

## Relazione tecnica conclusiva

### Analisi delle prestazioni di miscele innovative

Committente:  
**POLYMERTEAM NV**  
in persona del suo legale rappresentante **NOEL ESSERS**

Indirizzo:  
**Via Calto, 731 - 45030 Cenese (RO)**

|                                                                  |                                                                          |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Responsabile scientifico:                                        | Prof. Ing. Anna Laura Pisello                                            |
| Responsabile tecnico-operativo:                                  | Ing. Claudia Fabiani                                                     |
| Esecuzione misure ed elaborazione dati:                          | Ing. Francesco Marchini<br>Ing. Silvia Cavagnoli<br>Ing. Claudia Fabiani |
| Stesura relazione tecnica:                                       | Ing. Francesco Marchini<br>Ing. Silvia Cavagnoli<br>Ing. Claudia Fabiani |
| Revisione tecnico-scientifica finale e<br>supervisione generale: | Prof. Ing. Anna Laura Pisello                                            |

**Luogo e data emissione:** Perugia, **01/09/2025**

## **Sommario**

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Premessa.....                                                                                                                | 4  |
| 2. Materiali e provini.....                                                                                                     | 5  |
| 3. Valutazione delle proprietà di riflettanza solare, emissività termica e calcolo dell'Indice di Riflettanza Solare (SRI)..... | 7  |
| 3.1 Caratterizzazione ottica.....                                                                                               | 7  |
| 3.1.1 Riferimenti normativi.....                                                                                                | 7  |
| 3.1.2 Metodologia di misura.....                                                                                                | 8  |
| 3.1.3 Procedura seguita.....                                                                                                    | 9  |
| 3.1.4 Descrizione delle strumentazioni usate.....                                                                               | 9  |
| 3.1.5 Risultati.....                                                                                                            | 10 |
| 3.2 Caratterizzazione termica.....                                                                                              | 15 |
| 3.2.1 Riferimenti normativi.....                                                                                                | 15 |
| 3.2.2 Metodologia di misura.....                                                                                                | 15 |
| 3.2.3 Procedura seguita.....                                                                                                    | 15 |
| 3.2.4 Descrizione delle strumentazioni usate.....                                                                               | 15 |
| 3.2.5 Risultati.....                                                                                                            | 16 |
| 3.3 Calcolo dell'Indice di Riflessione Solare (SRI).....                                                                        | 17 |
| 3.3.1 Riferimenti normativi.....                                                                                                | 17 |
| 3.3.2 Metodologia di calcolo.....                                                                                               | 17 |
| 3.3.3 Risultati.....                                                                                                            | 19 |
| 4. Valutazione delle proprietà di conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico. ....                           | 22 |
| 4.1 Caratterizzazione termica.....                                                                                              | 22 |
| 4.1.1 Riferimenti normativi.....                                                                                                | 22 |
| 4.1.2 Metodologia di misura.....                                                                                                | 22 |
| 4.1.3 Procedura seguita.....                                                                                                    | 23 |
| 4.1.4 Descrizione delle strumentazioni usate.....                                                                               | 24 |
| 4.1.5 Risultati.....                                                                                                            | 26 |

|       |                                                                                                                   |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.    | Valutazione delle prestazioni di surriscaldamento superficiale, temperatura dell'aria e radiazione riemessa.....  | 28 |
| 5.1   | Riferimenti normativi.....                                                                                        | 28 |
| 5.2   | Metodologia di misura.....                                                                                        | 28 |
| 5.3   | Procedura seguita .....                                                                                           | 29 |
| 5.3.1 | Calcolo della giornata media oraria estiva .....                                                                  | 30 |
| 5.3.2 | Calcolo della giornata più calda .....                                                                            | 31 |
| 5.3.3 | Impostazione dei cicli in camera climatica .....                                                                  | 32 |
| 5.3.4 | Temperatura Sole-Aria.....                                                                                        | 33 |
| 5.3.5 | Calcolo della radiazione media riemessa.....                                                                      | 34 |
| 5.4   | Descrizione delle strumentazioni usate .....                                                                      | 36 |
| 5.5   | Risultati.....                                                                                                    | 39 |
| 5.5.1 | Risultati della simulazione per la giornata media oraria estiva .....                                             | 39 |
| 5.5.2 | Risultati della simulazione per la giornata più calda.....                                                        | 42 |
| 5.5.3 | Confronto tra campioni .....                                                                                      | 45 |
| 6.    | Monitoraggio di temperatura superficiale, temperatura dell'aria ad altezza di prossimità e di albedo in sito..... | 47 |
| 6.1   | Riferimenti normativi.....                                                                                        | 47 |
| 6.2   | Metodologia di misura.....                                                                                        | 47 |
| 6.3   | Procedura seguita .....                                                                                           | 50 |
| 6.4   | Descrizione delle strumentazioni usate .....                                                                      | 51 |
| 6.5   | Risultati.....                                                                                                    | 53 |
| 7.    | Conclusioni .....                                                                                                 | 57 |

## **1. Premessa**

La presente relazione descrive in modo critico i risultati ottenuti dalle prove sperimentali condotte su miscele innovative progettate per pavimentazioni con lo scopo di favorire un efficace raffrescamento passivo. Il CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici) ha ricevuto incarico dal committente POLYMERTEAM Srl per svolgere i test necessari alla valutazione delle caratteristiche termo-ottiche di diverse tipologie di campioni, con l'obiettivo di comprendere in che modo tali materiali influenzino il surriscaldamento delle superfici e incidano sul bilancio energetico degli spazi urbani. Le attività sperimentali sono state articolate in tre principali task di lavoro:

- Valutazione delle proprietà di riflettanza solare ed emissività termica con conseguente calcolo dell'Indice di Riflettanza Solare (SRI).
- Valutazione delle proprietà di conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico.
- Valutazione delle prestazioni di surriscaldamento superficiale, temperatura dell'aria e della radiazione riemessa dalla superficie.

## 2. Materiali e provini

I materiali analizzati sono miscele innovative sviluppate da POLYMERTEAM Srl per realizzare pavimentazioni esterne ad alto potere di raffrescamento passivo. In collaborazione con il marchio Evizero, sono state prodotte quattro soluzioni, differenziate per colore e pensate per diverse applicazioni outdoor. Le tipologie di campioni analizzate sono mostrate nella Figura 1 e sono le seguenti:

- (i) un campione di pavimentazione bianca, costituito da aggregati calcarei "Bianco Ancona" con l'aggiunta dell'1% di pigmento bianco e di legante Evizero, legante trasparente, ecologico e innovativo;
- (ii) un campione di pavimentazione gialla, uguale a (i) ma senza l'aggiunta di pigmento bianco;
- (iii) un campione di pavimentazione rossa, prodotto con un diverso tipo di aggregato, chiamato "Rosso Verona", e il legante Evizero;
- (iv) un campione di pavimentazione nera, prodotto con gli stessi aggregati di (i) e (ii) ma con l'aggiunta di bitume al posto del legante Evizero.

In questa relazione, i campioni saranno così denominati: (i) Bianco, (ii) Naturale, (iii) Rosso, (iv) Nero.



Figura 1. Tipologie di campioni analizzati

Per ogni tipologia di campione sono stati preparati provini in due dimensioni differenti, scelti in base al tipo di analisi termo-ottica da effettuare in laboratorio. Queste proprietà sono state esaminate sia nello stato iniziale (dopo la produzione) sia dopo l'esposizione dei campioni a condizioni ambientali reali (dopo un periodo di invecchiamento). A questo scopo, tutti i campioni sono stati posizionati sul tetto del CIRIAF (Figura 2) e lasciati esposti per periodi di 30, 60 e 90 giorni. Questo ha permesso di valutare l'evoluzione delle principali proprietà termo-ottiche in seguito all'invecchiamento naturale.

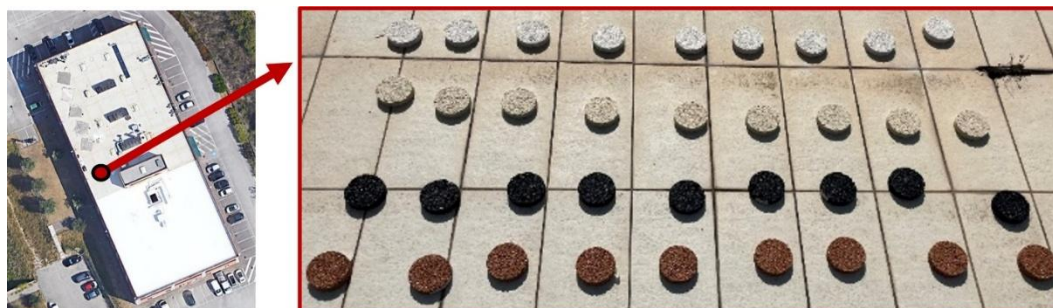


Figura 2. Invecchiamento naturale dei campioni

Più nel dettaglio, nella Tabella 1 sono riportate le specifiche delle varie tipologie di campioni testati e i relativi tempi di invecchiamento.

Tabella 1. Caratteristiche dei campioni e tipologia di analisi sperimentale condotta

|   | <b>Prova sperimentale</b>                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Geometria provini</b>                                                                                            | <b>Tipologia di miscela</b>                                                                                                                         |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Valutazione delle proprietà di riflettanza solare ed emissività termica con calcolo SRI:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>Pre-invecchiamento</li> <li>Invecchiamento 30 gg</li> <li>Invecchiamento 60 gg</li> <li>Invecchiamento 90 gg</li> </ul>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Forma cilindrica, spessore 2 cm, <math>\varnothing = 10</math> cm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Campione "Bianco"</li> <li>Campione "Naturale"</li> <li>Campione "Rosso"</li> <li>Campione "Nero"</li> </ul> |
| 2 | Valutazione delle proprietà di conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico tramite hot disk:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>Pre-invecchiamento</li> <li>Invecchiamento 30 gg</li> <li>Invecchiamento 60 gg</li> <li>Invecchiamento 90 gg</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Forma cilindrica, spessore 2 cm, <math>\varnothing = 10</math> cm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Campione "Bianco"</li> <li>Campione "Naturale"</li> <li>Campione "Rosso"</li> <li>Campione "Nero"</li> </ul> |
| 3 | Valutazione delle prestazioni di surriscaldamento superficiale, temperatura dell'aria e della radiazione riemessa dalla superficie (pre invecchiamento).                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Forma cilindrica, spessore 5 cm, <math>\varnothing = 15</math> cm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Campione "Bianco"</li> <li>Campione "Naturale"</li> <li>Campione "Rosso"</li> <li>Campione "Nero"</li> </ul> |

### **3. Valutazione delle proprietà di riflettanza solare, emissività termica e calcolo dell'Indice di Riflettanza Solare (SRI).**

Una delle varie analisi condotte sui campioni è stata la caratterizzazione delle proprietà ottiche e termiche, effettuata rispettivamente mediante spettrofotometria e misurazioni con emissometro portatile. Da queste analisi sono stati ottenuti il coefficiente di riflettanza solare e il valore di emissività termica che sono stati successivamente impiegati come dati di input per la determinazione dell'Indice di Riflettanza Solare (SRI).

#### **3.1 Caratterizzazione ottica**

Per la determinazione delle proprietà ottiche dei provini nello spettro solare e la valutazione dei coefficienti di riflettanza solare, sono state condotte le prove sperimentali sui campioni forniti dall'azienda POLYMERTEAM Srl di diametro 10 cm. Le attività di misura sono state svolte presso il laboratorio di Fisica Tecnica EAPLAB al CIRIAF, utilizzando uno spettrofotometro PerkinElmer 1050+ con sfera integratrice di diametro 15 cm. Per ciascun campione, la prova è stata eseguita su tre diversi punti della superficie, in modo da poter poi calcolare la media. La metodologia adottata e i riferimenti normativi di riferimento sono descritti nella presente sezione, unitamente ai risultati sperimentali.

##### **3.1.1 Riferimenti normativi**

- ASTM E903-12 (2020)  
Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres
- ASTM Standard G173  
Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances
- ISO 9050:2003  
Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors

### 3.1.2 Metodologia di misura

La normativa di cui al precedente punto definisce il metodo di prova che implica l'uso di uno spettrofotometro dotato di una sfera integratrice per misurare l'assorbanza, la riflettanza e la trasmittanza solare di una superficie. Queste misurazioni sono essenziali per valutare le proprietà ottiche dei materiali in relazione alla loro capacità di riflettere, trasmettere o assorbire la luce solare, e sono particolarmente utili in applicazioni per l'energia solare passiva o per migliorare l'efficienza energetica dei materiali da costruzione. Per determinare la riflettanza solare  $R$  della superficie analizzata, definita come il rapporto tra la frazione riflessa e la quantità incidente totale della radiazione solare, si misura innanzitutto la riflettanza spettrale  $\rho_\lambda$  della superficie in corrispondenza di un range di lunghezze d'onda  $\lambda$  [nm] che va da 300 nm a 2500 nm. In questo intervallo ricade oltre il 99% della radiazione solare incidente sulla superficie terrestre. La riflettanza solare  $R$  viene infine calcolata come la media della riflettività spettrale pesata sulla radiazione monocromatica del sole alla superficie terrestre,  $I_\lambda$  [W/(m<sup>2</sup>nm)], come tabulata dall'ASTM Standard G173.

$$R = \frac{\int_{300}^{2500} \rho_\lambda(\lambda) \cdot I_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_{300}^{2500} I_\lambda(\lambda) d\lambda}$$

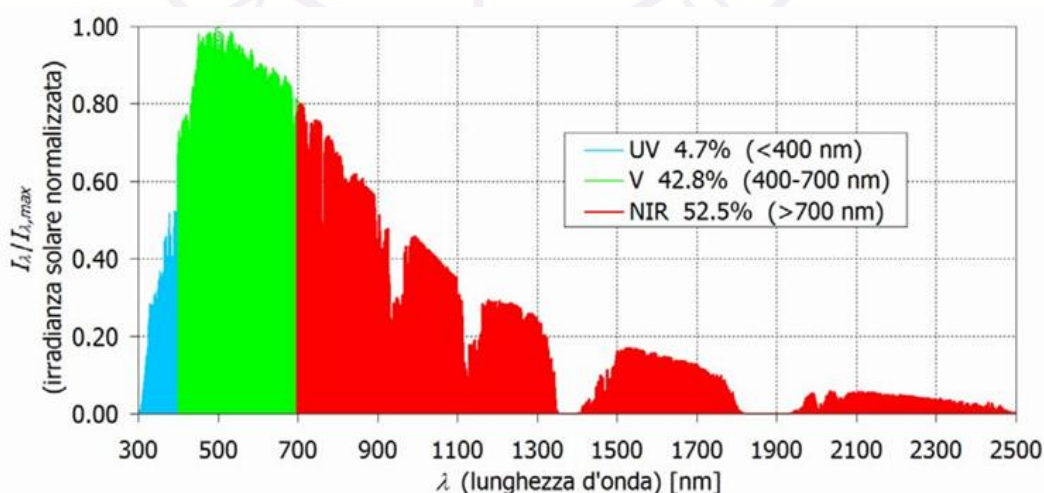


Figura 3. Spettro normalizzato della radiazione solare alla superficie terrestre (ASTM Standard G173).

### **3.1.3 Procedura seguita**

L'analisi delle proprietà ottiche per la valutazione della riflettanza solare è stata condotta sui campioni con diametro di 10 cm e spessore di 2 cm. Le prove sono state eseguite sull'intero spettro solare, ovvero lunghezze d'onda comprese tra 300 e 2500 nm, acquisendo i dati di riflettanza solare con una risoluzione di 1 nm. Prima di effettuare la prova, lo strumento è stato calibrato tramite uno standard di riflettanza certificato (Spectralon), al fine di assicurare l'accuratezza dei risultati. Per ogni tipo di campione sono state effettuate tre misure su tre differenti punti della superficie, e i relativi valori medi sono stati calcolati in fase di elaborazione per determinare i coefficienti di riflessione. Le misurazioni sono state effettuate in corrispondenza di più fasi temporali: pre-invecchiamento (tempo zero) e post-invecchiamento (ovvero dopo 30, 60 e 90 giorni di esposizione all'ambiente esterno). Questo ha permesso di valutare l'evoluzione delle caratteristiche ottiche in condizioni reali di invecchiamento.

### **3.1.4 Descrizione delle strumentazioni usate**

#### Spettrofotometro PerkinElmer LAMBDA 1050+ UV-Vis-NIR

La spettrofotometria è una metodologia analitica impiegata per studiare come un materiale interagisce con la radiazione elettromagnetica, misurando l'intensità della luce assorbita, trasmessa o riflessa in funzione della lunghezza d'onda.

Per questa tipologia di analisi, è stato utilizzato lo strumento spettrofotometro PerkinElmer LAMBDA 1050+ UV/VIS/NIR (Figura 4), uno strumento ad alte prestazioni in grado di analizzare un ampio intervallo spettrale che comprende l'ultravioletto (300-380 nm), il visibile (381-780 nm) e il vicino infrarosso (781-2500 nm). Il sistema ottico dello strumento comprende una lampada al deuterio per l'analisi della regione UV e una lampada al tungsteno per la regione visibile e NIR. La luce generata colpisce poi la superficie del campione da esaminare posizionato sul portacampioni dello strumento. Lo strumento è inoltre dotato di una sfera integratrice rivestita in Spectralon con diametro 15 cm utilizzata per raccogliere la luce riflessa in tutte le direzioni dal campione e garantire una misura precisa.



Figura 4. Spettrofotometro PerkinElmer LAMBDA 1050+ UV/Vis/NIR.

### **3.1.5 Risultati**

In questa sezione sono presentati i risultati dell'analisi di riflettanza solare relativa a ciascun campione esaminato. I dati riportati corrispondono alla media di tre misurazioni effettuate su ogni campione in tre punti distinti. Nello specifico, il campione bianco è rappresentato da linee in scala di grigi, il campione naturale da linee in tonalità di giallo, quello rosso da linee in scala di rosso e infine il campione nero da linee in scala di nero.

