

Ricerca di Sistema elettrico



Stato dell'arte e analisi preliminari di materiali e componenti per sistemi di involucro edilizio dinamici e ad alte prestazioni (LA1.8)

Michele Zinzi, Lisa Volpe, Carlo Romeo, Anna Castaldo,
Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello, Stefano Agnoli

STATO DELL'ARTE E ANALISI PRELIMINARI DI MATERIALI E COMPONENTI PER SISTEMI DI INVOLUCRO EDILIZIO DINAMICI E AD ALTE PRESTAZIONI (LA1.8)

Michele Zinzi (ENEA TERIN-SEN), Lisa Volpe (ENEA DUEE-SPS-ESU), Carlo Romeo (ENEA DUEE-SPS-ESU), Anna Castaldo (ENEA TERIN-STSN-SCIS), Emilia Gambale (ENEA TERIN-STSN-SCIS), Giuseppe Vitiello (ENEA TERIN-STSN-SCIS), Stefano Agnoli (ENEA ISER-UTFRA)

Settembre 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica

Linea di attività: L1.8

Responsabile del Progetto: Giovanni, Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Domenico, Iatauro, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: Gennaio 2022

Mese inizio effettivo: Gennaio 2022

Mese fine previsto: Giugno 2023

Mese fine effettivo: Giugno 2023

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	5
4	PRODOTTI SVILUPPATI	6
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	7
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	8
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	21
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	22
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	23

1 Risultati attesi

Il presente report è l'output principale della Linea di Attività 1.8. L'elenco puntato a seguire riporta gli obiettivi specifici dell'attività nel periodo. Il rapporto consta altresì di un allegato con una descrizione maggiormente dettagliata dell'attività condotta

- 1.1 Descrizione delle tecnologie di involucro individuate
- 1.2 Identificazione delle principali caratteristiche e *performance indicator* delle soluzioni individuate
- 1.3 Approvvigionamento e sviluppo di una serie di campioni
- 1.4 Misura sperimentale in laboratorio e in campo delle proprietà e prestazioni delle tecnologie studiate

2 Risultati ottenuti

Di seguito si elencano i risultati ottenuti. Le attività, escluse quelle dello studio di letteratura, fanno riferimento a tre tecnologie: rivestimenti termocromici, pellicole da intercapedine per vetrate multiple, daytime radiative coolers. Per i vetri trasparenti dinamici, sono state individuate alcune soluzioni promettenti e stabiliti i contatti per l'approvvigionamento di campioni e sistemi da testare e valutare in ENEA, queste azioni saranno parte integrante della Linea di Attività L1.9.

- 2.1 Descrizione delle tecnologie di involucro individuate Le tecnologie sono state individuate e selezionate, per le quattro categorie di prodotto è stato condotto uno stato dell'arte secondo quanto disponibile in letteratura
- 2.2 Identificazione delle principali caratteristiche e *performance indicator* delle soluzioni individuate. Per le diverse tecnologie studiate, sono stati individuati i seguenti parametri di riferimento e confronto:
 - 2.2.1 Materiali termocromici: riflettanza e assorbimento solare nello stato chiaro (decolorato) e colorato; confronto tra tali valori e quello di un materiale statico convenzionale del medesimo colore; differenza di temperatura superficiale tra materiale termocromico e materiale statico esposti in ambiente esterno.
 - 2.2.2 Pellicole mobili per intercapedini di vetrate multiple: trasmissione e riflessione solare/luminosa ed emissività della pellicola; fattore solare e trasmittanza termica di vetrate multiple di riferimento con e senza pellicola
 - 2.2.3 Daytime radiative coolers: riflettanza solare; emissività all'infrarosso in tutto lo spettro e nella finestra atmosferica; temperatura superficiale assoluta e differenza di temperatura tra superficie del materiale e l'aria esterna in condizioni reali con irraggiamento solare.
 - 2.2.4 Materiali trasparenti dinamici: Riflettanza e trasmittanza luminosa/solare della lastra (o in combinazione in sistemi di vetrate multiple) per diversi livelli di colorazione; fattore solare del sistema assemblato per diversi livelli di colorazione
- 2.3 Approvvigionamento e sviluppo di una serie di campioni. Sono stati sviluppati i primi campioni di daytime radiative coolers; sono state acquisite pellicole da intercapedine con diverse caratteristiche ottiche e radiative; è stato acquisito set di materiali termocromici del tipo leuco dyes
- 2.4 Misura sperimentale in laboratorio e in campo delle proprietà e prestazioni delle tecnologie studiate. Sono state eseguite le seguenti misure e calcoli susseguenti:
 - 2.4.1 Materiali termocromici: misura della riflettanza spettrale di alcuni campioni in diverse condizioni di esercizio; calcolo della riflettanza luminosa e solare; misura dell'emissività a banda larga; calcolo del SRI (Solar Reflectance Index), misura della temperatura superficiale in reali condizioni di utilizzo.
 - 2.4.2 Pellicole mobili per intercapedini di vetrate multiple: misura della riflettanza e trasmittanza spettrale di alcuni campioni; calcolo della riflettanza/trasmittanza luminosa e solare; misura dell'emissività a banda larga; calcolo del fattore solare e trasmittanza termica di vetrate multiple di riferimento equipaggiate o no con tali pellicole in intercapedine.
 - 2.4.3 Daytime radiative coolers: misura della temperatura superficiale in reali condizioni di utilizzo; modellazione della emissività spettrale di alcuni campioni sviluppati.

3 Prodotti attesi

Il presente report è il prodotto atteso.

Non erano previsti prodotti software/hardware.

4 Prodotti sviluppati

È stato predisposto il presente report.

Non erano previsti prodotti software/hardware.

Sono stati sviluppati 4 campioni preliminari di daytime radiative coolers

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Dal punto di vista tecnico non si sono verificati scostamenti significativi rispetto quanto previsto da capitolato. Non sono stati condotti test su materiali trasparenti dinamici ma: i) non era stato esplicitamente dichiarato che si sarebbero trattate in laboratorio tutte le diverse tecnologie; ii) è comunque prevista anche nel secondo periodo del triennio la fase di caratterizzazione dei materiali, così da completare il quadro per tutte le tecnologie selezionate.

