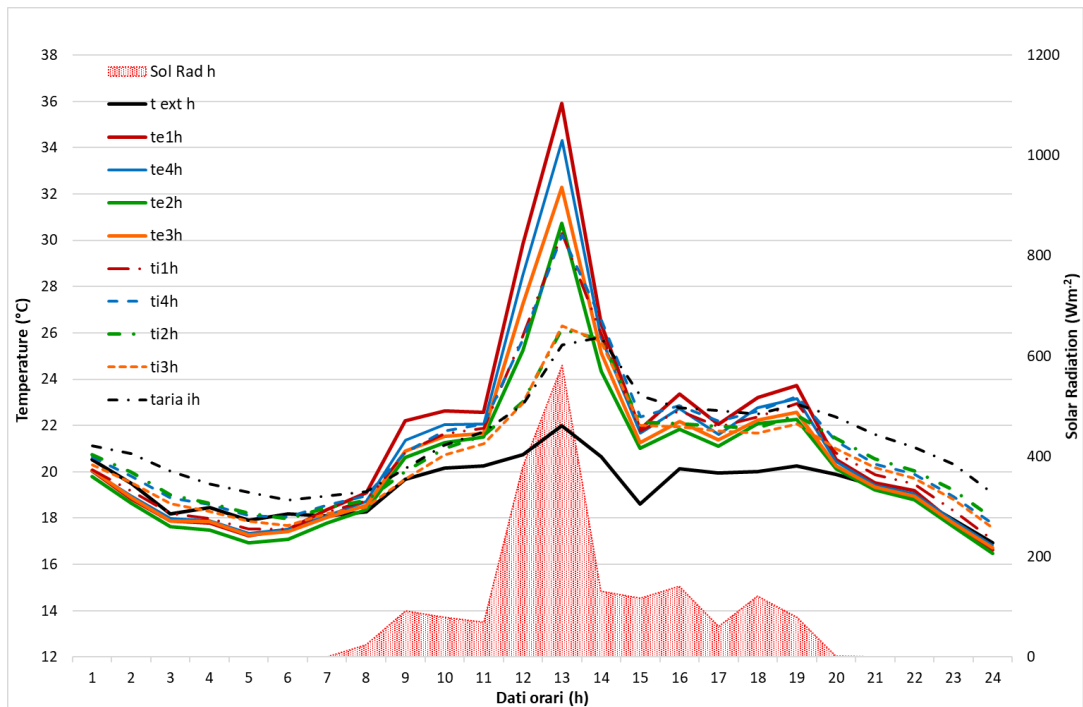


Grafico 76 - 7 settembre 2019: intervallo dati ogni 10 sec