In particolare, la Figura 5 mostra i risultati di tutti i campioni analizzati relativi al tempo 0, ovvero pre-invecchiamento. Analizzando i risultati, il campione bianco presenta la riflettanza solare più elevata, seguito nell'ordine dai campioni naturale, rosso e nero. Tuttavia, nella finestra spettrale dell'UV, è il campione naturale a mostrare la riflettanza più alta.

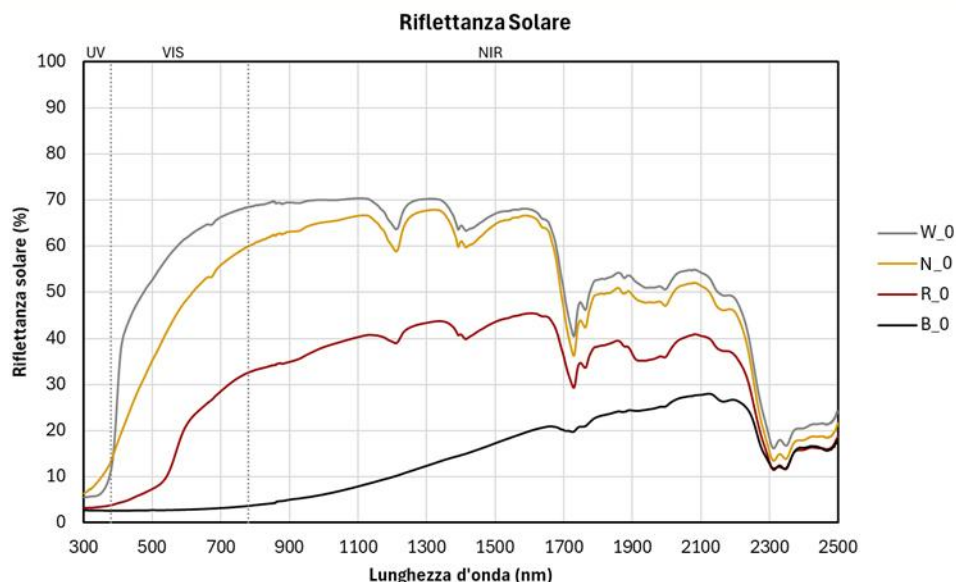


Figura 5. Confronto tra le curve di riflettanza solare dei campioni al tempo 0

Questa analisi è stata ripetuta sulla stessa tipologia di campioni anche dopo 30, 60 e 90 giorni di invecchiamento naturale. In Figura 6 viene presentato il confronto visivo tra i campioni pre- e post- invecchiamento, in cui è possibile notare una variazione del colore che tende ad essere più chiaro tra le foto dei campioni a 0 e a 90 giorni.

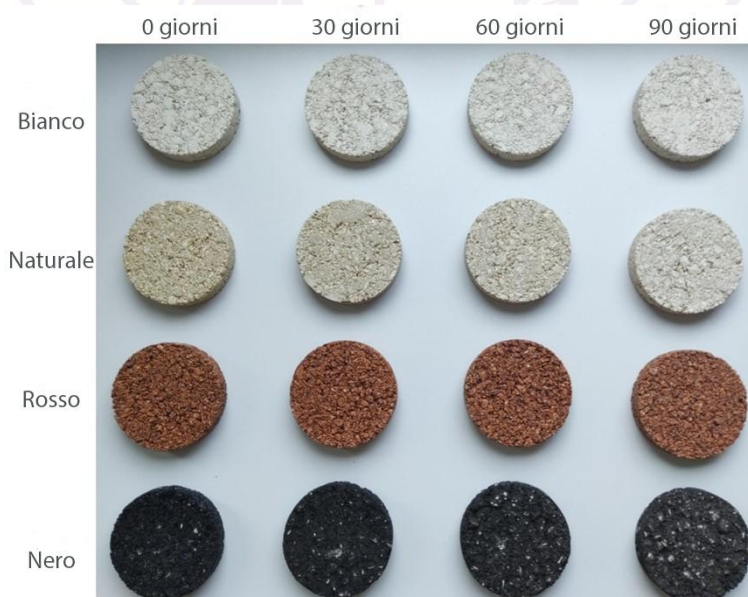


Figura 6. Effetto visivo macroscopico dell'esposizione agli agenti atmosferici (invecchiamento naturale) sui campioni.

La Figura 7 mostra invece i risultati in termini di riflettanza solare ottenuti per ciascuna tipologia di campione pre- e post- invecchiamento. Per il campione bianco, l'invecchiamento ha comportato una riduzione della riflettanza solare rispetto al tempo zero; tale diminuzione risulta comunque piuttosto stabile, con variazioni minime tra i 30 e i 90 giorni.

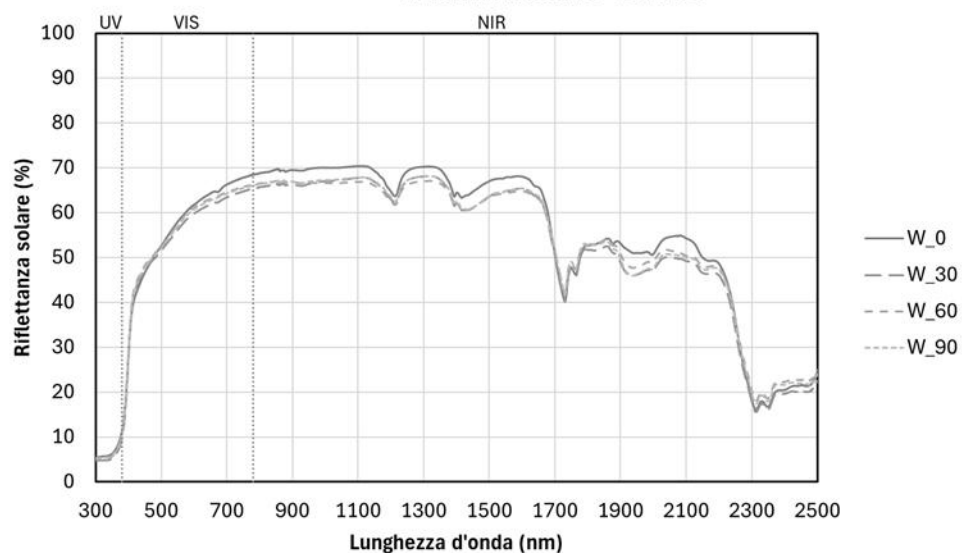
Anche il campione naturale mostra una riduzione della riflettanza nel tempo, in particolare a lunghezze d'onda superiori ai 700 nm. Al di sotto di questa soglia, invece, la riflettanza tende ad aumentare con l'aumentare del periodo di invecchiamento.

Nel caso del campione rosso, l'invecchiamento ha determinato un incremento della riflettanza solare rispetto al tempo zero, con un aumento più marcato osservato dopo 90 giorni di esposizione.

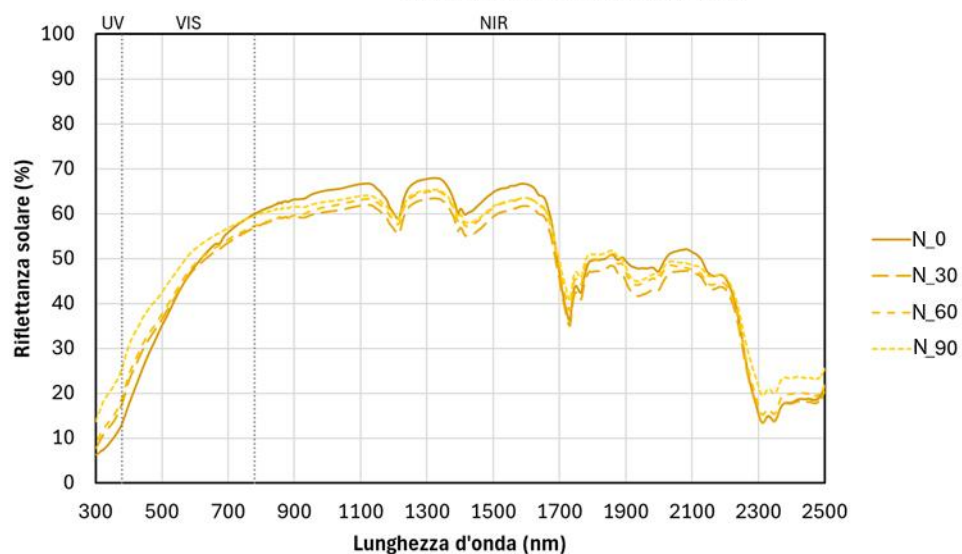
Per quanto riguarda il campione nero, si osserva inizialmente un aumento della riflettanza fino a circa 1100 nm nei campioni invecchiati per 30 e 60 giorni, seguito da un decremento rispetto al tempo zero. Tuttavia, dopo 90 giorni di esposizione, si registra un nuovo incremento della riflettanza, che si estende fino a circa 1500 nm.



### Riflettanza Solare - BIANCO



### Riflettanza Solare - NATURALE



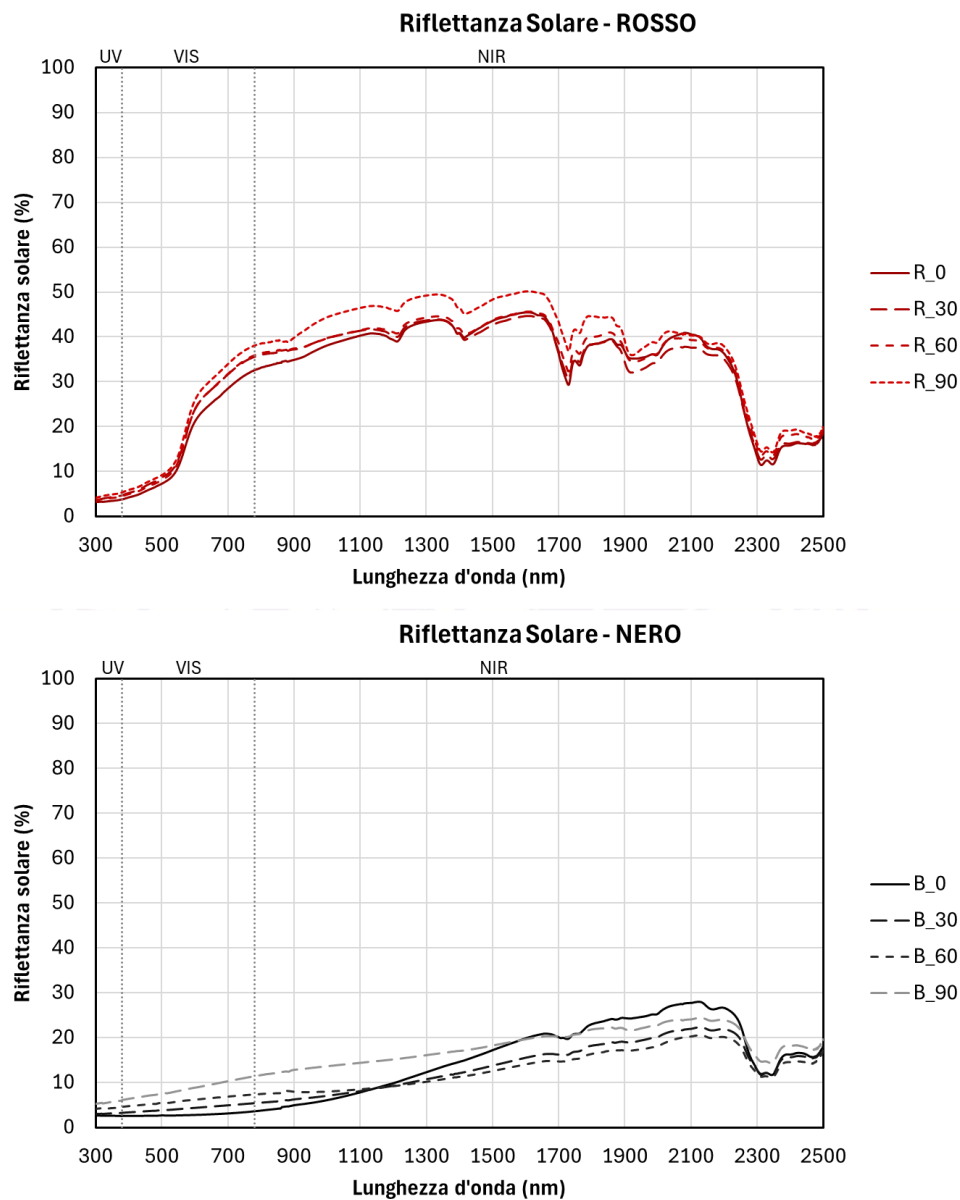


Figura 7. Riflettanza solare campione Bianco, Naturale, Rosso e Nero pre- e post-invecchiamento

## 3.2 Caratterizzazione termica

In questa sezione vengono riportati i riferimenti normativi e il metodo di analisi per la caratterizzazione termica dei campioni oggetto di studio. In particolare, i test per la valutazione dell'emissività termica sono stati eseguiti utilizzando un emissometro portatile della Devices and Services AE1 su campioni cilindrici con diametro pari a 15 cm e spessore di 5 cm.

### 3.2.1 Riferimenti normativi

- ASTM C1371-04a  
Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers.

### 3.2.2 Metodologia di misura

Il metodo di misurazione descritto nella norma ASTM C1371-04a riporta i passaggi da seguire per la determinazione dell'emissività dei materiali a temperatura ambiente utilizzando emissometri portatili.

### 3.2.3 Procedura seguita

Prima di procedere con l'esecuzione del test di valutazione di emissività dei materiali, l'emissometro portatile viene calibrato nelle condizioni ambientali in cui viene eseguito il test utilizzando due riferimenti standard: uno ad elevata emissività con  $\varepsilon=0.88$  e uno a bassa emissività con  $\varepsilon=0.06$ . Una volta calibrato lo strumento, si procede all'esecuzione del test sul materiale per quantificare l'emissività che sarà quantificata sulla base della calibrazione dello strumento.

### 3.2.4 Descrizione delle strumentazioni usate

Lo strumento utilizzato per l'analisi di emissività termica è l'emissometro portatile modello AE1 Devices & Services Company, con numero seriale 2296, in grado di fornire l'emittanza emisferica totale a 65°C. Lo strumento ha un rilevatore che viene scaldato a termopila (Figura 8.a) per creare la differenza di temperatura tra il rilevatore e la superficie e un dispositivo di lettura che è un voltmetro digitale D&S Scaling modello RD1. Questo è caratterizzato da una manopola per regolare il guadagno e impostare il valore della tensione corrispondente all'emittanza dello standard di calibrazione (Figura 8.b). Al termine dell'esecuzione del test,

lo strumento fornisce un valore di emissività termica del materiale testato compreso tra 0 e 1 con due cifre decimali. La Tabella 2 riporta nel dettaglio le specifiche dello strumento analizzato.

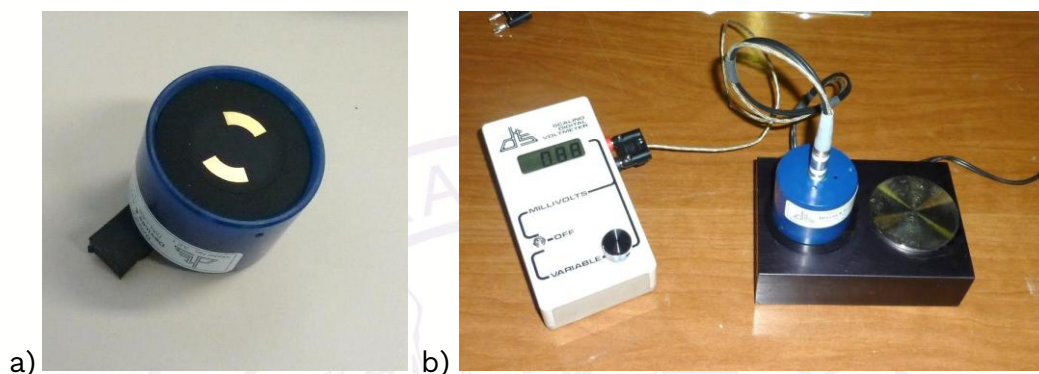


Figura 8. Rilevatore a termopile differenziali (a) e procedura di calibrazione.

Tabella 2. Specifiche dello strumento emissometro portatile.

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Batteria                  | fino a 12 ore di operatività continua                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Alimentazione             | 100-240V, 50-60 Hz, 12V DC                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Output                    | 2.4 mV                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Tempo di riscaldamento    | 30 minuti                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Riproducibilità           | +/- 0.01 unità di emittanza                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Standard per calibrazione | $\varepsilon = 0.06$ ; $\varepsilon = 0.88$                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Adattatori                | AE-AD1: materiali piatti con un diametro minimo 3,8 cm<br>AE-AD3: materiali piatti con un diametro minimo di 2,54 c<br>AE-ADP: materiali piatti con un diametro minimo di 3,8 cm e bassa conducibilità termica, superfici cilindriche con un grande raggio (>2 pollici) e superfici ruvide o testurizzate. |

### 3.2.5 Risultati

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi all'analisi di emissività termica delle 4 diverse tipologie di campioni analizzati, ovvero campione bianco, naturale, rosso e nero. I test sono stati eseguiti prima e dopo il periodo di invecchiamento naturale. Il processo di invecchiamento ha portato a lievi miglioramenti in termini di emissività termica all'aumentare dei giorni di esposizione dei campioni in alcune tipologie,

mentre per il campione nero, ad esempio, non ci sono state variazioni. I risultati sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3. Valori di emissività termica testati con emissometro portatile.

|          | Emissività termica |           |           |           |
|----------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
|          | 0 giorni           | 30 giorni | 60 giorni | 90 giorni |
| Bianco   | 0.94               | 0.95      | 0.96      | 0.96      |
| Naturale | 0.93               | 0.94      | 0.96      | 0.96      |
| Rosso    | 0.96               | 0.98      | 0.98      | 0.98      |
| Nero     | 0.96               | 0.96      | 0.96      | 0.96      |

### 3.3 Calcolo dell'Indice di Riflessione Solare (SRI)

L'Indice di Riflessione Solare (SRI) esprime la capacità di un materiale di riflettere l'energia solare e rilasciare il calore assorbito, indicando quanto è "freddo" un materiale quando esposto al sole. L'SRI integra i valori di riflettanza solare ed emissività termica per quantificare la capacità di una superficie di riflettere la radiazione solare e dissipare il calore assorbito. Valori elevati di SRI corrispondono a una maggiore efficacia del raffrescamento passivo, contribuendo alla mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbana. Convenzionalmente, un nero standard presenta SRI pari a 0 e un bianco standard SRI pari a 100; tuttavia, in funzione delle caratteristiche del materiale, l'indice può assumere valori inferiori a 0 o superiori a 100.