Dal punto di vista economico, non è stato completato alcun acquisto essendo le risorse finanziarie rese disponibili in tempi che non hanno consentito di completare l'acquisto delle attrezzature previste nel periodo di riferimento. L'approvvigionamento di quanto previsto avverrà nel secondo periodo del triennio. I mancati acquisti non hanno comunque alterato il previsto sviluppo delle attività tecnico-scientifiche.

6 Sintesi delle attività svolte

Nella presente linea di attività è stata inizialmente condotta una review di studi scientifici e delle quattro tecnologie avanzate di involucro individuate, così da fornire un quadro di riferimento e le possibili linee di sviluppo. Sono stati eseguiti test in laboratorio e in campo su una serie di materiali termocromici, le cui proprietà sono così confrontabili con quelle di materiali standard di medesimo colore. Sono stati condotte analisi di laboratorio su pellicole mobili da intercapedine per vetrate multiple innovative e, a partire dalle misure, sono stati calcolate le proprietà di vetrate trasparenti con e senza pellicola, così da determinarne il potenziale impatto sulle performance solari e di isolamento termico. Sono stati testati in ambiente reale i primi prototipi di daytime radiative coolers, così da poterne sviluppare e caratterizzare la versione definitiva. Sono stati individuati i materiali trasparenti dinamici per test e simulazioni da condurre nel prossimo periodo.

7 Dettaglio delle attività svolte

Durante la fase iniziale è stato condotto uno studio sullo stato dell'arte sulle tecnologie oggetto della Linea di Attività. L'analisi ha riguardato oltre 100 pubblicazioni, tra articoli scientifici e norme tecniche, e l'elenco completo è consultabile nella bibliografia della versione estesa del report, al quale si rimanda per ulteriori dettagli. Sono lì discussi: limiti e potenzialità delle tecnologie, stato di sviluppo, parametri prestazionali di riferimento.

7.1 Pellicole per applicazioni in intercapedine di vetrate multiple

Pellicole mobili poste nell'intercapedine di una vetrata consente di variare dinamicamente la capacità di controllo solare e l'isolamento termico delle facciate trasparenti, grazie anche a specifici coating applicati. Le pellicole selezionate sono in poliestere e sono descritte in Tabella 1. Tutti i campioni eccetto 11 e 12 sono opachi; i campioni 11 e 14 hanno una componente trasparente. I campioni con faccia 2 metallizzata sono quelli con trattamento basso emissivo. La selezione e l'approvvigionamento dei campioni è avvenuto in collaborazione con Pellini spa, industria di riferimento internazionale nel campo delle facciate innovative.

Tabella 1 Parametri prestazionali di pellicole per applicazioni in intercapedine di vetrate multiple

Codice	Spessore (mm)	Faccia 1	Faccia 2	Trasparente
1	25	Nera	Metallizzata	NO
2	25	Nera	Non metallizzata	NO
5	23	Nera	Metallizzata	NO
7	23	Bianca	Metallizzata	NO
9	-	Metallizzata	Metallizzata	NO
11	-	Bianca	Bianca	SI
14	-	Grigio chiaro	Grigio chiaro	SI

7.1.1 Misure ed elaborazioni delle proprietà ottiche e radiative di pellicole innovative

Per la caratterizzazione ottica delle pellicole selezionate è stato utilizzato uno spettrofotometro commerciale a doppio raggio (Perkin Elmer Lambda 950) con sfera integratrice avente diametro di 15 centimetri e rivestita in Spectralon. Lo spettro di scansione è 300-2500 nm e la risoluzione spettrale scelta è di 5 nm. I dati integrati sono ottenuti secondo le procedure di calcolo definite nella norma UNI EN 410:2011, i risultati sono riportati in Tabella 2. I risultati a banda larga delle misure sono presentati in Tabella 2. In particolare, le misure riportano i valori di trasmittanza (t), riflettanza (r) frontale (f) e posteriore (b) per gli spetti visibile (v) e solare (e); in aggiunta sono riportati i valori di emissività (e) frontale e posteriore.

Tabella 2 Proprietà ottiche e radiative a banda larga dei campioni selezionati

Codice	t_e [%]	t_v [%]	r_e_f [%]	r_e_b [%]	r_v_f [%]	r_v_b [%]	e_f [%]	e_b [%]
1	0	0	7	87	7	87	0.77	0.11
2	0	0	7	7	7	7	0.80	0.80
5	0	0	7	92	7	92	0.77	0.11
7	0	0	84	88	84	88	0.60	0.10
9	0	0	85	89	86	89	0.07	0.07
11	24	18	72	73	77	78	0.61	0.61
12	0	0	72	90	71	89	0.57	0.11
14	75	73	20	20	22	21	0.78	0.78

A titolo esemplificativo, Figura 1 riporta i grafici della riflettanza spettrale dei campioni 1 e 2. Il valore molto alto della faccia posteriore metallizzata del campione 1 contrasta con i valori molto bassi delle altre tre facce, di fatto, sovrapposte e determinate dal colore nero (nel visibile) e dalla natura del materiale (su tutto lo spettro). Tali caratteristiche conferiscono al materiale il comportamento assorbente, essendo la trasmittanza è praticamente nulla su tutto lo spettro.

