



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione sperimentale e numerica di aerogel trasparenti monolitici per applicazioni in edilizia commerciale

E. Moretti, C. Buratti, E. Belloni, F. Merli, M. Zinzi



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE E NUMERICA DI AEROGEL TRASPARENTI MONOLITICI PER APPLICAZIONI IN EDILIZIA COMMERCIALE

E. Moretti, C. Buratti, E. Belloni, F. Merli (Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria)
M. Zinzi (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: Soluzioni tecnologiche orientate alla gestione energetica degli edifici ad uso uffici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Caratterizzazione sperimentale e numerica di aerogel trasparenti monolitici per applicazioni in edilizia commerciale”*

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria: Elisa Moretti

Indice

SOMMARIO.....	4
1. INTRODUZIONE.....	5
2. VETRATE CON AEROGEL MONOLITICO: STATO DELL'ARTE.....	6
3. DESCRIZIONE DEL CAMPIONE ESAMINATO	10
4. STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA DI ANALISI	11
4.1. CARATTERIZZAZIONE OTTICA	11
Elaborazione dei dati e calcolo della resa cromatica	12
4.2. CARATTERIZZAZIONE TERMICA.....	13
4.3. ANALISI NUMERICA.....	14
5. RISULTATI	17
5.1. PRESTAZIONI OTTICHE	17
5.2. PRESTAZIONI TERMICHE	20
5.3. STIMA DEL FATTORE SOLARE	22
5.4. CONFRONTO CON SOLUZIONI CONVENZIONALI E CON VETRATE CON AEROGEL GRANULARE	25
6. PRESTAZIONI ENERGETICHE PER IL CASO DI STUDIO.....	27
7. CONCLUSIONI.....	30
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	32
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	34
APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	35

Sommario

Tra le soluzioni avanzate più promettenti per l'involucro trasparente, si annoverano i sistemi con aerogel in intercapedine, una sostanza nanoporosa dalle eccellenti proprietà termiche (conducibilità termica a temperatura ambiente tipicamente nel range 0.010 – 0.020 W/mK). Nella forma granulare l'aerogel ha la caratteristica di essere traslucido a causa dello scattering della luce, mentre nella forma monolitica, pur risentendo degli effetti di diffusione della luce, risulta trasparente, pertanto rappresenta un materiale particolarmente promettente nel campo degli edifici NZEB. Tuttavia, a oggi, sistemi vetrati con aerogel monolitico non sono commercializzati, poiché non è ancora possibile ottenere lastre di grandi dimensioni omogenee e resistenti a costi ragionevoli.

Al fine di valutare le prestazioni di tali soluzioni allo stato attuale, è stato realizzato un prototipo di vetrocamera innovativa con lastre di tipo float e aerogel monolitico in intercapedine di spessore pari a 15 mm (AER-DGU). L'aerogel monolitico impiegato per il campione è realizzato per mezzo di un processo di estrazione rapida in condizioni supercritiche, un metodo innovativo che dovrebbe consentire una riduzione significativa dei tempi di produzione e dei costi, fattori indispensabili per una diffusione di tali tecnologie negli edifici su vasta scala.

L'accurata campagna sperimentale effettuata sul prototipo e l'analisi numerica hanno quindi permesso di valutare le prestazioni ottiche, termiche ed energetiche allo stato attuale e di evidenziare le prospettive di sviluppo future di nuove soluzioni per l'edilizia non residenziale con aerogel monolitico in intercapedine.

La presenza di 15 mm di aerogel monolitico permette di avere una trasmittanza termica (U) di 1.0 W/m²K (valore in condizioni invernali, temperatura media del campione pari a 10°C), una trasmissione luminosa (τ_v) di 0.69, un fattore solare (g) elevato (0.70) e un'ottima resa cromatica ($R_g=96$). La soluzione investigata potrebbe fornire risultati più interessanti se si considerasse la prospettiva futura, a oggi in corso di studio, di una vetrocamera con aerogel in condizioni evacuate, che permetterebbe di raggiungere una trasmittanza termica di 0.6 W/m²K, con uno spessore complessivo della vetrata di circa 25 mm. Allo stesso tempo si prevede, nel medio termine, un miglioramento delle proprietà di trasparenza dei sistemi con aerogel monolitico: il campione oggetto di studio, assemblato mediante l'unione di diverse lastre prodotte con un procedimento innovativo di estrazione rapida, presenta infatti alcune imperfezioni superficiali che hanno penalizzato le prestazioni ottiche complessive.

Il confronto con le soluzioni convenzionali (vetrocamera con lastra basso-emissiva) ha evidenziato che la soluzione investigata presenta prestazioni termiche di poco superiori, con una riduzione modesta di trasmissione luminosa (-9%), ma allo stesso tempo il guadagno solare si mantiene più alto (+27%), situazione vantaggiosa in condizioni invernali. Le prestazioni misurate sono paragonabili a soluzioni innovative alternative con aerogel granulare in intercapedine, che tuttavia non consentono la visione dell'esterno, essendo traslucide.

Infine, le simulazioni in regime dinamico per un edificio commerciale tipo hanno evidenziato che la nuova soluzione investigata comporta una riduzione significativa della richiesta per il riscaldamento rispetto a una vetrocamera con basso-emissivo, dell'ordine del 5% per Helsinki, dell'8% per Parigi e del 10% per Torino, considerando il rapporto superficie vetrata/superficie totale della facciata (WWR) inferiore. Il risparmio aumenta con la radiazione solare incidente nella località, a causa dell'elevato fattore solare di AER-DGU, rendendo quindi la soluzione particolarmente promettente per le località con clima moderato, quali ad esempio Torino. Tuttavia, come prevedibile, si osserva un incremento dei fabbisogni per il raffrescamento, che varia con la località considerata e con il WWR dell'edificio considerato (5% per Torino, WWR minimo). L'impatto sui fabbisogni energetici per l'illuminazione è invece trascurabile.

1. Introduzione

Le recenti disposizioni normative, su scala sia nazionale sia internazionale, impongono parametri prestazionali per l'involucro sempre più restrittivi, al fine di limitare le dispersioni termiche e ridurre i consumi energetici per il condizionamento degli edifici, indirizzandosi verso il traguardo degli Edifici a Energia Quasi Zero (NZEB). Per tali ragioni, si assiste a un sempre maggiore interesse nella ricerca di soluzioni all'avanguardia per la parte trasparente dell'involucro edilizio; tipicamente, essa rappresenta il punto debole dell'edificio, soprattutto degli edifici commerciali o destinati a uffici, caratterizzati da ampie vetrate finalizzate a migliorare il comfort visivo grazie alla presenza della luce naturale e a creare soluzioni sempre più accattivanti dal punto di vista estetico.

Ad oggi, tra le soluzioni avanzate più promettenti, si annoverano i sistemi con aerogel in intercapedine. L'aerogel è una sostanza solida nanoporosa (diametro medio dei pori dell'ordine di 20 nm) caratterizzata dal 96-99% di aria e dal 2-4% di silice. Sintetizzato a partire da varie sostanze quali silice, carbonio e allumina, anche se l'aerogel di silice è decisamente il più diffuso, si configura come un materiale solido dalle proprietà uniche, paragonabili a quelle di un gas: è caratterizzato dalla minor densità al mondo (50-200 kg/m³, mille volte meno denso del comune vetro) e da una conducibilità termica inferiore a quella dell'aria (tipicamente nel range 0.010 – 0.020 W/mK). Tali proprietà chimico-fisiche lo rendono particolarmente appetibile nel campo dell'edilizia, poiché può garantire ottime proprietà di isolamento termico ed acustico, combinate con una buona capacità di trasmissione della luce naturale. Nella forma granulare ha la caratteristica di essere traslucido, a causa dello scattering della luce, mentre quello monolitico, pur risentendo degli effetti di diffusione della luce, mantiene la caratteristica di trasparenza. L'unione tra l'elevata resistenza termica, la buona trasmissione luminosa e la trasparenza rendono quindi l'aerogel monolitico un materiale particolarmente promettente nel campo degli edifici NZEB. Tuttavia, ad oggi, non sono commercializzati sistemi vetriati, a causa di problematiche connesse al processo produttivo che non permettono di avere lastre di grandi dimensioni omogenee e resistenti a costi ragionevoli, mentre alcuni prototipi sono stati realizzati per scopi di ricerca. L'aerogel granulare, invece, è attualmente integrato in diverse tipologie di sistemi trasparenti disponibili sul mercato, quali quelli con struttura di contenimento multicamera in policarbonato o sistemi vetriati isolanti a elevate prestazioni termiche.

In tale contesto si inserisce la presente attività di ricerca, che ha per oggetto la valutazione delle prestazioni ottiche, termiche ed energetiche di soluzioni vetrate avanzate per l'edilizia non residenziale con aerogel monolitico in intercapedine. Al fine di valutare le prestazioni di tali soluzioni allo stato attuale e le prospettive di sviluppo nel medio termine di tali tecnologie, è stato realizzato un prototipo di vetrocamera innovativa con lastre di tipo float e aerogel monolitico in intercapedine, con uno spessore in linea con quelli delle intercapedini comunemente impiegate in edilizia (15 mm). Viste le problematiche attuali legate alla produzione dell'aerogel monolitico e ai costi, a oggi ancora molto elevati, la scelta del campione si è indirizzata verso una lastra di aerogel monolitico realizzata con un metodo innovativo, che dovrebbe consentire una riduzione significativa dei tempi di produzione e quindi dei costi: un processo di estrazione rapida in condizioni supercritiche.

La caratterizzazione ottica della vetrata innovativa è stata effettuata presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia con uno spettrofotometro commerciale a doppio raggio e, vista la natura del materiale, le misure hanno previsto anche l'impiego dello spettrofotometro non convenzionale disponibile presso il Centro di Ricerca ENEA Casaccia, anche al fine di valutare il decadimento angolare (a 30°) delle proprietà di trasmissione luminosa e solare. Le misure sono state elaborate ai sensi della normativa tecnica di riferimento (UNI EN 410), al fine di stimare i parametri prestazionali più significativi, quali il fattore di trasmissione visibile e il fattore di trasmissione solare diretta. È stato inoltre stimato, mediante un metodo approssimato, il fattore solare g. Infine, è stato valutato l'indice generale di resa cromatica R_a, che esprime l'attitudine di una sorgente a rendere i colori degli oggetti che illumina; esso permette una valutazione qualitativa della radiazione luminosa che attraversa la superficie vetrata e quindi del comfort visivo all'interno dell'ambiente confinato.

Le prestazioni termiche del prototipo sono state misurate impiegando un apparato strumentale denominato Small Hot Box, un sistema originale ideato, costruito e messo a punto presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia.

L'accurata caratterizzazione sperimentale ottica e termica della vetrocamera innovativa ha permesso di disporre di dati sperimentali da utilizzare in simulazioni dinamiche delle prestazioni termoenergetiche degli edifici. Le simulazioni sono state effettuate considerando un caso di studio relativo all'edilizia non residenziale, in diverse condizioni climatiche. È stato quindi valutato l'impatto dell'aerogel monolitico sull'edificio in termini di variazione della richiesta energetica per il riscaldamento, per il raffrescamento e per l'illuminazione artificiale rispetto a soluzioni convenzionali. Infine, per lo stesso edificio, le simulazioni sono state ripetute considerando diversi valori del Window to Wall Ratio (WWR).

Nel presente documento, dopo una breve descrizione dello stato dell'arte sulle soluzioni a base di aerogel monolitico, sono illustrati il campione oggetto di studio, la metodologia di analisi e i principali risultati delle misure e delle simulazioni.

2. Vetrate con aerogel monolitico: stato dell'arte

I primi pannelli di aerogel monolitico trasparente sono stati sviluppati 20 - 30 anni fa in Svezia da Airglass AB, tuttavia questi sistemi non sono ancora entrati sul mercato e solo alcuni prototipi sono stati prodotti da laboratori a scopo di ricerca (Japan Fine Ceramics Center, Aerogel Technologies, Gyroscope, Guangdong Alison Aerogel e Surnano Aerogel Inc) [1]. Risulta ancora difficile produrre grandi lastre caratterizzate da buone proprietà di trasparenza, al massimo si sono raggiunte dimensioni di 60 x 60 cm.

Le fasi di produzione del materiale sono essenzialmente tre:

1. formazione del gel a partire da silicato di sodio, TMOS (tetrametilortosilicato) o TEOS (tetraetilortosilicato);
2. formazione della struttura solida in condizioni supercritiche (sol-gel Process);
3. essiccazione del gel ed estrazione del solvente dall'alcolgel.

La prima fase di preparazione del gel può avvenire in presenza di catalizzatori acidi o basici: in ambiente basico si raggiungono migliori livelli di trasparenza e l'aerogel ottenuto è meno fragile. Alla fine della seconda fase si ha un alcolgel, che presenta una struttura solida costituita da catene di silice i cui pori, di pochi nanometri di dimensione, sono riempiti dal solvente in fase liquida. Nell'ultimo step si estrae il solvente dall'alcolgel. La fase di essiccazione del materiale è considerata quella critica, poiché ha un maggiore impatto in termini di consumi ed è anche quella in cui la struttura del materiale tende a collassare. Esistono ad oggi due metodi principali: essiccazione a pressione ambiente e asciugatura in condizioni supercritiche. In condizioni supercritiche il processo avviene in autoclave: l'alcol viene sostituito dalla CO₂ a bassa temperatura che a sua volta viene sottratta al gel in condizioni supercritiche, ottenendo così aerogel. È in quest'ultima fase che si conferisce leggerezza ed ottime proprietà di isolamento termico al materiale. È stato valutato come variano le proprietà finali dell'aerogel al variare delle condizioni del processo di estrazione supercritica (RSCE) [2]: variando la quantità di TMOS nel gel (da 10 a 15 ml), la massima temperatura raggiunta nel processo (da 288 a 371°C) e la pressione applicata (da 0.23 a 0.66 MPa/min), si ottiene aerogel monolitico con buone proprietà di trasparenza in tutti i range (τ_v pari a 70% a 800 nm per campioni spessi 5 mm). In particolare è la temperatura massima l'unica variabile che ha un effetto significativo sulle prestazioni dell'aerogel: all'aumentare di essa la superficie specifica diminuisce da 560 a 395 m²/g.