#### 3.3.1 Riferimenti normativi

- ASTM E1980-11(2019)  
Pratica standard per il calcolo dell'indice di riflettanza solare di superfici opache orizzontali e con bassa pendenza

#### 3.3.2 Metodologia di calcolo

L'indice di riflettanza solare viene calcolato secondo lo Standard ASTM E1980-11, e combina i valori di riflettanza solare e di emissività termica del materiale. Tali parametri sono relativi alla temperatura superficiale del campione, in quanto rappresentano rispettivamente l'effetto della radiazione solare sulla superficie e la capacità della superficie stessa di riemettere energia in ambiente. La norma riporta due diversi approcci per

il calcolo dell'SRI. Il primo approccio prevede la determinazione della temperatura superficiale stazionaria ( $T_s$ ) raggiunta dal materiale stesso in determinate condizioni ambientali di irraggiamento solare e di ventilazione definite nella norma ASTM E1980-11 (flusso solare pari a 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura dell'aria esterna pari a 310 K e temperatura del cielo pari a 300 K, tre livelli di ventilazione). La temperatura superficiale stazionaria ( $T_s$ ) di un materiale esposto a irraggiamento solare e ventilazione si determina utilizzando il bilancio energetico tra l'energia assorbita e quella dissipata dal materiale. In regime stazionario, l'energia solare assorbita dalla superficie è uguale all'energia persa dalla stessa attraverso la radiazione termica e la convezione verso l'ambiente. Dal valore della temperatura superficiale  $T_s$  del materiale, l'indice SRI viene calcolato in questo modo:

$$SRI = 100 \cdot \frac{(T_{bianca} - T_s)}{(T_{nera} - T_{bianca})}$$

in cui  $T_{bianca}$  e  $T_{nera}$  sono le temperature limiti raggiungibili rispettivamente da una superficie di riferimento bianca (fattore di riflessione solare 0,8 - emissività 0,9 - SRI = 100 in condizioni ambientali standard) e una superficie di riferimento nera (fattore di riflessione solare di 0,05 - emissività di 0,9 - SRI = 0 in condizioni ambientali standard) nelle medesime condizioni ambientali per cui si è calcolata  $T_s$ .

Nel secondo approccio riportato dalla normativa, la determinazione del valore SRI viene effettuata a partire dalla seguente equazione:

$$SRI = 123.97 - 141.35\chi + 9.655\chi^2$$

dove:

$$\chi = \frac{((1 - r) - 0.029\varepsilon)(8.797 + h_c)}{9.5205\varepsilon + h_c}$$

$r$  e  $\varepsilon$  rappresentano rispettivamente la riflettanza solare e l'emissività termica misurate. Il termine  $h_c$  è il coefficiente convettivo che, secondo lo standard, può assumere tre diversi valori: 5, 12 e 30 W/m<sup>2</sup> K, a seconda dell'effetto di diverse condizioni di vento (rispettivamente 0-2 m/s, 2-6 m/s e 6-10 m/s).

### 3.3.3 Risultati

In questa sezione vengono presentati i risultati del calcolo dell'indice SRI dei campioni prima e dopo l'invecchiamento. La Tabella 4 presenta i dati al tempo 0, ovvero prima dell'invecchiamento. Il campione con SRI maggiore è il campione bianco, seguito dal naturale, rosso e nero. In particolare, anche la temperatura superficiale del campione bianco è quella che registra i valori più bassi, che tendono a diminuire all'aumentare del coefficiente convettivo  $h_c$ . Al contrario, il campione nero è quello che registra il valore di SRI minore con temperatura superficiale anche sopra i 100°C con  $h_c = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Tabella 4. Calcolo dei coefficienti globali e indice SRI – Valori iniziali (0 giorni).

| Campione | Coefficiente di convezione ( $\text{W/m}^2 \text{ K}$ ) | Riflettanza solare | Emissività termica | SRI | Temperatura superficiale ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Temperatura superficiale campione bianco di riferimento ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Temperatura superficiale campione nero di riferimento ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|----------|---------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Bianco   | $h = 5$                                                 | 0.59               | 0.94               | 71  | 65.3                                            | 49.3                                                                           | 103.7                                                                        |
|          | $h = 12$                                                | 0.59               | 0.94               | 72  | 55.3                                            | 44.6                                                                           | 82.5                                                                         |
|          | $h = 30$                                                | 0.59               | 0.94               | 73  | 46.4                                            | 40.8                                                                           | 61.1                                                                         |
| Naturale | $h = 5$                                                 | 0.50               | 0.93               | 57  | 72.5                                            | 49.3                                                                           | 103.7                                                                        |
|          | $h = 12$                                                | 0.50               | 0.93               | 59  | 60.2                                            | 44.6                                                                           | 82.5                                                                         |
|          | $h = 30$                                                | 0.50               | 0.93               | 60  | 49                                              | 40.8                                                                           | 61.1                                                                         |
| Rosso    | $h = 5$                                                 | 0.25               | 0.96               | 28  | 88.4                                            | 49.3                                                                           | 103.7                                                                        |
|          | $h = 12$                                                | 0.25               | 0.96               | 28  | 71.7                                            | 44.6                                                                           | 82.5                                                                         |
|          | $h = 30$                                                | 0.25               | 0.96               | 28  | 55.3                                            | 40.8                                                                           | 61.1                                                                         |
| Nero     | $h = 5$                                                 | 0.06               | 0.96               | 6   | 100.7                                           | 49.3                                                                           | 103.7                                                                        |
|          | $h = 12$                                                | 0.06               | 0.96               | 4   | 80.8                                            | 44.6                                                                           | 82.5                                                                         |
|          | $h = 30$                                                | 0.06               | 0.96               | 3   | 60.4                                            | 40.8                                                                           | 61.1                                                                         |

Con il periodo di invecchiamento, i vari coefficienti considerati hanno subito delle variazioni, con i relativi risultati in termini di indice SRI riportati in

Tabella 5, Tabella 6 e Tabella 7. In generale, l'SRI tende ad aumentare all'aumentare del periodo di invecchiamento, ad eccezione del campione bianco in cui si registra un leggero abbassamento. Nonostante questo, il campione bianco rimane il campione che riporta sempre l'SRI maggiore.

Tabella 5. Calcolo dei coefficienti globali e indice SRI – Valori dopo 30 giorni.

| Campione | Coefficiente di convezione (W/m <sup>2</sup> K) | Riflettanz a solare | Emissività termica | SRI | Temperatura superficiale (°C) | Temperatura superficiale campione bianco di riferimento (°C) | Temperatura superficiale campione nero di riferimento (°C) |
|----------|-------------------------------------------------|---------------------|--------------------|-----|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Bianco   | h = 5                                           | 0.57                | 0.95               | 68  | 66.4                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.57                | 0.95               | 70  | 56.1                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.57                | 0.95               | 70  | 46.8                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Naturale | h = 5                                           | 0.48                | 0.94               | 56  | 73.3                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.48                | 0.94               | 57  | 60.8                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.48                | 0.94               | 58  | 49.3                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Rosso    | h = 5                                           | 0.27                | 0.98               | 31  | 86.7                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.27                | 0.98               | 31  | 70.6                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.27                | 0.98               | 31  | 54.8                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Nero     | h = 5                                           | 0.06                | 0.96               | 6   | 100.3                         | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.06                | 0.96               | 5   | 80.6                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.06                | 0.96               | 4   | 60.3                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |

Tabella 6. Calcolo dei coefficienti globali e indice SRI – Valori dopo 60 giorni.

| Campione | Coefficiente di convezione (W/m <sup>2</sup> K) | Riflettanz a solare | Emissività termica | SRI | Temperatura superficiale (°C) | Temperatura superficiale campione bianco di riferimento (°C) | Temperatura superficiale campione nero di riferimento (°C) |
|----------|-------------------------------------------------|---------------------|--------------------|-----|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Bianco   | h = 5                                           | 0.58                | 0.96               | 70  | 65.8                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.58                | 0.96               | 71  | 55.7                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.58                | 0.96               | 71  | 46.6                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Naturale | h = 5                                           | 0.49                | 0.96               | 58  | 72                            | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.49                | 0.96               | 59  | 60                            | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.49                | 0.96               | 60  | 48.9                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Rosso    | h = 5                                           | 0.27                | 0.98               | 31  | 86.6                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.27                | 0.98               | 31  | 70.5                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.27                | 0.98               | 31  | 54.8                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Nero     | h = 5                                           | 0.08                | 0.96               | 7   | 99.6                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.08                | 0.96               | 6   | 80                            | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.08                | 0.96               | 5   | 60                            | 40.8                                                         | 61.1                                                       |

Tabella 7. Calcolo dei coefficienti globali e indice SRI – Valori dopo 90 giorni.

| Campione | Coefficiente di convezione (W/m <sup>2</sup> K) | Riflettanza solare | Emissività termica | SRI | Temperatura superficiale (°C) | Temperatura superficiale campione bianco di riferimento (°C) | Temperatura superficiale campione nero di riferimento (°C) |
|----------|-------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Bianco   | h = 5                                           | 0.58               | 0.96               | 70  | 65.7                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.58               | 0.96               | 71  | 55.7                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.58               | 0.96               | 71  | 46.6                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Naturale | h = 5                                           | 0.52               | 0.96               | 62  | 69.8                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.52               | 0.96               | 63  | 58.5                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.52               | 0.96               | 64  | 48.1                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Rosso    | h = 5                                           | 0.30               | 0.98               | 34  | 85                            | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.30               | 0.98               | 35  | 69.4                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.30               | 0.98               | 34  | 54.1                          | 40.8                                                         | 61.1                                                       |
| Nero     | h = 5                                           | 0.11               | 0.96               | 12  | 97.3                          | 49.3                                                         | 103.7                                                      |
|          | h = 12                                          | 0.11               | 0.96               | 11  | 78.3                          | 44.6                                                         | 82.5                                                       |
|          | h = 30                                          | 0.11               | 0.96               | 10  | 59                            | 40.8                                                         | 61.1                                                       |

La Figura 9 riporta i risultati di SRI dei campioni con  $h_c = 12 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Dal grafico si evince che, ad eccezione del campione nero e del campione rosso pre-invecchiamento, i materiali analizzati hanno valori di SRI superiori alle richieste del D.M. 05/08/2024 – Paragrafo 2.2.1 ( $\text{SRI} \geq 29$ ) per le superfici esterne. Questo sta ad indicare la possibilità di poter applicare questi tipi di materiali per pavimentazioni esterne.

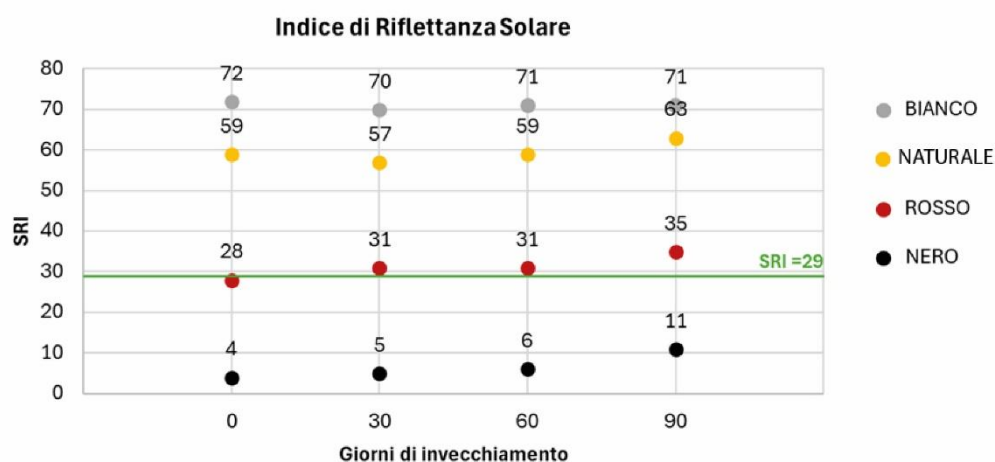


Figura 9. SRI con  $h_c = 12 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

## **4. Valutazione delle proprietà di conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico.**

### **4.1 Caratterizzazione termica**

In questa sezione viene presentata la caratterizzazione termica dei campioni prima e dopo il periodo di invecchiamento. Questa valutazione è stata eseguita utilizzando il metodo il metodo Transient Plane Source (TPS) utilizzando lo strumento Hot Disk 2500 S. Attraverso questa analisi è stato possibile valutare la conducibilità termica [ $W/(mK)$ ], la diffusività termica [ $mm^2/s$ ] e il calore specifico volumetrico [ $MJ/(m^3K)$ ].

#### **4.1.1 Riferimenti normativi**

- UNI EN ISO 22007-2:2015  
Materie plastiche – Determinazione della conduttività termica e della diffusività termica – Parte 2: Metodo della sorgente piana transitoria (disco caldo).
- UNI CEI 70098-3:2016  
Incertezza di misura – Parte 3: Guida all'espressione dell'incertezza di misura.

#### **4.1.2 Metodologia di misura**

Il metodo Transient Plane Source (TPS) sfrutta una fonte termica aero-transitoria per la rapida misurazione della conducibilità termica, della diffusività termica e, quindi, della capacità termica specifica di un campione. Tra i vantaggi di questa tecnica, oltre alla possibilità di testare una vasta gamma di materiali, c'è quello di disporre di un'ampia scala di misurazioni con range di conducibilità variabile tra  $0.005 W/mK$  e  $1800 W/mK$ . Si tratta di test non distruttivi durante i quali la corrente passa attraverso una resistenza a spirale in nichel e genera un aumento di temperatura nel sistema. Il calore generato si dissipa attraverso il campione su entrambi i lati, ad una velocità dipendente dalle proprietà termiche di trasporto del materiale. La sonda contenente la spirale in nichel funge sia da fonte di calore che da sensore di temperatura.

Misurando la variazione della resistenza termica del sensore durante il transitorio termico, si può determinare la variazione media della temperatura attraverso la formula:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha \overline{\Delta T(t)})$$

dove  $R(t)$  è la resistenza [ $\Omega$ ] del sensore all'istante  $t$ ,  $R_0$  è la resistenza [ $\Omega$ ] iniziale del sensore,  $\alpha$  è il coefficiente termico di resistenza e  $\overline{\Delta T(t)}$  è il cambiamento medio di temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] del sensore.

Analizzando il cambiamento di temperatura in funzione del tempo, inoltre, è possibile ricavare la conducibilità termica e la diffusività termica del materiale circostante tramite la formula:

$$\Delta T(\tau) = \frac{P_0}{\pi^2 r \lambda} D(\tau)$$

dove  $P_0$  è la potenza [ $\text{W}$ ] emessa dal sensore,  $r$  è il raggio [ $\text{m}$ ] del sensore,  $\lambda$  è la conducibilità termica [ $\text{W/mK}$ ] e  $D(\tau)$  è la funzione di forma adimensionale definita in funzione del tempo caratteristico della misura  $\tau$ , e quindi della diffusività termica  $k[\text{mm}^2/\text{s}]$ .

Da ultimo è possibile ricavare la capacità termica specifica del campione sfruttando la relazione che lega conducibilità e diffusività termica:

$$k = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

La metodologia di misura si basa sulle seguenti ipotesi:

- Il sensore planare è costituito da sorgenti lineari circolari concentriche ed equidistanti;
- Lo spessore e la capacità termica del sensore sono trascurabili;
- Non c'è alcuna resistenza termica tra sensore e campione.

#### **4.1.3 Procedura seguita**

Le analisi termiche sono state eseguite tramite Hot Disk sui campioni con diametro 10 cm e spessore 2 cm. Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata una sonda in Kapton 5501 con raggio 6.403 mm posizionata tra due pezzi di uno stesso campione in modo che fosse perfettamente aderente (Figura 10).



Figura 10. Set up sperimentale per le misure di conducibilità termica tramite Hot Disk

Per ogni campione sono state effettuate quattro diverse misurazioni su quattro diversi punti del campione. Successivamente, è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

#### **4.1.4 Descrizione delle strumentazioni usate**

##### Hot Disk TPS 2500 S

L'hot disk è uno strumento progettato per analisi di precisione delle proprietà di trasporto termico come la conducibilità, la diffusività e la capacità termica specifica di un materiale, sfruttando il metodo del disco caldo secondo quanto prescritto dalla normativa ISO 22007-2. Lo strumento può testare una vasta gamma di materiali, con geometrie e dimensioni diverse.

