

# Ricerca di Sistema elettrico



Analisi sperimentali e numeriche per l'applicazione di materiali e componenti per sistemi di involucro edilizio in edifici ad alte prestazioni (LA1.9)

Michele Zinzi, Carlo Romeo, Anna Castaldo, Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello, Stefano Agnoli, Giuliano Giacomi

## Titolo completo del report

ANALISI SPERIMENTALI E NUMERICHE PER L'APPLICAZIONE DI MATERIALI E COMPONENTI PER SISTEMI DI INVOLUCRO EDILIZIO IN EDIFICI AD ALTE PRESTAZIONI (LA1.9)

Michele Zinzi (ENEA TERIN-ICER), 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), Giuliano Giacomi (ENEA ISER-UTFRA)

Con il contributo di: G. Elmo, L. Volpe, R. Basile

Dicembre 2024

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: LA 1.9

Responsabile del Progetto: Giovanni, Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Domenico, Iatauro, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: Luglio 2023

Mese inizio effettivo: Luglio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

Si ringrazia per la collaborazione: Michele Manca e Giulia Olivè Morales di LEITAT, Luca Papaiz di Pellini spa.

## Indice

1	Risultati attesi .....	6
1.1	Misure ottiche su componenti trasparenti .....	6
1.2	Misure ottiche su componenti opachi .....	6
1.3	Misure di emissività su componenti opachi .....	6
1.4	Misure di emissività su componenti trasparenti .....	6
1.5	Misure e calcolo di sistemi trasparenti complessi .....	6
1.6	Calcolo di sistemi trasparenti integranti pellicole mobili .....	6
1.7	Analisi energetiche di edifici di riferimento equipaggiati con le tecnologie studiate	6
2	Risultati ottenuti .....	7
2.1	Misure ottiche su componenti trasparenti.....	7
2.2	Misure ottiche su componenti opachi .....	7
2.3	Misure di emissività su componenti opachi .....	7
2.4	Misure di emissività su componenti trasparenti .....	7
2.5	Misure e calcolo di sistemi trasparenti complessi .....	7
2.6	Calcolo di sistemi trasparenti integranti pellicole mobili .....	7
2.7	Analisi energetiche di edifici di riferimento equipaggiati con le tecnologie studiate.	7
3	Prodotti attesi .....	8
4	Prodotti sviluppati .....	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati .....	10
6	Sintesi delle attività svolte .....	11
7	Dettaglio delle attività svolte .....	12
7.1	Analisi sperimentali e misure in campo .....	12
7.1.1	Pellicole integrate in vetrate multiple .....	12
7.1.2	Vetri elettrocromici dual-band .....	12
7.1.3	Rivestimenti termocromici .....	14
7.1.4	Passive daytime radiative coolers (PDRC).....	15
7.2	Analisi numeriche .....	17
7.2.1	La modellazione degli edifici di riferimento .....	17
7.2.2	Il modello di calcolo .....	19
7.2.3	Analisi dei risultati .....	20
7.2.4	Risultati Pellicole schermanti .....	21
7.2.5	Rivestimenti termocromici.....	23

7.2.6	Vetri Elettrocromici.....	24
7.2.7	Simulazioni a impianti spenti.....	24
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte .....	25
9	Publicazioni scientifiche.....	26
10	Eventi di disseminazione .....	27

## Indice delle figure

Figura 1 – Curve angolari trasmissione solare e visibile di un vetro camera con e senza pellicola diffondente.....	12
Figura 2 – Curve spettrali di trasmissione di un campione elettrocromico dual band di colore rosa per diversi valori di tensione applicata.....	13
Figura 3 – Curve spettrali del campione termocromico blu per diverse temperature del materiale.....	14
Figura 4 Misure di riflettanza dei due substrati proposti. ....	15
Figura 5 Confronto tra le temperature dei substrati e quella ambiente nel corso della giornata. ....	15
Figura 6 Misura di variazione della temperatura tra la temperatura dei dispositivi e la temperatura ambiente: campagna di misura effettuata sul tetto di un edificio del CR di Portici .....	16
Figura 7 – Planimetria del piano tipo dell’edificio residenziale .....	17
Figura 8 Planimetria del piano tipo dell’edificio uso uffici.....	18
Figura 9 Modello di calcolo implementato in TRNSYS Simulation Studio .....	19

## Indice delle tabelle

Tabella 1 Trasmittanza solare e luminosa dei campioni testati con diverse tensioni di alimentazione.....	13
Tabella 2 Riflettanza solare di campioni termocromici a diversa temperatura.....	14
Tabella 3 Range di variazione dei principali parametri di deposizione dei materiali inorganici	16
Tabella 4 Dati dimensionali dell’edificio residenziale.....	17
Tabella 5 Dati dimensionali dell’edificio uso uffici .....	18
Tabella 6 Valori di riferimento .....	18
Tabella 7 Caratteristiche termo-fisiche dell’involucro degli edifici: non isolato e isolato .....	18
Tabella 8 Schema di attivazione schermi .....	20
Tabella 9 Rivestimento termocromico: comportamento Caso 1 .....	20
Tabella 10 Rivestimento termocromico: comportamento Caso 2 .....	20
Tabella 11 Residenze non isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento.....	21
Tabella 12 Residenze isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento.....	21
Tabella 13 Uffici non isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento.....	22
Tabella 14 Uffici isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento .....	22

Tabella 15 Residenze non isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento .....	23
Tabella 16 Residenze isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento.....	23
Tabella 17 Uffici non isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento .....	23
Tabella 18 Uffici non isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento.....	24

# 1 Risultati attesi

1.1 Misure ottiche su componenti trasparenti

1.2 Misure ottiche su componenti opachi

1.3 Misure di emissività su componenti opachi

1.4 Misure di emissività su componenti trasparenti

1.5 Misure e calcolo di sistemi trasparenti complessi

1.6 Calcolo di sistemi trasparenti integranti pellicole mobili

1.7 Analisi energetiche di edifici di riferimento equipaggiati con le tecnologie studiate

## 2 Risultati ottenuti

### 2.1 Misure ottiche su componenti trasparenti

Sono state eseguite le misure sui dispositivi sperimentali elettrocromici di tipo dual-band per diverse colorazioni

### 2.2 Misure ottiche su componenti opachi

Sono state eseguite le misure sui dispositivi termocromici per diverse temperature e per materiali sviluppati nell'ambito del raffrescamento diurno.

### 2.3 Misure di emissività su componenti opachi

La caratterizzazione termica su dispositivi termocromici e sulle pellicole opache è stata già sviluppata e presentata nel report della LA1.8.