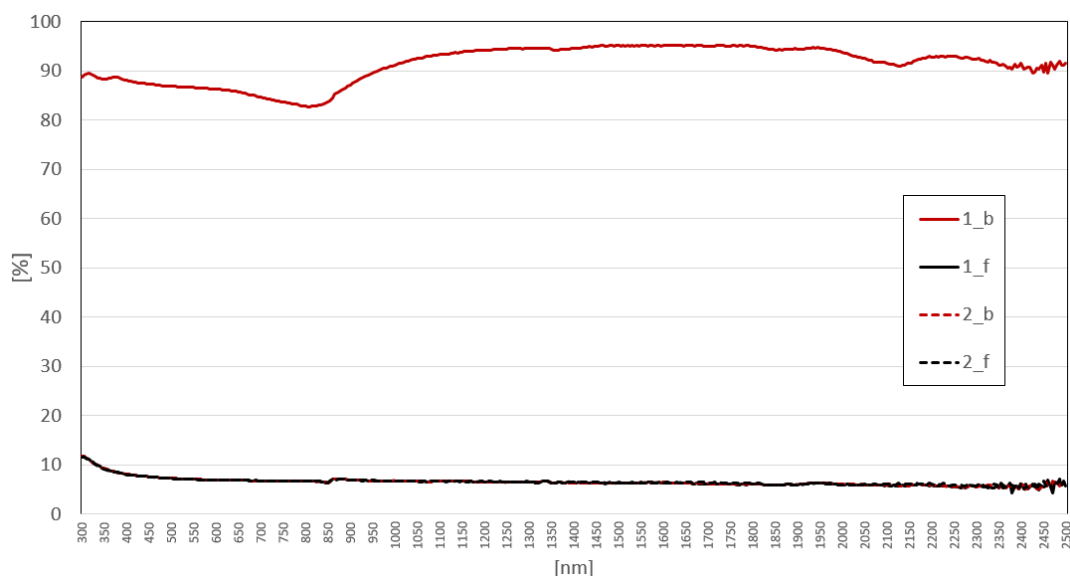


Figura 1 Riflettanza spettrale frontale e posteriore dei campioni 1 e 2.

7.1.2 Calcoli su dispositivi schermanti integrati in vetrate multiple

Per valutare le caratteristiche luminose, solari termiche ed energetiche delle pellicole schermanti inserite in sistemi trasparenti costituiti da multiple è stato utilizzato il tool Win-SHELTER ver 4.0, sviluppato in conformità con le norme di riferimento UNI EN ISO 52022-3:2018 e ISO 15099:2003.

Sono state individuate tre configurazioni di vetrocamera costituite da elementi trasparenti largamente diffusi per le loro caratteristiche di controllo solare e di isolamento termico (Tabella 3); si è quindi descritto il sistema che costituisce la vetrata multipla attraverso i parametri caratteristici di trasmissione, riflessione luminosa e solare delle superfici.

I dati a banda larga, ottenuti da calcoli, sono riportati in Tabella 4.

Tabella 3 Descrizione delle configurazioni Base

Stratigrafia	spessore [mm]	Visibile			Solare			Emissività	
		τ_v [%]	$\rho_{v,b}$ [%]	$\rho_{v,f}$ [%]	τ_e [%]	$\rho_{e,b}$ [%]	$\rho_{e,f}$ [%]	ε_b	ε_f
Configurazione Base 1									
Vetro float chiaro	6	90	8	8	85	8	8	0.89	0.89
Intercapedine aria 100 %	20								
Vetro float chiaro	6	90	8	8	85	8	8	0.89	0.89
Configurazione Base 2									
Vetro float chiaro	6	90	8	8	85	8	8	0.89	0.89
Intercapedine aria 100 %	20								
Vetro bassoemissivo (faccia 3)	4	90	44	5	65	25	22	0.03	0.89
Configurazione Base 3									
Vetro selettivo (faccia 2)	4	79	9	8	40	36	44	0.89	0.01
Intercapedine aria 100 %	20								
Vetro float chiaro	6	90	8	8	85	8	8	0.89	0.89

Tabella 4 Risultati di calcolo delle Configurazioni Base

Stratigrafia	spessore [mm]	Visibile			Solare			U [W/m ² K]
		τ_v [%]	$\rho_{v,b}$ [%]	$\rho_{v,f}$ [%]	τ_e [%]	ρ_e [%]	g [%]	
Configurazione Base 1	6 - 20 - 6	81.5	14.8	14.8	72.5	13.2	76.4	2.4
Configurazione Base 2	6 - 20 - 4	81.7	11.5	11.6	56.3	25.7	63.9	1.3
Configurazione Base 3	4 - 20 - 6	71.8	14.0	14.9	35.2	37.4	39.3	1.2

Sono state quindi inserite le pellicole utilizzando le seguenti procedure: i) La pellicola è assimilata ad un vetro e sono utilizzati i dati a banda larga, ii) la pellicola è assimilata ad uno schermo e sono utilizzati i dati a banda larga, iii) la pellicola è assimilata ad un vetro utilizzando i dati spettrali, iv) la pellicola è assimilata ad uno schermo utilizzando i dati spettrali. I risultati ottenuti per le vari configurazioni sono riportati in Tabella 5, Tabella 6, Tabella 7 e Tabella 8.

La differenza fondamentale tra la modellazione della pellicola come vetro addizionale interno o come schermo consiste nella completa separazione delle due camere nel primo caso, mentre nel secondo rimane un accoppiamento tra le due; ciò spiega la differenza, a volte molto elevata, tra i valori di trasmittanza termica.

Tabella 5 Risultati dei calcoli integrati con applicazione delle pellicole inserite come tipologia vetri

		Spessore [mm]	τ_v [%]	g [%]	U [W/m ² K]
Configurazione Base 1	Schermo 1	6 - 10 - 1 - 10 - 6	0	7.2	1.3
Configurazione Base 1	Schermo 2		0	33.9	1.6
Configurazione Base 1	Schermo 11		16.5	22.1	1.5
Configurazione Base 1	Schermo 14		61.3	63.0	1.7
Configurazione Base 2	Schermo 1	6 - 10 - 1 - 10 - 4	0	4.9	0.9
Configurazione Base 2	Schermo 2		0	20.1	1.0
Configurazione Base 2	Schermo 11		16.1	18.6	1.0
Configurazione Base 2	Schermo 14		61.1	54.8	1.0
Configurazione Base 3	Schermo 1	4 - 10 - 1 - 10 - 6	0	6.7	1.1
Configurazione Base 3	Schermo 2		0	26.6	1.1
Configurazione Base 3	Schermo 11		14.6	16.4	1.1
Configurazione Base 3	Schermo 14		54.0	34.6	1.1

Tabella 6 Risultati dei calcoli integrati con applicazione delle pellicole come tipologia elementi schermanti

		Spessore [mm]	τ_v [%]	g [%]	U [W/m ² K]
Configurazione Base 1	FILM 1	6 - 10 - 1 - 10 - 6	0	6.5	1.8
Configurazione Base 1	FILM 2		0	32.3	1.9
Configurazione Base 1	FILM 11		16.5	22.2	1.8
Configurazione Base 1	FILM 14		61.5	61.0	1.9
Configurazione Base 2	FILM 1	6 - 10 - 1 - 10 - 4	0	5.0	1.4
Configurazione Base 2	FILM 2		0	24.9	1.5
Configurazione Base 2	FILM 11		16.1	20.4	1.5
Configurazione Base 2	FILM 14		61.2	51.7	1.5
Configurazione Base 3	FILM 1	4 - 10 - 1 - 10 - 6	0	6.7	1.7
Configurazione Base 3	FILM 2		0	23.0	1.7
Configurazione Base 3	FILM 11		14.6	17.0	1.6
Configurazione Base 3	FILM 14		54.2	34.2	1.7

I dati spettrali non hanno impatto sulla trasmittanza termica, si registrano differenze di fattore solare rispetto ai risultati dati a banda larga quando intervengono materiali selettivi.