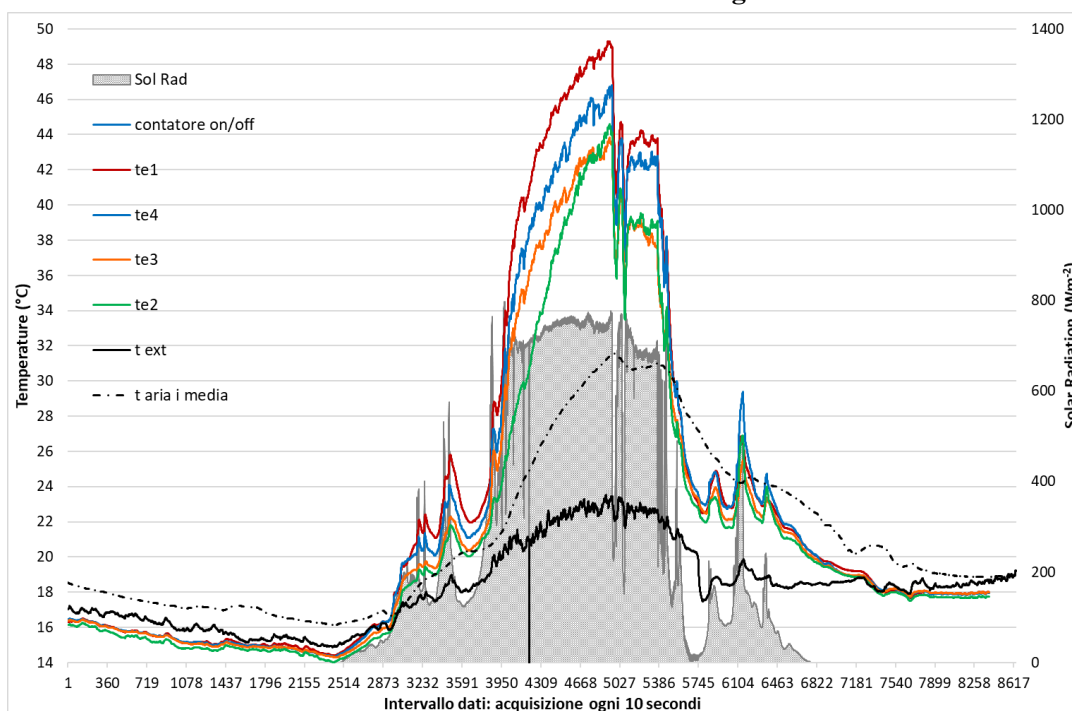
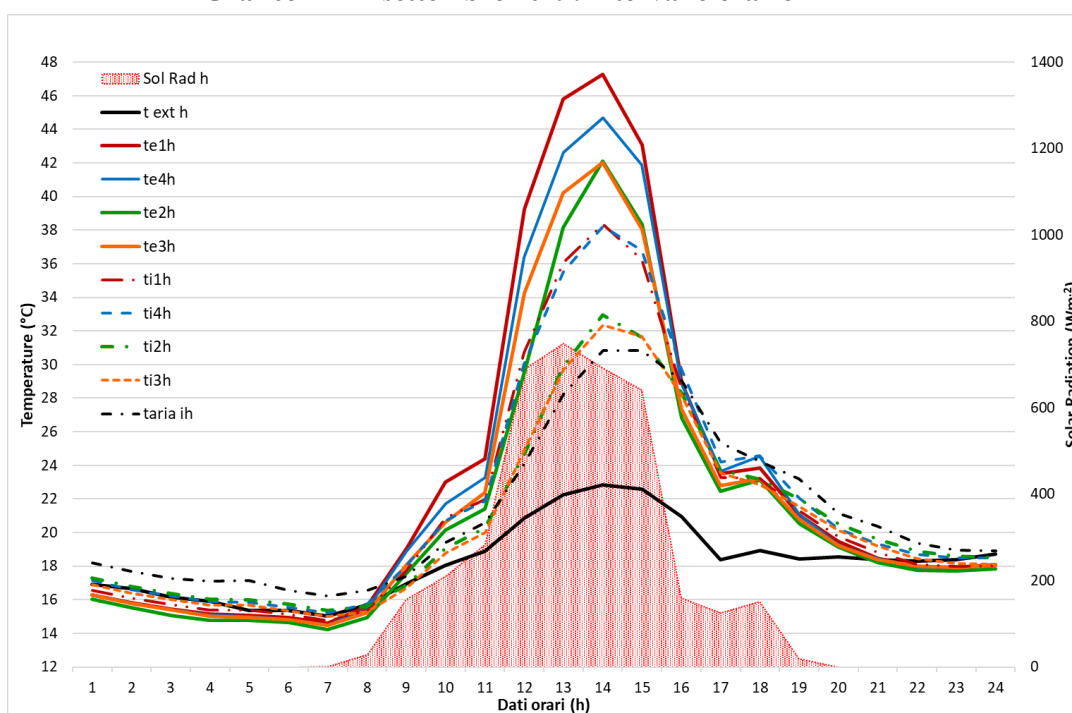