Il modello di cui il gruppo EAPLAB dispone è L'Hot Disk AB - TPS 2500 S. Il sistema è formato principalmente da uno speciale ponte Wheat stone e da un sensore piatto costituito da una resistenza a spirale doppia continua in nichel, spessa circa 10 micron, inserita tra due strati di kapton, spessi tra 0.013 e 0.025 mm. Un alimentatore ausiliario DC genera un voltaggio costante attraverso il ponte, che viene bilanciato automaticamente prima di ogni misura. Inoltre, un voltmetro digitale dotato di memoria misura l'incremento di temperatura del sensore e, di conseguenza, le proprietà di trasporto termico del campione investigato.

Grazie all'installazione di più moduli software, lo strumento può essere impiegato per misure su: (i) materiali isotropi (Isotropic module), (ii) campioni astiformi (One-dimensional module), (iii) film sottili, rivestimenti o strati adesivi (Thin-film module), (iv) piastre e lastre di conduttori (Slab module), (v) materiali estremamente leggeri e a bassa conduzione

(Lowdensity / Highly insulating module), (vi) campioni anisotropi o strutture stratificate (Anisotropic module). Inoltre, data la capacità di sondare la conducibilità termica in funzione dello spessore del campione (Structural probe module), si può valutare anche l'omogeneità o la disomogeneità dello stesso.

Per l'esecuzione della misura, il sensore viene collocato tra due stati dello stesso materiale o tra uno stato di materiale campione e uno di materiale isolante; viene quindi riscaldato da una corrente elettrica costante. Il calore generato all'interno della resistenza si dissipa attraverso il materiale circostante, provocandone un aumento di temperatura dell'ordine di 1-5°C. Quest'ultimo viene identificato monitorando la variazione di resistenza elettrica. La durata del test viene di solito impostata in funzione dello spessore del campione, al fine di evitare dispersioni di calore all'esterno. Inoltre, se il diametro del campione è molto più grande di quello del sensore, l'area di misura da considerare ai fini di risultati validi dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza del raggio del sensore stesso.

Tabella 8. Specifiche dello strumento Hot Disk TPS 2500 S.

|                                     |                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conducibilità termica               | 0.005 ÷ 1800 W/m/K                                                                                                                                                                                                    |
| Diffusività termica                 | 0.1 ÷ 1200 mm <sup>2</sup> /s                                                                                                                                                                                         |
| Calore specifico volumetrico        | >5 MJ/m <sup>3</sup> K                                                                                                                                                                                                |
| Tempo di misura                     | 1 ÷ 1280 s                                                                                                                                                                                                            |
| Riproducibilità                     | migliore dell'1%                                                                                                                                                                                                      |
| Accuratezza                         | migliore del 5%                                                                                                                                                                                                       |
| Range di temperature                | -253 ÷ 1000 °C                                                                                                                                                                                                        |
| Con circolatore                     | -35 ÷ 200 °C                                                                                                                                                                                                          |
| Dimensioni dei campioni più piccoli | 0.5×2 mm di diametro o di area (test di massa)<br>0.1×10 mm di diametro o di area (test di lastre)<br>10×5 mm di diametro o di area (test unidimensionali)<br>0.02×22 mm di diametro o di area (test di film sottili) |
| Tipi di sensori disponibili         | Kapton, mica o teflon                                                                                                                                                                                                 |

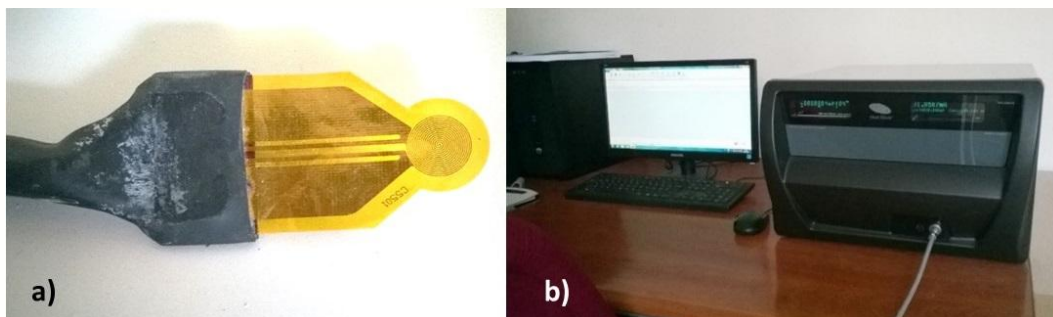


Figura 11. (a) Esempio di sensore e (b) Hot Disk TPS 2500 S, in dotazione presso il laboratorio EAPLAB (Università degli Studi di Perugia).

#### 4.1.5 Risultati

In questa sezione vengono riportati i risultati delle analisi termiche effettuate sulle quattro diverse tipologie di campioni. Per ciascun campione è stata analizzata la conducibilità termica ( $\lambda$ ), la diffusività termica ( $D$ ) e il calore specifico volumetrico ( $c$ ).

Tabella 9. Risultati delle analisi termiche prima dell'invecchiamento

| Campione | Misura         | $\lambda$ [W/mK] | $D$ [mm <sup>2</sup> /s] | $c$ [MJ/m <sup>3</sup> K] |
|----------|----------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| Bianco   | #1             | 1.66             | 1.07                     | 1.6                       |
|          | #2             | 1.63             | 1.26                     | 1.3                       |
|          | #3             | 1.63             | 1.28                     | 1.3                       |
|          | #4             | 1.69             | 1.12                     | 1.5                       |
|          | <b>Media</b>   | 1.65             | 1.2                      | 1.4                       |
|          | <b>Dev.st.</b> | 0.03             | 0.1                      | 0.1                       |
| Naturale | #1             | 1.66             | 0.98                     | 1.7                       |
|          | #2             | 1.75             | 1.00                     | 1.8                       |
|          | #3             | 1.61             | 0.94                     | 1.7                       |
|          | #4             | 1.53             | 1.23                     | 1.3                       |
|          | <b>Media</b>   | 1.64             | 1.0                      | 1.6                       |
|          | <b>Dev.st.</b> | 0.09             | 0.1                      | 0.2                       |
| Rosso    | #1             | 0.97             | 0.67                     | 1.5                       |
|          | #2             | 0.95             | 0.68                     | 1.4                       |
|          | #3             | 0.95             | 0.69                     | 1.4                       |
|          | #4             | 0.93             | 0.79                     | 1.2                       |
|          | <b>Media</b>   | 0.95             | 0.7                      | 1.4                       |
|          | <b>Dev.st.</b> | 0.02             | 0.1                      | 0.1                       |
| Nero     | #1             | 1.31             | 1.25                     | 1.1                       |
|          | #2             | 1.35             | 1.27                     | 1.1                       |
|          | #3             | 1.44             | 1.06                     | 1.4                       |
|          | #4             | 1.42             | 0.93                     | 1.5                       |
|          | <b>Media</b>   | 1.38             | 1.1                      | 1.3                       |
|          | <b>Dev.st.</b> | 0.06             | 0.2                      | 0.2                       |

In particolare, il campione bianco e il campione naturale riportano proprietà termiche simili, dovuto anche al fatto che i materiali utilizzati sono gli stessi ad eccezione dell'introduzione di pigmento bianco. Il campione rosso, invece, realizzato con un differente tipo di aggregato, riporta la conducibilità termica e la diffusività termica più basse tra i quattro campioni e un calore specifico volumetrico medio tra i primi due campioni. Il campione nero, realizzato con lo stesso tipo di aggregato del campione bianco e naturale, riporta infatti proprietà termiche leggermente più alte del campione rosso. In questo caso il campione differisce dai primi due in quanto è stato prodotto con bitume invece di legante Evizero e questo può influire nelle prestazioni termiche del materiale finale.

La Figura 12 mostra i valori di conducibilità termica dei campioni anche dopo il processo di invecchiamento di 30, 60 e 90 giorni, mentre la Tabella 10 mostra i valori di diffusività termica e calore specifico volumetrico. Dai risultati si evince che il processo di invecchiamento non influisce in modo significativo sulle proprietà termiche dei materiali in quanto i risultati ottenuti sono simili e uguali entro l'errore.

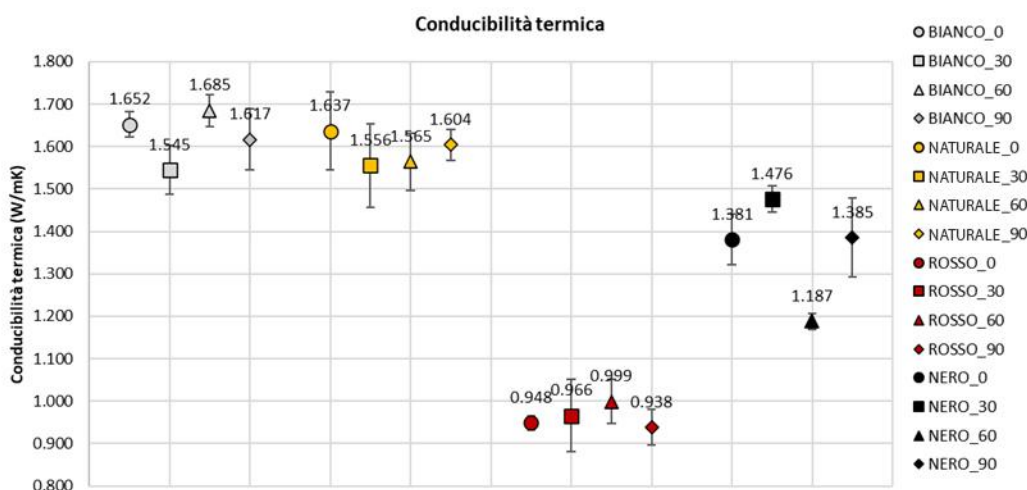


Figura 12. Conducibilità termica prima e dopo il periodo di invecchiamento

Tabella 10. Diffusività termica e calore specifico volumetrico post-invecchiamento

| Malta    | Giorni di invecchiamento | Misura       | D [mm <sup>2</sup> /s] | c [MJ/m <sup>3</sup> K] |
|----------|--------------------------|--------------|------------------------|-------------------------|
| Bianco   | 30                       | <b>Media</b> | <b>1.1</b>             | <b>1.4</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
|          | 60                       | <b>Media</b> | <b>1.0</b>             | <b>1.9</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
|          | 90                       | <b>Media</b> | <b>1.3</b>             | <b>1.4</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.3                    | 0.4                     |
| Naturale | 30                       | <b>Media</b> | <b>1.1</b>             | <b>1.4</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
|          | 60                       | <b>Media</b> | <b>1.0</b>             | <b>1.5</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
|          | 90                       | <b>Media</b> | <b>1.2</b>             | <b>1.4</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.1                     |
| Rosso    | 30                       | <b>Media</b> | <b>0.6</b>             | <b>1.6</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
|          | 60                       | <b>Media</b> | <b>0.7</b>             | <b>1.5</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
|          | 90                       | <b>Media</b> | <b>0.8</b>             | <b>1.2</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
| Nero     | 30                       | <b>Media</b> | <b>1.0</b>             | <b>1.5</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.2                     |
|          | 60                       | <b>Media</b> | <b>1.3</b>             | <b>0.9</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.2                    | 0.1                     |
|          | 90                       | <b>Media</b> | <b>1.0</b>             | <b>1.3</b>              |
|          |                          | Dev.st.      | 0.1                    | 0.1                     |

## 5. Valutazione delle prestazioni di surriscaldamento superficiale, temperatura dell'aria e radiazione riemessa

### 5.1 Riferimenti normativi

- D.P.R. 26/08/1993 n. 412  
Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia.

### 5.2 Metodologia di misura

Per analizzare il comportamento dei campioni quando esposti a condizioni ambientali reali è stata utilizzata una camera climatica nel laboratorio EAPLAB al CIRIAF in grado di riprodurre fedelmente parametri ambientali come la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e

l'irraggiamento solare. L'obiettivo di questo studio è quello di valutare il comportamento termico dei campioni simulando in particolare due giornate tipo: una giornata media estiva e una giornata estiva di caldo estremo.

### 5.3 Procedura seguita

Per la caratterizzazione del comportamento termico, sono stati utilizzati i campioni con diametro di 15 cm e spessore di 5 cm. Ogni campione è stato posizionato all'interno di un supporto isolante in schiuma di poliuretano espanso di 10 cm di spessore lasciando la superficie superiore del campione a diretto contatto con l'ambiente simulato in camera climatica, mentre la superficie inferiore rimane a contatto con il supporto isolante. Su entrambe le superfici è stata applicata una termocoppia per registrare i valori di temperatura superficiale durante l'intera durata del test.

La termocoppia posizionata sulla superficie superiore consente di monitorare la risposta del materiale all'esposizione diretta alle condizioni ambientali simulate, mentre quella sulla superficie inferiore permette di valutare il flusso di calore che attraversa il campione. A completamente del sistema di monitoraggio, sono stati posizionati all'interno della camera climatica due sensori TinyTag per la misurazione della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria (schermati adeguatamente), oltre a un piranometro per il controllo e la registrazione dell'irraggiamento solare.

Il setup descritto è stato utilizzato sia per la giornata media estiva che per la giornata estiva più calda. Analizzando i risultati di questo test è possibile valutare come e quanto ciascun materiale si scalda quando esposto a determinati parametri ambientali comprendendone il comportamento termico.



Figura 13. Setup sperimentale: campione all'interno della base isolante e relativi sensori.

### 5.3.1 Calcolo della giornata media oraria estiva

I parametri orari della giornata media estiva sono stati calcolati mediando i dati orari di temperatura, umidità relativa e radiazione solare rilevati da quattro diverse stazioni meteo nell'anno 2023. Le località sono state selezionate per rappresentare in maniera omogenea la diversità del territorio italiano, facendo ricorso a diverse zone climatiche. Nel dettaglio, la classificazione in fasce climatiche tiene conto del clima ed è calcolata sulla base dei gradi-giorno, cioè la somma per i vari giorni dell'anno della differenza tra temperatura dell'ambiente interno e quella media esterna: più alto è il valore dei gradi giorno, più rigido è il clima considerato (Tabella 11). In questa analisi, le quattro zone climatiche di riferimento scelte sono: zona B (Catania), zona C (Bari), zona D (Roma), e Zona E (Milano).

Tabella 11. Zone climatiche definite dalla normativa italiana e zone climatiche scelte per il calcolo della giornata oraria media estiva.

| Zona climatica | Gradi giorno |
|----------------|--------------|
| A              | ≤600         |
| B              | 601 -900     |
| C              | 901-1400     |
| D              | 1401-2100    |
| E              | 2101-3000    |
| F              | ≥3001        |

La Figura 14 mostra la giornata media oraria estiva ricavata dai dati meteo e utilizzata come riferimento per la simulazione in camera climatica. La radiazione solare massima si avvicina a  $800 \text{ W/m}^2$  nelle ore centrali della giornata, con temperature dell'aria massime e minime intorno ai  $27^\circ\text{C}$  e  $18^\circ\text{C}$ , rispettivamente.

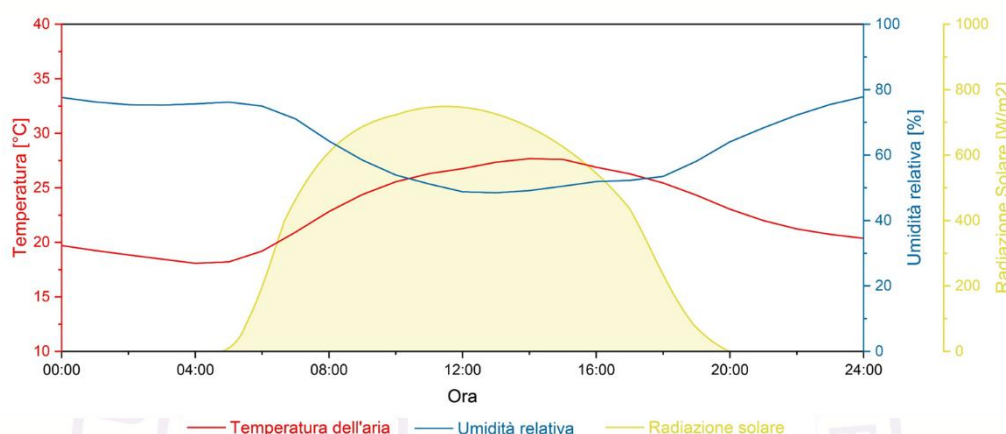


Figura 14. Profilo di temperatura, umidità relativa e irraggiamento durante la giornata media oraria estiva calcolata.

### 5.3.2 Calcolo della giornata più calda

La giornata che registra la massima temperatura dell'aria dell'anno 2023 è stata ricavata dall'analisi dei dati misurati dalla stazione meteo presente sul tetto dell'edificio del centro di ricerca CIRIAF (Perugia, Italia). La giornata identificata è il 23/08/2023, i cui parametri ambientali sono riportati in Figura 15. La radiazione solare massima si avvicina a  $1000 \text{ W/m}^2$  nelle ore centrali della giornata, con temperature massime che superano i  $35^\circ\text{C}$  e minime intorno ai  $18^\circ\text{C}$ . Rispetto alla giornata media estiva riportata in Figura 14, durante la giornata più calda si raggiungono valori minimi di umidità relativa, anche minori del 15% nelle ore centrali della giornata.