Tabella 7 Risultati dei calcoli da dati spettrali con applicazione delle pellicole come tipologia vetri

		Spessore [mm]	τ_v [%]	g [%]	U [W/m ² K]
Configurazione Base 1	Schermo 1	6 - 10 - 1 - 10 - 6	0	7.2	1.3
Configurazione Base 1	Schermo 2		0	33.9	1.6
Configurazione Base 1	Schermo 11		16.5	22.7	1.5
Configurazione Base 1	Schermo 14		61.5	61.8	1.7
Configurazione Base 2	Schermo 1	6 - 10 - 1 - 10 - 4	0	4.9	0.9
Configurazione Base 2	Schermo 2		0	20.7	1.0
Configurazione Base 2	Schermo 11		16.1	21.0	1.0
Configurazione Base 2	Schermo 14		61.2	51.2	1.0
Configurazione Base 3	Schermo 1	4 - 10 - 1 - 10 - 6	0	5.7	1.1
Configurazione Base 3	Schermo 2		0	26.0	1.1
Configurazione Base 3	Schermo 11		14.6	16.6	0.9
Configurazione Base 3	Schermo 14		54.2	31.1	1.1

Tabella 8 Risultati dei calcoli da dati spettrali con applicazione delle pellicole come tipologia elementi schermanti

		Spessore [mm]	τ_v [%]	g [%]	U [W/m ² K]
Configurazione Base 1	FILM 1	6 - 10 - 1 - 10 - 6	0	6.5	1.8
Configurazione Base 1	FILM 2		0	32.3	1.9
Configurazione Base 1	FILM 11		16.5	22.2	1.8
Configurazione Base 1	FILM 14		61.5	61.1	1.9
Configurazione Base 2	FILM 1	6 - 10 - 1 - 10 - 4	0	5.0	1.4
Configurazione Base 2	FILM 2		0	24.9	1.5
Configurazione Base 2	FILM 11		16.1	20.4	1.5
Configurazione Base 2	FILM 14		61.2	50.9	1.5
Configurazione Base 3	FILM 1	4 - 10 - 1 - 10 - 6	0	5.8	1.7
Configurazione Base 3	FILM 2		0	22.6	1.7
Configurazione Base 3	FILM 11		14.6	17.0	1.6
Configurazione Base 3	FILM 14		54.2	31.4	1.7

Dai risultati emerge l'importanza comprendere la modalità costruttiva di un sistema con pellicole in intercapedine, visto l'impatto della la maggiore o minore circolazione d'aria tra sui risultati finali. A tale scopo saranno eseguiti test con il metodo a piastra calda.

7.2 Attività su materiali termocromici

Tali materiali passano reversibilmente da uno stato colorato ad uno decolorato quando la loro temperatura raggiunge un determinato valore. In collaborazione con GFC Chimica S.r.l. è stata sviluppata una serie di campioni di materiali termocromici (TC) del tipo leuco dyes con temperatura di transizione di 25°C. Sono stati realizzati campioni di vernici TC e di vernici statiche del medesimo colore deposte su una base in alluminio, è stato realizzato un campione statico bianco. I campioni analizzati sono stati quindi:

- 5 campioni, vernici convenzionali: colore verde (1), nero (2), rosso (3), blu (4), bianco (5);
- 4 campioni, vernici TC: colore verde (1_TC), nero (2_TC), rosso (3_TC), blu (4_TC).

7.2.1 Attività sperimentali in campo

Le prove sperimentali hanno previsto la misurazione delle variazioni di temperature superficiali dei campioni in ambiente reale in una giornata ore 08:00 alle ore 16:00 nel mese di Luglio 2023 (temperatura dell'aria di picco superiore a 30°C e irradiazione solare orizzontale superiore a 800W/m²) presso il Centro di Ricerca ENEA Casaccia (Roma). La superficie dei campioni è stata monitorata con termocamera FLIR B355 a intervalli di un ora e con termocoppie a intervalli di 5 minuti. L'evoluzione temporale della temperatura superficiale è ben evidenziata in Figura 2, in cui si riportano le immagini termiche dei campioni durante la giornata.