### 2.4 Misure di emissività su componenti trasparenti

La caratterizzazione termica su pellicole trasparenti è stata già sviluppata e presentata nel report della LA1.8. Le misure sui vetri elettrocromici non sono state eseguite, senza pregiudicare le attività legate a questa fase. Infatti, il materiale ha il lato attivo embedded tra due vetri convenzionali, la cui emissività è ampiamente nota da letteratura.

### 2.5 Misure e calcolo di sistemi trasparenti complessi

Sono state eseguite misure ad angolo di incidenza variabile su un campione assemblato con doppio vetro e pellicola semi-trasparente all'interno. L'analisi ha consentito di valutare la risposta ottica del sistema in diverse condizioni geometriche di irraggiamento.

### 2.6 Calcolo di sistemi trasparenti integranti pellicole mobili

Un'ampia analisi numerica è stata già sviluppata e presentata nel report della LA1.8.

### 2.7 Analisi energetiche di edifici di riferimento equipaggiati con le tecnologie studiate.

Si è condotto un ampio studio di simulazione numerica atto a valutare i possibili benefici delle tecnologie allo studio nella linea di attività. Si è quantificato il beneficio in termini di energia netta (MWh) invernale ed estiva conseguibile con l'applicazione di vetrate innovative, con pellicole mobili in intercapedine e vetri elettrocromici dual band, e di sistemi opachi dinamici, realizzati con rivestimenti termocromici. È stato infine calcolato il beneficio in termini di comfort nel caso di alcune tecnologie installate in edifici in libera fluttuazione termica.

### 3 Prodotti attesi

Non era atteso lo sviluppo di prodotti hardware o software.

## 4 Prodotti sviluppati

Non era atteso lo sviluppo di prodotti hardware o software.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

L'attività non ha scostamenti significativi considerando l'intero processo di studio e sviluppo, che ha riguardato LA.1.8 e LA.1.9. Alcuni risultati non sono stati presentati in questo report, semplicemente perché già conseguiti nel precedente linea di attività. Alcune limitazioni legate ad un più lento sviluppo e maturazione della tecnologia non hanno però impedito di raggiungere gli obiettivi prefissati.

## 6 Sintesi delle attività svolte

L'attività si è concentrata sullo sviluppo e la caratterizzazione di una serie di tecnologie innovative per l'involucro edilizio, completando le azioni intraprese nella LA.1.8. Sono stati sviluppati i primi campioni di raffrescamento radiativo diurno e le prestazioni valutate in campo. È stata poi completata la sperimentazione dei materiali termocromici e delle pellicole integrate nelle vetrate multiple attraverso misure di laboratorio. Si sono eseguite le misure di trasmissione spettrale sui primi dispositivi elettrocromici dual-band. Una serie di simulazioni su edifici residenziali e per uffici sono state eseguite per diverse zone climatiche nazionali (Torino, Roma e Palermo) e diversi livelli di isolamento termico. I risultati hanno consentito di valutare il miglioramento energetico conseguibile utilizzando tali soluzioni innovative rispetto a quelle convenzionali. I risultati positivi pongono le basi per sviluppi successivi delle tecnologie analizzate.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Il dettaglio delle attività fa riferimento ai due campi di azione principali, ossia l'attività sperimentale sulle tecnologie individuate e le analisi numeriche, le quali consentono di determinare gli impatti rispetto a soluzioni convenzionali.

### 7.1 Analisi sperimentali e misure in campo

I risultati seguenti integrano quelli, parziali, presentati nella LA1.8. Si fa notare che tutti i calcoli dei parametri ottici broad-band a partire dalle misure spettrali sono eseguiti secondo le procedure definite nello standard ISO9050:2003.

#### 7.1.1 Pellicole integrate in vetrate multiple

Questa tecnologia è stata ampiamente esplorata nella LA1.8. Come da capitolato, ci si è limitati ad analizzare la dipendenza angolare di un sistema composto da vetrata doppia con pellicola 11, avente caratteristiche diffondenti. Le altre pellicole non hanno richiesto tali approfondimenti, essendo opache o con comportamento speculare. Le misure di un vetrocamera chiaro, con e senza pellicola attivata, sono state eseguite con uno spettrofotometro sperimentale con sfera integratrice da 75cm e per angoli di incidenza 0, 15, 30, 45 gradi (Figura 1). La trasmittanza solare e visibile del vetrocamera (misurata tra 350 e 1750nm) evidenzia il classico andamento del decadimento secondo le leggi di Fresnel e un valore assoluto tra 0.72 e 0.77; l'effetto della pellicola è una forte riduzione della trasmissione (0.22-0.24) e in accordo col comportamento lambertiano non si osserva decadimento angolare. Interessante la selettività spettrale, seppure modesta, che se approfondita potrebbe portare ad interessanti sviluppi sul controllo visivo oltre che solare.

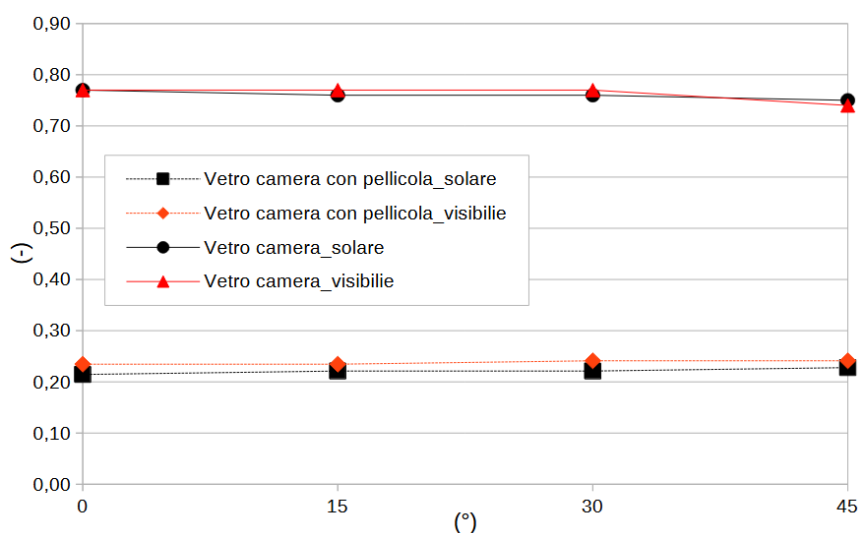


Figura 1 - Curve angolari trasmissione solare e visibile di un vetro camera con e senza pellicola diffondente

#### 7.1.2 Vetri elettrocromici dual-band

L'attività ha riguardato la misura spettrale della trasmissione spettrale di una serie di campioni, di diverse colorazioni, prodotti da LEITAT in Spagna. Si tratta della prima campagna di misura su tutto lo spettro solare (300-2500nm), condotta con strumentazione ENEA. Questi dispositivi sono in grado di modulare la trasmissione della radiazione solare in modo selettivo rispetto alla lunghezza d'onda in base al voltaggio applicato allo strato elettrocromico. Ai voltaggi minori si privilegia una certa trasparenza all'infrarosso vicino, così

da garantire l'apporto solare; innalzando il voltaggio questa componente viene azzerata mantenendo una componente di trasmissione nel visibile. I campioni sono di dimensione 2x2cm, con area attiva 1x1cm, cosa che ha implicato la realizzazione di maschere opportune affinché la sorgente illuminasse la sola parte attiva; i campioni, trasparenti senza tensione applicata, si colorano in 4 tonalità diverse: verde, rosa, blu e un campione ottenuto con un mix di colre. A titolo esemplificativo si riportano in Figura 2 le curve spettrali del campione rosa per diversi valori di Volts applicati. I dati integrati sugli spettri solare e visibile dei campioni testati sono riportati in Tabella 1.