Il processo di essiccazione in condizioni supercritiche può richiedere anche alcuni giorni. È per questo motivo che oggi si stanno sviluppando dei sistemi alternativi, come quello sperimentato dallo Union College di Schenectady (New York, United States) dove viene impiegato un metodo di estrazione rapida in condizioni supercritiche mediante una piastra a caldo: in questo caso i tempi si riducono notevolmente (6.5 ore) e la quantità di residui di solvente ottenuta dalla lavorazione è molto inferiore [3,4]. Rispetto ad un processo di realizzazione tradizionale, quello di estrazione rapida può ridurre notevolmente i tempi di produzione dell'aerogel monolitico e di conseguenza i costi del processo. L'aerogel monolitico ottenuto

(dimensioni massime di 14 x 14 x 1.27 cm) ha buone proprietà ottiche nella porzione rossa dello spettro del visibile ($\tau_v > 80\%$); dal punto di vista termico si sono misurati valori di resistenza termica di doppi vetri con aerogel monolitico inserito in condizioni evacuate di 1.21 – 1.55 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$). In particolare, se inserito in un sistema con doppia lastra in polycarbonato da 22 mm totali di spessore (aerogel da 12.7 mm) si ottengono valori di resistenza di 0.86 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) a pressione ambiente e 1.55 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) in condizioni evacuate che corrispondono, rispettivamente, ad una trasmittanza di 1.16 e 0.65 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Guoqing Zu e altri autori hanno valutato le proprietà di un aerogel monolitico a base di allumina preparato con il metodo sol-gel combinato con l'essiccazione supercritica: si sono misurati valori di conducibilità termica di 0.028 $\text{W}/(\text{mK})$ ad una temperatura media di 30°C [5].

Anche Duer e Svendsen [6] hanno realizzato nel 1198 un prototipo di dimensioni di 45 x 45 cm, in condizioni evacuate, interposto tra due lastre di vetro. È stato misurato un valore di conducibilità termica di 0.010 W/mK a temperatura ambiente (spessore aerogel 15 ± 1 mm). La trasmissione solare è maggiore del 75% e la trasmittanza termica è dell'ordine di grandezza delle più performanti vetrate triple ($U < 0.6$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) [7]. Da questo studio è risultato che il contributo della luce diffusa è significativo e questo comporta una distorsione dell'immagine.

Per quanto riguarda le proprietà ottiche è stato misurato un coefficiente di trasmissione solare di 0.88 e un coefficiente di trasmissione luminosa di un pannello di 10 mm di aerogel monolitico abbastanza elevato (dello stesso ordine di grandezza di un vetro float da 6 mm). Tuttavia la qualità dell'immagine attraverso il materiale non è molto elevata; la radiazione viene dispersa secondo la teoria di Rayleigh ed è stato osservato che il colore della luce trasmessa tende al rosso [6-13]. In generale le proprietà ottiche dell'aerogel monolitico sono fortemente dipendenti dal processo produttivo e la trasparenza è notevolmente migliorata negli ultimi anni (Figura 1).



Figura 1. Effetto della visione attraverso l'aerogel monolitico a confronto con un vetro trasparente [1].

Da alcuni studi e misure effettuati qualche anno fa [12,13] è emerso che, rispetto a un doppio vetro standard basso-emissivo, una vetrata doppia con aerogel monolitico in intercapedine consente una riduzione del 55% delle perdite di calore e un 25% nella trasmissione luminosa; al contrario, le finestre con aerogel granulare hanno mostrato una riduzione del 25% in termini di dispersione termica e un 66% in termini di trasmissione luminosa. Inoltre l'indice di resa cromatica R_a stimato è inferiore rispetto a quello di una vetrata doppia con aria in intercapedine ($R_a = 98$): si arriva ad un valore di 92 per una vetrata con aerogel monolitico di circa 14 mm di spessore.

Un altro studio ha analizzato le proprietà di diversi aerogel monolitici a base di polietossidi silossani: la resistenza meccanica misurata varia tra 500 kPa e 4.2 MPa per una conducibilità termica variabile tra 0.0135 e 0.0245 $\text{W}/(\text{mK})$, per densità via via crescenti [14].

Studi più recenti hanno implementato dei modelli di calcolo per valutare l'efficacia dell'impiego di aerogel monolitico per la ristrutturazione di edifici ampiamente vetrati.

L'influenza di finestre con aerogel monolitico sul consumo di energia per il riscaldamento invernale è stata valutata attraverso simulazioni per una tipica casa unifamiliare in Danimarca [15]. Si è presa in considerazione una finestra con uno spessore di aerogel di 20 mm, con un valore di U medio di 0.5 W/(m² K) e un valore di g pari a 0.75; i risultati sono stati confrontati con un vetro triplo con argon e due rivestimenti basso emissivi (U = 0.6 W/(m² K) e g = 0.46). Il risparmio energetico annuo con vetri a base di aerogel è di circa 1200 kWh/anno, corrispondente al 19% in meno dell'energia necessaria con la tripla vetrata (domanda di riscaldamento pari a 5040 kWh/anno per l'aerogel, 6220 kWh/anno per la tripla vetrata). Tuttavia nei climi caldi l'aumento dei fabbisogni, a causa del maggior fattore solare, diminuisce il vantaggio dei vetri con aerogel monolitico e in alcuni casi potrebbe essere ottenuto un consumo energetico globale più alto durante l'anno.

Lo stesso comportamento è stato evidenziato da Buratti et al. in uno studio di valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio multifunzionale in diverse città del mondo (Roma, Ottawa, Londra, Mosca, Helsinki e Pechino) al variare della tipologia della superficie vetrata [16-22]. Le vetrature con pannelli di aerogel monolitico in intercapedine sono le più efficienti in climi freddi con una diminuzione della domanda energetica annua dell'edificio di circa un 30% rispetto a vetri doppi tradizionali (Ottawa) (Figura 2). Di contro, a causa di un fattore solare g abbastanza elevato, la domanda per il raffrescamento estivo tende ad aumentare, soprattutto in climi medio-temperati (Roma, Londra).

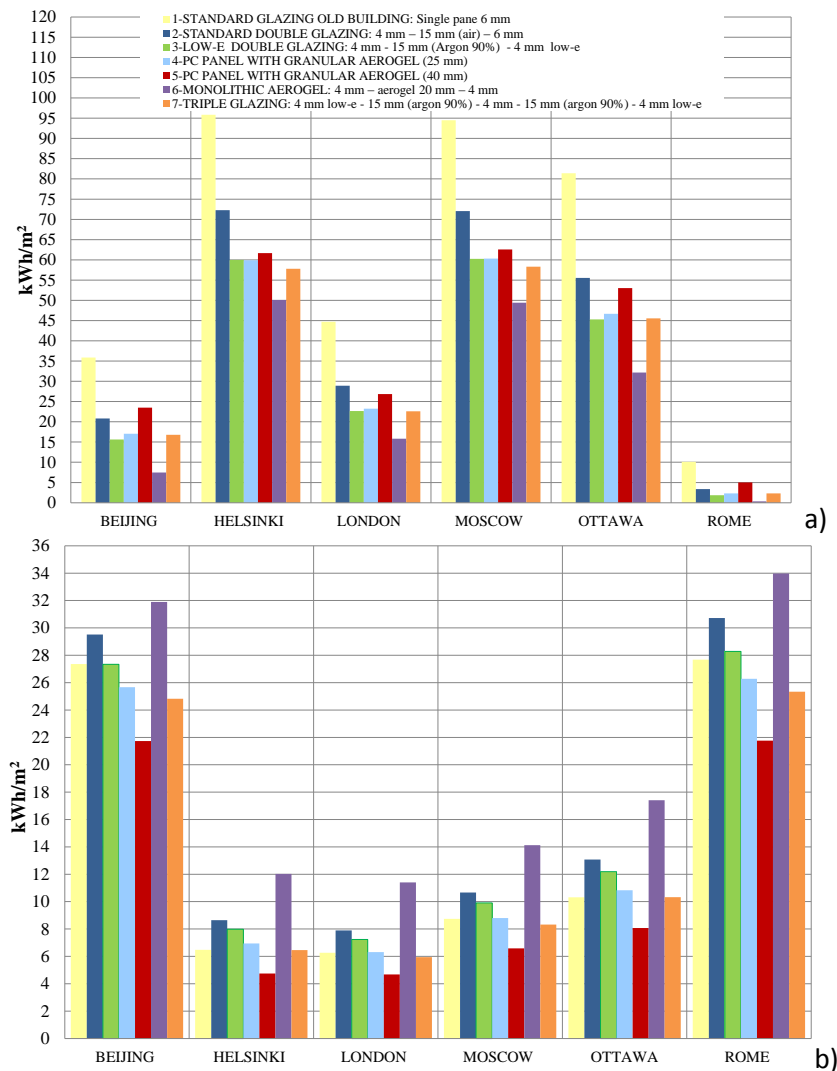


Figura 2. Domanda energetica annua per il riscaldamento invernale (a) e per il raffrescamento estivo (b) per 6 diverse città del mondo e per 7 differenti tipologie di sistemi vetrati [16].

Anche Berardi ha analizzato in uno di studio di riqualificazione energetica di un complesso universitario in Massachusetts l'effetto della sostituzione di vetrate con aerogel monolitico al posto di quelle tradizionali [1,23]. Lo studio si è concentrato sull'analisi energetica e sull'illuminazione attraverso tipiche finestre stile inglese costituite da 25 singoli pannelli in vetro, ciascuno con dimensioni di 40 x 30 cm. I risultati hanno dimostrato che la combinazione di vetrate convenzionali e vetri con aerogel potrebbe essere una soluzione adeguata: sono state considerate quattro configurazioni con sostituzione delle superfici vetrate via via crescenti (40%, 60%, 80% e 100% mostrate in Figura 3a) e si è osservata una diminuzione lineare della domanda per il riscaldamento, mentre quella per il raffrescamento nei mesi estivi è rimasta pressoché stabile con una percentuale di finestre sostituite maggiore del 60% (Figura 3b). Tuttavia, andando a sostituire più del 60% delle finestrate con il sistema ad aerogel monolitico, si ha un'eccessiva riduzione della luce naturale disponibile per gli occupanti, mentre, se si hanno finestre con aerogel pari al 40% del totale, la percentuale di tempo in cui la luce naturale è sufficiente per gli occupanti (UDI – Useful Daylight Index) è accettabile. Si può concludere che un valore del 40% di finestrate con aerogel monolitico potrebbe essere un buon compromesso, perché riduce il consumo di energia migliorando la disponibilità della luce di giorno.

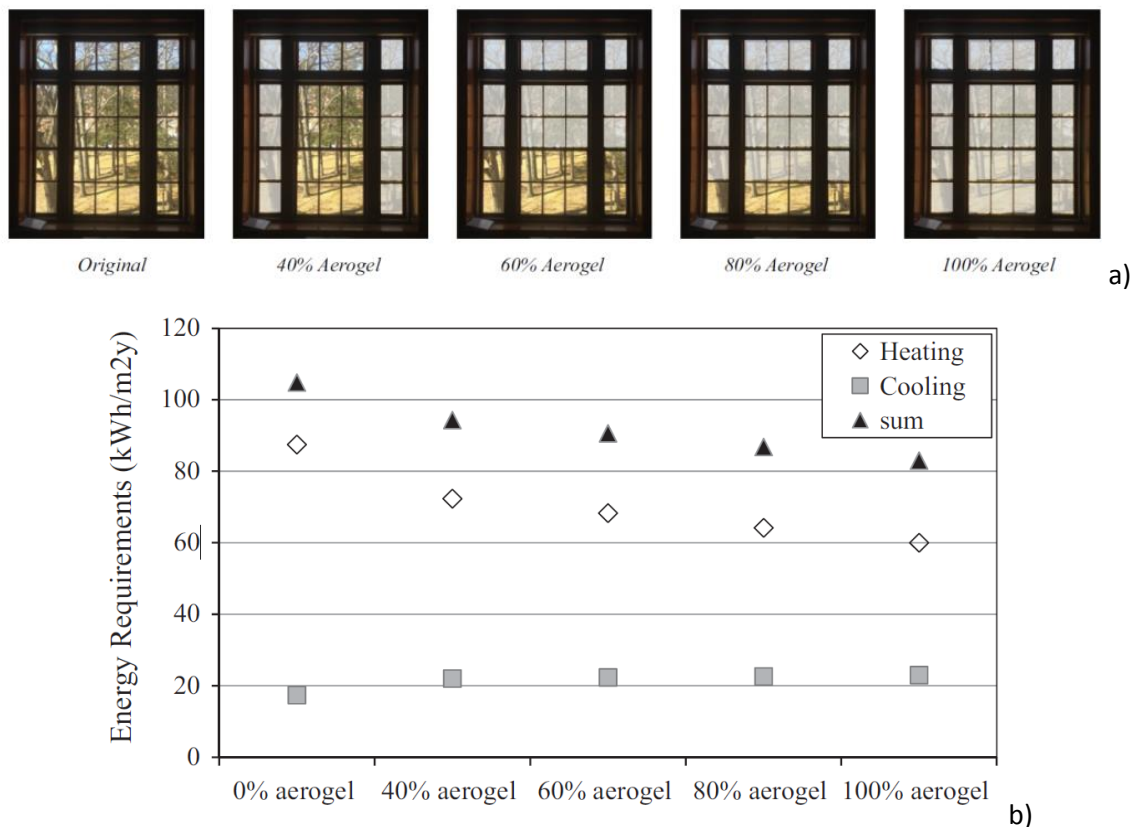


Figura 3. (a) Configurazioni delle finestre stile inglese considerate con diverse percentuali di aerogel monolitico integrate; (b) domanda energetica annua per riscaldamento e raffrescamento per le diverse configurazioni vetrate riportate in (a) [1].