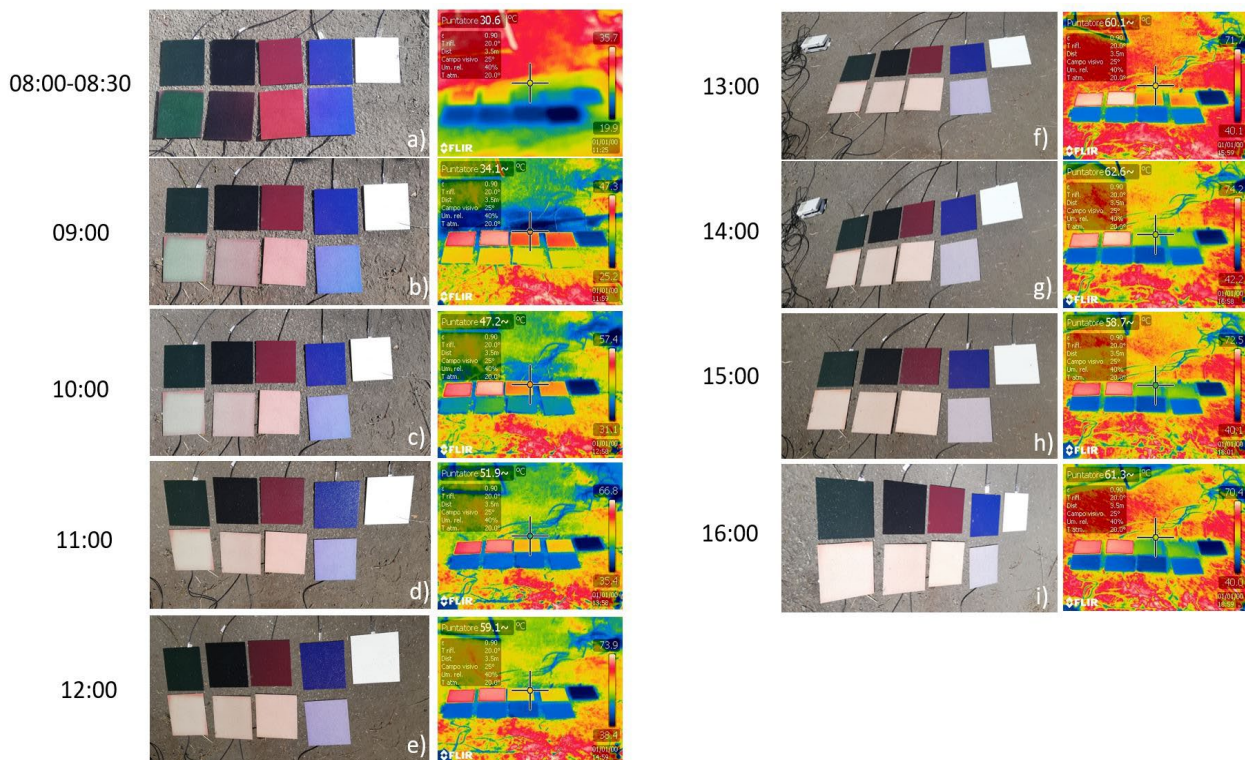


Figura 2 Campioni durante le prove sperimentali trattati con vernici convenzionali e con vernici TC: riprese nel visibile con fotocamera digitale e con termocamera riprese dopo ogni ora di esposizione, dalle ore 08:00 – 08:30 alle 16:00 (ora solare).

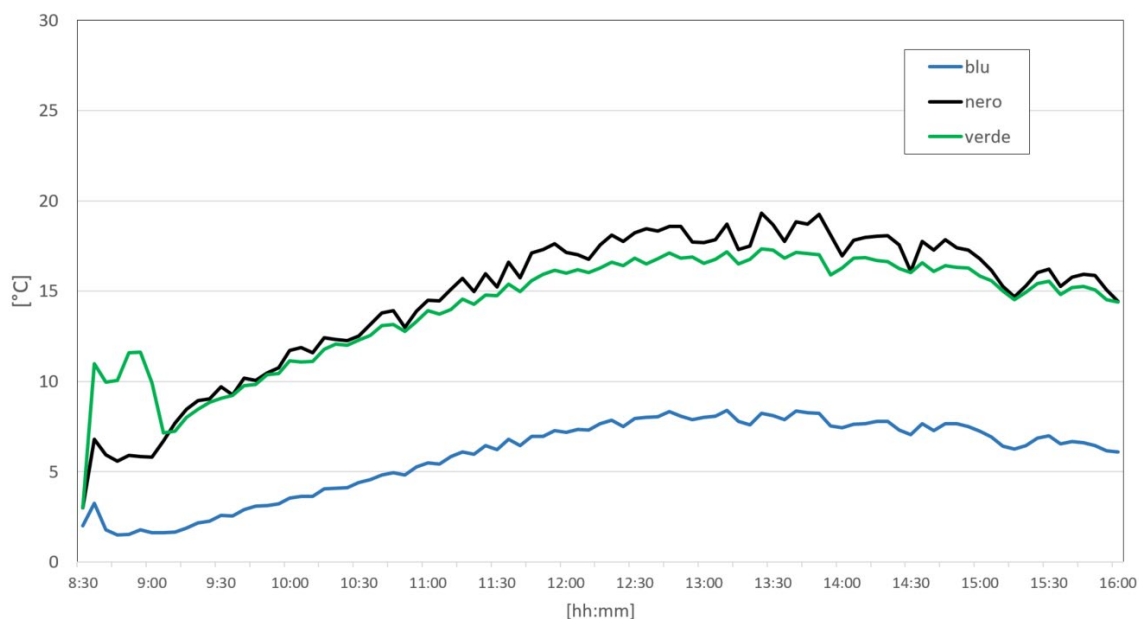


Figura 3 Differenza di temperatura superficiale tra campioni statici e TC del medesimo colore.

Figura 3 riporta l'andamento in continuo della differenza di temperatura superficiale tra i campioni TC e quelli statici con il medesimo colore. Si può notare il profilo simile del campione verde e quello nero, mentre il campione blu presenta delle differenze decisamente minori. Il motivo è, vedi sezione successiva, è che i primi due hanno riflettanza solare molto bassa su tutto lo spettro, il campione blu statico ha riflettanza più elevata nello spettro dell'infrarosso vicino. Il campione verde e nero hanno differenze di temperatura massime di 17.3 e 19.3°C, rispettivamente, con valori medi sulla giornata di 14-15°C. Valori minori si registrano per il campione blu, che ha un picco di abbassamento termico di 8.4°C e un valore medio giornaliero di circa 6°C.

7.2.2 Attività sperimentali in laboratorio

Le iniziali misure in laboratorio hanno riguardato la misura di riflettanza dei campioni verde e nero sia TC che statici, i primi sono stati misurati sia nello stato colorato che in quello decolorato. Lo strumento è quello indicato nella sezione 7.1. L'emissività è stata misurata con emissometro a banda larga di Devices and Services, operante in conformità con lo standard USA: ASTM C1371-04, ottenendo valori nel range 0.87-0.91. Dai dati di emissività è stato ricavato il Solar Reflectance Index, che indica la capacità del materiale di rimanere a temperature contenute anche in caso di forte irraggiamento solare. A titolo esemplificativo si riportano le curve spettrali del campione nero in diverse condizioni in Figura 4; i parametri ottici e termici riportati in Tabella 9.