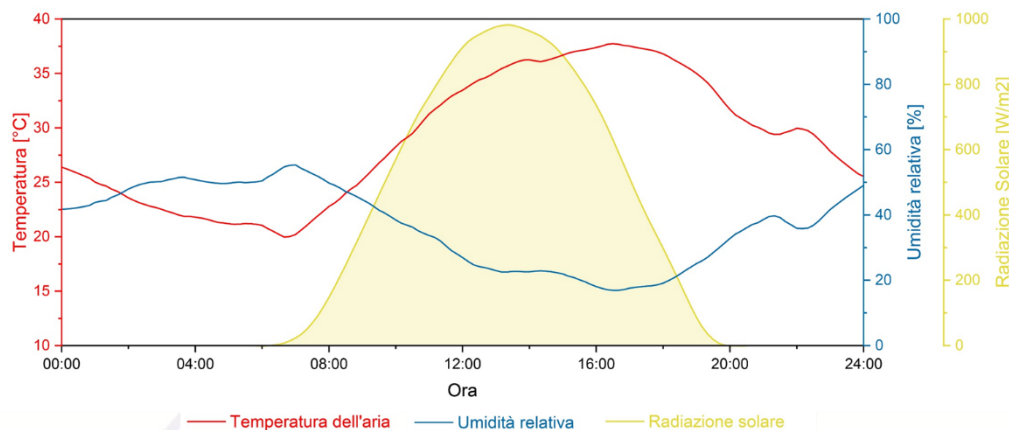


Figura 15. Profilo di temperatura, umidità relativa e irraggiamento durante la giornata media oraria estiva ricavata dalla stazione meteo del CIRIAF.

### 5.3.3 Impostazione dei cicli in camera climatica

La camera climatica DM340SR del laboratorio EAPLAB è in grado di simulare condizioni ambientali esterne, tramite il controllo preciso di temperatura ambiente, umidità relativa e irraggiamento solare. I range operativi della camera climatica coprono agevolmente le temperature dell'aria registrate nella giornata media e massima calda del 2023, con un controllo dell'umidità relativa fino al 20%, valore a cui sono stati approssimati eventuali valori reali inferiori. Infine, il simulatore solare ha una potenza che varia tra i 600 e i 1200 W/m<sup>2</sup>, riproducendo adeguatamente i valori di irraggiamento che si hanno nelle ore centrali delle giornate selezionate. Per valori inferiori ai 600 W/m<sup>2</sup>, si è tenuto conto della temperatura sole-aria (maggiori dettagli nella sezione 5.3.4), che combina l'effetto termico combinato di radiazione solare e temperatura dell'aria. Poiché la temperatura sole-aria dipende in maniera proporzionale dalle proprietà ottiche del materiale considerato, è stato necessario definire un andamento diverso per le impostazioni del simulatore solare per ciascuno dei campioni testati. La Figura 16 mostra i settaggi utilizzati per replicare la giornata media oraria estiva, tenendo conto di diverse zone climatiche italiane.

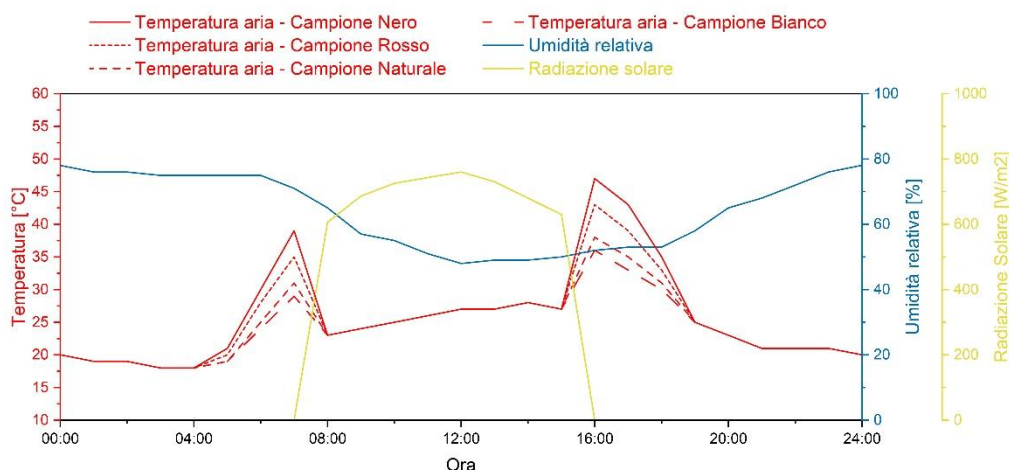


Figura 16 – Settaggi utilizzati per la simulazione della giornata media oraria estiva per ciascun campione.

In Figura 17, invece, sono riportati i settaggi utilizzati per replicare la giornata più calda monitorata dalla stazione meteo del CIRIAF a seconda del campione analizzato.

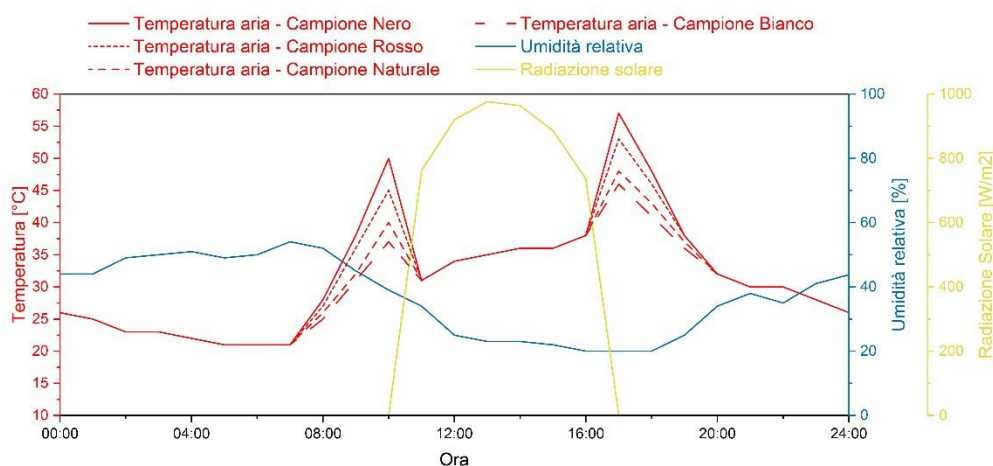


Figura 17 – Settaggi utilizzati per la simulazione della giornata più calda per ciascun campione.

### 5.3.4 Temperatura Sole-Aria

L'effetto termico provocato dalla combinazione di radiazione solare e di temperatura dell'aria sulla superficie esterna di una superficie viene descritto attraverso un unico parametro: la temperatura sole-aria. Si tratta della temperatura fittizia che dovrebbe avere l'aria esterna per generare su una superficie in ombra lo stesso scambio termico realizzato

nella realtà dall'azione combinata della temperatura esterna e della radiazione solare.

La temperatura sole-aria si ottiene dalla seguente relazione:

$$T_{\text{sole-aria}} = T_{\text{esterna}} + \frac{(\alpha \cdot I_{\text{totale}})}{h_0} - \frac{(\varepsilon \cdot \Delta R)}{h_0}$$

dove:

- $T_{\text{esterna}}$  temperatura dell'aria sulla superficie;
- $\alpha$  coefficiente di assorbimento solare della superficie;
- $I_{\text{totale}}$  irradianza solare;
- $h_0$  coefficiente di adduzione esterno;
- $\varepsilon$  coefficiente di emissività termica;
- $\Delta R$

Per superfici orizzontali come le pavimentazioni stradali oggetto di analisi,  $(\varepsilon \cdot \Delta R)/h_0$  può essere considerato pari a zero. La formula precedente diventa quindi:

$$T_{\text{sole-aria}} = T_{\text{esterna}} + \frac{(\alpha \cdot I_{\text{totale}})}{h_0}$$

Dall'equazione sopra riportata si evince come la temperatura sole-aria dipenda in maniera direttamente proporzionale dalle proprietà ottiche della finitura superficiale esterna, e pertanto a parità di condizioni climatiche una parete di colore scuro, con un elevato coefficiente di assorbimento, presenterà, rispetto ad una parete di colore chiaro, una  $T_{\text{sole-aria}}$  più elevata, nonché un flusso termico verso l'ambiente interno maggiore.

### 5.3.5 Calcolo della radiazione media riemessa

Il calcolo della radiazione emessa da un campione è fondamentale per comprendere il bilancio energetico della superficie e, di conseguenza, il suo comportamento termico. In particolare, per materiali utilizzati in ambienti esterni, la capacità di una superficie di emettere o trattenere calore incide direttamente su vari aspetti, tra cui l'ottimizzazione del comfort termico e il potenziale di mitigazione dell'isola di calore urbana.

La legge di Stefan-Boltzmann descrive la potenza totale irradiata da una superficie in funzione della sua temperatura. Questa legge è fondamentale per il calcolo delle perdite o dei guadagni termici attraverso l'irraggiamento, e viene usata per valutare il comportamento termico dei materiali e delle superfici esposte a diverse condizioni ambientali. Nel dettaglio, la legge è espressa dalla formula:

$$P_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

dove:

- $P_e$  potenza emessa per unità di superficie ( $\text{W/m}^2$ );
- $\varepsilon$  coefficiente di emissività della superficie;
- $\sigma$  costante di Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ );
- $T$  temperatura assoluta della superficie (K).

Oltre al calcolo della radiazione totale emessa dal campione, il calcolo della radiazione netta è altrettanto importante perché indica il calore effettivamente disperso dalla superficie rispetto al suo ambiente. Questo calcolo permette di determinare quanto calore il campione scambia effettivamente per irraggiamento netto verso il cielo. In questo caso, la formula può essere riscritta come:

$$P_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{superficie}}^4 - T_{\text{cielo}}^4)$$

dove:

- $P_e$  potenza emessa per unità di superficie ( $\text{W/m}^2$ );
- $\varepsilon$  coefficiente di emissività della superficie;
- $\sigma$  costante di Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ );
- $T_{\text{superficie}}$  temperatura assoluta della superficie (K);
- $T_{\text{cielo}}$  temperatura del Cielo, uguale alla temperatura dell'aria meno 10 K (K).

In questa analisi, la radiazione emessa, sia netta che totale, è stata calcolata facendo riferimento a un intervallo temporale di due ore, selezionando quello con temperature più elevate per la giornata media estiva e quella più calda. I dati di temperatura superficiale e dell'aria in questo intervallo sono stati mediati per ottenere un valore unico da utilizzare nel calcolo della radiazione emessa attraverso le formule sopra riportate.

## 5.4 Descrizione delle strumentazioni usate

### **Camera climatica DM340SR**

Una camera climatica è un'apparecchiatura che consente di riprodurre artificialmente le condizioni ambientali nelle quali macchinari, materiali, dispositivi o componenti elettronici possono essere esposti al fine di valutarne gli effetti. La macchina presente presso il laboratorio EAPLAB al CIRIAF dell'Università degli Studi di Perugia è il modello DM340SR prodotta da Angelantoni Test Technologies (ATT). Essa presenta un vano di prova all'interno del quale è possibile ottenere un ambiente controllato in termini di temperatura, umidità relativa e radiazione solare, quest'ultima simulata per mezzo di una lampada alogena con spettro solare tipico delle nostre latitudini. Il vano di prova della camera è costruito in lamiera di acciaio inossidabile (AISI 304), completamente saldato a tenuta di vapore. L'isolamento termico è garantito dalla lana di vetro, trattata con uno speciale legante a base di resine termoindurenti.

Il funzionamento della camera climatica è garantito dalla presenza di tre sistemi: (i) di riscaldamento, (ii) di refrigerazione e (iii) di deumidificazione. Il sistema di riscaldamento è costituito da resistenze elettriche, corazzate in acciaio inossidabile a bassa inerzia termica, poste sul ricircolo dell'aria interna. Il sistema di refrigerazione, invece, è caricato con fluidi che non danneggiano l'ozono e il raffreddamento è prodotto dall'evaporazione del liquido iniettato nell'evaporatore. Il compressore comprime il gas refrigerante nel condensatore che, per effetto dell'alta pressione, cambia stato e diventa liquido. Il liquido si espande grazie ad una valvola termostatica ed evapora assorbendo calore e determinando quindi il raffreddamento del vano di prova. Il ciclo si completa con il gas che viene nuovamente aspirato dal compressore. Il sistema di deumidificazione, infine, funziona con la tecnologia del "dito freddo". Un piccolo evaporatore a tubo liscio, alimentato dallo stesso impianto che provvede al raffreddamento, cattura per congelamento l'umidità dell'aria che lo lambisce senza variare la temperatura della camera. L'umidificazione è ottenuta tramite immissione diretta di vapore nel vano prova. Il sistema diretto di umidificazione utilizza un generatore di vapore speciale che immette vapore d'acqua surriscaldato, senza rischio di gocciolamento. Questo sistema diretto ha un bassissimo tempo di risposta, così da permettere una variazione dell'umidità molto rapida. Il tutto è controllato da un regolatore che tiene conto del fatto che la

percentuale di acqua contenuta nell'aria è una funzione non lineare della temperatura.

Tabella 12. Specifiche della camera climatica ATT UD150C SR.

|                                                       |                  |
|-------------------------------------------------------|------------------|
| Volume utile                                          | 337 l            |
| Campo di temperatura                                  | -40 ÷ +180 °C    |
| Precisione (nel tempo e al centro dello spazio utile) | ±0.5-1.0 °C      |
| Campo di umidità                                      | 10÷98%           |
| Precisione umidità relativa                           | ±1÷3 %           |
| Campo punto di rugiada per prove continuative         | -4/+94 °C        |
| Campo di rugiada per prove non continuative           | -3/+4 °C         |
| Max carico termico interno a +25 °C                   | 2300 W           |
| Gas refrigerante                                      | R404A            |
| Dimensioni esterne                                    | 919x1786x1765 mm |
| Dimensioni interne utili                              | 601x810x694 mm   |
| Peso max caricabile                                   | 80 Kg            |
| Peso complessivo della macchina                       | 820 Kg           |
| Rumore aereo con condensatore ad aria                 | 58 dB            |



Figura 8. Camera climatica ATT DM340SR, in dotazione presso il laboratorio EAPLAB al CIRIAF (Università degli Studi di Perugia).

### **Termocamera FLIR**

Una termocamera è uno strumento che rileva il calore emesso da oggetti, persone o superfici sotto forma di radiazione infrarossa. Questo tipo di radiazione è invisibile all'occhio umano, ma viene emessa da tutti i corpi con una temperatura superiore allo zero assoluto (-273,15 °C). La termocamera traduce questa radiazione in un'immagine visibile, chiamata immagine termica, che mostra le differenze di temperatura attraverso colori o sfumature. In questa analisi, una termocamera compatta FLIR One è stata utilizzata per acquisire immagini termiche a infrarossi dei campioni durante la simulazione in camera climatica. La FLIR One combina immagini termiche con immagini visibili usando la tecnologia MSX (Multi-Spectral Dynamic Imaging), che permette di sovrapporre i dettagli visibili alle immagini termiche per migliorarne la qualità e la comprensibilità.

Tabella 13. Specifiche della termocamera FLIR One.

|                                        |                          |
|----------------------------------------|--------------------------|
| Dimensioni                             | 35 × 37.5 × 149 mm       |
| Peso                                   | 153 g                    |
| Dimensione dei pixel termici           | 12 µm                    |
| Risoluzione termica                    | 160 × 120 (19.200 pixel) |
| Sensibilità termica                    | 70 m                     |
| Intervallo di temperatura dell'oggetto | -20°C a 120°C            |
| Temperatura di funzionamento           | -10°C a 50°C             |
| Accuratezza                            | ±3°C                     |

### **TinyTag**

Il Tinytag Plus 2 TGP-4017 è un datalogger progettato per monitorare sia la temperatura che l'umidità relativa. Grazie ai suoi sensori interni, è in grado di rilevare temperature comprese tra -25°C e +85°C e livelli di umidità relativa tra 0% e 100%, rendendolo versatile per una vasta gamma di applicazioni. Con una memoria capace di registrare fino a 32.000 letture, questo dispositivo consente un monitoraggio continuo a lungo termine, garantendo accuratezza e affidabilità anche in condizioni estreme. Il robusto involucro impermeabile lo protegge da agenti esterni, permettendo il suo utilizzo senza compromettere l'integrità dei dati.

raccolti. L'alimentazione è fornita da una batteria sostituibile con una durata media di circa 2 anni, a seconda della frequenza di registrazione.

Tabella 14 – Specifiche della termocamera FLIR One.

|                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| Dimensioni                  | 34 × 51 × 80 mm            |
| Peso                        | 110 g                      |
| Risoluzione di lettura      | 0.01 °C                    |
| Tipi di lettura             | Effettiva, Minima, Massima |
| Intervallo operativo        | -40°C a +85°C              |
| Intervallo di registrazione | 1 secondo a 10 giorni      |
| Tipo di sensore             | Termistore NTC 10K         |
| Grado di protezione         | IP68 impermeabile          |
| Capacità totale di lettura: | 32.000 rilevazioni         |

## 5.5 Risultati

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi al monitoraggio termico dei campioni quando sottoposti a determinate condizioni ambientali in camera climatica, simulando in particolare una giornata media estiva e una giornata estiva particolarmente calda.

### 5.5.1 Risultati della simulazione per la giornata media oraria estiva

Le Figure 19-22 riportano l'andamento delle temperature superficiali dei diversi campioni durante la simulazione in camera climatica. In linea con le capacità di assorbimento della radiazione solare e con gli indici SRI calcolati in precedenza, i campioni Bianco e Naturale mostrano le temperature più contenute sulle superfici esposte, con massimi rispettivamente di 44°C e 48°C; sulle superfici inferiori non esposte le temperature risultano inferiori di circa 2°C. Nel caso del campione Rosso, la differenza tra superficie esposta e non esposta è più marcata (circa 3°C), con una temperatura massima della superficie esposta superiore a 51°C. Il campione Nero evidenzia invece le peggiori prestazioni in termini di surriscaldamento, raggiungendo valori massimi di 55°C per la superficie esposta e 51°C per quella non esposta. In tutti i casi, l'andamento della temperatura dell'aria (linea blu tratteggiata) varia sensibilmente se si considera la temperatura sole-aria, mostrando due picchi principali nelle prime ore del mattino e nel tardo pomeriggio, direttamente correlati alla capacità di assorbimento solare di ciascun campione.