Un altro interessante caso di studio ha per oggetto l'analisi del ciclo di vita di un appartamento vicino Oslo: si sono analizzate tre diverse tipologie di sistemi vetrati installati (una vetrata tripla con argon in intercapedine ($U = 0.79 \text{ W/m}^2\text{K}$), una vetrata doppia con aerogel monolitico ($U = 0.65 \text{ W/m}^2\text{K}$) ed una doppia con granulare ($U = 0.44 \text{ W/m}^2\text{K}$)) [24]. L'edificio in oggetto è stato completamente riqualificato dal punto di vista energetico fino a ottenere una casa passiva. Dai risultati è emerso che entrambe le finestre con aerogel rappresentano una buona soluzione per la riduzione delle emissioni di gas serra, indipendentemente dal rapporto WWR (Window to Wall Ratio) scelto. Aumentando le finestrate con aerogel si abbassano le emissioni da un 5 ad un 9%. Un'analisi di sensibilità mostra che le emissioni di gas a

effetto serra provenienti dalla produzione di aerogel dovrebbero essere almeno 8 volte superiori a quelli ad oggi riscontrati per controbilanciare totalmente i risparmi energetici raggiunti.

3. Descrizione del campione esaminato

Il campione di aerogel monolitico oggetto di studio è stato realizzato per mezzo di un processo di estrazione rapida in condizioni supercritiche mediante l'impiego di una pressa a caldo di tipo industriale presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Chimica dello Union College (Schenectady, New York, United States) [3,4].

Nel laboratorio si sono ottenuti campioni di dimensioni massime pari a 14 x 14 x 1.27 cm mediante un processo di estrazione supercritica di sole 6.5 ore, impiegando una pressa da laboratorio caratterizzata da una forza di 267 kN. Il precursore è composto da una miscela di ortosilicato tetrametile, metanolo, acqua deionizzata e ammoniaca in un rapporto molare di 1: 12: 3.6: 0.0035. La soluzione è poi versata in uno stampo di metallo posto tra due piastre di una pressa idraulica a caldo mantenuta a temperatura controllata. Guarnizioni a due strati posti sopra e sotto lo stampo sono impiegate per garantire una tenuta ad alta pressione. La miscela è sottoposta a quattro cicli di pressatura programmati con diverse temperature e pressioni impostate per un certo periodo. L'intensità della pressione applicata e i cicli di riscaldamento e raffreddamento (temperature e tempi impostati) influenzano la dimensione del campione che si riesce ad ottenere e la qualità dell'aerogel monolitico stesso. Questo processo richiede 6 ore complete, un tempo significativamente inferiore rispetto a quello richiesto per la fabbricazione di aerogel in autoclave mediante il metodo dell'estrazione della CO₂.

Al fine di poter determinare le prestazioni ottiche e termiche dell'aerogel monolitico, è stata assemblata una vetrocamera di dimensioni 30x30 cm costituita da due lastre vetrate float di spessore 3/16" (circa 4.7 mm) e un'intercapedine di 15 mm di aerogel (Figura 4).



Figura 4. Campione di vetrocamera con aerogel monolitico in intercapedine.

Essendo 14 x 14 cm le dimensioni massime dei campioni realizzabili presso il laboratorio dello Union College e dovendo realizzare un campione 30 x 30 cm, si è scelto di assemblare 9 pezzi pressoché quadrati al fine di evitare di avere giunzioni nella zona centrale del campione, in corrispondenza della quale sono

tipicamente posti sensori di varia natura per la caratterizzazione termica e ottica, come sarà descritto nel seguito. Pertanto 9 pezzi (6 dei quali circa 10x12 cm e i restanti 3 circa 6x10 cm) sono stati posizionati nell'intercapedine della vetrocamera; la vetrocamera è stata poi sigillata con silicone.

4. Strumentazione e metodologia di analisi

4.1. Caratterizzazione Ottica

Nel corso del presente lavoro sono state effettuate due distinte campagne di misura volte alla caratterizzazione ottica (trasmissione e riflessione spettrale) del campione assemblato con aerogel monolitico e della sola lastra vetrata float: la prima, presso il laboratorio di Controlli Ambientali del Dipartimento di Ingegneria, utilizzando lo spettrofotometro Shimadzu SolidSpec-3700, la seconda presso il Centro di Ricerca ENEA Casaccia eseguendo le analisi con lo spettrofotometro non convenzionale CA.TRA.M.

Il SolidSpec-3700 (Figura 5), utilizzato per determinare le proprietà di trasmissione spettrale, è caratterizzato da tre differenti rilevatori: un tubo fotomoltiplicatore (PMT) per la banda spettrale UV-VIS, un fotodiode all'arseniuro di gallio e di indio (InGaAs) per la porzione NIR I e un fotodiode al solfuro di piombo (PbS) a bassa temperatura per il NIR II. Ha uno schema ottico a doppio raggio che garantisce una buona riduzione del rumore e costituisce la soluzione migliore per la scansione continua dello spettro. È presente una sfera integratrice, di diametro 6 cm, rivestita in Solfato di Bario e dotata di un'energia sufficiente a eseguire diverse misure nell'intervallo di lunghezze d'onda da 240 nm, nella regione dell'ultravioletto, a 2600 nm, nella regione del vicino infrarosso. La luce è emessa da una delle due lampade presenti: quella al deuterio o quella al tungsteno, per le quali il passaggio dall'una all'altra è automatico in funzione della lunghezza d'onda.



Figura 5. Caratterizzazione ottica: spettrofotometro Shimadzu SolidSpec-3700 (UNIPG).

A causa della complessità geometrica del campione e dei fenomeni di scattering che caratterizzano i materiali irregolari e diffusivi come l'aerogel, è stata condotta una seconda campagna sperimentale presso il Centro di Ricerca ENEA Casaccia tramite uno spettrofotometro non convenzionale (Figura 6) [25-28], il cui componente principale è la sfera integratrice con diametro di 75 cm, realizzata in alluminio con rivestimento interno in Spectralon (perfettamente diffondente).

La sfera è caratterizzata da tre porte, che consentono l'ingresso e l'uscita della radiazione; la sfera è in grado di distribuire equamente, attraverso riflessioni diffuse consecutive, i raggi luminosi incidenti in un punto qualsiasi su tutta la superficie interna, eliminando gli effetti dell'originale direzione della luce. La

Sample Port ha un diametro variabile (10, 15 o 20 cm) e garantisce un'elevata flessibilità del sistema: la scelta della porta è conseguenza delle caratteristiche del campione. Per consentire misure con raggio di incidenza non normale, la sorgente luminosa è montata su un braccio mobile: è possibile spostarsi su tre assi, avendo però il raggio sempre centrato sul campione. Il fascio luminoso (diametro 6 e 12 cm rispettivamente per le prove di trasmissione e riflessione) è originato da due tipi di sorgenti luminose: una lampada ad arco di xenon (potenza di 300 W) per le prove nello spettro visibile e una lampada alogena al tungsteno con potenza di 1000 W, per le prove nel vicino infrarosso. Lo spettrofotometro è dotato di array e di tre detector che consentono di analizzare circa il 98% dello spettro solare, passando automaticamente da un sensore a un altro in corrispondenza di una fissata lunghezza d'onda. Il sistema di rilevamento raccoglie l'energia all'interno della sfera attraverso la *Detector Port*.

Le misure eseguite tramite questa sfera integratrice sono a "singolo raggio": ogni misura richiede sempre due letture da parte del sistema, una sul riferimento e una sul campione in accordo con il tipo di misura.

Le misure sono state effettuate sia sul campione assemblato con aerogel monolitico (AER-DGU) sia sulla sola lastra vetrata di contenimento (FLOAT GLASS): le caratteristiche spettrali della lastra hanno permesso di poter stimare quelle di una vetrocamera identica al prototipo, ma con aria in intercapedine, e il fattore solare del campione complessivo.

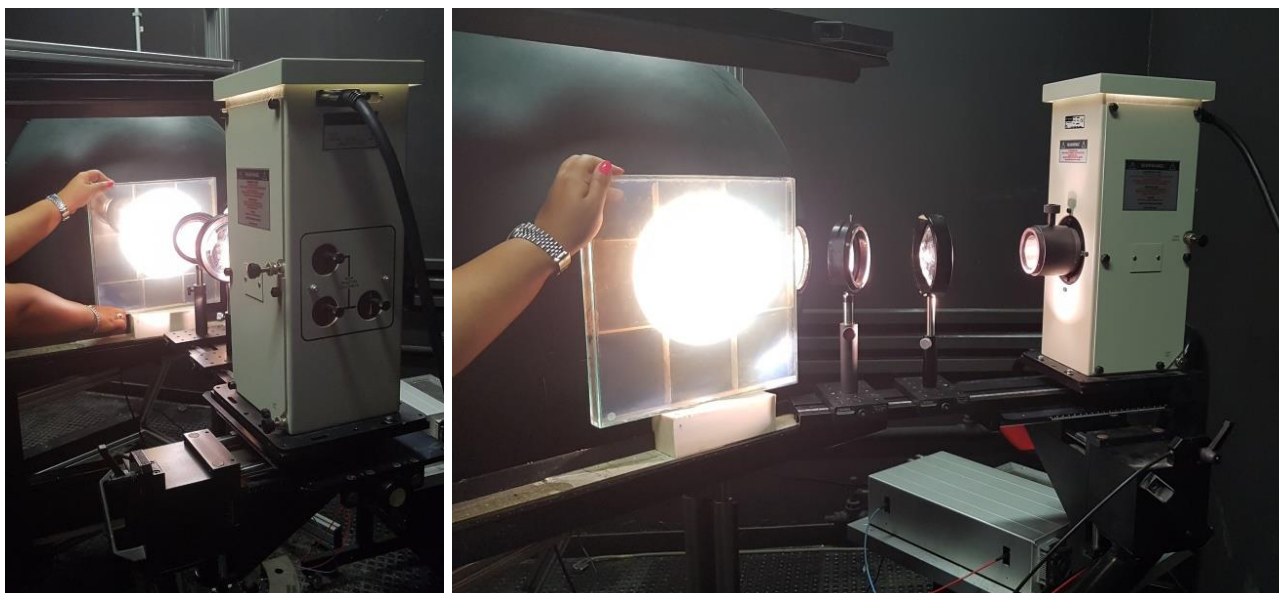


Figura 6. Caratterizzazione ottica: spettrofotometro non convenzionale, CA.TRA.M. (ENEA).

Elaborazione dei dati e calcolo della resa cromatica

Le misure sono state elaborate ai sensi della normativa tecnica di riferimento (UNI EN 410), al fine di stimare i parametri prestazionali più significativi: il fattore di trasmissione visibile (τ_v) e il fattore di trasmissione solare diretta (τ_e), il fattore di riflessione visibile (ρ_v) e il fattore di riflessione solare diretta (ρ_e).

Per i campioni in oggetto è stato calcolato anche l'indice generale di resa cromatica R_a , che permette una valutazione qualitativa della radiazione luminosa che attraversa la superficie vetrata e quindi avere indicazioni sul comfort visivo all'interno dell'ambiente: tale indice rappresenta il grado di corrispondenza fra la percezione cromatica degli oggetti illuminati dalla luce solare (illuminante D_{65}) e quella degli stessi illuminati dalla luce solare trasmessa dall'elemento trasparente. R_a è stato valutato in accordo alla UNI EN 410 [29] a partire dal fattore di trasmissione $\tau(\lambda)$, nell'intervallo di lunghezze d'onda comprese fra 380-780 nm. Questo indice consente di esprimere sinteticamente una valutazione quantitativa della differenza di colore tra 8 colori di prova (colori standard scelti dalla CIE: rosso, giallo, giallo-verde, verde, verde-bluastro, blu-violaceo, violetto, porpora rossastro) illuminati in un primo caso direttamente dall'illuminante di riferimento D_{65} , e poi dallo stesso illuminante trasmesso attraverso la vetrata. Nelle tabelle 4 e 5 della [29]

sono definiti i colori di prova tramite il fattore di riflessione spettrale $\beta(\lambda)$ e la distribuzione relativa di energia spettrale dell'illuminante D_{65} , rispettivamente. La metodologia riportata nella [29] prevede di calcolare:

- le componenti X_t, Y_t, Z_t della luce trasmessa dalla vetrata, dipendenti dalla distribuzione spettrale relativa di energia dell'illuminante D_{65} , dal fattore di trasmissione spettrale della vetrata $\tau(\lambda)$ e dalle componenti tricromatiche spettrali per l'osservatore colorimetrico normalizzato CIE 1931 (tabella 6 della [29]);
- le componenti tricromatiche $X_{t,i}, Y_{t,i}, Z_{t,i}$ della luce trasmessa dalla vetrata e riflessa da ognuno degli otto colori di prova, dipendenti dalla distribuzione spettrale relativa di energia dell'illuminante D_{65} , dal fattore di trasmissione spettrale della vetrata $\tau(\lambda)$, dalle componenti tricromatiche spettrali per l'osservatore colorimetrico normalizzato CIE 1931 (tabella 6 della [29]) e dal fattore di riflessione spettrale di ciascun colore di prova ($\beta(\lambda)$);
- le coordinate tricromatiche nel diagramma colorimetrico uniforme CIE 1960, u_t e v_t per la luce trasmessa in funzione di X_t, Y_t, Z_t mentre $u_{t,i}$ e $v_{t,i}$ per la luce trasmessa e quindi riflessa dal colore di prova i -esimo in funzione di $X_{t,i}, Y_{t,i}, Z_{t,i}$;
- le coordinate tricromatiche corrette $u'_{t,i}$ e $v'_{t,i}$ in termini di distorsione tramite adattamento cromatico, per gli otto colori di prova illuminati dalla luce trasmessa, dipendenti da u_t e v_t e $u_{t,i}$ e $v_{t,i}$;
- $W_{t,i}^*, U_{t,i}^*, V_{t,i}^*$ in funzione rispettivamente di $Y_{t,i}$ e Y_t , $W_{t,i}^*$ e $u'_{t,i}$, $W_{t,i}^*$ e $v'_{t,i}$, conversioni nello spazio colorimetrico uniforme CIE 1964;
- la distorsione totale del colore i -esimo ΔE_i per ciascun colore di prova, dipendente da $W_{t,i}^*, U_{t,i}^*, V_{t,i}^*$ e $W_{r,i}^*, U_{r,i}^*, V_{r,i}^*$ per i colori di prova illuminati dall'illuminante D_{65} , forniti dalla UNI EN 410 (tabella 7);
- l'indice specifico di resa dei colori R_i per ciascun colore di prova, dipendente da ΔE_i ;
- infine, l'indice di resa cromatica R_a è determinato secondo la seguente relazione:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (1)$$

4.2. Caratterizzazione termica

La resistenza termica dei campioni è stata determinata mediante un apparato strumentale, denominato *Small Hot Box* [30-32], costruito presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria (Figura 7); questa apparecchiatura segue in parte le indicazioni della UNI EN ISO 8990, ma è caratterizzata da dimensioni ridotte rispetto ad una tradizionale *Hot Box*. Molte delle indicazioni contenute nelle normative tecniche sono comunque state considerate come linee guida nella progettazione e nella realizzazione dell'apparato [33-35], che consente di ospitare provini omogenei di piccole dimensioni.