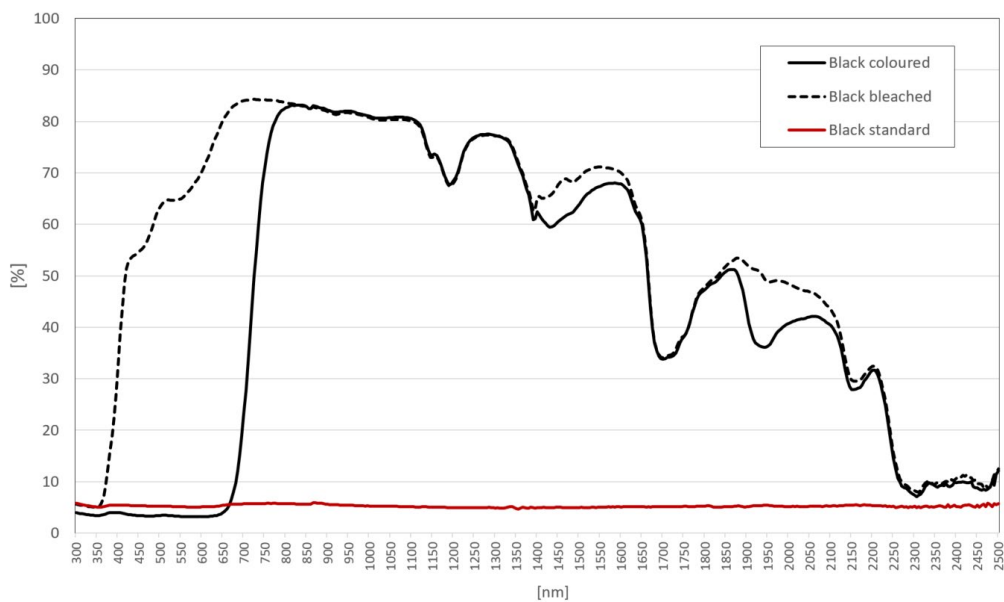


Figura 4 Riflettanza spettrale del campione termocromico nero nello stato chiaro e scuro e del campione nero statico

Tabella 9 Valori a banda larga di trasmissione e Solar Reflectance Index dei campioni misurati

Campione	Riflettanza solare [%]	Riflettanza vicino infrarosso [%]	Riflettanza visibile [%]	SRI [-]
NERO STATICO	5	5	5	-1
NERO 15°	38	72	3	42
NERO 70°	68	72	67	83
VERDE STATICO	7	8	6	2
VERDE 15°	40	72	5	45
VERDE 70°	69	75	66	84
BLU STATICO	32	47	7	34
BLU 15°	43	72	5	49
MARRONE STATICO	32	47	7	34
MARRONE 15°	43	71	6	49
BIANCO	79	77	87	98

La riflettanza solare dei campioni nero e verde, questa infatti aumenta di oltre un fattore 10 tra il campione statico e quello TC nello stato chiaro. Confrontando lo scarto del materiale TC nei due stati estremi si osserva un aumento di riflettanza del 30% circa, che in termini relativi rispetto al valore iniziale corrisponde ad oltre il 75%. Si noti che per la preparazione del materiale TC sono stati utilizzati anche dei materiali riflettenti all'infrarosso vicino. Questo fa sì che il materiale TC anche nello stato scuro abbia riflettanza molto più elevata dell'equivalente statico per i colori nero e verde, così che l'incremento di riflettanza solare è di un fattore 5/6 anche senza termocromismo.

7.3 Attività su daytime radiative coolers

Un sistema di raffreddamento passivo radiativo diurno è un dispositivo in grado di smaltire calore verso il serbatoio freddo dell'universo, restando a temperatura inferiore di quella ambiente anche in presenza di forte irraggiamento solare, attraverso la finestra infrarossa dello spettro elettromagnetico compresa tra 8 e 13 micron, dove l'atmosfera terrestre è trasparente. L'attività ha quindi riguardato la sintesi e caratterizzazione di nuovi materiali con proprietà spettralmente selettive, in particolare la realizzazione di metamateriali con profilo a gradino della riflettanza (con limite teorico 100% in tutto lo spettro solare e infrarosso e 0% nella finestra 8-13 μm , dove si dovrebbe tendere al limite teorico di emissività 100%) e allocazione in atmosfera di gas nobili per limitare lo scambio di calore per convezione.

7.3.1 Idea progettuale e sviluppo dei primi campioni

L'idea progettuale è stata di adoperare un substrato metallico, in modo da consentire l'applicazione come scambiatore termoelettrico e di realizzare una struttura stratificata nella quale ciascuno degli strati garantisce una funzione/proprietà, vedi schema in Figura 5. Per quanto attiene al comportamento riflettente del dispositivo, la scelta è ricaduta sull'alluminio, tra i materiali con la più alta riflettanza nel range solare. Per quanto attiene allo strato emettitore infrarosso sono stati selezionati diversi composti del silicio aventi legami covalenti Si-O e Si-C, entrambi caratterizzati da assorbimenti e, quindi, emissioni nella regione desiderata; questi sono stati quindi dispersi in matrici polimeriche in modo da ottenere formulazioni trasparenti, economiche e facilmente processabili. Uno dei limiti di un siffatto approccio risiede nel fatto che le matrici polimeriche, a loro volta, assorbono/emettono e, conseguentemente, viene rilassato il vincolo dell'emissione selettiva, che si riverbera su un potenziale minore effetto di abbassamento della temperatura dell'oggetto rivestito. Nella fattispecie, la scelta di avere multistrati a base polimerica incontra le necessità di carattere pratico provenienti dall'esigenza delle applicazioni negli edifici di semplificare i dispositivi radiativi ed il relativo costo. Tuttavia, per garantire comunque che non vi sia un surriscaldamento sotto irraggiamento solare occorre che le matrici polimeriche siano almeno trasparenti nella finestra infrarossa di trasparenza dell'atmosfera, requisito non banale per i materiali organici che hanno tutta una serie di legami covalenti IR attivi. Affinché il controllo ottico sia demandato allo strato sottostante è, ovviamente, richiesto che lo strato polimerico contenente le particelle emissive sia anche trasparente nell'intero range solare.