I dati evidenziano come a basso potenziale (fino a 0.5) i materiali siano tutti con elevata trasmissione. A circa 1V i campioni abbassano notevolmente la trasmittanza con bassa selettività, escluso il blu che mostra una trasmissione notevole nell'infrarosso vicino rispetto al visibile. Da 1.5V la selettività è decisamente maggiore, con valori di trasmissione luminosa più alti di quella solare, con comportamento inverso ancora del campione blu. Dai 2.5V la trasmissione è estremamente bassa su tutto lo spettro, arrivando ad annullarsi per valori maggiori.

I risultati sono interessanti per future applicazioni negli edifici, soprattutto considerando che in funzione del materiale che da la colorazione al vetro è possibile avere diverse modulazioni sugli spettri di interesse. Si ritiene interessante approfondire il tema, con caratterizzazioni più avanzate: misure emisferiche e non dirette, misura anche della riflettanza, misure ad angoli di incidenza non normale.

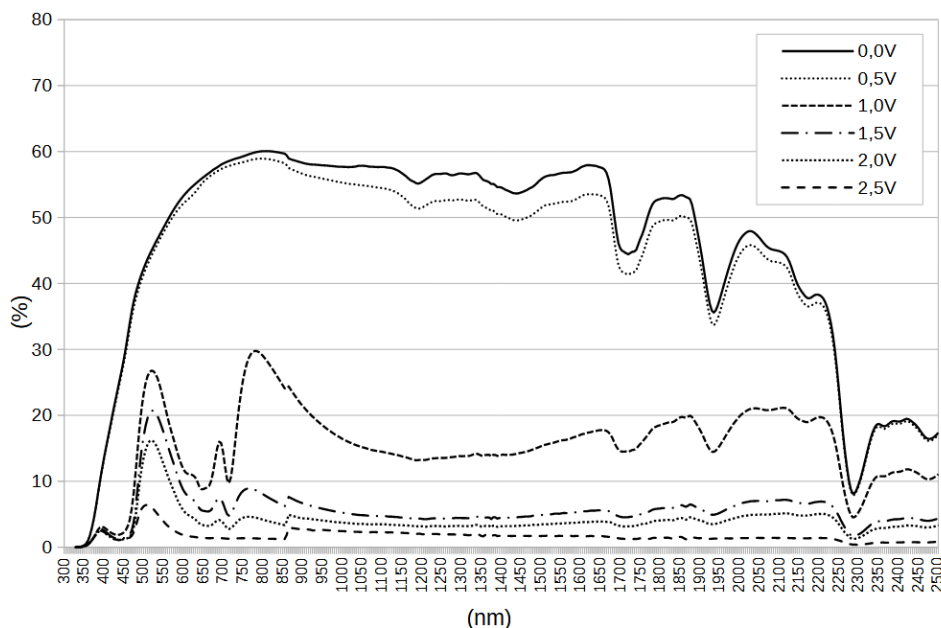


Figura 2 – Curve spettrali di trasmissione di un campione elettrocromico dual band di colore rosa per diversi valori di tensione applicata

Tabella 1 Trasmittanza solare e luminosa dei campioni testati con diverse tensioni di alimentazione

Campione	0,0V	0,5V	1,0V	1,5V	2,0V	2,5V
Verde $\tau_e$ (%)	49	49	12	4	2	0
Verde $\tau_v$ (%)	45	45	18	10	5	1
Rosa $\tau_e$ (%)	49	47	16	7	5	2

Rosa $\tau_v$ (%)	49	48	19	14	10	4
Mix $\tau_e$ (%)	55	54	14	1	1	1
Mix $\tau_v$ (%)	57	57	13	3	2	2
Blu $\tau_e$ (%)	58	56	22	11	6	1
Blu $\tau_v$ (%)	59,0	59	11	3	1	0

### 7.1.3 Rivestimenti termocromici

L'attività ha riguardato la misura spettrale della riflettanza spettrale di campioni termocromici marroni e blu, integrando la sperimentazione svolta in LA1.8 focalizzata essenzialmente sui campioni di colore nero e verde. In questo caso si è voluta analizzare anche il comportamento del materiale durante le transizioni, così le misure sono state eseguite con il materiale freddo (circa 15°C), ossia totalmente colorato, e caldo (oltre 70°C) così da ottenere il massimo della decolorazione e il massimo della riflessione. Misure intermedie sono state eseguite a 32°C e 44°C. Le curve spettrali del campione blu sono riportate in Figura 3 e i dati integrati sugli spettri visibile e solare in Tabella 2.

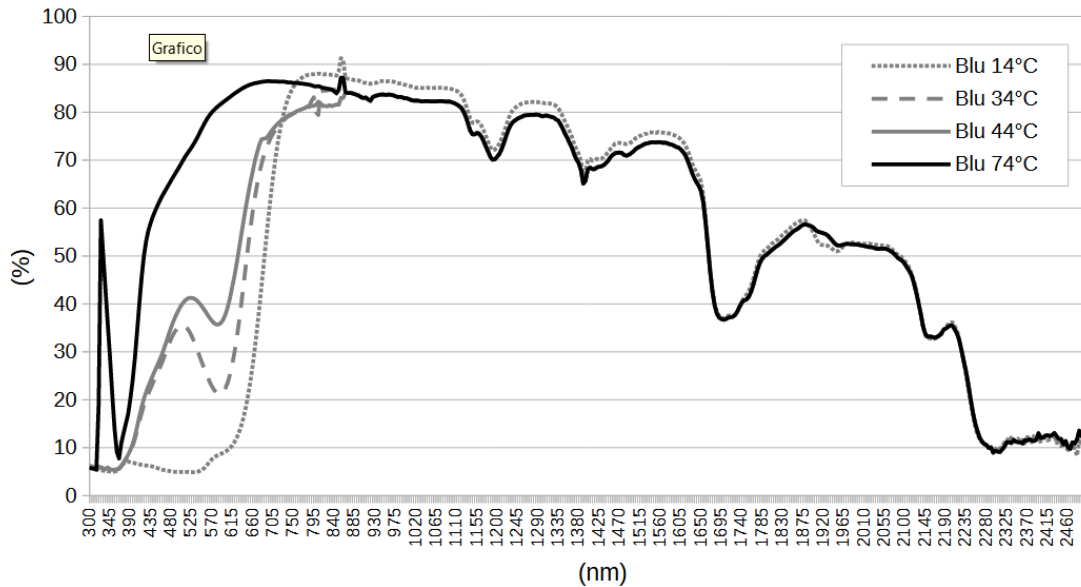


Figura 3 - Curve spettrali del campione termocromico blu per diverse temperature del materiale