La *Small Hot Box* è costituita da una camera calda (dimensioni esterne 0.94 x 0.94 x 0.50 m, volume interno di 0.075 m³) le cui pareti esterne sono realizzate con un materiale isolante di spessore 200 mm ricoperto da pannelli di legno di 20 mm, al fine di minimizzare il flusso di calore attraverso le pareti stesse. La camera all'interno è dotata di un cavo scaldante di lunghezza complessiva pari a 3 m (potenza massima erogabile di 50 W) e la temperatura interna è controllata da un regolatore elettronico digitale.

Una struttura a strati, costituita da 2 pannelli di legno con un layer intermedio di poliuretano espanso costituisce il lato di chiusura della scatola: nella parte centrale è presente un'apertura per il posizionamento del campione, di dimensioni 30 x 30 cm.

Il lato freddo del sistema è costituito dall'ambiente di laboratorio, completamente isolato dall'esterno e mantenuto a temperatura costante mediante il sistema di climatizzazione dell'edificio. La temperatura media di prova del campione risulta pari a circa 35°C.

Le prove sono state effettuate mediante il metodo del termoflussimetro: il flusso termico (q) attraverso il campione è misurato per mezzo di un termoflussimetro HFP01 della Hukseflux, che è installato nella parte centrale del provino. Contemporaneamente 8 termoresistenze di tipo PT 100 a lamina sottile installate sulla superficie del campione (4 sul lato caldo e 4 su quello freddo) permettono la misura della temperatura superficiale del campione (T_{sup}). Il valore della resistenza termica è determinato sulla base della seguente relazione:

$$R = \frac{\Delta T_{sup}}{q} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (2)$$

Numerose prove sperimentali di calibrazione preliminari effettuate su campioni di conducibilità termica nota hanno mostrato che l'errore di misura dello strumento è dell'ordine del 6-8%.

Il valore delle conducibilità dello strato di aerogel monolitico è stato determinato depurando il contributo delle due lastre float, in base alla relazione:

$$R = \frac{s_a}{\lambda_a} + \left(\frac{s_v}{\lambda_v} * 2 \right) \quad (3)$$

dove s_a e λ_a sono lo spessore e la conducibilità dello strato di aerogel monolitico, s_v e λ_v quelli delle lastre vetrate float. Dalla resistenza termica complessiva del campione misurata, noti gli spessori delle lastre vetrate e dell'aerogel e ipotizzata una conducibilità termica pari a 1 W/mK per le lastre vetrate, è possibile valutare la conducibilità termica dell'aerogel monolitico stesso (3).

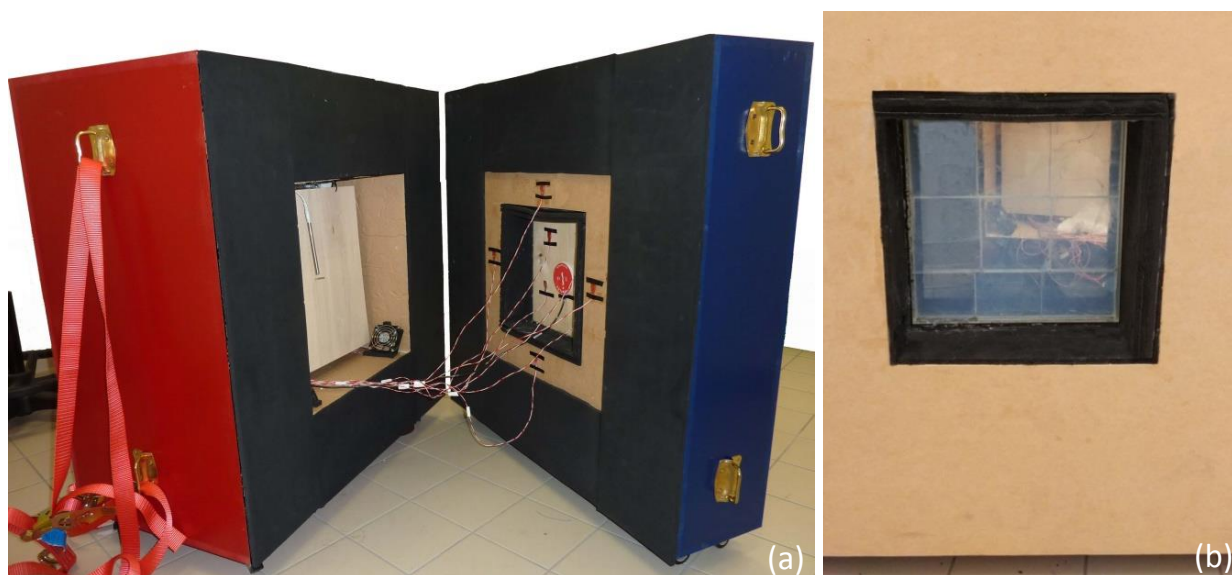


Figura 7. Small Hot Box impiegata per la misura della resistenza dei campioni (a) e vista del campione monolitico installato all'interno della Small Hot Box.

4.3. Analisi numerica

Gli strumenti di simulazione energetica dinamica sono sempre più indispensabili per la progettazione avanzata dell'involucro edilizio e degli impianti e per l'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici e del comfort termico degli occupanti. Esistono numerosi codici per la simulazione delle prestazioni energetiche di edifici in regime dinamico, tra cui si citano TRNSYS, DesignBuilder, EnergyPlus, eQuest, AECOSim Energy Simulator, ESP-r e TAS.

Il software scelto per il lavoro in oggetto è EnergyPlus v8.4.0 [36,37], uno dei motori di simulazione integrata più completi e potenti tra quelli disponibili a oggi, open source, capace di valutare l'impatto di diverse scelte progettuali relative all'involucro edilizio sulle prestazioni complessive dell'edificio e investigare contemporaneamente più aspetti dell'edificio, come quelli energetici e illuminotecnici.

L'impatto della soluzione vetrata con aerogel monolitico in intercapedine sulla performance dell'edificio è stato valutato su un edificio di riferimento nel quale, una volta definiti in maniera univoca i parametri di input (caratteristiche costruttive dell'involucro opaco, carichi interni, ventilazione, impianto e regimi di occupazione), sono state variate le caratteristiche delle superfici vetrate, al fine di effettuare una valutazione comparativa. Nello specifico, i risultati ottenuti per la soluzione innovativa oggetto di indagine sono stati confrontati con quelli relativi allo stesso edificio con vetrate convenzionali: una vetrocamera con trattamento basso-emissivo di nuova generazione su una lastra e argon al 90% in intercapedine (acronimo

LOW-E DGU; Trasmittanza termica $U=1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$), che rappresenta una soluzione efficace in molte condizioni climatiche, e una soluzione più performante, costituita da una vetrocamera tripla con 2 lastre con deposito basso-emissivo e argon al 90% in intercapedine (acronimo LOW-E TGU; $U=0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$). È stata inoltre considerata nelle simulazioni la possibile ipotesi futura di condizioni evacuate della soluzione innovativa con aerogel monolitico in intercapedine (acronimo AER-DGU (condizioni evacuate); $U=0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Le prestazioni energetiche sono state valutate considerando come caso di studio un edificio a uso commerciale (80x20 m) di 3 piani, ciascuno alto 3 m, caratterizzato da ampie superfici vetrate a nastro nelle facciate est e ovest. Sono stati considerati nelle simulazioni 2 diversi WWR (Window to Wall Ratio): WWR1, per il quale le superfici vetrate occupano il 50% delle facciate EST e OVEST, e WWR2, per il quale circa il 100% delle stesse facciate è costituito da superfici trasparenti (Figura 8).

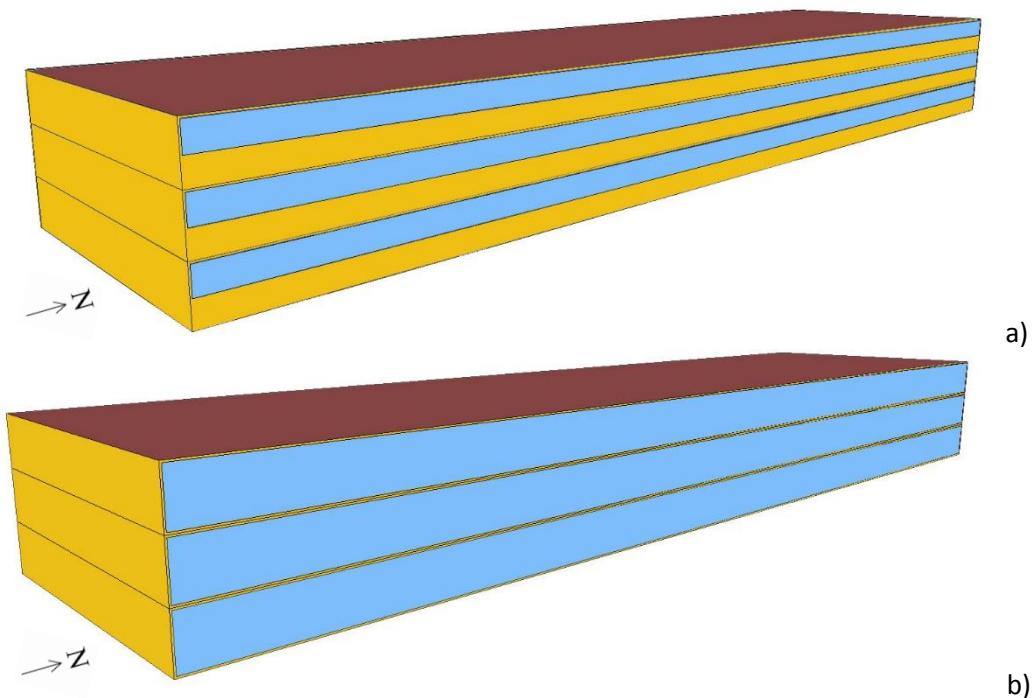


Figura 8. Modello dell'edificio considerato nel presente studio nella condizione WWR1 (a) e WWR2 (b).

Ai fini della valutazione comparativa sono stati considerati i risultati relativi al piano intermedio, in modo da massimizzare lo scambio attraverso la vetrata e rendere minime le dispersioni attraverso le pareti opache. Sono state considerate diverse condizioni climatiche: clima freddo (Helsinki); clima moderato (Parigi e Torino); clima caldo (Roma). Come fonte dei dati climatici è stata scelta IWEC (International Weather for Energy Calculations).

La geometria dell'edificio è stata modellata con il software Sketchup 2015 [38] e il tool Open Studio legacy [39].

Nel modello termico sono stati poi definiti tutti i materiali impiegati: tali caratteristiche sono state determinate dopo un'attenta analisi bibliografica. Le caratteristiche dei componenti opachi sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Edificio caso di studio: caratteristiche pareti opache.

Elementi edificio	Spessore [m]	Trasmittanza termica [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Muro esterno	0.24	0.57
Divisorio interno	0.11	3.41
Solaio controterra	0.99	0.48
Solaio interpiano	0.50	0.52
Copertura	0.52	0.32

Le soluzioni vetrate sono state inserite nel modello di simulazioni grazie ai software Window 7.4 (LBNL) [40] e Optic [41], che permettono di modellare la finestra (vetro e telaio) e dare in output un file, direttamente leggibile in EnergyPlus, che contiene i dati spettrali della trasmissione e riflessione della vetrata, grazie ad un ampio database a disposizione; le vetrocamere possono essere modellate a partire dai dati relativi alle singole lastre. Nel caso di soluzioni non presenti, è possibile inserire manualmente le lastre, ampliando il database sulla base dei dati di trasmissione e riflessione spettrali misurati sperimentalmente. Le soluzioni vetrate considerate per il confronto (LOW-E DGU e LOW-E TGU) sono state scelte tra le vetrocamere commerciali presenti nella libreria dei software [40,41]; la vetrocamera con aerogel monolitico in intercapedine, invece, è stata implementata inserendo i dati spettrali di trasmissione e di riflessione misurati sperimentalmente. In Tabella 2 sono riportate le caratteristiche delle vetrocamere considerate nelle simulazioni.

Tabella 2. Caratteristiche soluzioni vetrate di confronto.

Vetrocamera	Stratigrafia
LOW-E DGU	float clear (6 mm) - argon 90% (16 mm) - low-e dgu (4 mm)
LOW-E TGU	low-e dgu (4 mm) - argon 90% (12 mm) - float clear (4 mm) - argon 90% (12 mm) - low-e dgu (4 mm)
AER-DGU (condizioni evacuate)	float clear (4.7 mm) - aerogel monolitico (15 mm) - float clear (4.7 mm)
AER-DGU	

Nel modello sono stati definiti i carichi interni dovuti all'illuminazione, alle persone e alle attrezzature per ognuna delle zone: in Tabella 3 sono riassunti i carichi e i profili orari considerati. L'infiltrazione di aria, a temperatura e umidità pari alle condizioni esterne, è stata considerata variabile durante la giornata (profili orari in Tabella 4). Sono stati inoltre definiti i periodi di funzionamento dell'impianto di riscaldamento (secondo le prescrizioni del D.P.R. 412 del 1993, per le località italiane) e di raffrescamento, considerando le temperature di progetto di 20°C e 26°C rispettivamente (Tabella 5). Per le città di Helsinki e Parigi, i periodi di funzionamento sono stati individuati in seguito a un'attenta analisi dei file climatici.

Tabella 3. Carichi interni e profili orari di funzionamento.