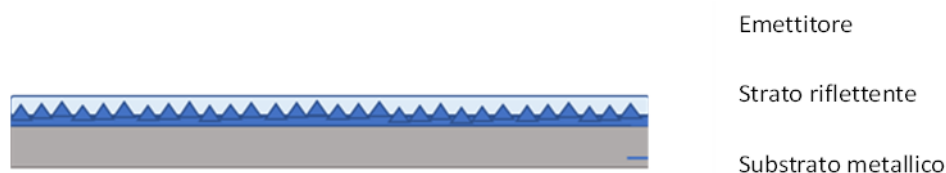


Figura 5 Strutturazione tipo dei dispositivi realizzati

A tal proposito è stata condotta una sperimentazione sulle proprietà ottiche di diversi polimeri (ed in particolare sulla trasmittanza infrarossa nella finestra atmosferica), che ha portato all'individuazione di alcune poliolefine ad alta densità come migliore candidato matrice. Il materiale di elezione adoperato come

schermatura e quindi ultimo strato esposto anche nei dispositivi fotonici è il polietilene ad alta densità. Processare siffatto polimero aggiungendo al suo interno dei guest non è operazione banale, in quanto nei compositi polimerici occorre che host e guest siano solubili negli stessi solventi. Come altra possibilità vi è quella di massimizzare l'emissività dei guest, trovando il compromesso tra il loro quantitativo e la trasmittanza della matrice. Siccome i guest migliori contengono legami Si-O la cui natura idrofila mal si concilia con l'idrofobicità dei solventi necessari a processare poliolefine sono state prese in considerazione matrici polimetilmetacriliche contenenti silsesquiossani in diversa concentrazione. In Tabella 10 sono elencati i differenti campioni prodotti. Sono tutti compositi polimerici di tipo guest-host depositati su substrati di alluminio rivestiti da una pellicola adesiva. I primi 4 (P25-P45-PSAZ- PSe) hanno la stessa matrice polimerica metacrilica con filler emissivi differenti o in concentrazione (25 o 45 % di gabbie) o in tipologia (silsesquiossani o azulene), PEe e PSe hanno lo stesso filler, ossia nanoparticelle di SiC in un caso in matrice metacrilica e nell'altro poliolefinica.

Tabella 10 Elenco dei campioni realizzati: sigla, tipologia di matrice polimerica utilizzata e filler

Sigla campione	Matrice polimerica	Filler
P25	metacrilica	Silsesquiossaniche T8
P45	metacrilica	Silsesquiossaniche T8
PSAZ	metacrilica	Silsesquiossan T8 e azulene
PSe	metacrilica	Nanoparticelle di SiC
PEe	poliolefinica	Nanoparticelle di SiC

7.3.2 Misure sperimentali in campo

Sui campioni sviluppati, oltre alle caratterizzazioni chimico-fisiche dei vari materiali costituenti (substrato, substrato più strato adesivo riflettente, intero multistrato) è stata condotta una campagna sperimentale durata circa 1 mese, esponendoli alle condizioni atmosferiche del mese di agosto presso il CR di Casaccia, finalizzata alla comprensione delle loro prestazioni in ambiente reale. Nel grafico di Figura 6 sono riportate, a titolo di esempio, le misure di temperatura di tre dispositivi (P25, Paz e P45) e la misura della temperatura ambiente: si osserva che tutti i dispositivi nel corso della campagna sperimentale hanno una temperatura superiore a quella ambiente.

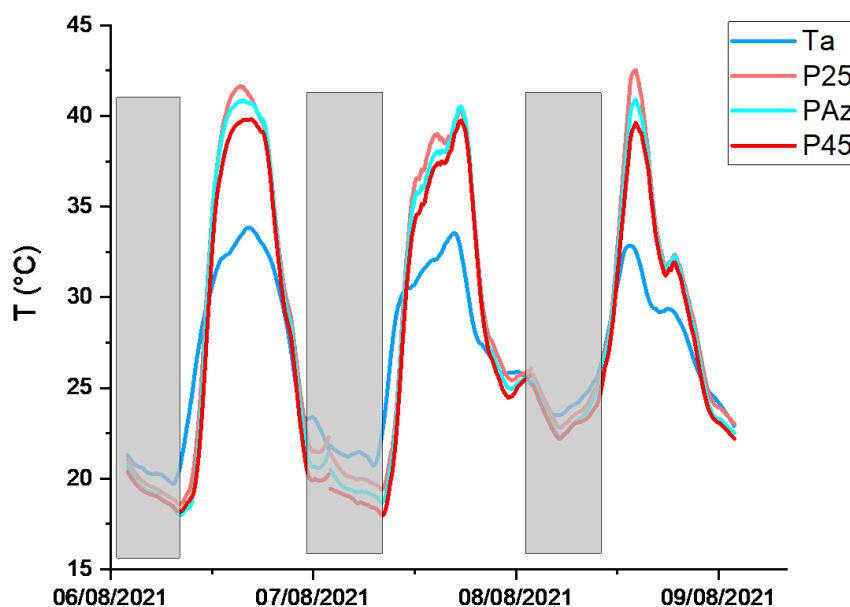


Figura 6 Misure di temperatura dei diversi dispositivi realizzati confrontati con il substrato "lastra di alluminio".

In Figura 7 è presentata una elaborazione delle misure di temperatura dei dispositivi realizzati normalizzati alla temperatura del substrato al solo scopo di valutare l'efficacia dei singoli materiali proposti. Si osserva che, nonostante il dispositivo continui a trovarsi ad una temperatura maggiore di quella ambiente, esso riesce a tenersi di qualche grado sotto la temperatura del solo substrato.

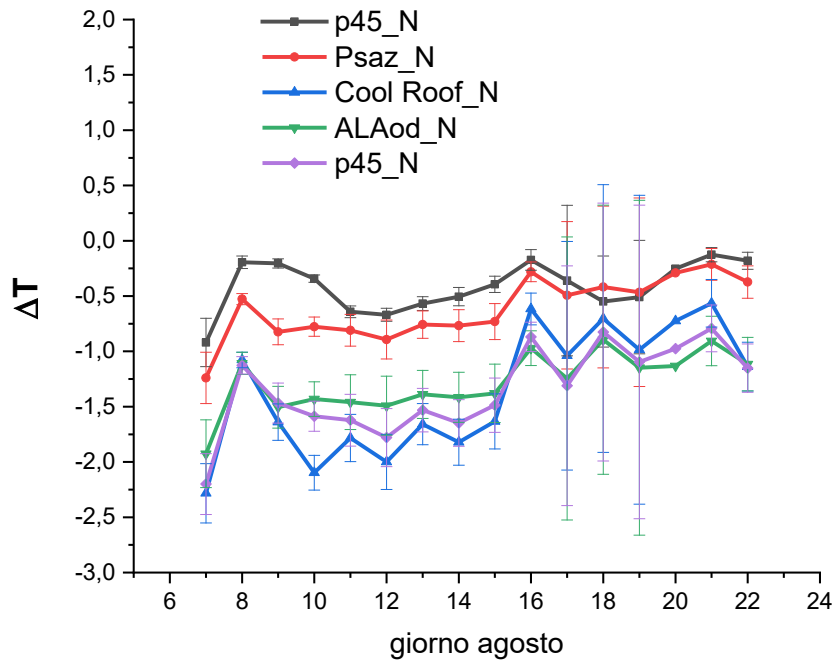


Figura 7. Misura del gradiente di temperatura (misurato rispetto alla temperatura del substrato) a cui si portano i diversi campioni sotto irraggiamento solare