Grafico 77 - 7 settembre 2019: intervallo orario



List of Figures

- Fig. 61** – Parete con un rivestimento esterno basso assorbente (α) e rivestimento interno basso emissivo (ϵ).
- Fig. 62** – Parete con un rivestimento esterno alto assorbente (α) e rivestimento interno alto emissivo (ϵ).
- Fig. 63** – Riflettanza solare ed emissività: indice SRI.
- Fig. 64** – Schema che riassume il comportamento di un cool roof.
- Fig. 65** – Database di prodotti con proprietà *cool* aderenti al progetto del CRRC.
- Fig. 66** – Parametri minimi richiesti nel programma *Energy Star Roof Products* per la certificazione dei prodotti *cool roof*.
- Fig.67** - L'illustrazione mostra come il raffreddamento radiante passivo quotidiano (PDRC) provoca la riflettanza simultanea della luce del sole e l'irraggiamento del calore nell'atmosfera fredda causando una perdita di calore netta. Il processo naturale può raffreddare le strutture fino a raggiungere temperature ambientali inferiori.
- Fig.68** – Pigmento rosso rubino fluorescente in grado di diminuire la temperatura dei rivestimenti come i pigmenti bianchi.
- Fig.69** – Efficienza dello scattering in relazione alla dimensione delle microsferi secondo la legge di Weber.
- Fig. 70** – Scattering multipli all'interno di un film di pittura.
- Fig. 71** – Relazione tra coperture e isola di calore urbana.
- Fig. 72** – Versatilità delle pitture riflettenti in base al campo d'impiego: per interno e per esterno.
- Fig. 73** – Schematizzazione della problematica dell'Urban Heat Island: individuazione dei tre livelli di scambio climatico. PBL- Planetary Boundary Layer, UBL-Urban Boundary Layer, UCL-Urban canopy Layer.
- Fig. 74** – Funzionamento di una parete con una pittura per esterni "standard" rispetto ad una parete con una pittura per esterni riflettente.
- Fig. 75** – Prodotti a base acqua: fenomeno della coalescenza durante la formazione del film secco.

Fig. 76 – Caratteristiche del miscelatore ad alta velocità da impiegare nella formulazione di prodotti vernicianti per una dispersione ottimale dei pigmenti e delle cariche.

Figura 77 – Comportamento riflettente delle particelle di alluminio.

Figura 78 – Rivestimento in sol-gel della particella di alluminio.

Figura 79 – Grafici dello spettro di riflessione nella zona di infrarosso MIR: le curve in rosso, verde e blu rappresentano l'andamento di una pittura in alluminio, applicata su tre tipologie di supporto più o meno liscio, rispetto a ad una tradizionale bianca, curva in grigio.

Figura 80 – Schema delle possibili strutture dei silicati naturali.

Figura 81 – Sfere di vetro cave S1: densità 0,22 g/cm³ e diametro max 75 micron.

Figura 82 – Perle silicate espanse S2.

Figura 83 – Polverino di sughero naturale: granulometria 0 – 0,5 mm.

Fig. 84 – Perlite espansa in polvere: granulometria nominale 0 - 150 µm.

Fig. 85 – Pittura di Riferimento (Rif 0) con cariche termiche TH2 applicata a pennello su un pannello 150 mm x 150 mm.

Fig. 86 – Pittura P1 con le sfere S1 riflettenti applicata a pennello su un pannello 150 mm x 150 mm.

Fig. 87 – Pittura P2 con le sfere S1 riflettenti applicata a pennello su un pannello 150 mm x 150 mm.

Fig. 88 – Pittura P3 con le sfere S1 riflettenti e la carica termica TH1 applicata a spatola su un pannello 150 mm x 150 mm.

Fig. 89 – Rasante R1 con cariche riflettenti termiche S2 applicato a spatola su un pannello di prova.

Fig. 90 – Applicazione del rasante R1 su un muretto sul quale era stato applicato precedentemente il termointonaco a base sughero. Obiettivo: valutare l'applicabilità e lavorabilità del prodotto, grado di finitura finale e resistenza agli agenti atmosferici (il muretto era all'esterno e non protetto).

Fig. 91 - Applicazione della pittura in sughero con sfere riflettenti P3 su una parete interna precedentemente preparata con un fissativo idoneo alla successiva applicazione del rivestimento. Obiettivo: valutare l'applicabilità e lavorabilità del

prodotto, grado di finitura finale e comfort termico interno (sensazione di soft touch e parete “calda”).

Fig. 92 – Riflettometro solare (Standard ASTM C1549).