Carico	Ipotesi	Carico zona [W]	Profilo orario
Illuminazione	lampade fluorescenti 500 lux sui piani di lavoro	7 W/m ²	Modulabile dimming 8:00 – 18:00 Da lunedì a venerdì
Persone	Rappresentative di un edificio a uso uffici	0.05 persone /m ² 108 W/m ²	8:00 – 18:00 Da lunedì a venerdì
Attrezzature		7 W/m ²	

Tabella 4. Infiltrazione e profili orari di funzionamento.

Orario	Volume di aria immessa [vol/h]
00:00 – 08:00	0.3
08:00 – 18:00	0.6
18:00 – 24:00	0.3

Tabella 5. Riscaldamento e raffrescamento: periodi di funzionamento.

	Periodo di funzionamento		Orari di funzionamento
	Riscaldamento	Raffrescamento	
Helsinki	1/1-31/12	1/5-4/9	7:00 – 19:00 da lunedì a venerdì
Parigi	15/10-30/4	1/5-14/10	
Torino	15/10-15/4	16/4-14/10	
Roma	1/11-15/4		

Al fine di ridurre i carichi nel periodo estivo, è stato anche previsto un sistema esterno di schermatura delle vetrate, costituito da tende (trasmissione solare pari al 10%) attivo nel periodo di raffrescamento, quando la temperatura interna risulta superiore a 22°C: la scelta del tipo di controllo è stata fatta in seguito a simulazioni preliminari che hanno permesso di individuare la soluzione migliore.

5. Risultati

5.1. Prestazioni ottiche

Nelle figure 9-10 sono riportati gli andamenti di trasmissione ad angolo di incidenza normale e 30° e riflessione spettrale (angolo di incidenza 0°) del campione con aerogel monolitico (AER-DGU) e della lastra vetrata float di spessore 4.7 mm (la stessa impiegata per assemblare la vetrocamera), misurati presso il Centro di Ricerca ENEA.

I valori trasmissione, come prevedibile, decrescono all'aumentare dell'angolo di incidenza, con una variazione minima nel passaggio da 0° a 30°, mantenendo lo stesso andamento; si osservano dei picchi di assorbimento alle lunghezze d'onda di circa 1400 nm, 1700 nm e 1900 nm, tipici del materiale indagato. Rispetto alla sola lastra vetrata Float, la trasmissione del campione AER-DGU diminuisce di circa un 20 % (Figura 9). Per contro, l'aerogel in intercapedine comporta un incremento significativo della riflessione, soprattutto nel campo visibile (Figura 10).

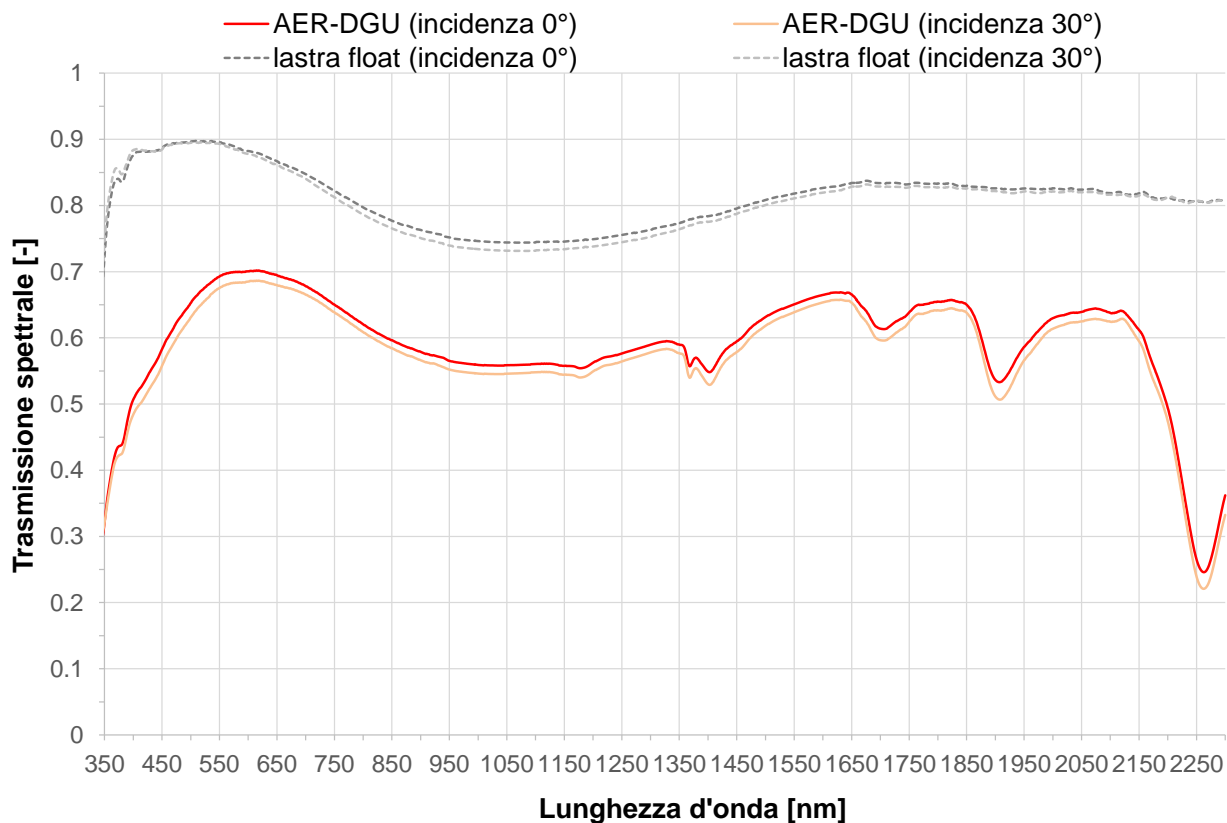


Figura 9. Spettro di trasmissione campione monolitico e lastra float: angolo di incidenza normale e 30°.

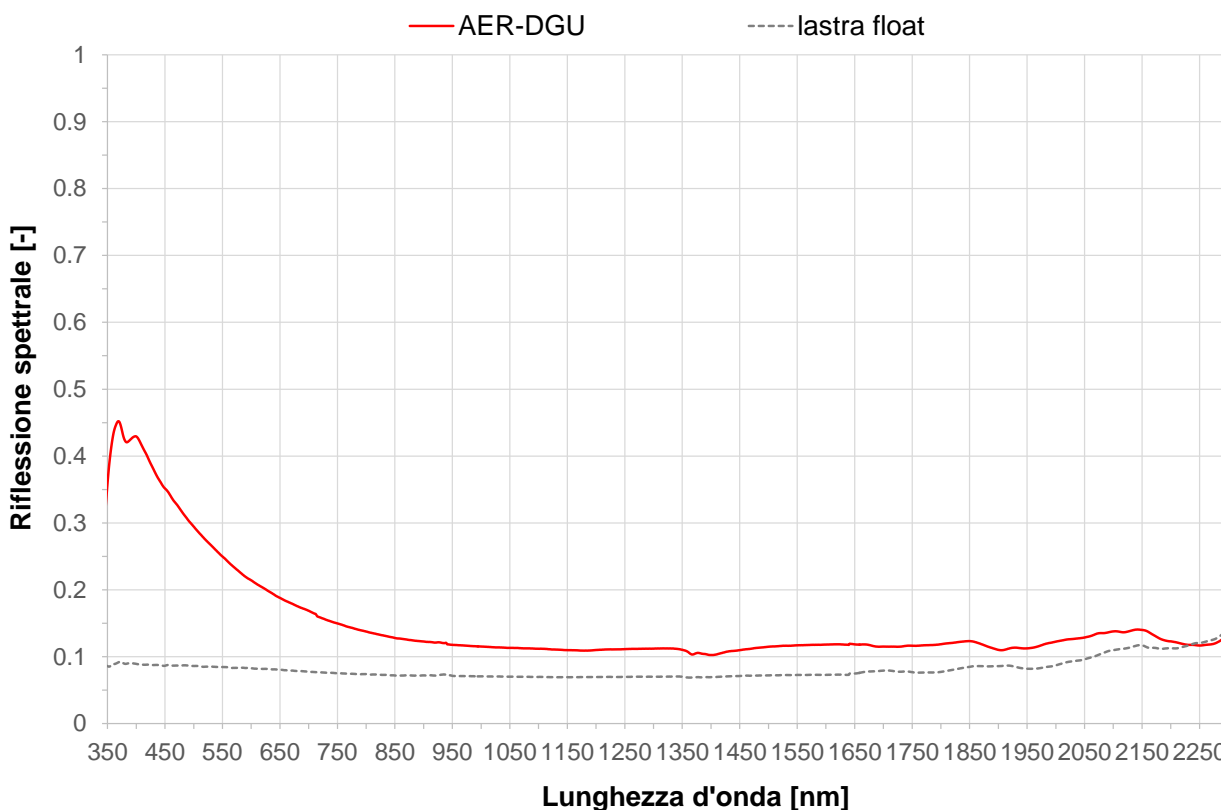


Figura 10. Spettro di riflessione campione monolitico e lastra float: angolo di incidenza normale.

Il confronto tra le misure di trasmissione e riflessione (Figure 11-12) effettuate presso il Dipartimento di Ingegneria (linee tratteggiate) e quelle effettuate presso ENEA (linee continue) evidenzia che gli strumenti convenzionali tendano a sottostimare, soprattutto nel range del visibile, la trasmissione di campioni complessi e diffondenti come quello in esame sebbene, nel caso del monolitico, la sottostima sia molto contenuta rispetto all’aerogel granulare, data la sua natura meno diffondente (alla lunghezza d’onda di circa 600 nm, τ_v passa da 0.63 misurato con lo spettrofotometro convenzionale a 0.7 con quello non convenzionale); la riflessione del campione AER-DGU misurata con lo spettrofotometro convenzionale non è stata riportata, in quanto ritenuta poco significativa. Tale aspetto non è evidente nel caso del confronto effettuato per la lastra float (in grigio): gli andamenti di trasmissione e riflessione ottenuti con il SolidSpec sono equiparabili a quelli dello spettrofotometro non convenzionale.

In Figura 13 sono mostrati i risultati della caratterizzazione ottica (trasmissione e riflessione) con lo spettrofotometro non convenzionale del campione con aerogel monolitico (AER-DGU) e i dati stimati con il metodo della UNI EN 410, noti i valori misurati per la lastra Float, per una vetrocamera con le stesse lastre e aria in intercapedine (DGU*).

L’aerogel causa una modifica della forma degli spettri di trasmissione e riflessione rispetto alla stessa vetrocamera con aria: per la trasmissione, si osserva una riduzione significativa nel visibile e nel vicino infrarosso, dopo 1350 nm; il contributo della lastra di aerogel è invece trascurabile nel range 900-1350 nm. Considerazioni analoghe valgono per la riflessione: l’aerogel dà luogo a un incremento significativo dei valori misurati nel visibile, soprattutto in corrispondenza del blu-violetto (400-450 nm).

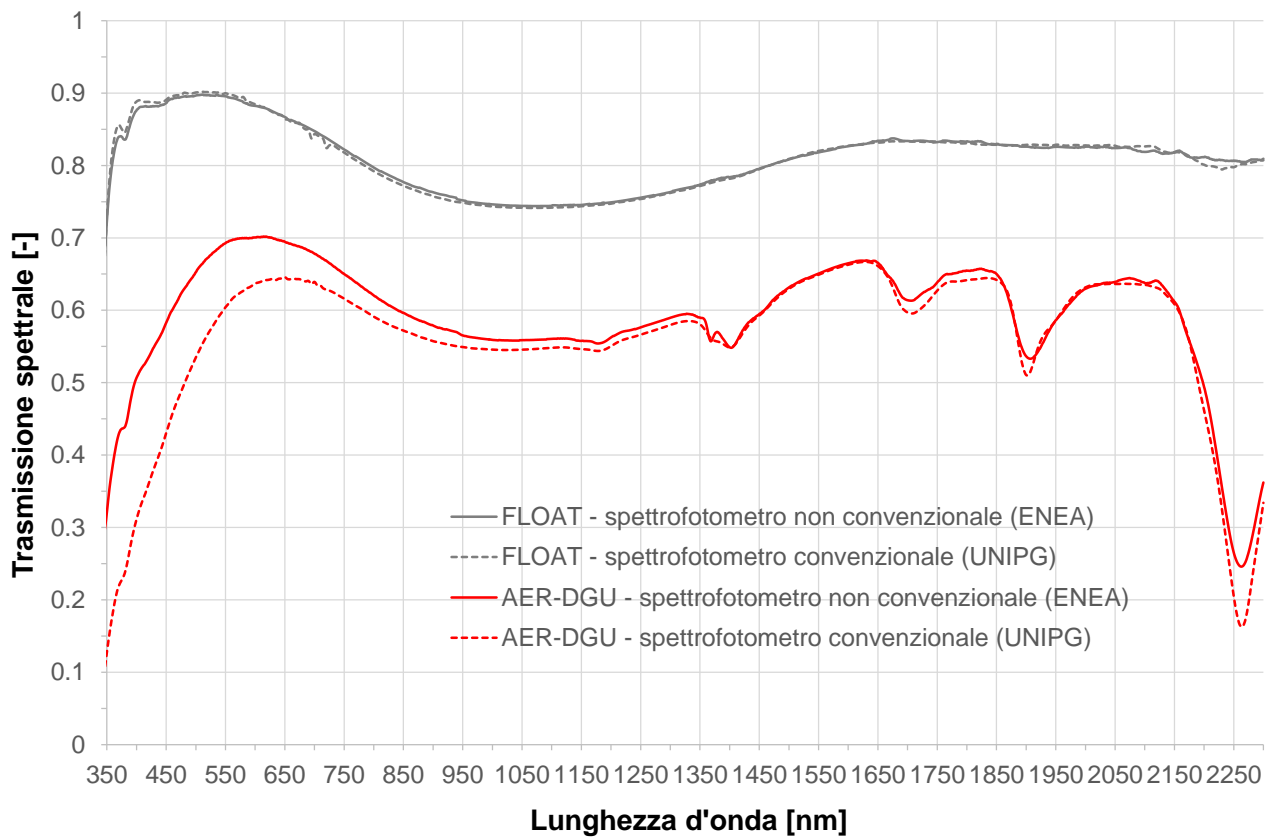


Figura 11. Spettro di trasmissione a incidenza normale campione con aerogel monolitico: confronto tra spettrofotometri.