Infine, come si evince dal grafico di Figura 8 i materiali fabbricati, ripartiti in due diversi grafici, sono in grado di restare al di sotto della temperatura superficiale del substrato, fino a tre gradi, con un trend dipendente dal quantitativo di emettitori e dalla tipologia di formulazione. Sarà sulla base delle informazioni ottenute dalla campagna sperimentale che saranno sviluppate le nuove soluzioni progettuali per raggiungere la capacità di rimanere sotto temperatura ambiente di materiali applicabili a scala di edificio.

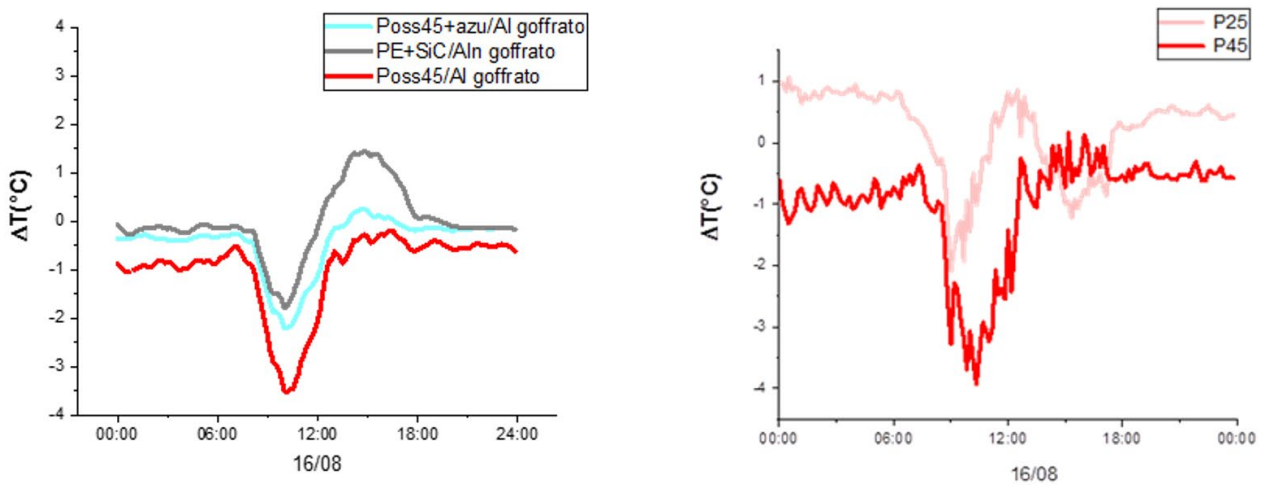


Figura 8. Prestazioni dei campioni di PDRC: confronto per tipo di materiale e per quantitativo di gabbie.

7.4 Materiali trasparenti dinamici

Non sono state condotte attività di ricerca per questa famiglia di prodotti. L'attività si è concentrata sull'identificazione delle tecnologie più promettenti tra i sistemi dinamici attivi. Di particolare interesse sono risultati i vetri elettrocromici dual-band, in grado di operare separatamente il controllo attivo sullo spettro del vicino infrarosso e del visibile, ottimizzando così le prestazioni di sistema. In questo quadro si è dato inizio alla collaborazione con Leitat Technological Center, istituto di ricerca spagnolo all'avanguardia nell'ambito di tale tecnologia, per lo sviluppo e l'analisi termo-fisica di tali materiali, i cui risultati saranno oggetto della linea di attività L1.9.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

- 9.1 *Mainini A.G., Speroni A., Poli T., Zinzi M. On the Optical Characterization of Architectural Three-Dimensional Skins and Their Solar Control Potential (2022) Buildings, 12 (8), art. no. 1103 - DOI: 10.3390/buildings12081103.*
- 9.2 *Badino, E., Autretto, G., Fantucci, S., Zinzi, M., Serra, V. (2023). Laboratory and In-Situ Assessment of Thermo-chromic Coatings for Building Application: Testing on Dynamic Properties and Photodegradation. In: Wang, L.L., et al. Proceedings of the 5th International Conference on Building Energy and Environment. COBEE 2022. Environmental Science and Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9822-5_310.*

10 Eventi di disseminazione

Partecipazione agli eventi descritti di seguito:

- 10.1 *COBEE 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDING ENERGY AND ENVIRONMENT. 25th-29th July 2022. Concordia University. Montreal, Quebec, Canada*
- 10.2 *Partecipazione al meeting dell'Annex 80 Resilient Cooling del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Università di Santa Caterina, Florianopolis, Brasile, ottobre 2022*
- 10.3 *Partecipazione al meeting dell'Annex 80 Resilient Cooling del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Institute of Building Research & Innovation, Vienna, Austria, aprile 2023*
- 10.4 *Partecipazione al meeting dell'Annex Annex 90 Low Carbon, High Comfort Integrated Lighting del Programma IEA – Energy in Building and Communities Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, Caserta, Italia, aprile 2023*
- 10.5 *Partecipazione in qualità di delegato nazionale all'Executive Committee Meeting del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Wuppertal, Germania, giugno 2022*
- 10.6 *Partecipazione on-line in qualità di delegato nazionale all'Executive Committee Meeting del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Istanbul, Turchia, novembre 2022*
- 10.7 *Partecipazione in qualità di delegato nazionale all'Executive Committee Meeting del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Copenhagen, Danimarca, giugno 2023*