I risultati confermano i risultati ottenuti in LA1.8, materiale con elevata transizione nello spettro visibile ma trascurabile nel vicino infrarosso, legata essenzialmente all'elevata riflessione nelle condizioni di campione colorato. I dati evidenziano altresì una transizione a temperature ben più elevate di quelle attese (completamento a 40°C, con inizio a 25°C). Questi limiti, oltre a quelli già menzionati di durabilità sono, al momento, una barriera notevole allo sviluppo della tecnologia.

Tabella 2 Riflettanza solare di campioni termocromici a diversa temperatura

Campione	15°C	33°C	44°C	>70°C
Blu $\rho_e$ (%)	45	53	56	72
Blu $\rho_v$ (%)	7	28	39	76
Marrone $\rho_e$ (%)	44	57	60	68
Marrone $\rho_v$ (%)	7	35	44	64

#### 7.1.4 Passive daytime radiative coolers (PDRC)

I materiali presi in considerazione per lo sviluppo sono tutti bi-layer il cui primo strato è una pellicola di alluminio altamente riflettente nel range UV-VIS-NIR ed il secondo è un emettitore nella finestra trasparente dell'atmosfera tra 8 e 13  $\mu\text{m}$ . Come strato riflettente sono state selezionate due possibilità: una con elevata riflettanza speculare e l'altra, sempre a base di alluminio ma con elevata riflettanza globale e speculare ridotta da una goffratura (Figura 4). In Figura 5 è riportata la misura delle temperature raggiunte da un substrato di alluminio tale quale, un medesimo substrato rivestito con la pellicola goffrata e la temperatura ambiente. Il substrato rivestito con la pellicola riflettente ha una temperatura inferiore mediamente di 2°C, variazioni di comportamento tra la misura della temperatura ambiente e quella del substrato è imputabile a variazioni di breve durata della componente diretta della radiazione solare.

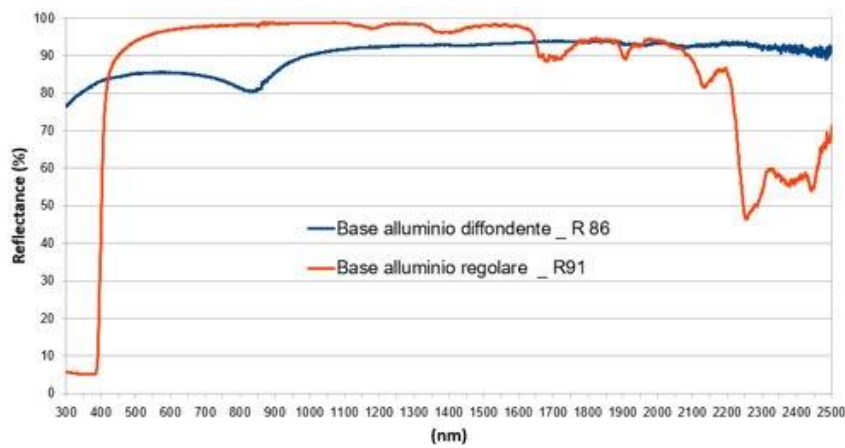


Figura 4 Misure di riflettanza dei due substrati proposti.

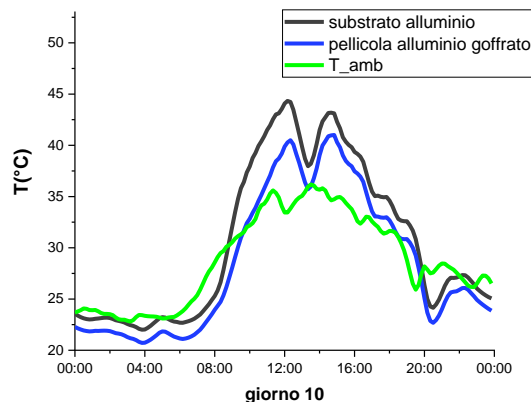


Figura 5 Confronto tra le temperature dei substrati e quella ambiente nel corso della giornata.

Come strato emettitore sono stati considerati materiali organici e inorganici che garantivano la trasparenza dello spettro solare in modo da salvaguardare la funzione di riflettore. In LA.1.8 sono state descritte le diverse tipologie di materiali polimerici progettati e depositati sotto forma di film sottili. I materiali organici studiati più promettenti si basano su gabbie silsesquiossamiche legate ad una matrice polimerica metacrilica in differenti concentrazioni.

Per quanto concerne i materiali inorganici, sono stati prodotti e caratterizzati strati emettitori a base di film sottili di silice sotto-stechiometrica e di nitruri di alluminio ottenuti mediante

processi di magnetron sputtering in regime reattivo. Tali materiali sono stati selezionati in base alle proprietà di assorbimento (e, quindi, di emissione) di radiazione infrarossa dei legami Si-O ed Al-N (situato nella regione di interesse), combinato all'elevata trasmittanza nella regione solare. Per i film di silice e di nitruro di alluminio è stato condotto un studio sulle condizioni di crescita allo scopo di depositare film sottili che massimizzassero le performance di emettitore salvaguardando la trasparenza nel range solare: incrementare l'emissione richiede un incremento dei legami Al-N e quindi un incremento di spessore che però comporta una diminuzione delle performance ottiche.

Sono stati fabbricati e caratterizzati 37 film sottili di silice 46 film sottili di nitruro di alluminio depositati mediante magnetron sputtering RF. I campioni sono stati caratterizzati: è stato misurato lo spessore, le performance ottiche (misure di riflettanza, trasmittanza e assorbanza nel range UV-VIS-NIR), è stata eseguita l'analisi vibrazionale (mediante micro-RAMAN e tecniche FTIR) e misure di diffrazione ai raggi X e misure di rugosità superficiale mediante microscopio AFM. In Tabella 3 sono riportati i range in cui sono stati variati i parametri di processo nella fase sperimentale.