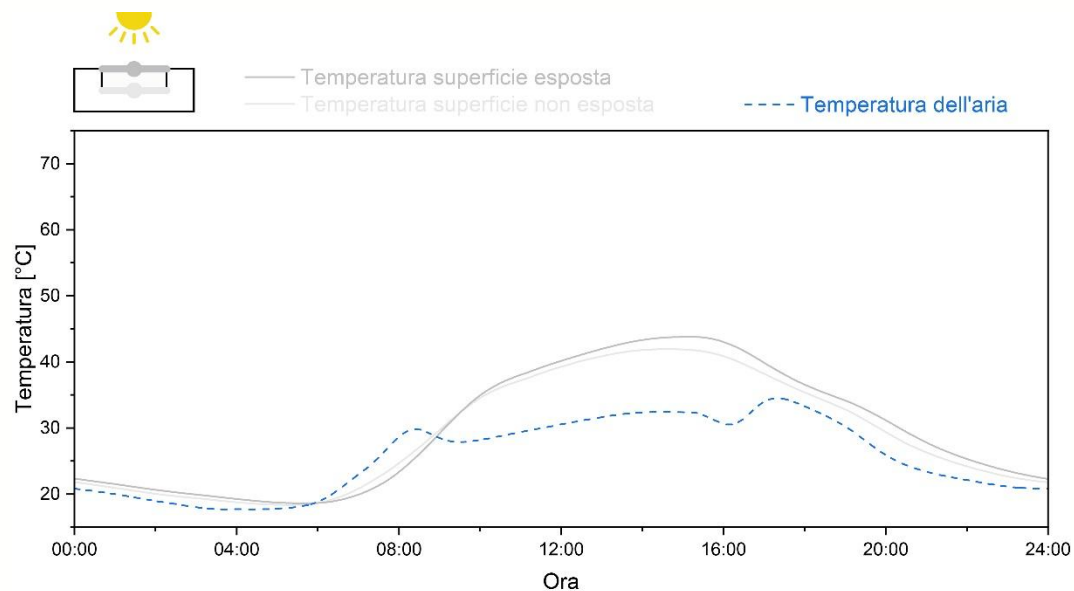


Figura 19 – Risultati della simulazione per la giornata media oraria estiva – Campione Bianco

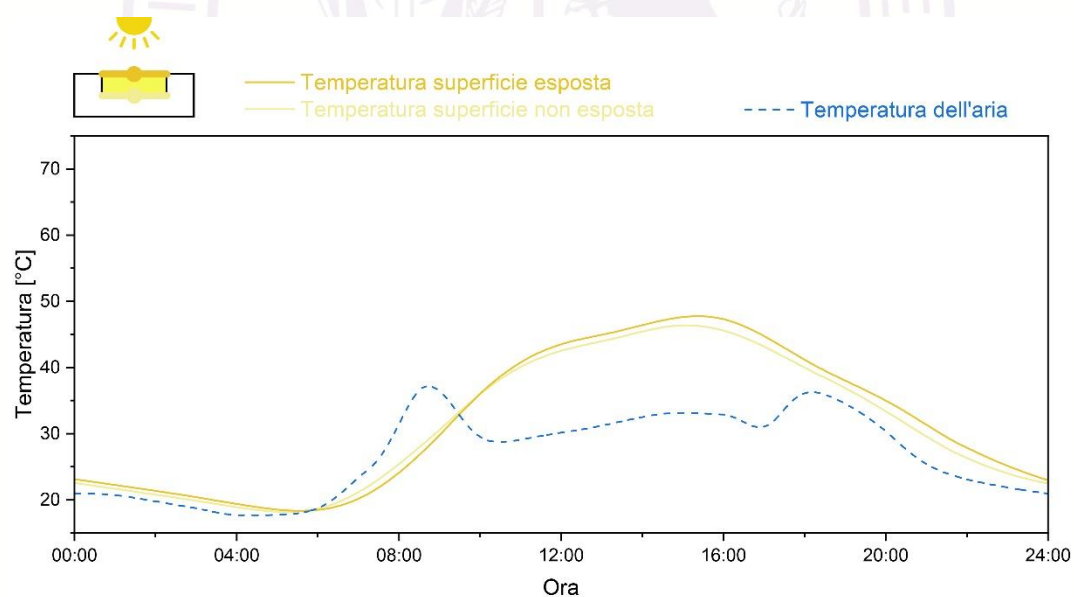


Figura 20 – Risultati della simulazione per la giornata media oraria estiva – Campione Naturale.

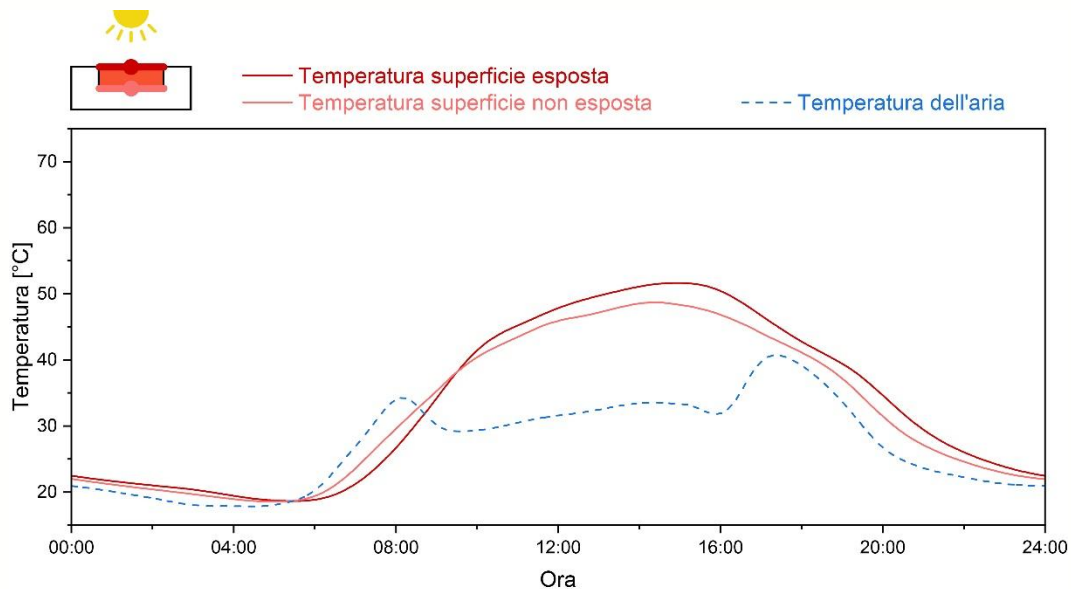


Figura 21 – Risultati della simulazione per la giornata media oraria estiva – Campione Rosso.

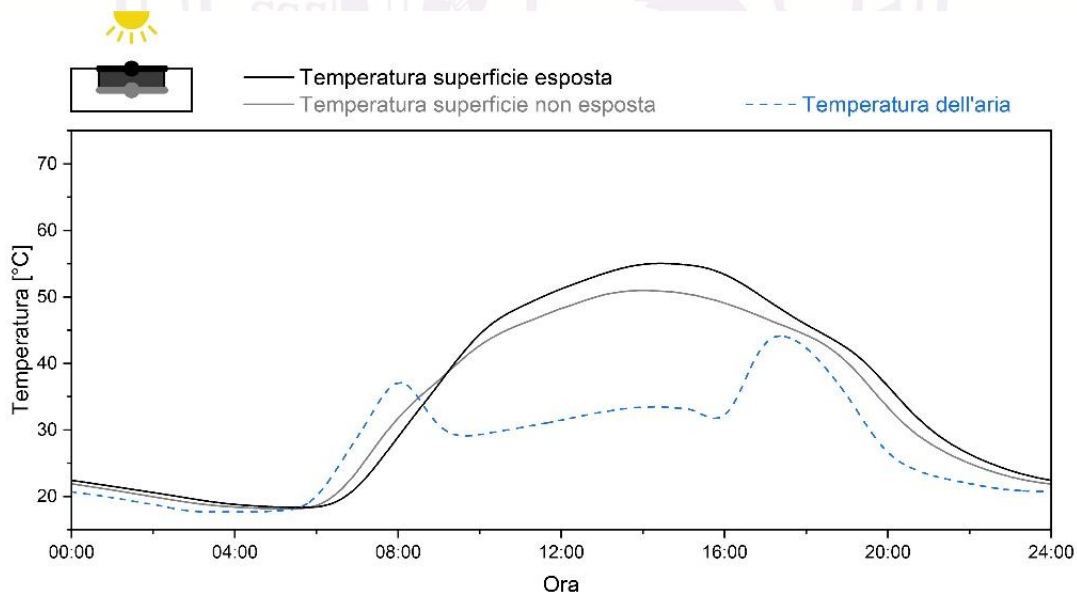


Figura 22 – Risultati della simulazione per la giornata media oraria estiva – Campione Nero.

Durante le ore più calde della giornata media estiva simulata sono state inoltre effettuate termografie per ogni campione, come mostrato in Figura 23. Le termografie mostrano temperature superficiali in accordo con i dati evidenziati dal monitoraggio delle temperature superficiali tramite sonde di temperatura.

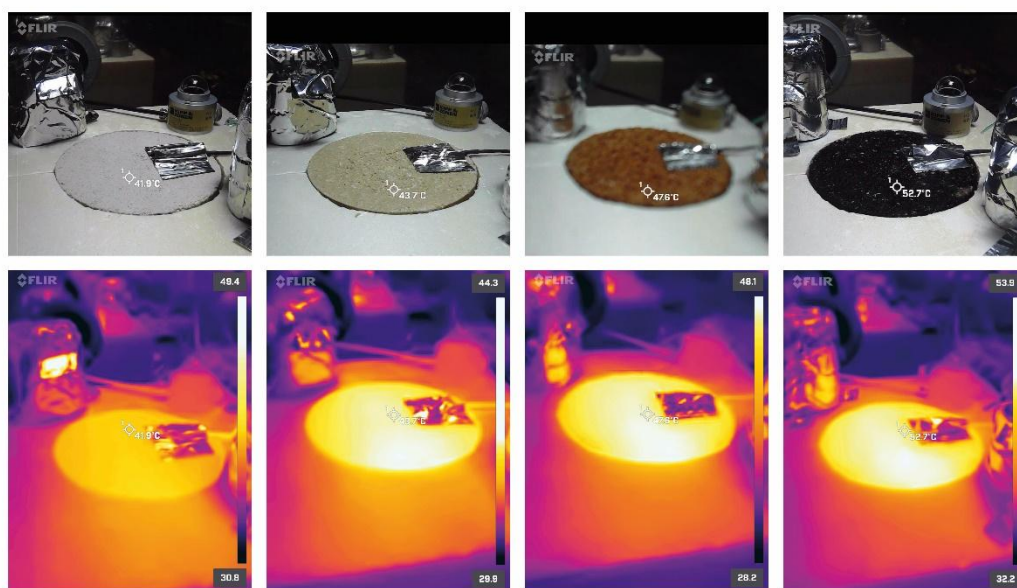


Figura 23 – Termografie acquisite durante la giornata media estiva simulata.

### 5.5.2 Risultati della simulazione per la giornata più calda

Le Figure 24-27 riportano l'andamento delle temperature superficiali dei diversi campioni durante la simulazione in camera climatica per la giornata massima estiva. Come nel caso della giornata media, i campioni Bianco e Naturale mostrano le temperature più contenute sulle superfici esposte, con massimi rispettivamente di 55°C e 59°C; sulle superfici non esposte le temperature si mantengono inferiori di circa 2°C. Nel caso del campione Rosso, la differenza tra superficie esposta e non esposta è di nuovo più marcata (fino a 4°C), con una temperatura massima della superficie esposta superiore a 67°C. Il campione Nero evidenzia invece le peggiori prestazioni in termini di surriscaldamento, raggiungendo valori massimi di 70°C per la superficie esposta e 65°C per quella non esposta. Anche in questo caso, l'andamento della temperatura dell'aria risente dei settaggi imposti dalla temperatura sole-aria con due picchi nella prima mattina e nel tardo pomeriggio.

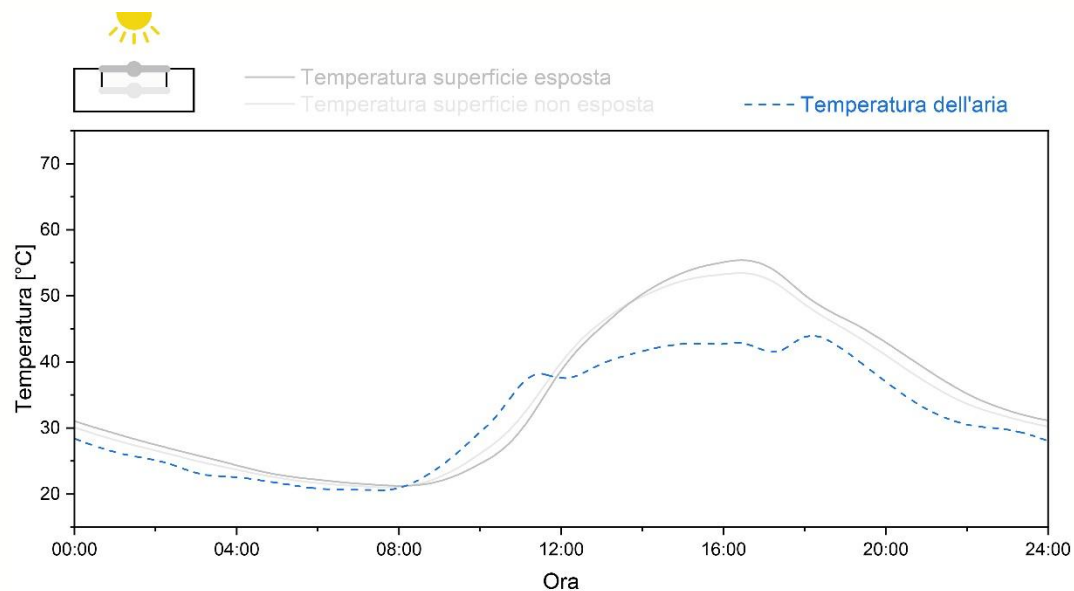


Figura 24 – Risultati della simulazione per la giornata più calda – Campione Bianco

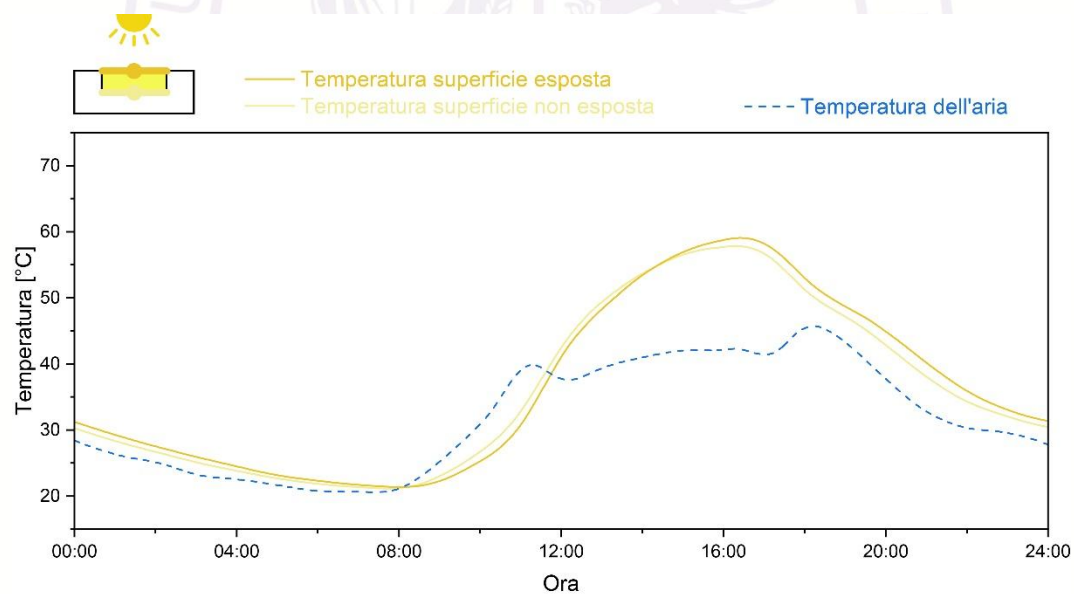


Figura 25 – Risultati della simulazione per la giornata più calda – Campione Naturale.

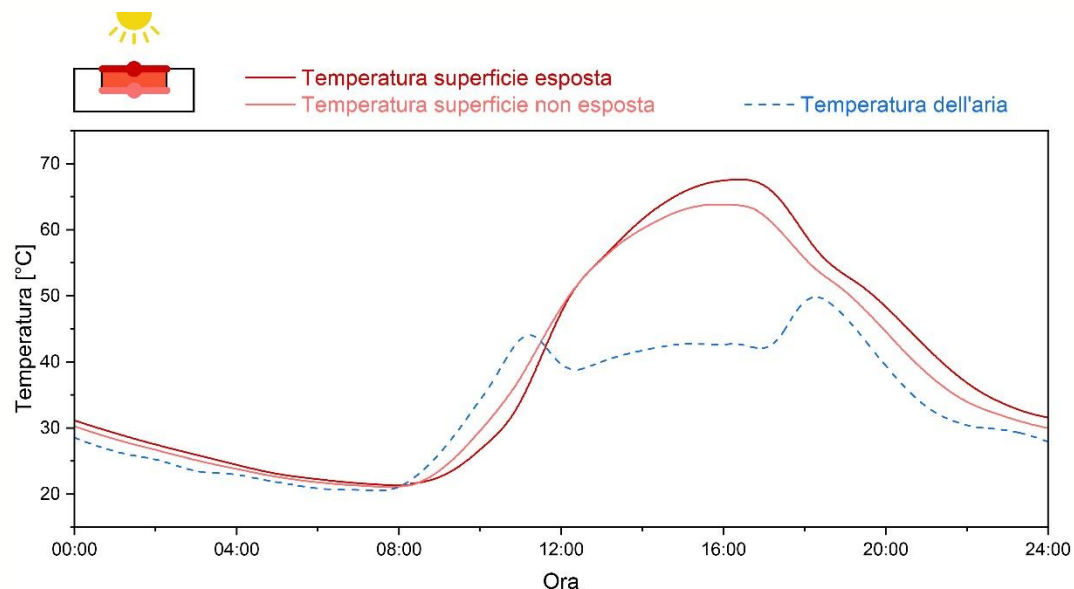


Figura 26 – Risultati della simulazione per la giornata più calda – Campione Rosso.