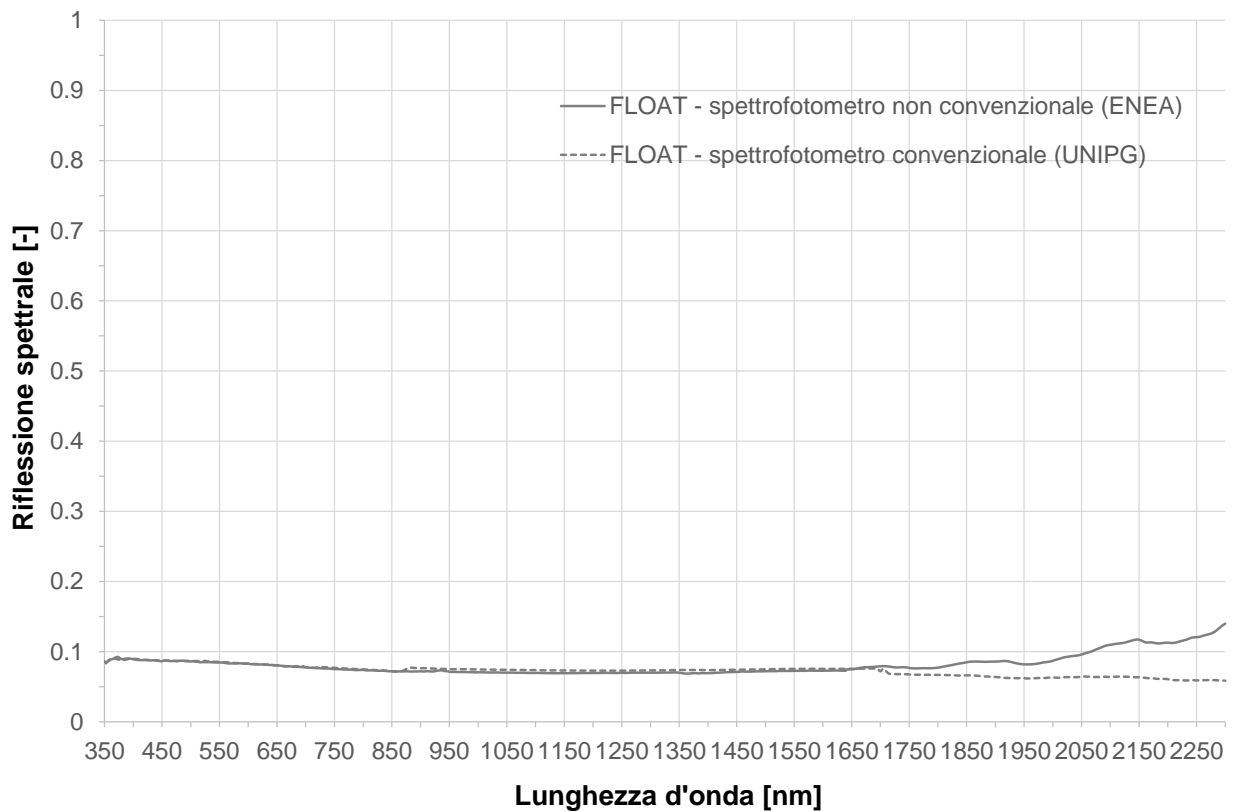


Figura 12. Spettro di riflessione a incidenza normale lastra float: confronto tra spettrofotometri.

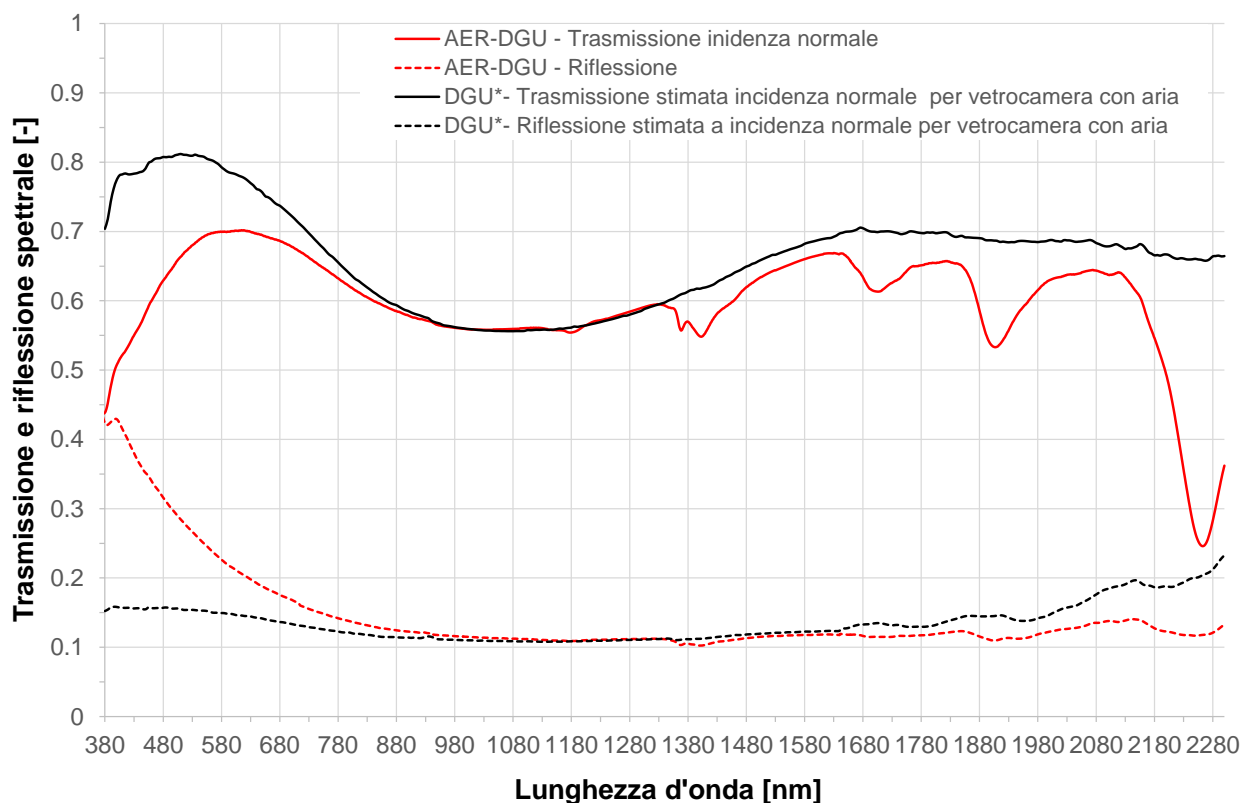


Figura 13. Spettri di trasmissione e di riflessione del prototipo e confronto con vetrocamera con stesse lastre vetrate di contenimento e aria in intercapedine(dati stimati).

Sulla base delle considerazioni sopra esposte, per le successive analisi sono stati impiegati i dati ottici misurati presso l’ENEA. Le misure sono state elaborate ai sensi della normativa tecnica di riferimento (UNI EN 410), al fine di stimare i parametri prestazionali più significativi: il fattore di trasmissione visibile (τ_v) e il fattore di trasmissione solare diretta (τ_e) ad incidenza normale e a 30°, e l’indice di resa cromatica (R_a), che permette una valutazione qualitativa della radiazione luminosa che attraversa la superficie vetrata e fornisce indicazioni sul comfort visivo interno (Tabella 6).

Per l’analisi dei dati si rimanda al seguito, dove i valori ottenuti sono confrontati con quelli di vetrocamere convenzionali e alternative. Per il campione AER-DGU si osserva comunque che il decadimento angolare della trasmissione visibile e solare a 30° appare modesto. Tuttavia, si suggerisce lo studio del comportamento ad angoli di incidenza maggiori (45° e 60°).

Tabella 6. Fattori di trasmissione e riflessione luminosa e solare diretta, indice di resa cromatica (UNI EN 410).

CAMPIONE	Trasmissione luminosa τ_v		Trasmissione solare diretta τ_e		Riflessione luminosa ρ_v	Riflessione solare Diretta ρ_{ve}	Indice di resa cromatica R_a
	0°	30°	0°	30°			
AER-DGU	0.69	0.67	0.63	0.61	0.25	0.21	96
FLOAT	0.89	0.89	0.85	0.85	0.08	0.08	99

5.2. Prestazioni termiche

Sono state effettuate 5 differenti prove impostando la temperatura della camera calda a 45°C e a 50°C; per le elaborazioni dei dati, si è scelto un intervallo di circa 2 ore durante il quale sia le temperature sia il flusso risultano sufficientemente stazionari nel tempo: in Figura 14 (a) e (b) sono riportati, a titolo di esempio, rispettivamente gli andamenti nel tempo delle temperature dell’aria in camera calda e nell’ambiente laboratorio (camera fredda) nell’intervallo di tempo considerato, relativamente a una delle prove effettuate (PROVA 3). I risultati delle prove termiche effettuate in diverse condizioni ambientali sono riportati in Tabella 7. La resistenza termica del prototipo (misurata da superficie a superficie) è nel range

0.72-0.74 m²K/W, a cui corrisponde una trasmittanza termica pari a 1.1 W/m²K. Sulla base dei dati misurati, la conducibilità termica stimata per la sola lastra di aerogel in intercapedine, secondo l'equazione (3), è pari a 0.021 W/mK, a circa 35 °C (temperatura media del campione durante la prova).

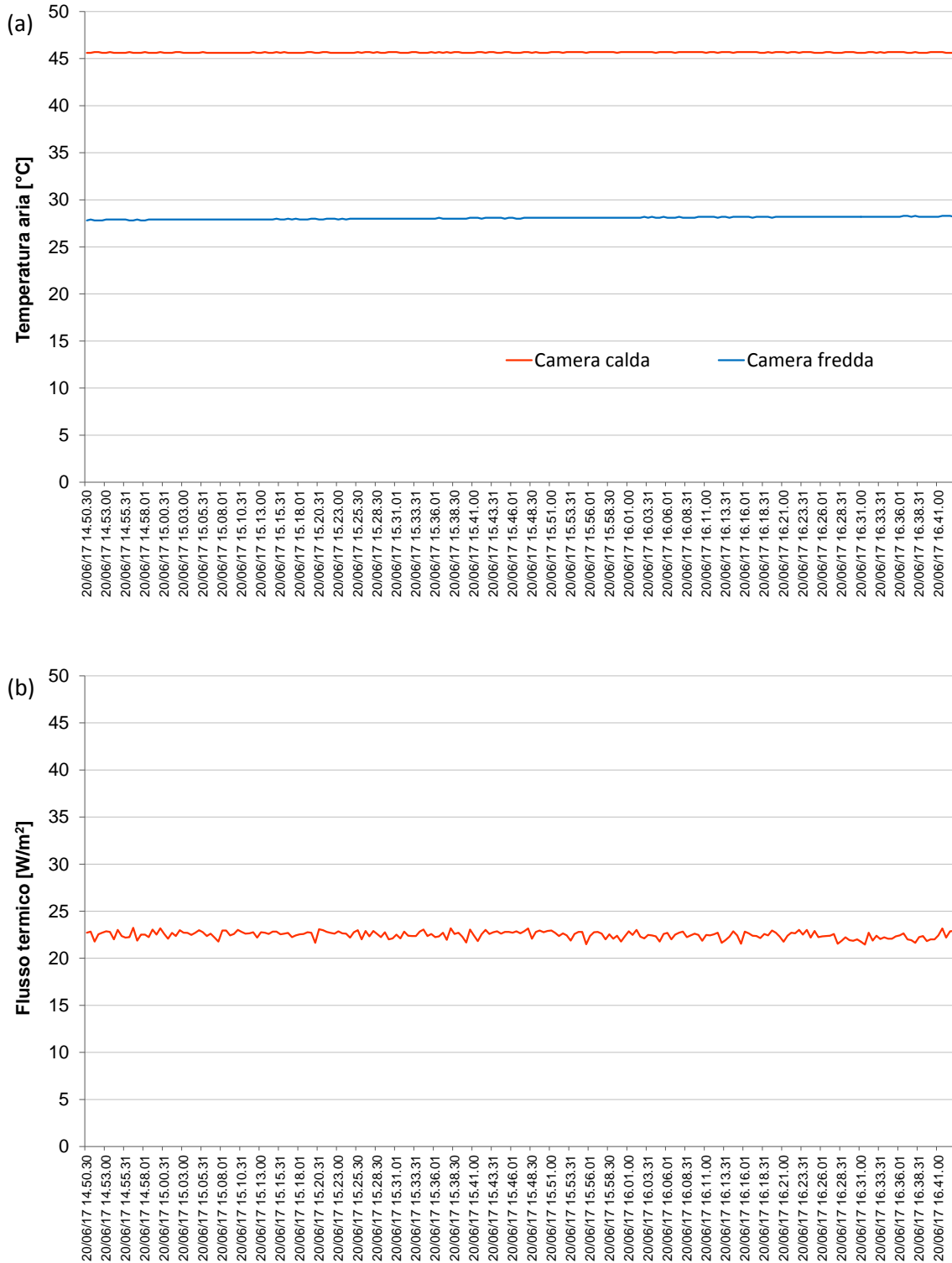


Figura 14. Verifica stazionarietà prova: (a) temperatura dell'aria nelle camere; (b) flusso termico (PROVA 3).

Tabella 7. Risultati misure termiche sul campione monolitico: metodo del termoflussimetro.

	T _{lato caldo} [°C]	T _{lato freddo} [°C]	ΔT _{aria} [°C]	ΔT _{sup} [°C]	Flusso Φ [W/m ²]	R _{totale} [m ² K/W]	U [W/m ² K]	λ _{aerogel monolitico stimata a 35°C} [W/mK]
Prova 1	46.15	27.89	18.26	16.78	22.73	0.74	1.1	0.021
Prova 2	50.60	27.70	22.9	21.68	30.05	0.72		
Prova 3	45.65	28.06	17.59	16.48	22.48	0.73		
Prova 4	50.59	27.90	22.69	21.04	29.13	0.72		
Prova 5	46.09	27.18	18.91	16.59	22.49	0.74		

5.3. Stima del fattore solare

Principio del metodo

La conoscenza delle proprietà delle lastre vetrate di contenimento e del campione complessivo ha permesso di mettere a punto un metodo approssimato per la stima delle caratteristiche ottiche ed energetiche dello strato di aerogel, difficilmente misurabili in modo diretto. La determinazione delle proprietà dell'aerogel è necessaria per la stima del fattore solare del campione oggetto di studio, secondo la procedura riportata nella norma UNI EN 410.