Tabella 3 Range di variazione dei principali parametri di deposizione dei materiali inorganici

Materiale	Range di densità di Potenza [ $W \cdot cm^{-2}$ ]	Range di Pressione [mbar]	Gas di processo
Silice	2.80÷4.75	$4.0 \cdot 10^{-3} \div 15 \cdot 10^{-3}$	Ar, O
Nitruro di alluminio	3.32÷7.75	$4.4 \cdot 10^{-4} \div 1.0 \cdot 10^{-2}$	Ar, N, O

La risposta di alcuni materiali è stata misurata sul tetto di un edificio del CR di Portici in condizioni di umidità relativa tra 40 e 60% in una giornata molto soleggiata. In Figura 6 sono posti a confronto il nanocomposito P25 depositato su substrato goffrato e la Silice sotto-stechiometrica depositata su substrato speculare e con due campioni di matrici polimeriche trasparenti ma non emissive depositate su pellicola riflettente. L'elevata umidità ha effetti negativi sull'emissione termica e l'unico materiale che riesce a stare a temperature uguali all'aria circostante è solo il metamateriale fotonico. Al contempo i migliori materiali bilayer anche in condizioni avverse si assestano a temperature di poco superiori all'aria circostante. Questo dato è molto importante, in considerazione del fatto che tipicamente i materiali comuni esposti all'irraggiamento solare diretto tipico di una giornata estiva raggiungono temperature molto maggiori della stessa.

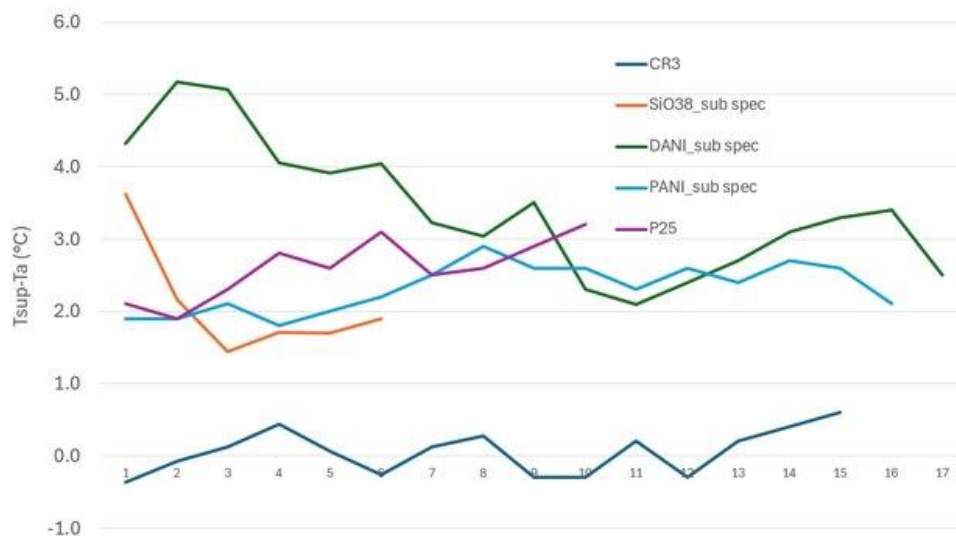


Figura 6 Misura di variazione della temperatura tra la temperatura dei dispositivi e la temperatura ambiente: campagna di misura effettuata sul tetto di un edificio del CR di Portici

## 7.2 Analisi numeriche

In questa fase è stata condotta la modellizzazione di casi studio nei quali è stata implementata l'applicazione delle tecnologie descritte nella LA.1.8 al fine di valutarne, attraverso analisi numeriche, gli effetti in termini di variazione del fabbisogno energetico netto dell'intero edificio rispetto a configurazioni di riferimento. Si fa notare che, visto il numero disponibile di caratteri, i risultati saranno incentrati sugli aspetti energetici, più inerenti rispetto agli obiettivi del PTR; le analisi in libera fluttuazione termica saranno riportati per un solo caso, a scopo puramente esemplificativo.

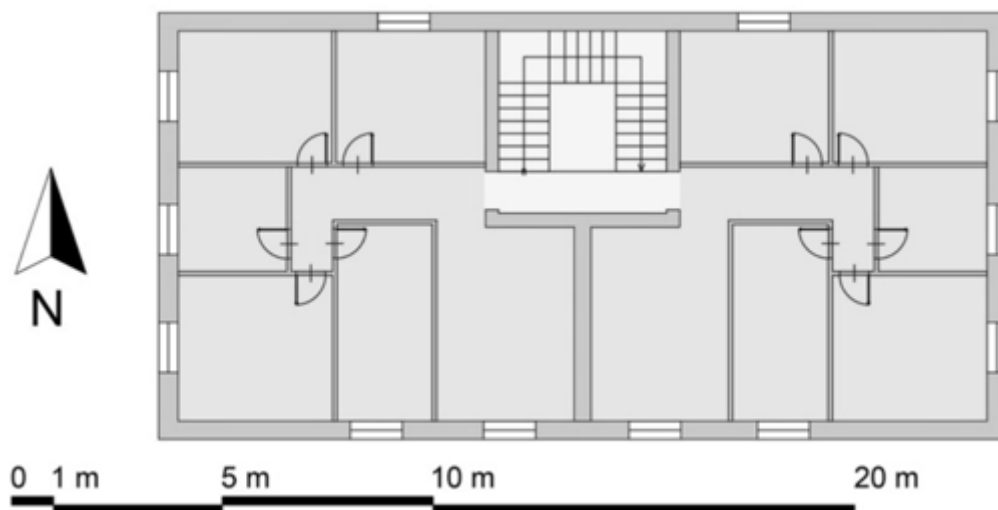


Figura 7 - Planimetria del piano tipo dell'edificio residenziale

### 7.2.1 La modellazione degli edifici di riferimento

I due edifici selezionati per le analisi sono un edificio-tipo di tre piani ad uso residenziale con due appartamenti per piano e l'altro ad uso uffici su due piani. Riportiamo in Figura 7 e Figura 8 la descrizione dei piani tipo e in Tabella 4 e Tabella 5 le caratteristiche dimensionali e termo-fisiche dell'involucro. Dati di set-point e condizioni operative sono riportate in Tabella 6. I fabbricati sono stati anche modellizzati in configurazione isolata nel rispetto dei parametri previsti dai DM 26.05.2015 (Tabella 7) suddivisi per le tre zone climatiche considerate (Torino, Palermo, Roma). Le superfici trasparenti sono costituite da doppio vetro con intercapedine d'aria, dettagli sulle configurazioni sono riportati in LA.1.8.