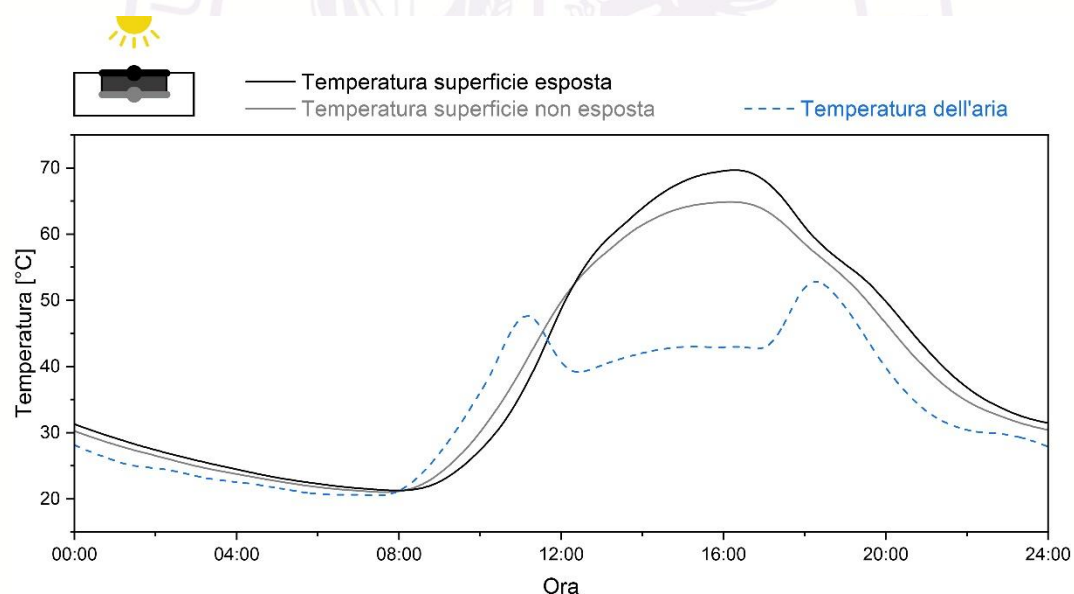


Figura 27 – Risultati della simulazione per la giornata più calda – Campione Nero.

Durante le ore più calde della giornata media estiva simulata sono state inoltre effettuate termografie per ogni campione, come mostrato in figura 28. Come nel caso precedente, le termografie mostrano temperature superficiali in accordo con i dati evidenziati dal monitoraggio delle temperature superficiali tramite sonde di temperatura.

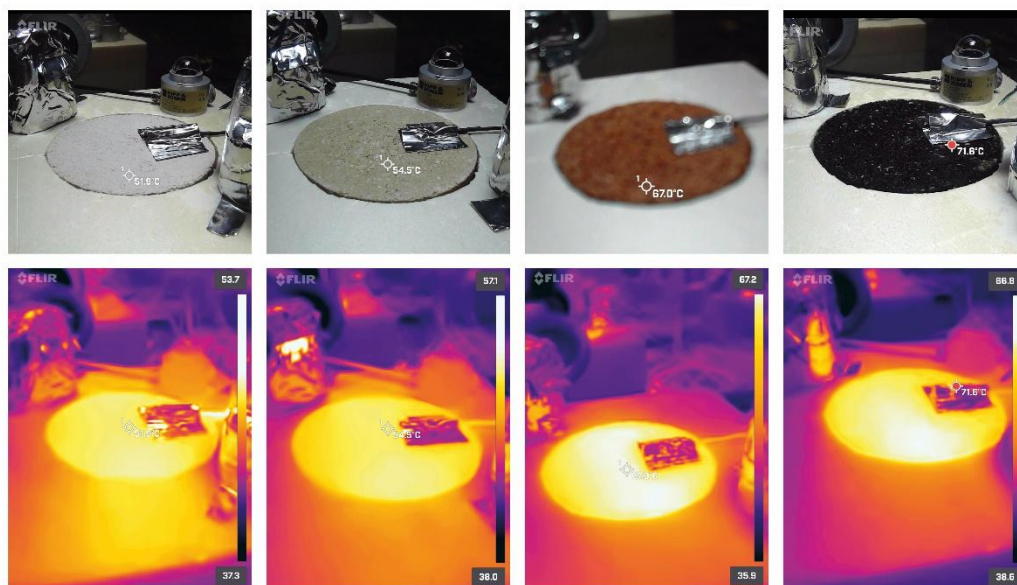


Figura 28 – Termografie acquisite durante la giornata massima estiva simulata.

### 5.5.3 Confronto tra campioni

Nelle Figure 29-30 vengono confrontate le prestazioni termiche dei campioni durante le simulazioni in camera climatica, in termini di differenza di temperature nelle superfici esposte direttamente alla radiazione solare. Dall'analisi delle giornate medie, il campione Nero presenta le temperature più elevate, con valori di 55,0 °C sulla superficie esposta. Rispetto a questi valori, il Bianco si mantiene più freddo di circa 11 °C. Il Rosso mostra temperature inferiori al Nero di circa 3°C, mentre il Naturale risulta più fresco di circa 7°C. Nelle giornate estive più calde, l'andamento si conferma analogo, con il Nero che raggiunge i valori più alti: 69,7 °C sulla superficie esposta alla radiazione solare. In questo caso, il campione Bianco risulta più freddo rispettivamente di circa 14 °C, il campione Naturale si mantiene su valori inferiori di circa 11 °C, mentre il campione Rosso, infine, si colloca solo leggermente al di sotto del Nero, con differenze di circa 2 °C. Complessivamente, i dati confermano che la tonalità cromatica influenza fortemente il surriscaldamento, con i campioni chiari che garantiscono riduzioni significative delle temperature superficiali rispetto a quelli scuri.

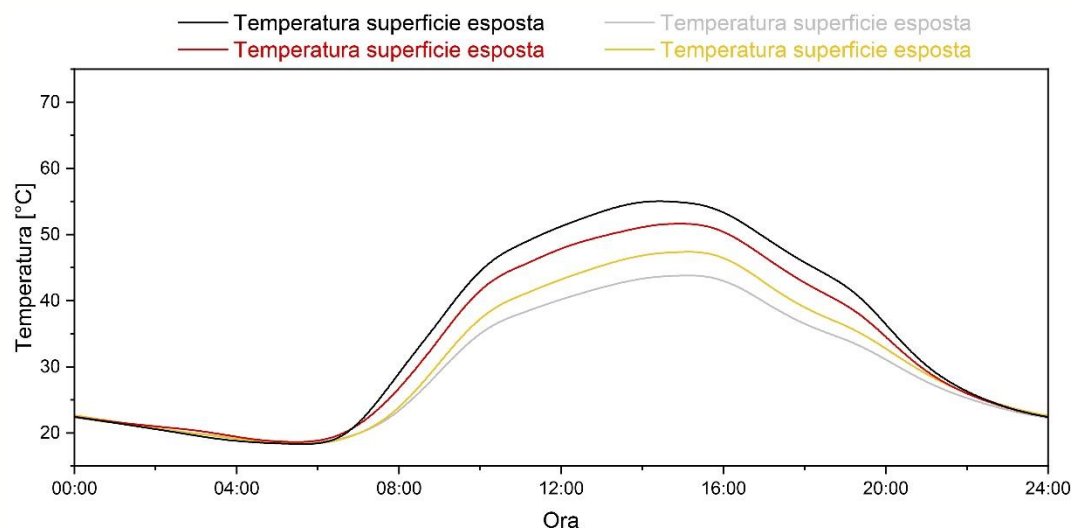


Figura 29 – Confronto tra campioni – Giornata media oraria estiva.

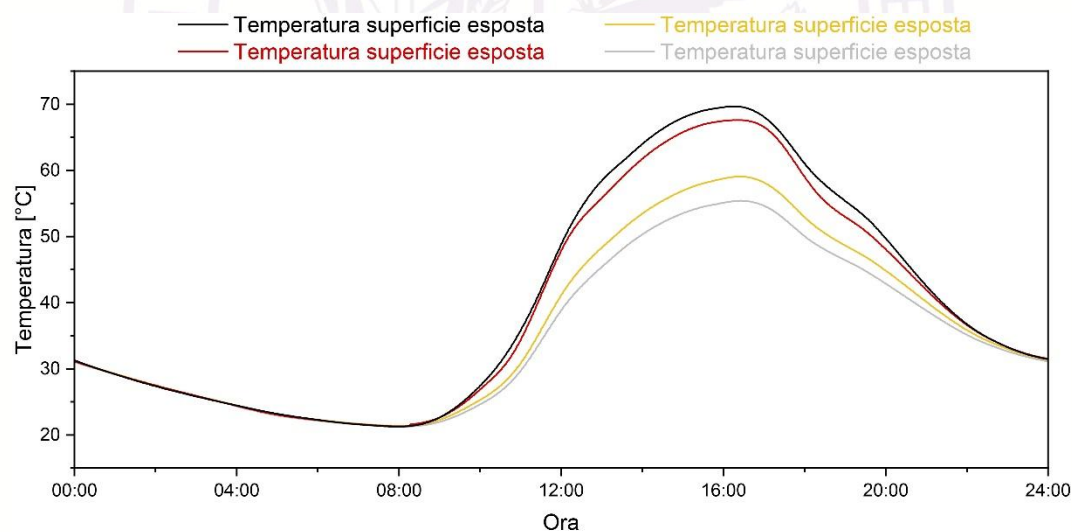


Figura 30 – Confronto tra campioni – Giornata più calda.

La Tabella 15 riporta i risultati relativi alla radiazione termica emessa dai quattro campioni analizzati. In entrambe le giornate simulate, si osserva che la radiazione totale emessa aumenta al crescere della tonalità scura del campione: il nero presenta i valori più elevati, seguito da rosso, naturale e infine bianco. Tale andamento è dovuto al maggiore surriscaldamento delle superfici più scure, poiché la radiazione termica emessa da un corpo è direttamente proporzionale alla sua temperatura superficiale.

Tabella 15 – Calcolo della radiazione emessa.

| Campione          | Giornata simulata | Radiazione totale emessa (W/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------|-------------------|----------------------------------------------|
| Campione Bianco   | media             | 536                                          |
|                   | massima           | 604                                          |
| Campione Naturale | media             | 556                                          |
|                   | massima           | 623                                          |
| Campione Rosso    | media             | 603                                          |
|                   | massima           | 714                                          |
| Campione Nero     | media             | 628                                          |
|                   | massima           | 733                                          |

## **6. Monitoraggio di temperatura superficiale, temperatura dell'aria ad altezza di prossimità e di albedo in sito**

### **6.1 Riferimenti normativi**

- ISO 9060:2018  
Energia solare — Specificazione e classificazione degli strumenti per la misurazione della radiazione solare emisferica e diretta
- ISO 9846:2025  
Energia solare — Calibrazione di un piranometro mediante pireliometro
- ISO 9847:2023  
Energia solare — Taratura dei piranometri mediante confronto con un piranometro di riferimento
- ISO/TR 9901:2021  
Energia solare — Piranometri — Consigli pratici per l'uso

### **6.2 Metodologia di misura**

Lo strumento utilizzato per questa tipologia di analisi è il radiometro con 4 componenti di Hukseflux Thermal Sensors NR01. Questo strumento è un sensore di radiazione netta a 4 componenti che fornisce misurazioni di radiazione solare globale, radiazione solare riflessa, discendente e ascendente a onde lunghe, utilizzando due sensori rivolti verso l'alto e due sensori rivolti verso il basso, rispettivamente in grado di rilevare la radiazione solare (onda corta) e termica (onda lunga). NR01 è quindi in

grado di misurare le 4 componenti separatamente: radiazione solare e radiazione a onde lunghe discendente e ascendente. Per farlo, utilizza piranometri, sensori di radiazione solare, e pirgeometri, sensori di radiazione a onde lunghe. Analizzando queste 4 componenti si ricava la radiazione netta mentre per il calcolo delle temperature del cielo e della superficie è necessario compensare il calore irradiato dai pirgeometri stessi (legge di Stefan-Boltzmann).

NR01 è quindi dotato anche di un sensore di temperatura PT100, di piranometro modello SR01 per monitorare l'irradianza solare, e di uno equivalente per monitorare la radiazione riflessa dalla pavimentazione oggetto di analisi, di due pirgeometri modello IR01 per l'analisi della radiazione a onde lunghe e un sistema di riscaldamento interno per prevenire la condensa soprattutto durante la notte.

L'irradianza solare misurata in  $W/m^2$  si calcola dividendo l'uscita dell'SR01, una piccola tensione, per la sensibilità indicata nell'SR01 sul suo certificato di calibrazione. L'equazione che regola la misura di radiazione solare è:

$$E = \frac{U}{S}$$

dove U è la tensione in uscita (V) e S è la sensibilità ( $V/(W/m^2)$ ).

L'irradianza a onde lunghe in  $W/m^2$  si calcola invece dividendo l'uscita U IR01, una piccola tensione, per la sensibilità S e tenendo conto del calore irradiato dal sensore stesso (legge di Stefan-Boltzmann). La sensibilità è indicata con IR01 sul suo certificato di calibrazione. L'equazione che governa la misurazione a onde lunghe con i pirgeometri è la seguente:

$$E = \frac{U}{S} + \sigma \cdot (T + 273.15)^4$$

Dalla radiazione solare ascendente e discendente, è possibile calcolare la radiazione solare netta e l'albedo o la riflettanza superficiale. Da tutte e 4 le componenti solari e a onde lunghe, è possibile ricavare la radiazione netta e la temperatura superficiale.

La Figura 31 mostra il NR01 radiometro netto a 4 componenti utilizzato per l'analisi della radiazione solare a onda corta.



Figura 31. NR01 radiometro netto 4 componenti (pirgeometri a sinistra e piranometri a destra dell'immagine)

Le equazioni considerate durante questo tipo di analisi sono le seguenti:

- Per i piranometri rivolti verso l'alto e verso il basso, radiazione solare globale  $E_g$  e riflessa  $E_r$ :

$$E_g \downarrow_h = \frac{U}{S}$$

$$E_r \uparrow = \frac{U}{S}$$

- Radiazione netta e albedo (nel calcolo della radiazione netta, la misurazione della temperatura dello strumento non è più inclusa):

$$E^* = E \downarrow - E \uparrow = E_g \downarrow_h - E_r \uparrow + E_l \downarrow - E_l \uparrow$$

$$Albedo = \frac{E_r \uparrow}{E_g \downarrow_h}$$

### 6.3 Procedura seguita

Per l'analisi del monitoraggio di temperatura superficiale, temperatura dell'aria ad altezza di prossimità (50 cm) e di albedo in sito è stato utilizzato il 4 componenti posizionandolo su una stesa di pavimentazione realizzata ad hoc come campo prova per la misurazione dalla ditta PAV.I. Srl in località Moano (06034, Foligno (PG)). In questo caso per la realizzazione del campo prove è stato utilizzato un aggregato leggermente diverso ma sempre chiaro di natura calcareaa simile al bianco Ancona (Figura 32).



Figura 32. a) Campo prova, b) zoom pavimentazione

La superficie è stata oggetto di monitoraggio per un periodo di tre giorni, dal 25 al 27 giugno 2025. A tal fine, il sensore 4 componenti è stato posizionato parallelamente alla pavimentazione, in un punto centrale ma sufficientemente distante da eventuali zone d'ombra generate dalla vegetazione circostante, al fine di evitare alterazioni nei dati rilevati. Inoltre, sono stati impiegati sensori TinyTag per la misurazione della temperatura superficiale della pavimentazione, nonché della temperatura dell'aria e del livello di umidità relativa (altezza 50 cm), per l'intera durata della campagna di monitoraggio. Installato il tutto come mostrato in Figura 33, il sensore è stato collegato al datalogger per registrare i parametri monitorati, con un intervallo di acquisizione pari a 30 secondi.



Figura 33. Campo prova in fase di monitoraggio

## 6.4 Descrizione delle strumentazioni usate

Il sensore NR01 è un radiometro netto 4 componenti costituito da 2 piranometri di tipo SR01 (utilizzati per l'analisi della radiazione solare in questo studio), 2 pirgeometri di tipo IR01, un riscaldatore, un gruppo di livellamento per gli assi x e y e un sensore di temperatura PT100. La Tabella 16 elenca i dettagli e le specifiche del sensore.