Il metodo esposto nella Norma [22] permette di caratterizzare il fattore di trasmissione e riflessione spettrale elaborando gli spettri di trasmissione e riflessione dei singoli componenti di cui è costituito un campione; il metodo è indicato per le vetrate multiple, ma è applicabile a qualunque campione complesso con geometria regolare.

Nel caso di vetrata tripla, la trasmissione spettrale τ(λ) è calcolata a partire dai fattori di trasmissione e riflessione spettrale dei singoli componenti:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda)\rho_2(\lambda)][1 - \rho'_2(\lambda)\rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda)\rho_1(\lambda)\rho_3(\lambda)} \quad (4)$$

dove:

τ₃(λ) è la trasmissione spettrale della terza lastra;

ρ₂(λ) è la riflessione spettrale della seconda lastra, misurata in direzione opposta alla radiazione incidente;

ρ₃(λ) è la riflessione spettrale della terza lastra, misurata nella direzione della radiazione incidente.

Tali fattori sono illustrati in Figura 15.

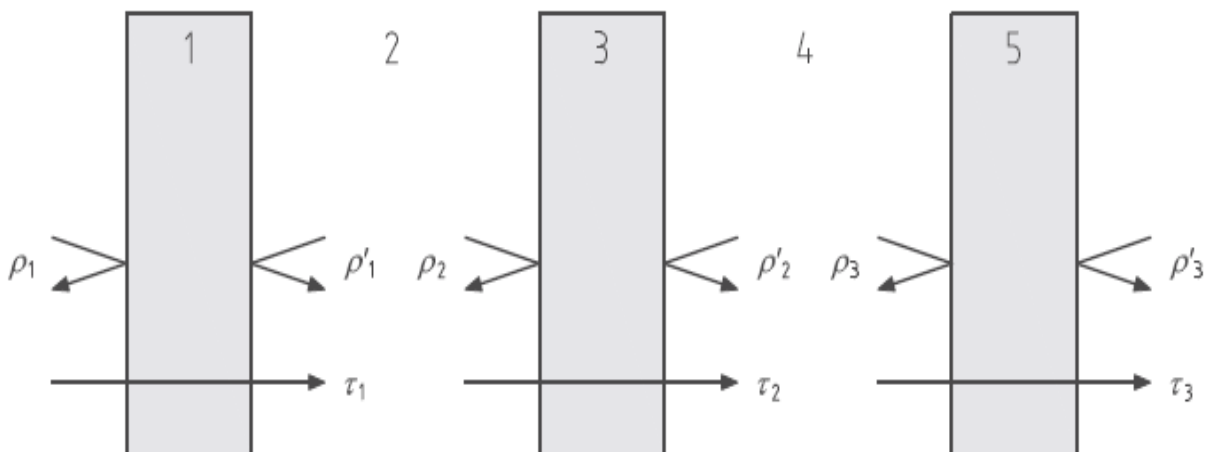


Figura 15. Trasmissione e riflessione in una tripla vetrata.

Analogamente, il fattore di riflessione spettrale $\rho(\lambda)$ è calcolato dai fattori di trasmissione e riflessione spettrale dei singoli componenti; nel caso di vetrata tripla:

$$\rho(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda)\rho_2(\lambda)[1 - \rho_2'(\lambda)\rho_3(\lambda)] + \tau_1^2(\lambda)\tau_2^2(\lambda)\rho_3(\lambda)}{[1 - \rho_1'(\lambda)\rho_2(\lambda)][1 - \rho_2'(\lambda)\rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda)\rho_1'(\lambda)\rho_3(\lambda)} \quad (5)$$

Stima dei valori di trasmissione e riflessione dello strato di aerogel

Per determinare le caratteristiche dell'aerogel, in prima approssimazione, è stato ipotizzato di considerare la vetrocamera con aerogel monolitico in intercapedine come una tripla vetrata, dove lo strato di aerogel è stato assimilato a una lastra omogenea, dotata di una trasmissione e riflessione spettrale incognita, come mostrato nello schema sottostante (Figura 16).

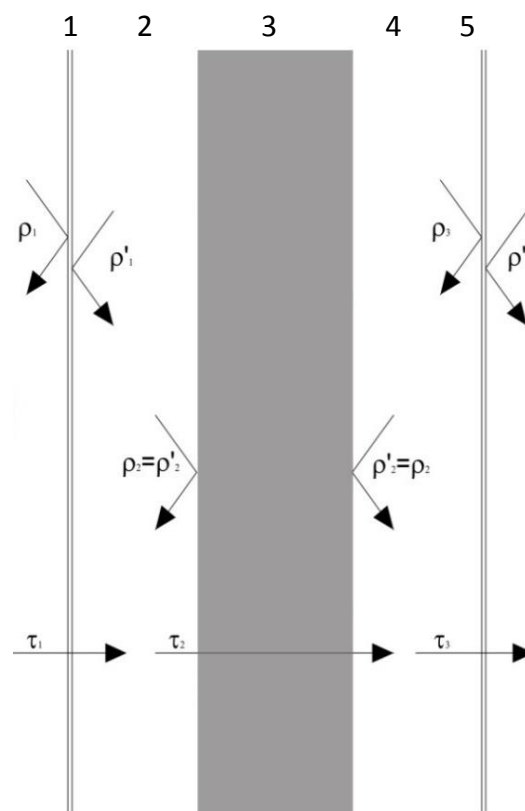


Figura 16. Schema ipotizzato per la lastra di aerogel.

Applicando quindi le relazioni relative alle triple vetrate derivanti dalla normativa UNI EN 410 (eq. 4 e 5), sono stati stimati i valori di trasmissione e riflessione dello strato interno di aerogel.

Considerando quindi $\tau(\lambda)$ e $\rho(\lambda)$ noti dalle misure effettuate sul campione assemblato e sulle due lastre, è stato ottenuto un sistema di due equazioni non lineari in due incognite: la trasmissione $\tau_2(\lambda)$ e la riflessione $\rho_2(\lambda) = \rho_2'(\lambda)$ dello strato di aerogel interno, avendo ipotizzato che il fattore di riflessione spettrale dello strato interno in direzione della radiazione e quello in direzione opposta siano coincidenti.

Calcolo del fattore solare

Il fattore solare g è il rapporto tra l'energia totale entrante e l'energia solare incidente sulla vetrata. Tale grandezza caratterizza le prestazioni globali d'insieme di un serramento, indicando l'apporto energetico dovuto alla radiazione solare per il calcolo dei carichi termici invernali ed estivi secondo la normativa vigente.

Le procedure per la misura diretta del fattore solare sono lunghe e hanno un costo relativamente elevato. Per questo si è deciso di ricavarlo applicando la metodologia derivante dalla normativa UNI EN 410. Il fattore di trasmissione dell'energia solare totale si ricava da:

$$g = \tau_e + q_i \quad (6)$$

dove τ_e è la trasmissione solare diretta e q_i è il fattore di trasferimento secondario di calore dal vetro verso l'interno. Il primo termine è noto dalle misure effettuate, il secondo è stato calcolato con la seguente relazione, valida per le vetrate triple, note le caratteristiche delle componenti della vetrata:

$$q_i = \frac{\left[\frac{\alpha_{e3}}{\Lambda_{23}} + \frac{\alpha_{e3} + \alpha_{e2}}{\Lambda_{12}} + \frac{\alpha_{e3} + \alpha_{e2} + \alpha_{e1}}{h_e} \right]}{\left[\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda_{12}} + \frac{1}{\Lambda_{23}} \right]} \quad (7)$$

dove:

α_{e1} è l'assorbimento diretto dell'energia solare della lastra esterna della vetrata tripla;

α_{e2} è l'assorbimento diretto dell'energia solare della seconda lastra della vetrata tripla;

α_{e3} è l'assorbimento diretto dell'energia solare della terza lastra della vetrata tripla;

Λ_{12} è la conduttanza termica tra la superficie esterna della prima lastra e il centro della seconda lastra (Figura 17);

Λ_{23} è la conduttanza termica tra il centro della seconda lastra e la superficie più interna della terza lastra (Figura 17);

h_e e h_i sono i coefficienti di adduzione esterno ed interno.

α_{e1} , α_{e2} e α_{e3} sono calcolati mediante relazioni, di cui se ne riporta una (8) a titolo di esempio:

$$\alpha_{e1} = \frac{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ a_1(\lambda) + \frac{\tau_1(\lambda) a'_1(\lambda) \rho_2(\lambda) [1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] + \tau_1(\lambda) \tau_2^2(\lambda) a'_1(\lambda) \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) \rho_2(\lambda)] \times [1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho'_1(\lambda) \rho_3(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (8)$$

dove:

$a'_1(\lambda)$ è il fattore di assorbimento spettrale diretto della lastra esterna, misurato in direzione opposta alla radiazione incidente.

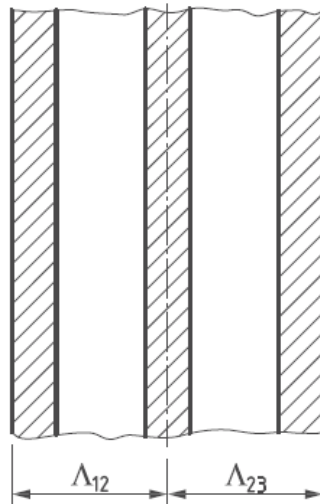


Figura 17. Schema contributi conduttanza termica.

Per la stima dei valori delle conduttanze termiche è stata fatta la seguente ipotesi: nota la resistenza termica del campione, determinata sperimentalmente, è stata calcolata la conduttanza C per l'intero campione ed è stata divisa per due al fine di ottenere Λ_{12} e Λ_{23} .

I risultati dei calcoli sono riportati in Tabella 8.

Tabella 8. Calcolo del fattore solare g.

Campione	Trasmissione solare diretta τ_e	Assorbimento solare diretto a_e	Trasferimento secondario di calore verso l'interno q_i	Fattore solare g
Vetrocamera con aerogel monolitico	0.63	0.16	0.07	0.70

5.4. Confronto con soluzioni convenzionali e con vetrate con aerogel granulare

In Tabella 9 è riportato un confronto, in termini dei parametri prestazionali ritenuti più significativi, con alcune soluzioni convenzionali (DGU, LOW-E DGU, LOW-E TGU).

Per il campione AER-DGU, ai fini del confronto con le altre soluzioni vetrate, il valore di trasmittanza termica (U) non è quello direttamente misurato (con una temperatura media del campione pari a 35°C), ma è stato riportato alla temperatura di 10°C, corrispondente alle condizioni invernali. Il calcolo è stato effettuato seguendo la procedura indicata nella norma UNI EN ISO 10456 [43], che permette di convertire i valori ottenuti sperimentalmente per un insieme di condizioni in quelli validi per un altro insieme di condizioni.

Nel confronto sono state considerate anche soluzioni vetrate alternative con aerogel granulare in intercapedine: GRAN- AER- DGU 10, una doppia vetrocamera con lastra esterna e interna float da 4 mm e 10 mm di aerogel granulare in intercapedine; GRAN- AER- DGU 20, caratterizzata dalle stesse lastre vetrate di contenimento ma con 20 mm di aerogel granulare. Lo studio delle proprietà ottiche di cinque differenti spessori (da 10 a 35 mm) di aerogel granulare in intercapedine è stato oggetto di precedenti collaborazioni di ricerca tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria [42] (Figura 18). Gli spessori considerati per l'aerogel granulare (10 e 20 mm) sono quelli più simili allo spessore del campione oggetto di indagine (15 mm).

Gli andamenti di trasmissione e riflessione spettrale misurati per i campioni suddetti sono mostrati a confronto con quelli del campione con aerogel monolitico rispettivamente in Figura 19 (a) e (b).



Figura 18. Vetrocamere con aerogel granulare in intercapedine.

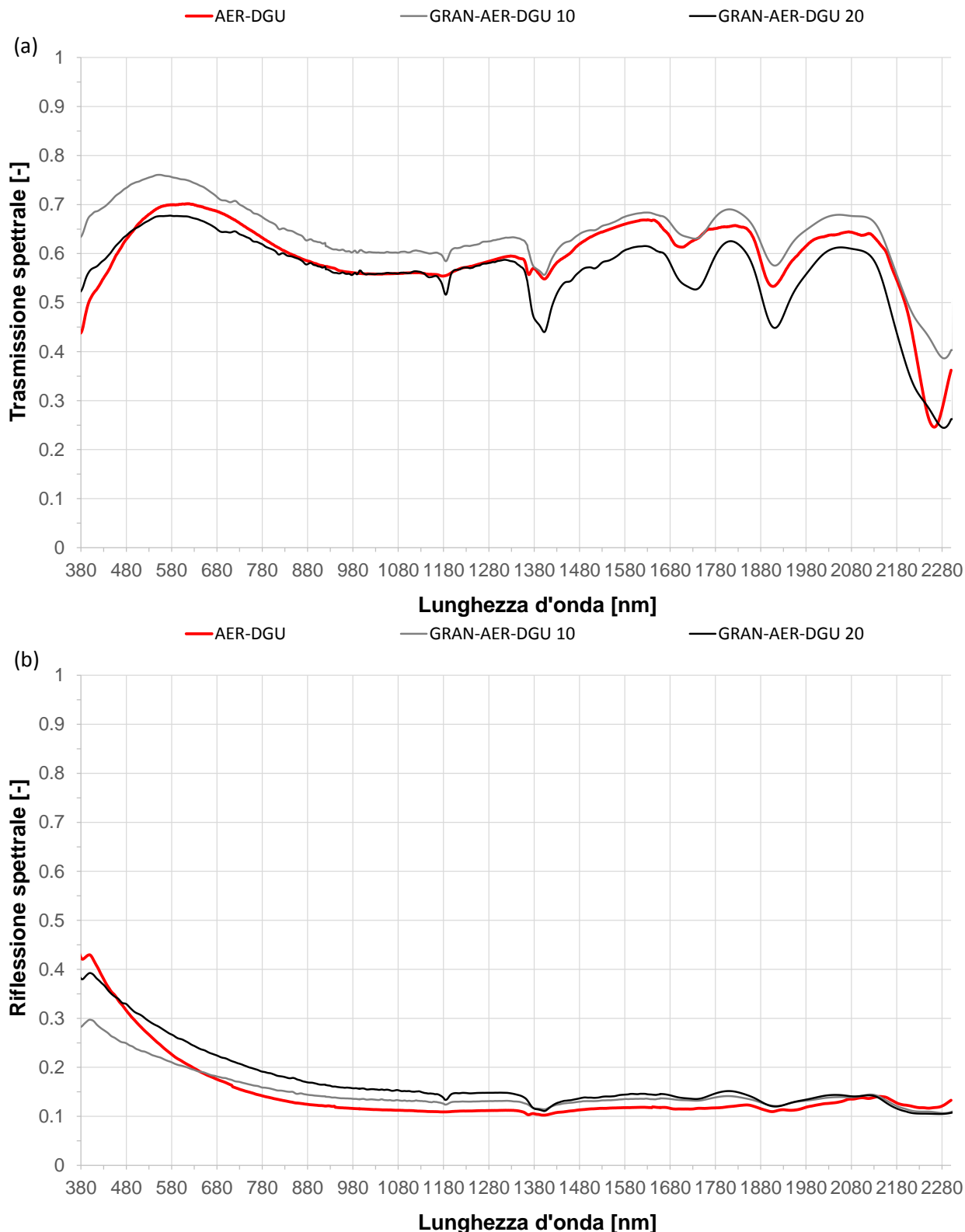


Figura 19. Confronto con soluzioni convenzionali e con aerogel granulare: (a) trasmissione, (b) riflessione spettrale.