Tabella 4 Dati dimensionali dell'edificio residenziale

Superficie utile per piano (m <sup>2</sup> )	Volume netto per piano (m <sup>3</sup> )	Superficie opaca esterna totale (m <sup>2</sup> )	Superficie trasparente esterna totale (m <sup>2</sup> )
178	484	730	103



Figura 8 Planimetria del piano tipo dell'edificio uso uffici

Tabella 5 Dati dimensionali dell'edificio uso uffici

Superficie utile per piano (m <sup>2</sup> )	Volume netto per piano (m <sup>3</sup> )	Superficie opaca esterna totale (m <sup>2</sup> )	Superficie trasparente esterna totale (m <sup>2</sup> )
826	247	1810	287

Tabella 6 Valori di riferimento

T Set point invernale (°C)	T Set point estivo (°C)	Umidità Relativa estiva (%)	Ventilazione naturale (1/hr)	Apporti Interni Uffici (kJ/hr)
20	26	55	0.5	126

Tabella 7 Caratteristiche termo-fisiche dell'involucro degli edifici: non isolato e isolato

Componente	Trasmittanza (W/m <sup>2</sup> K)	Resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	Capacità termica (MJ/K)
Parete verticale	1.66	0.60	37.3
Copertura	0.95	1.05	18.8
Solaio basamento	1.20	0.83	13.9
ZONA B Parete verticale isolata	0.40	2.50	37.3
ZONA B Copertura isolata	0.32	3.12	18.8
ZONA B Solaio basamento isolato	0.42	2.38	13.9
ZONA D Parete verticale isolata	0.32	3.12	37.3
ZONA D Copertura isolata	0.26	3.85	18.8
ZONA D Solaio basamento isolato	0.32	3.12	13.9
ZONA E Parete verticale isolata	0.28	3.58	37.3

Componente	Trasmittanza (W/m <sup>2</sup> K)	Resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	Capacità termica (MJ/K)
ZONA E Copertura isolata	0.25	4.00	18.8
ZONA E Solaio basamento isolato	0.28	3.58	13.9

### 7.2.2 Il modello di calcolo

Il calcolo della risposta termica ed energetica degli edifici è stato eseguito con TRNSYS 18-2017, ben noto e validato nella comunità scientifica per analisi in regime transitorio. Il modello di calcolo consiste nella costruzione di un progetto che necessita dell'implementazione di componenti (types) ognuna con specifiche funzioni di calcolo e tra di loro interconnesse per lo scambio di input finalizzati a descrivere l'intero sistema e a produrre i risultati di calcolo richiesti (Figura 9).

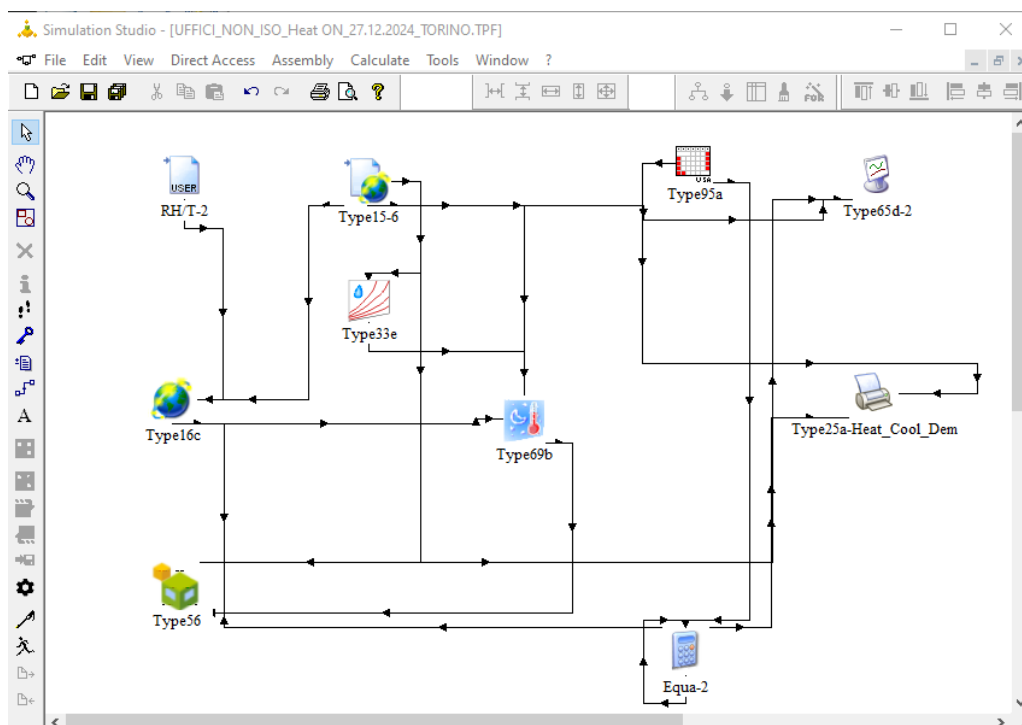


Figura 9 Modello di calcolo implementato in TRNSYS Simulation Studio

Le prestazioni richieste sono state calcolate in relazione alle seguenti varianti:

- n. 2 Edifici di riferimento: residenze, uffici;
- n. 2 Configurazioni: non isolato e isolato;
- n. 3 località: Torino, Roma, Palermo;
- n. 3 condizioni operative (edificio con impianto di climatizzazione invernale ed estiva, e in libera fluttuazione termica estiva)
- n.2 configurazioni base di chiusure trasparenti: Vetrocamera 1 (convenzionale) e 2 (basso-emissivo);
- n. 4 pellicole: n.2, 7, 11, 14.
- n. 2 vetri elettrocromici (ossia un vetro elettrocromico in due stati)
- n. 2 rivestimenti termocromici in copertura

Per valutare l'efficacia dell'impatto dell'utilizzo delle pellicole come resistenza termica aggiuntiva sulle prestazioni invernali si è impostata la loro attivazione durante le ore notturne; la pellicola 11 è stata simulata per controllo solare e quindi con attivazione diurna

(Tabella 8); nelle restanti ore è in essere il solo vetrocamera. Per le caratteristiche dei vetrocamera (VC) e delle pellicole si rimanda al report di LA.1.8

Tabella 8 Schema di attivazione schermi

Attivazione	Componente	Attivazione	Componente
20:00 – 08:00	Vetrocamera 1 Pellicola2	20:00 – 08:00	Vetrocamera 2 Pellicola2
20:00 – 08:00	Vetrocamera 1 Pellicola7	20:00 – 08:00	Vetrocamera 2 Pellicola7
20:00 – 08:00	Vetrocamera 1 Pellicola11	20:00 – 08:00	Vetrocamera 2 Pellicola11
08:00 – 20:00	Vetrocamera 1 Pellicola11	08:00 – 20:00	Vetrocamera 2 Pellicola11
20:00 – 08:00	Vetrocamera 1 Pellicola14	20:00 – 08:00	Vetrocamera 2 Pellicola14

Per l'applicazione di rivestimenti termocromici si fa riferimento al campione nero di LA1.8: riflettanza solare 0.68 nello stato chiaro e 0.4 (nero con pigmenti freddi) o 0.05 (nero convenzionale) nello stato scuro, come da schema in Tabella 9 e Tabella 10. Un sistema di equazioni lineari è stato implementato per gestire la transizione cromatica tra 20 e 40°C.