Tabella 16. Specifiche generali del sensore NR01

|                                                      |                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensori inclusi                                      | 2 piranometri di seconda classe ISO 9060<br>2 pirgeometri con angolo di campo visivo di 150°                                                                                                    |
| Range spettro solare                                 | Da 285 a 3000 x 10 <sup>-9</sup> m                                                                                                                                                              |
| Range spettro onde lunghe                            | Da 4.5 a 40 x 10 <sup>-6</sup> m                                                                                                                                                                |
| Livellamento                                         | Livella a bolla e gruppo di livellamento per gli assi x e y inclusi                                                                                                                             |
| Potenza del sensore richiesta                        | Zero (passive sensor)                                                                                                                                                                           |
| Sensore di temperatura                               | Pt100                                                                                                                                                                                           |
| Riscaldatore sul pirgeometro                         | 12 VDC, 1.5 W                                                                                                                                                                                   |
| Intervallo di temperatura di esercizio nominale      | Da -40 a +80 °C                                                                                                                                                                                 |
| Intervallo di umidità relativa di esercizio nominale | Da 0 a 100%                                                                                                                                                                                     |
| Lettura richiesta                                    | 4 canali di tensione differenziale o 4 canali di tensione a terminazione singola, resistenza di ingresso > 10 <sup>6</sup> Ω<br>1 canale di temperatura per Pt100                               |
| Norme che regolano l'uso dello strumento             | ISO/TR 9901:1990<br>Solar energy - Field pyranometers - Recommended practice for use<br><br>ASTM G183 - 05<br>Standard Practice for Field Use of Pyranometers, Pyrhemometers and UV Radiometers |
| SPECIFICHE AGGIUNTIVE DEL PIRANOMETRO SR01           |                                                                                                                                                                                                 |
| Misurazione                                          | Radiazione solare globale e riflessa<br>Irradianza W/m <sup>2</sup>                                                                                                                             |
| Angolo di campo visivo                               | 180°                                                                                                                                                                                            |
| Campo di misura                                      | Da 0 a 2000 W/m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                    |
| Range di sensibilità                                 | Da 7 a 30 x 10 <sup>-6</sup> V/(W/m <sup>2</sup> )                                                                                                                                              |
| Sensibilità (nominale)                               | 15 x 10 <sup>-6</sup> V/(W/m <sup>2</sup> )                                                                                                                                                     |
| Tensione di uscita prevista                          | Applicazione con radiazione solare naturale: da -0.1 a +50 x 10 <sup>-3</sup> V                                                                                                                 |
| Funzione di misura/programmazione richiesta          | E=U/S                                                                                                                                                                                           |
| Intervallo di resistenza del sensore                 | Da 40 a 60 Ω                                                                                                                                                                                    |
| Potenza del sensore richiesta                        | Zero (sensore passivo)                                                                                                                                                                          |
| Intervallo spettrale (20% dei punti di trasmissione) | Da 285 a 3000 x 10 <sup>-9</sup> m                                                                                                                                                              |

## 6.5 Risultati

In questa sezione vengono riportati i risultati relativi al monitoraggio in sito della pavimentazione Evizero analizzata per tre giorni. Nel dettaglio, è stata monitorata la radiazione solare “in entrata” (in) e “in uscita” (out) a onde corte (shortwave) e a onde lunghe (longwave) in  $W/m^2$ , insieme alla radiazione a onde corte e lunghe netta, data dalla differenza tra quella in entrata e quella in uscita. Inoltre, è stata analizzata anche la temperatura ( $^{\circ}C$ ) e l'albedo, e la temperatura dell'aria, l'umidità e la temperatura superficiale con sensori TinyTag.

La Figura 34 mostra l'andamento della temperatura monitorata durante l'intera campagna sperimentale. Dalla temperatura registrata è possibile notare che il test è stato effettuato in giornate rappresentativamente calde, in cui nelle ore centrali è stata raggiunta una temperatura di circa  $40^{\circ}C$ , per poi abbassarsi nelle ore notturne a circa  $20^{\circ}C$ .

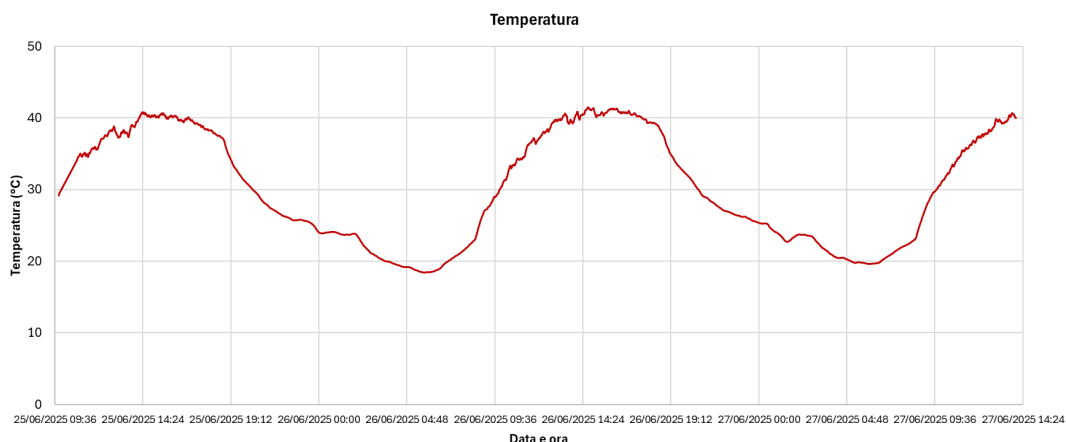


Figura 34. Temperatura dell'aria monitorata

La Figura 35 mostra invece un tipico andamento giornaliero della radiazione solare durante la campagna di monitoraggio. La componente in entrata evidenziata in giallo (SWIN) raggiunge il massimo intorno alle ore 13 delle giornate monitorate raggiungendo picchi di circa  $940 W/m^2$  alle 13:34 del 25 giugno e alle 13:33 il 26 giugno, mentre la giornata del 27 giugno ha riportato valori di radiazione solare leggermente più bassi. La radiazione solare in uscita (SWOUT) è la componente riflessa dalla superficie oggetto di analisi ed è poco inferiore a circa  $300 W/m^2$  nelle ore più calde. La radiazione solare netta (SWNETTA) è data dalla differenza di

IN e OUT e ha valori intorno ai  $650 \text{ W/m}^2$  nelle ore centrali della giornata, valore assimilabile a giornate soleggiate senza nuvole.

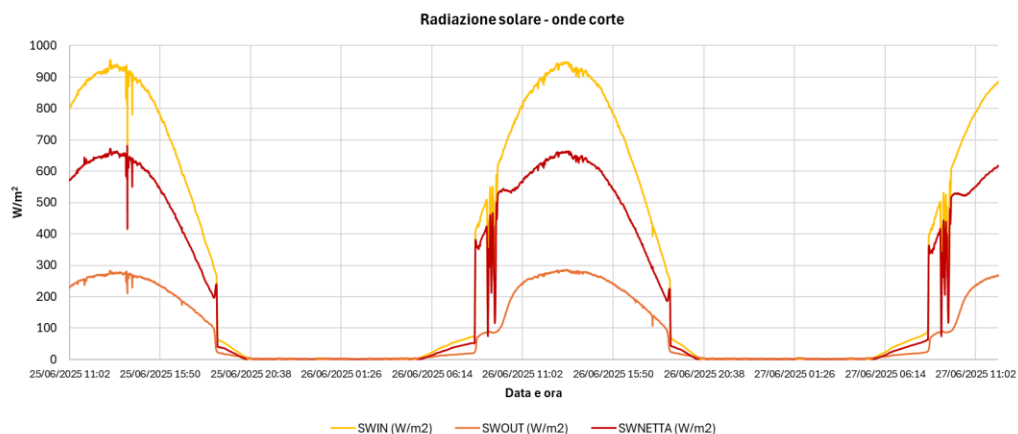


Figura 35. Radiazione solare onde corte

La Figura 36 mostra invece l'andamento giornaliero della radiazione a onde lunghe riemessa dalla pavimentazione. La radiazione emessa dalla superficie nelle ore centrali delle giornate monitorate arriva fino a valori massimi intorno ai  $78 \text{ W/m}^2$ .

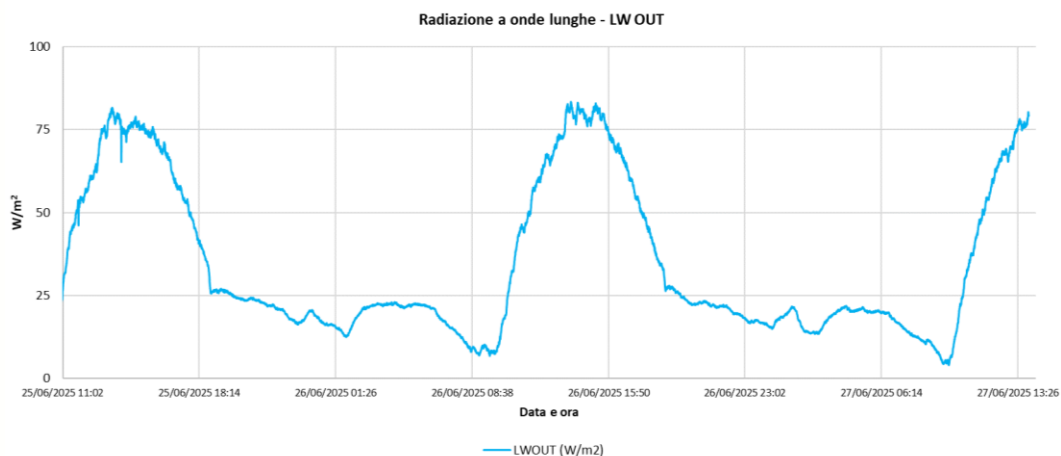


Figura36. Radiazione a onde lunghe riemessa dalla pavimentazione.

Oltre a questo, è stato calcolato anche l'albedo delle giornate monitorare nelle ore centrali della giornata, come riportato in Tabella 17.

Tabella 17. Albedo

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Media Albedo 25/06/2025, orario 12:00 – 14:00 | 0.29 |
| Media Albedo 26/06/2025, orario 12:00 – 14:00 | 0.30 |
| Media Albedo 27/06/2025, orario 12:00 – 14:00 | 0.30 |

I sensori TinyTag hanno registrato la temperatura superficiale, la temperatura dell'aria e l'umidità relativa; i risultati sono riportati in Figura 37. La temperatura dell'aria rilevata risulta simile a quella registrata dai sensori a 4 componenti, sebbene leggermente più alta, probabilmente a causa del diverso posizionamento dei sensori: le TinyTag erano infatti collocate a livello della pavimentazione. Durante le ore centrali più calde, la temperatura dell'aria ha raggiunto picchi di circa 45 °C, con un'umidità relativa compresa tra 30% e 75%. La temperatura superficiale, invece, ha superato quella dell'aria, raggiungendo punte prossime a 55 °C nelle ore più calde della giornata.

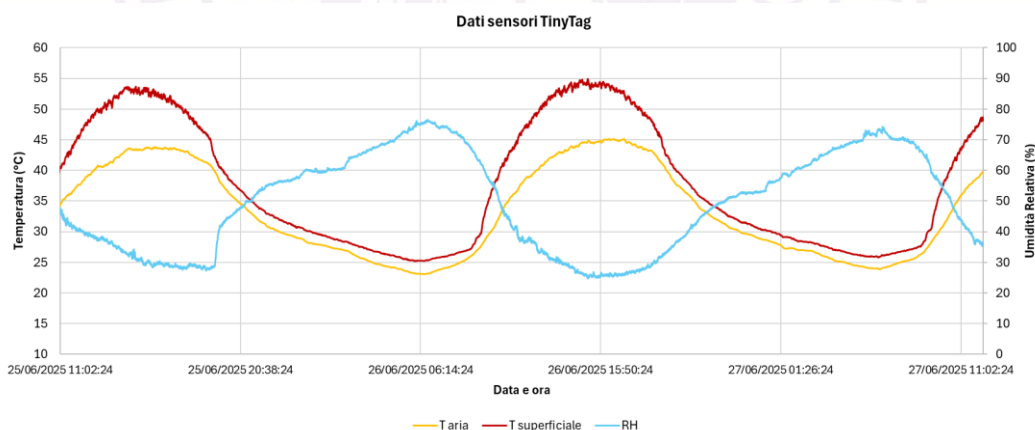


Figura 37. Dati registrati con sensori TinyTag

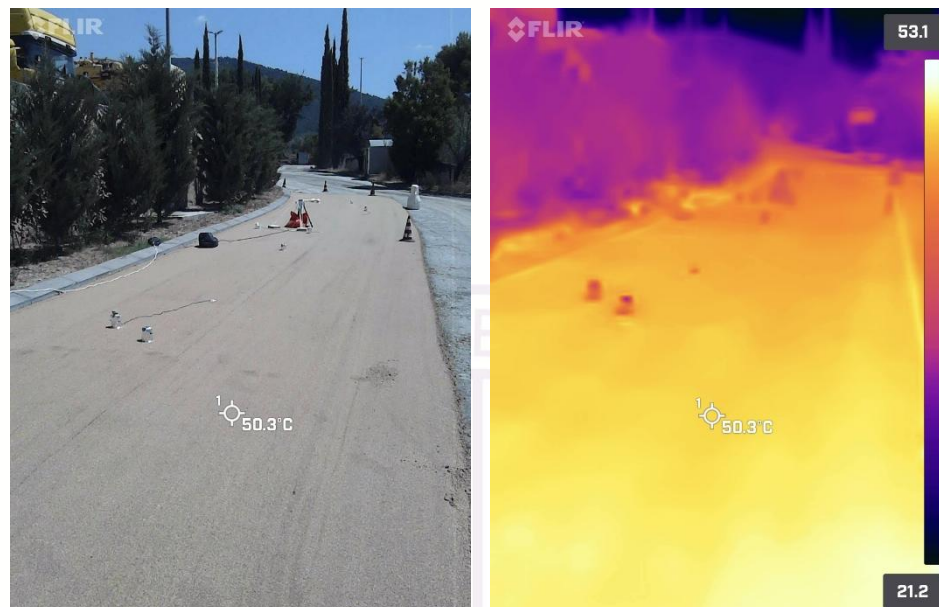


Figura 38. Campo di prova e relativa termografia

## 7. Conclusioni

Questo lavoro di ricerca applicata ha riguardato l'analisi termo-ottica di quattro diverse tipologie di pavimentazioni ad elevato raffrescamento passivo prodotte da POLYMERTEAM SRL, nell'ottica della mitigazione dell'isola urbana di calore. Il CIRIAF – Università degli Studi di Perugia è stato incaricato dell'esecuzione dei test necessari alla caratterizzazione dei provini forniti, rispettivamente prodotti con:

- Aggregati bianco ancona + legante Evizero + 1% di pigmento (BIANCO)
- Aggregati bianco ancora + legante Evizero (NATURALE)
- Aggregati rosso verona + legante Evizero (ROSSO)
- Aggregati bianco ancona + bitume (NERO).

In termini di proprietà combinate di riflettanza solare ed emissività termica, il campione bianco presenta un SRI compreso tra 71 e 73, mentre il campione naturale varia tra 57 e 60, a seconda del coefficiente  $h_c$ ; entrambi rispettano quindi i requisiti previsti dal D.M. 05/08/2024 per pavimentazioni esterne. Anche il campione rosso, a partire da 30 giorni di invecchiamento, raggiunge un SRI compreso tra 31 e 35, risultando anch'esso conforme ai medesimi standard. Il campione nero, invece, non raggiunge mai valori di SRI adeguati a questo tipo di applicazione.

Coerentemente, la temperatura superficiale teorica del campione nero rimane sempre la più elevata, arrivando fino a 100 °C, mentre quella del campione bianco è costantemente la più bassa rispetto agli altri campioni.

In termini di proprietà termiche, il campione con la conducibilità più bassa è il rosso, seguito dal nero, dal naturale e dal bianco, mentre la diffusività termica più ridotta è anch'essa associata al campione rosso. Il calore specifico volumetrico maggiore si osserva nel campione naturale, seguito dal bianco. Durante il processo di invecchiamento, questi valori rimangono sostanzialmente stabili entro l'intervallo di errore sperimentale.

Per l'impiego in pavimentazioni urbane, materiali con bassa conducibilità e diffusività termica e alto calore specifico volumetrico tendono a limitare il surriscaldamento delle superfici e dell'ambiente circostante. Tuttavia, è importante considerare anche altre caratteristiche, come la porosità, che può ridurre la capacità termica ma favorire l'evapotraspirazione in presenza di acqua, contribuendo anch'essa al raffrescamento. In questo contesto, sebbene il campione

rosso mostri i valori più bassi di conducibilità e diffusività, i campioni naturale e bianco offrono un bilanciamento tra capacità termica elevata e colorazione chiara, risultando generalmente più adatti in aree soggette al fenomeno dell'isola di calore urbana.

Tutti i risultati di caratterizzazione delle proprietà intrinseche dei materiali sono stati successivamente confermati dai monitoraggi termici in camera climatica. Durante la simulazione di una giornata estiva media (zone climatiche B-E), il campione bianco mantiene temperature fino a 11 °C inferiori rispetto al nero, il naturale fino a 8 °C e il rosso fino a 3 °C. In condizioni estreme, le differenze si amplificano: il bianco rimane più freddo di circa 14 °C, il naturale di circa 11 °C e il rosso di circa 2 °C, a conferma delle migliori prestazioni termiche delle superfici chiare rispetto a quelle scure.

Infine, dal monitoraggio ambientale in sito, è stato calcolato l'albedo di una stesa realizzata con aggregati simili a quelli del campione Bianco Ancona, dopo circa 3 giorni di monitoraggio. Le misurazioni sono state effettuate durante giornate di giugno 2025 particolarmente soleggiate e calde, con temperature dell'aria che hanno raggiunto circa 40 °C nelle ore centrali. La temperatura superficiale della pavimentazione ha raggiunto punte di circa 55 °C nelle ore più calde, scendendo fino a circa 25 °C nelle ore notturne. Dall'analisi dei dati, l'albedo calcolato nella fascia oraria 12:00–14:00 risulta pari a circa 0.3. Si sottolinea che le misurazioni sono state eseguite quando non erano ancora trascorsi 30 giorni dalla stesura della pavimentazione, quindi in condizioni in cui la superficie non aveva ancora subito un processo significativo di invecchiamento naturale. Considerando i risultati ottenuti in laboratorio, è ragionevole attendersi un incremento delle prestazioni ottiche e di raffrescamento in campo dopo l'esposizione prolungata agli agenti atmosferici e il conseguente naturale invecchiamento della pavimentazione.