Fig. 93 – Riflettometro solare (Standard ASTM C1549): utilizzabile anche per le misure in opera.

Fig.94 – Emissometro TIR (Standard EN 15976).

Fig. 95 – Collocazione e identificazione della struttura impiegata nella sperimentazione in sito.

Fig. 96 – Situazione iniziale del mock up sperimentale prima delle campagne di sperimentazione sulle pitture riflettenti.

Fig. 97 – Pannelli OSB tipo 3.

Fig. 98 – Pittura P3 non riflettente con cariche in sughero.

Fig. 99 – Pittura P4 riflettente con cariche in alluminio.

Fig. 100 – Fasi applicative delle pitture sui pannelli OSB prima di essere installati.

Fig. 101 – Prospetto Sud del mock up dopo aver installato i 4 pannelli OSB con le pitture oggetto del monitoraggio.

Fig. 102 – Schema d’installazione del sistema di monitoraggio termoflussimetrico.

Fig. 103 – Strumentazione di controllo, registrazione e monitoraggio dei dati: in evidenza il DataTaker DT500 interno alla struttura in muratura adiacente al mock up in legno esposto a Sud.

Fig. 104 – Installazione dei termoflussimetri per ciascun pannello: termoflussimetri e sonde di temperatura PT100 devono essere collocati alla stessa altezza e uno accanto all’altro.

Fig. 105 – Stazione meteo posizionata adiacente al mock up sperimentale: nella foto le varie fasi di allestimento preparatorie all’inizio della campagna di monitoraggio.

Fig. 106 – Pannello di acquisizione e controllo dati: interfaccia LabView.

Fig. 107 – Sistema di irrigazione predisposto davanti alla facciata sud del mock up dove sono collocati i pannelli monitorati.

Fig. 108 – Interfaccia di controllo LabView per la temporizzazione del sistema di irrigazione in base ai parametri di controllo programmati.

Fig. 109 – Sistema di raffrescamento: pompa di calore.

Fig. 110 – Sistema di raffrescamento all'interno della serra: ventilconvettore.

Fig.111 – Elenco dei parametri monitorati:

Fig. 112 – Schema posizionamento e numerazione dei pannelli studiati.

List of Tables

Tabella 24 – Valori di riflettanza standard definiti dalla UNI 10349-1 per alcune superfici.

Tabella 25 – Principali caratteristiche della resina acrilica R1.

Tabella 26 – Principali caratteristiche della resina acrilica R2.

Tabella 27 – Principali caratteristiche della resina acrilica R3.

Tabella 28 – Principali caratteristiche della resina acrilica R4.

Tabella 29 – Principali caratteristiche del biossido di titanio tipo T1.

Tabella 30 – Principali caratteristiche del biossido di titanio tipo T2.

Tabella 31 – Curva granulometrica particelle di alluminio: passante al setaccio D10, 50, 90.

Tabella 32 – Principali tipologie di cariche ed extenders inorganici

Tabella 33 – Principali caratteristiche fisiche del quarzo K1.

Tabella 34 – Principali caratteristiche chimiche e curva granulometrica del quarzo K1.

Tabella 35 – Principali proprietà del talco K4.

Tabella 36 – Principali proprietà del carbonato di calcio più fino K5.

Tabella 37 – Principali proprietà del carbonato di calcio più granulare K6.

Tabella 38 – Principali caratteristiche e benefici applicativi.

Tabella 39 – Principali proprietà fisiche delle sfere di vetro cave S1.

Tabella 40 – Principali proprietà fisiche delle perle silicatiche espanse S2.

Tabella 41 – Principali caratteristiche chimico-fisiche.

Tabella 42 – Prospetto delle formulazioni dei rivestimenti riformulati con materie prime più performanti in ottica di migliorare le proprietà riflettenti dei prodotti rispetto alla pittura di riferimento.

Tabella 43 – Valori misurati in laboratorio sui materiali selezionati: SR (%), emissività termica ε e SRI (%).

Tabella 44 – Confronto percentuale tra i valori ottenuti per la pittura di riferimento e i rivestimenti riflettenti: in tutte le formulazioni sperimentali si riscontra un miglioramento delle performance rispetto alla pittura Rif 0.