Tabella 9 Rivestimento termocromico: comportamento Caso 1

Temperatura superficiale (°C)	$\rho$ (-)
$T_{sup} < 20$ °C	0.40
$20^{\circ}\text{C} < T_{sup} < 40^{\circ}\text{C}$	0.40 – 0.68
$T_{sup} > 40$ °C	0.68

Tabella 10 Rivestimento termocromico: comportamento Caso 2

Temperatura superficiale (°C)	$\rho$ (-)
$T_{sup} < 20$ °C	0.05
$20^{\circ}\text{C} < T_{sup} < 40^{\circ}\text{C}$	0.05 – 0.68
$T_{sup} > 40$ °C	0.68

T

Infine i vetri elettrocromici dual-band sono stati analizzati considerando una attivazione del materiale rosa con 0V e 2V, come da risultati nella sezione 7.1.2. L'analisi è fatta per il solo edificio a uffici e il vetro elettrocromico è accoppiato a un vetro chiaro per creare un vetrocamera dinamico da confrontare con un equivalente statico. Il vetro EC si colora per temperatura interna superiore a 24°C e ritorna trasparente per temperature inferiori a 22°C.

### 7.2.3 Analisi dei risultati

L'impatto delle tecnologie selezionate è stato valutato in termini di fabbisogno netto di energia (MWh) riferito all'intero edificio per estate ed inverno, oppure analizzando la temperatura operativa in assenza di impianto estivo. Data la enorme mole di simulazioni e di risultati, se ne presentano alcuni tra i più significativi.

## 7.2.4 Risultati Pellicole schermanti

Risparmi energetici fino a 6.6MWh (Torino) in configurazione non isolata; in estate risparmi fino a 13.4MWh (Palermo) in configurazione isolata per l'edificio residenziale. Nel caso di uffici i risparmi energetici salgono fino a 6.6MWh (Torino non isolato) e 8% in inverno in configurazione non isolata; in estate risparmi fino a 26.6MWh (Palermo) in configurazione.

Tabella 11 Residenze non isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
	Risc.to	Risc.to	Risc.to	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
VC 1	70.2	36.6	14.6	5.6	9.4	16.5
VC 1 Pellicola2	67.9	35.1	13.8	5.7	9.6	16.7
VC 1 Pellicola7	66.6	34.3	13.4	5.8	9.7	16.7
VC 1 Pellicola11 notte	67.5	34.9	13.7	5.7	9.6	16.7
VC 1 Pellicola11 giorno	80.4	46.5	22.5	1.5	3.5	7.7
VC 1 Pellicola14	67.9	35.2	13.8	5.7	9.7	16.8
VC 2	66.3	34.6	13.7	4.8	8.2	14.6
VC 2 Pellicola2	66.1	34.7	14.0	4.6	8.0	14.4
VC 2 Pellicola7	65.5	34.3	13.8	4.7	8.1	14.4
VC 2 Pellicola11 notte	66.1	34.7	14.0	4.6	8.0	14.3
VC 2 Pellicola11 giorno	77.0	44.5	21.5	1.3	3.2	7.2
VC 2 Pellicola14	66.1	34.7	14.0	4.7	8.1	14.5

Tabella 12 Residenze isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
	Risc.to	Risc.to	Risc.to	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
VC 1	31.8	13.9	3.9	8.0	12.1	18.1
VC 1 Pellicola2	29.4	12.5	3.3	8.3	12.5	18.3
VC 1 Pellicola7	28.1	11.7	2.9	8.5	12.8	18.5
VC 1 Pellicola11 notte	29.1	12.3	3.2	8.3	12.5	18.3
VC 1 Pellicola11 giorno	33.9	19.0	8.6	1.2	2.4	4.7
VC 1 Pellicola14	29.5	12.5	3.3	8.4	12.6	18.5

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
VC 2	27.8	11.8	3.1	7.1	10.7	15.9
VC 2 Pellicola2	27.5	11.9	3.2	6.8	10.3	15.5
VC 2 Pellicola7	26.8	11.5	3.1	6.9	10.4	15.5
VC 2 Pellicola11 notte	27.4	11.8	3.2	6.8	10.3	15.4
VC 2 Pellicola11 giorno	31.0	17.3	7.7	0.9	2.2	4.6
VC 2 Pellicola14	27.5	11.9	3.2	6.9	10.5	15.6

Tabella 13 Uffici non isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
	Risc.to	Risc.to	Risc.to	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
VC 1	169.5	86.7	33.6	17.1	29.6	49.1
VC 1 Pellicola7	160.4	81.0	31.1	17.9	30.7	50.0
VC 1 Pellicola11 notte	162.9	82.6	32.6	17.6	30.3	30.3
VC 1 Pellicola11 giorno	196.9	111.8	52.2	4.8	11.3	23.3
VC 2	160.2	81.8	31.6	15.0	26.4	44.2
VC 2 Pellicola7	158.1	81.0	31.6	14.7	25.9	43.6
VC 2 Pellicola11 notte	159.5	3 1.9	81.9	14.6	25.7	25.7
VC 2 Pellicola11 giorno	188.7	106.8	49.7	4.5	10.8	22.0

Tabella 14 Uffici isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
	Risc.to	Risc.to	Risc.to	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
VC 1	109.2	55.0	22.2	16.5	28.3	46.3
VC 1 Pellicola7	99.7	49.4	19.6	17.4	29.4	47.3
VC 1 Pellicola11 notte	102.2	50.9	50.9	17.1	29.0	29.0
VC 1 Pellicola11 giorno	137.3	80.4	40.2	4.2	10.0	20.7
VC 2	99.0	49.6	19.7	14.5	25.0	41.3
VC 2 Pellicola7	96.7	48.7	19.6	14.2	24.6	40.7
VC 2 Pellicola11 notte	98.1	49.7	49.7	14.0	24.4	24.4

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
VC 2 Pellicola11 giorno	128.4	75.1	37.5	3.9	9.5	19.4

### 7.2.5 Rivestimenti termocromici

I materiali termocromici nelle residenze non isolate (Tabella 15) non offrono vantaggi significativi a Torino e Roma (risparmi di energia totale, ossia somma di climatizzazione estiva e invernale, tra 1 e 4%), a Palermo si assestano intorno al 5%. Si noti che, riferendosi ai soli due appartamenti al piano sottotetto, quello direttamente interessato dal rivestimento termocromico, i risparmi annuali sono mediamente di 2.5, 4 e 7kW/m<sup>2</sup> anno andando da nord a sud. L'impatto è decisamente maggiore nel caso di residenze isolate (Tabella 16), in particolare considerando lo switch teorico di un materiale con assorbimento da 0.95 a 0.32. In questo caso i risparmi dell'edificio vanno dal 2% a Torino a 5% a Roma e 12% a Palermo. In termini di consumi specifici dell'ultimo piano, si hanno risparmi tra 10 e 20kWh/m<sup>2</sup> anno. Alla luce dei risultati precedenti, si è deciso di presentare i dati dell'edificio per uffici limitandoli al caso non isolato (Tabella 17), in quanto più significativo. I risparmi complessivi a Torino raggiungono il 4% con il rivestimento teorico ad elevato switching. A Roma i risparmi sono tra 5 e 10% per entrambe le soluzioni dinamiche, mentre a Palermo i risparmi sono nel range 12-17%. Con riferimento ai consumi specifici del piano superiore i risparmi specifici da nord a sud hanno valori massimi di 10, 14 e 20kWh/m<sup>2</sup> per anno.

Tabella 15 Residenze non isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
	Risc.to	Risc.to	Risc.to	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
$\alpha = 0.95$	73.1	38.6	15.2	5.3	9.3	16.4
$\alpha = 0.8$	73.7	39.1	15.6	4.9	8.6	15.5
$\alpha = 0.6 - 0.32$	74.5	39.9	16.2	3.7	6.7	12.6
$\alpha = 0.95 - 0.32$	73.1	38.6	15.2	3.7	6.7	12.6

Tabella 16 Residenze isolate: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
	Risc.to	Risc.to	Risc.to	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
$\alpha = 0.95$	33.9	14,8	3,7	8	12.5	18.9
$\alpha = 0.8$	33.9	15	3,8	8	12.2	18.5
$\alpha = 0.6 - 0.32$	34	15,1	3,8	7.5	11.5	17.4
$\alpha = 0.95 - 0.32$	33.9	14,8	3,7	7.5	11.5	17.4

Tabella 17 Uffici non isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo	Torino	Roma	Palermo
	Risc.to	Risc.to	Risc.to	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
$\alpha = 0.95$	163.9	78.5	27.1	21.5	38.6	65.5
$\alpha = 0.8$	166.3	80.4	28.3	19.6	35.5	61.6
$\alpha = 0.6 - 0.32$	169.5	83.2	30.1	13.9	26.5	49.2
$\alpha = 0.95 - 0.32$	163.9	78.5	27.1	13.9	26.5	49.2

### 7.2.6 Vetri Elettrocromici

I vetri EC, agendo sulla trasmissione solare, offrono vantaggi durante la stagione estiva, soprattutto in edifici non residenziali. I risparmi relativi sono circa 30-40%, quelli assoluti arrivano a 21.1MWh.

Tabella 18 Uffici non isolati: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento

Componente	Torino	Roma	Palermo
	Raffr.to	Raffr.to	Raffr.to
VC 1	21.8	39.5	68.4
VC EC	13.4	25.8	47.3

### 7.2.7 Simulazioni a impianti spenti

Nel caso di residenze non isolate, si è verificato che la pellicola 11 integrata nella vetrata abbassa la temperatura operativa media di circa 4.5°C nelle tre città, riducendo le ore con temperatura superiore a 30°C del 75% a Palermo o annullandole a Roma e Torino.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state necessarie consulenze per lo sviluppo delle attività previste.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Castaldo A., Gambale E., Vitiello G., Zinzi M. Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC): the nanohybrid approach (2024) EPJ Web of Conferences, 309, art. no. 13006, DOI: 10.1051/epjconf/202430913006

Zani A., Speroni A., Mainini A.G., Zinzi M., Caldas L., Poli T. Customized shading solutions for complex building façades: the potential of an innovative cement-textile composite material through a performance-based generative design (2024) Construction Innovation, 24 (1), pp. 256 - 279, DOI: 10.1108/CI-01-2023-0014

Badino E., Autretto G., Fantucci S., Serra V., Zinzi M. Development of testing procedures for assessing the thermal and optical performance of thermochromic coatings for buildings (2023) Solar Energy, 263, art. no. 111950 DOI: 10.1016/j.solener.2023.111950

Zinzi M., Romeo C., Agnoli S., Papaiz L., On the use of dynamic film to improve the thermal and solar performance of multiple glazing units. Preliminary testing and assessment. *Sottomesso a Energy Reports, Elsevier (IF 4.8), ricevuta la review and in fase di sottomissione la versione rivista dell'articolo.*

## 10 Eventi di disseminazione

Partecipazione a 19<sup>th</sup> Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), tenutasi a Roma nel settembre 2023. Nell'ambito della conferenza è stato presentato l'articolo: On the use of dynamic film to improve the thermal and solar performance of multiple glazing units. Preliminary testing and assessment.

Organizzazione della FOCUSED SESSION del Convegno internazionale della società ottica europea (EOSAM 2024) sul passive radiative cooling, in occasione del cinquantenario della scoperta. NAPOLI, giugno 2024.

"Il tetto freddo" Emilia Gambale, Giuseppe Vitiello, Anna Castaldo. Attività formative per studenti delle scuole superiori nell'ambito di Festival delle Scienze di Genova 2024.

Intervista radiofonica per il programma di Maurizio Melis "Smart city" sul FRIGORIFERO SOLARE, Dicembre 2024

Partecipazione in qualità di delegato nazionale al 93.mo Executive Committee Meeting del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Pechino, Cina, ottobre 2023

Partecipazione on-line in qualità di delegato nazionale al 94.mo Executive Committee Meeting del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Utrecht, Paesi bassi, giugno 2024

Partecipazione in qualità di delegato nazionale al 95.mo Executive Committee Meeting del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Melbourne, Australia, novembre 2024 (online)

Partecipazione in qualità di membro nazionale del board al 91.mo meeting di IEA AIVC – Air Infiltration and Ventilation Centre, Singapore, Singapore, aprile 2024 (online)

Partecipazione in qualità di membro nazionale del board al 92.mo meeting di IEA AIVC – Air Infiltration and Ventilation Centre, Dublino, Irlanda, ottobre 2024 (online)

Partecipazione al meeting dell'Annex Annex 90 Low Carbon, High Comfort Integrated Lighting del Programma IEA – Energy in Building and Communities, Berkeley, California, USA aprile 2024