Tabella 45 – Scheda tecnica della pittura tradizionale bianca P1.

Tab. 46 – Elenco e principali caratteristiche delle pitture monitorate nella campagna sperimentale condotta nel periodo estivo del 2019.

Tabella 47 – Principali caratteristiche dei sensori utilizzati nella sperimentazione.

Tab. 48 – Analisi dei dati di radiazione solare (Sol Rad) e temperatura esterna (Text) in base alla frequenza dei valori registrati per poter scegliere le giornate con gli andamenti più simili.

List of Graphics

Grafico 17 – Riflettività spettrale NIR valutata per le pitture P1, P2, P3 e P4.

Grafico 18 – Riflettività spettrale MIR valutata per le pitture P1, P2, P3 e P4.

Da **Grafico 19** a **54**: elenco grafici dei dati della sperimentazione.

Grafico 55 – Confronto delle radiazioni solari e delle temperature delle giornate scelte per confrontare gli andamenti delle temperature superficiali esterne dei pannelli.

Grafico 56 – Confronto tra 21 agosto e 27 agosto.

Grafico 57 – Confronto tra 30 agosto e 19 agosto.

Da **Grafico 58** a **77**: elenco grafici dei dati della sperimentazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Efficienza energetica invernale ed estiva delle coperture – Manuale ANIT di approfondimento tecnico, Aprile 2019 (Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico);
- [2] Progettazione delle coperture con materiali cool roof – Manuale ANIT di approfondimento tecnico, Dicembre 2020 (Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico);
- [3] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the energy performance of buildings.
- [4] Yuan Yang, Jyotirmoy Mandal - UNIVERSITY OF COLUMBIA, Polymer coating cools down buildings, Pitture e Vernici – European Coatings – Formulation 6/2018;
- [5] Paul Berdahl - Berkeley Lab, Fluorescent ruby red roofs stay as cool as white, Pitture e Vernici – European Coatings – Formulation 1/2017;
- [6] Vincenzo Contaldi - R&D Engineer, SALENTEC SRL, Antonio Alessandro Liciulli - Professor of Materials Science and Engineering, University of Salento, Study of the heat reflective properties of outdoor paints, Pitture e Vernici – European Coatings – Formulation 3/2017;
- [7] Development of Components for Heat Insulation Systems – Nano-Lambda (03X0071), ZAE Bayern – Bavarian Center for Applied Energy Research, Remmers Baustofftechnik GmbH, ECKART GmbH;
- [8] Prof. Dr. Oliver Kornadt, Study on the influence of the IR-reflective interior wall paint IReflex on the thermal comfort and the heating energy requirement, Bauhaus University Weimar, Coudraystr. 11a D-99423 Weimar;
- [9] Peter Katholnig, Amandine Briand, Anabelle Elton-Legrix, IMERYS MINERALS Ltd, Choice of TiO₂ extenders for optimized paint performance, Pitture e Vernici – European Coatings – Formulation 2/2018;
- [10] Akbari, H., Konopacki, S., 2004. Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada. *Energy Build.* 29, 191–210.
- [11] Akbari, H., Konopacki, S., 2005. Calculating energy-saving potentials of heatislandreduction strategies. *Energy Policy* 33 (6), 721–756.
- [12] Akbari, H., Matthews, H.D., 2012. Global cooling updates: reflective roofs and pavements, *Energy Build.* 55, 2–6.

- [13] Akbari, H., Muscio, A., 2015. Cooling heat islands. *Urban Climate* 14, 139–140.
- [14] Akbari, H., Taha, H., 1992. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy* 17 (2), 141–149.
- [15] Akbari, Hashem, Konopacki, Steven J., Eley, Charles N., Wilcox, Bruce A., Van Geem, Martha G., Parker, Danny S., 1998. Calculations for reflective roofs in support of standard 90.1. *ASHRAE Trans.* 104(Pt 1B), 976–987 (Proceedings of the 1998 ASHRAE Winter Meeting. Part 1 (of 2); San Francisco, CA, USA).
- [16] Akbari, H., Levinson, R., Rainer, L., 2005a. Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy Build.* 37 (10), 1007–1016.
- [17] Antonaia, A., Ascione, F., Castaldo, A., D'Angelo, A., De Masi, R.F., Ferrara, M., Vanoli, G.P., Vitiello, G., 2016. Cool materials for reducing summer Energy consumptions in Mediterranean climate: in-lab experiments and numerical analysis of a new coating based on acrylic paint. *Appl. Therm. Eng.* 102, 91–107.
- [18] Asdrubali, Francesco, Baldassarri, Catia, Fthenakis, Vasilis, 2013. Life cycle analysis in the construction sector: guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy Build.* 64, 73–89.
- [19] Asif, M., Muneer, T., Kelley, R., 2007. Life cycle assessment: a case study of a dwelling home in Scotland. *Build. Environ.* 42, 1391–1394.
- [20] ASTM C1371-15. Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. ASTM.
- [21] ASTM C1549, 2002. Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer, ASTM.
- [22] ASTM D2244-16, 2016. Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates. ASTM.
- [23] ASTM D7897-15, 2015. Standard Practice for Laboratory Soiling and Weathering of Roofing Materials to Simulate Effects of Natural Exposure on Solar Reflectance and Thermal Emittance.
- [24] ASTM E1918-06, 2015. Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field. ASTM.
- [25] ASTM E1980-11, 2011. Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces.

- [26] ASTM E903-12, 2012. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. ASTM.
- [27] ASTM G173-03, 2008. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. ASTM.
- [28] Ferrari, C., Gholizadeh Touchaei, A., Sleiman, M., Libbra, A., Muscio, A., Siligardi, C., Akbari, H., 2014. Effect of aging processes on solar reflectivity of clay roof tiles. *Adv. Build. Energy Res.* 8 (1), 28–40.
- [29] Ferrari, C., Muscio, A., Siligardi, C., Manfredini, T., 2015a. Design of a cool color glaze for solar reflective tile application. *Energy* 41 (Part 9A), 11106–11116.
- [30] Ferrari, C., Muscio, A., Siligardi, C., Manfredini, T., 2015b. Design of a cool color glaze for solar reflective tile application. *Ceram. Int.* 41, 11106–11116.
- [31] Ferrari, C., Libbra, A., Cernuschi, F.M., De Maria, L., Marchionna, S., Barozzi, M., Siligardi, C., Muscio, A., 2016a. A composite cool colored tile for sloped roofs with high ‘equivalent’ solar reflectance. *Energy Build.* 114, 221–226.
- [32] Ferrari, Chiara, Libbra, Antonio, Cernuschi, Federico Maria, Maria, Letizia De, Marchionna, Stefano, Barozzi, Matteo, Siligardi, Cristina, Muscio, Alberto, 2016b. A composite cool colored tile for sloped roofs with high ‘equivalent’ solar reflectance. *Energy Build.* 114, 221–226.
- [33] Ferrari, C., Muscio, A., Siligardi, C., Manfredini, T., 2015. Design of a cool color glaze for solar reflective tile application.
- [34] Karlessi, T., Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, D., Didaskalopoulos, P., Apostolakis, K., 2011. Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings. *Build. Environ.* 46 (3), 570–576.
- [35] Kolokotroni, M., Gowreesunker, B.L., Giridharan, R., 2013. Cool roof technology in London: an experimental and modelling study. *Energy Build.* 67, 658–667.
- [36] Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S., Vlissidis, A., 2012. Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece. *Energy Build.* 55, 85–93.
- [37] Kolokotsa, D., Santamouris, M., Zerefos, S.C., 2013. Green and cool roofs’ urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Sol. Energy* 95, 118–130.

- [38] Kosareo, Lisa, Ries, Robert, 2007. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Build. Environ.* 42, 2606–2613.
- [39] Kültür, Sinem, Türkeri, Nil, 2012. Assessment of long term solar reflectance performance of roof coverings measured in laboratory and in field. *Build. Environ.* 48, 164–172.
- [40] Kusaka, H., Kimura, F., 2004. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. *J. Appl. Meteorol.* 43 (12), 1899–1910.