Anche i campioni con aerogel granulare presentano picchi di assorbimento alle lunghezze d'onda di circa 1400 nm, 1700 nm e 1900 nm, tipici del materiale indagato; pur non essendo possibile un confronto accurato a causa della differenza di spessori, si osserva che nel range del vicino infrarosso, per lunghezze d'onda maggiori di 1400 nm, il monolitico ha una trasmissione maggiore. La riflessione del monolitico nel visibile, tra 280 e 580 nm, appare maggiore, mentre è inferiore per lunghezze d'onda maggiori.

Tabella 9. Confronto prestazionale (τ_v , g , R_a , U) tra la vetrocamera innovativa e le soluzioni alternative considerate.

Vetrata	Descrizione	τ_v	R_a [-]	g [-]	U [W/m^2K]
AER-DGU	campione oggetto di indagine	0.69	96	0.70	1.0*
AER-DGU (condizioni evacuate)	stesso campione in condizioni evacuate, ipotizzando per l'aerogel monolitico una $\lambda=0.010$ W/mK (temperatura pari a 10°C)	0.69	96	0.70	0.6
DGU	doppia vetrocamera float 6-16-4 con argon (90%) in intercapedine	0.80	99	0.74	2.6
LOW-E DGU	doppia vetrocamera 6-16-4 con trattamento basso-emissivo e argon (90%) in intercapedine	0.76	98	0.52	1.1
LOW-E TGU	trippla vetrocamera 4-12-4-12-4 con doppio trattamento basso-emissivo e argon (90%) in intercapedine	0.66	96	0.43	0.7
GRAN- AER- DGU 10	doppia vetrocamera 4-10-4 con 10 mm di aerogel granulare in intercapedine	0.75	99	0.76	1.4
GRAN- AER- DGU 20	doppia vetrocamera 4-20-4 con 20 mm di aerogel granulare in intercapedine	0.67	98	0.70	0.8

* Valore riportato alla temperatura media di 10°C, corrispondente alle condizioni invernali.

Dalla Tabella 9 si evince che l'aerogel monolitico, anche con uno spessore modesto (15 mm), produce una riduzione significativa della trasmittanza termica rispetto alla vetrocamera con aria (63%); allo stesso tempo la perdita in termini di luce visibile trasmessa è di circa il 14%, mentre il fattore solare si mantiene elevato. Confrontando la vetrata con il LOW-E DGU, le prestazioni termiche sono di poco superiori e la trasmissione luminosa diminuisce del 9%, ma allo stesso tempo il guadagno solare si mantiene più alto ($g=0.70$), situazione vantaggiosa in condizioni invernali. Per quanto riguarda la qualità della luce trasmessa dalla vetrata, l'aerogel monolitico consente di avere un'ottima resa cromatica ($R_a=96$), inferiore a quella del DGU del 3%, ma paragonabile a quella di una tripla vetrata.

Il confronto con le vetrate con aerogel granulare evidenzia che esse presentano valori di τ_v e g paragonabili a quelli della soluzione con aerogel monolitico (AER-DGU). Il fattore di trasmissione luminosa ($\tau_v=0.69$) è infatti poco superiore a quello del campione con aerogel granulare di spessore maggiore (20 mm); tuttavia si precisa che l'aerogel monolitico oggetto di studio è un prototipo realizzato mediante un processo innovativo, ancora in corso di ottimizzazione, e presentava quindi alcune imperfezioni superficiali, fattori che hanno penalizzato le prestazioni ottiche complessive. Per quanto riguarda la qualità della luce trasmessa, l'aerogel granulare permette una resa cromatica più elevata ($R_a=98$ per spessore di 20 mm), maggiore di quello della lastra di aerogel monolitico. Tuttavia, allo stesso tempo, le vetrate con aerogel granulare non consentono la visione dell'esterno, essendo traslucide (Figura 18), e questo può costituire una limitazione al loro impiego, soprattutto per alcune tipologie di edifici.

La soluzione investigata potrebbe fornire risultati più interessanti se si considerasse la prospettiva futura, a oggi in corso di studio, di una vetrocamera con aerogel in condizioni evacuate: considerando uno spessore complessivo della vetrocamera di circa 25 mm, la trasmittanza termica stimata potrebbe raggiungere 0.6 W/m^2K , valore inferiore a quello di una vetrocamera tripla con doppio basso-emissivo e argon, che però ha uno spessore di 40 mm e un peso di circa 30 kg/m^2 . Inoltre, il fattore solare della vetrocamera con aerogel monolitico è sensibilmente maggiore, con evidenti vantaggi in termini di guadagno solare in condizioni invernali.

6. Prestazioni energetiche per il caso di studio

L'influenza di diverse soluzioni trasparenti è stata valutata in termini di richiesta energetica per il riscaldamento, il raffrescamento e l'illuminazione artificiale, espressa in kWh/m^2 . Si precisa che i dati non sono riferiti ai consumi effettivi di energia, poiché nel modello di simulazione è stato considerato un

impianto ideale, senza specificare né gli elementi terminali né il sistema di generazione. Le Tabelle 10 e 11 riportano i valori di richiesta energetica ottenuti per le soluzioni considerate per i due WWR esaminati. Per il WWR inferiore (WWR1: le superfici vetrate occupano il 50% delle facciate EST e OVEST), rispetto al LOW-E DGU, la nuova soluzione investigata comporta una riduzione della richiesta per il riscaldamento significativa, dell'ordine del 5% per Helsinki, 8% per Parigi e del 10% per Torino; per Roma, invece, la richiesta energetica per il riscaldamento è molto modesta per tutte le soluzioni vetrate considerate, in linea con i valori della temperature dell'aria esterna (Figura 20) e della radiazione solare (Figura 21).

Tabella 10. Prestazioni energetiche dell'edificio al variare della vetrata e della località per WWR1.

Città	Vetrata	Heating [kWh/m ²]	Cooling [kWh/m ²]	Lighting [kWh/m ²]
HELSINKI	LOW-E DGU	52.6	0.4	8.6
	LOW-E TGU	50.3	0.4	9.1
	AER-DGU	49.9	0.5	8.9
	AER-DGU EVACUATO	45.8	0.6	8.9
TORINO	LOW-E DGU	14.8	9.4	7.5
	LOW-E TGU	14.4	9.2	8.0
	AER-DGU	13.4	9.8	7.7
	AER-DGU EVACUATO	11.3	10.2	7.7
PARIGI	LOW-E DGU	18.5	2.8	7.8
	LOW-E TGU	17.9	2.8	8.3
	AER-DGU	17.0	3.1	8.1
	AER-DGU EVACUATO	14.7	3.4	8.1
ROMA	LOW-E DGU	2.9	14.9	7.2
	LOW-E TGU	3.1	14.6	7.6
	AER-DGU	2.2	15.5	7.3
	AER-DGU EVACUATO	1.5	15.9	7.3

Tabella 11. Prestazioni energetiche dell'edificio al variare della vetrata e della località per WWR2

Città	Vetrata	Heating [kWh/m ²]	Cooling [kWh/m ²]	Lighting [kWh/m ²]
HELSINKI	LOW-E DGU	51.9	0.7	7.9
	LOW-E TGU	47.4	0.6	8.2
	AER-DGU	48.3	0.8	8.0
	AER-DGU EVACUATO	41.7	1.1	8.0
TORINO	LOW-E DGU	13.2	10.2	6.8
	LOW-E TGU	12.1	9.7	7.0
	AER-DGU	11.2	10.8	6.9
	AER-DGU EVACUATO	8.0	11.7	6.9
PARIGI	LOW-E DGU	16.9	3.5	7.0
	LOW-E TGU	15.5	3.2	7.2
	AER-DGU	14.9	3.9	7.1
	AER-DGU EVACUATO	11.2	4.6	7.1
ROMA	LOW-E DGU	1.7	16.9	6.5
	LOW-E TGU	1.7	15.8	6.7
	AER-DGU	1.1	17.8	6.6
	AER-DGU EVACUATO	0.4	18.7	6.6

In generale, il risparmio dovuto al monolitico in intercapedine aumenta con la radiazione solare incidente nella località nei mesi invernali (Figura 21), a causa dell'elevato fattore solare di AER-DGU. Tuttavia, come prevedibile, l'elevato fattore solare comporta un incremento dei fabbisogni per il raffrescamento, che varia con la località considerata: 4% per Roma, 5% per Torino e infine 10% per Parigi; i fabbisogni per il raffrescamento per Helsinki sono invece trascurabili per tutte le vetrate. I benefici in inverno dovuti all'impiego di vetrate con aerogel si riducono considerando nel confronto la tripla vetrata (7% anziché 10% per la città di Torino) e, in questo caso, anche l'incremento per il raffrescamento è più evidente (+6%). Facendo l'ipotesi di condizioni evacuate per la vetrata con aerogel, si osserva una riduzione della richiesta energetica per riscaldamento ancora più elevata rispetto al LOW-E DGU, pari ad esempio al 23% per Torino, a discapito però di un incremento maggiore dell'energia richiesta in condizioni estive (9% per la città di Torino).

Infine, si osserva che la richiesta per l'illuminazione artificiale è simile per tutte le vetrate, con un modesto incremento per quella tripla, in linea con i valori del fattore di trasmissione visibile.

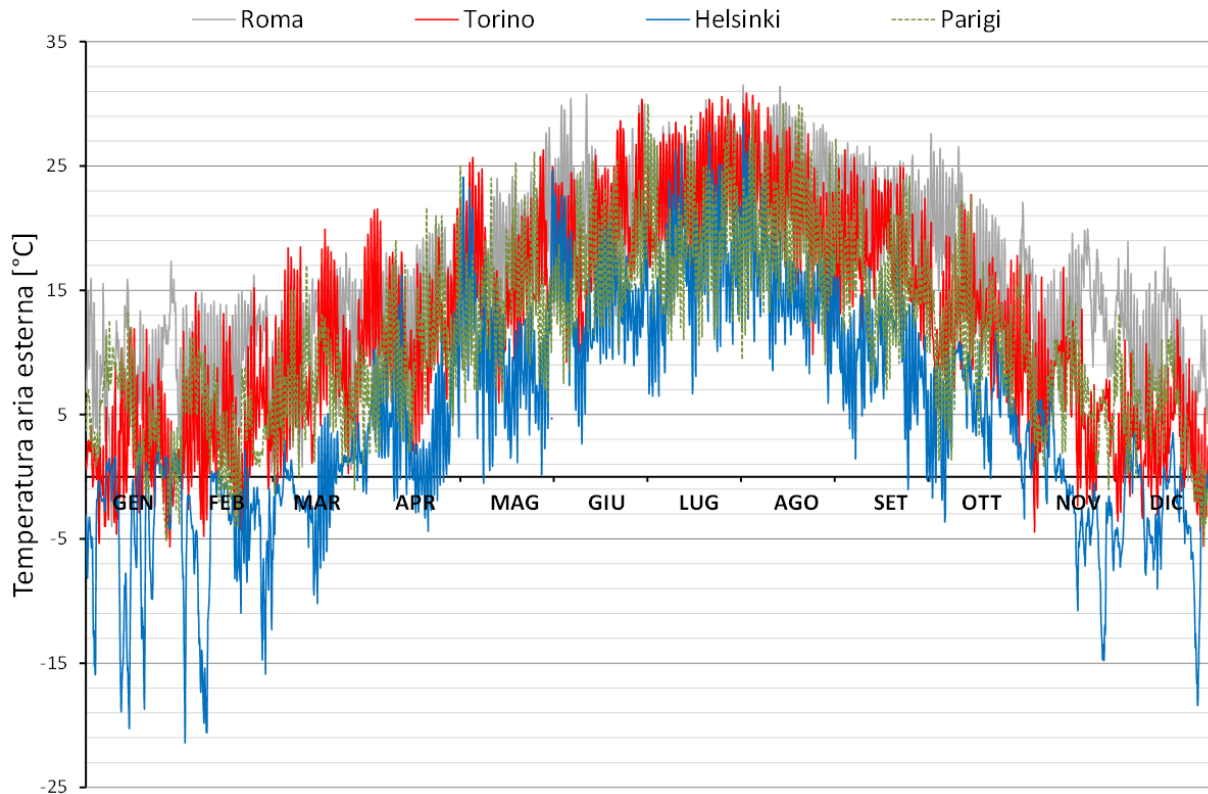


Figura 20. Temperatura aria esterna annuale delle località considerate.

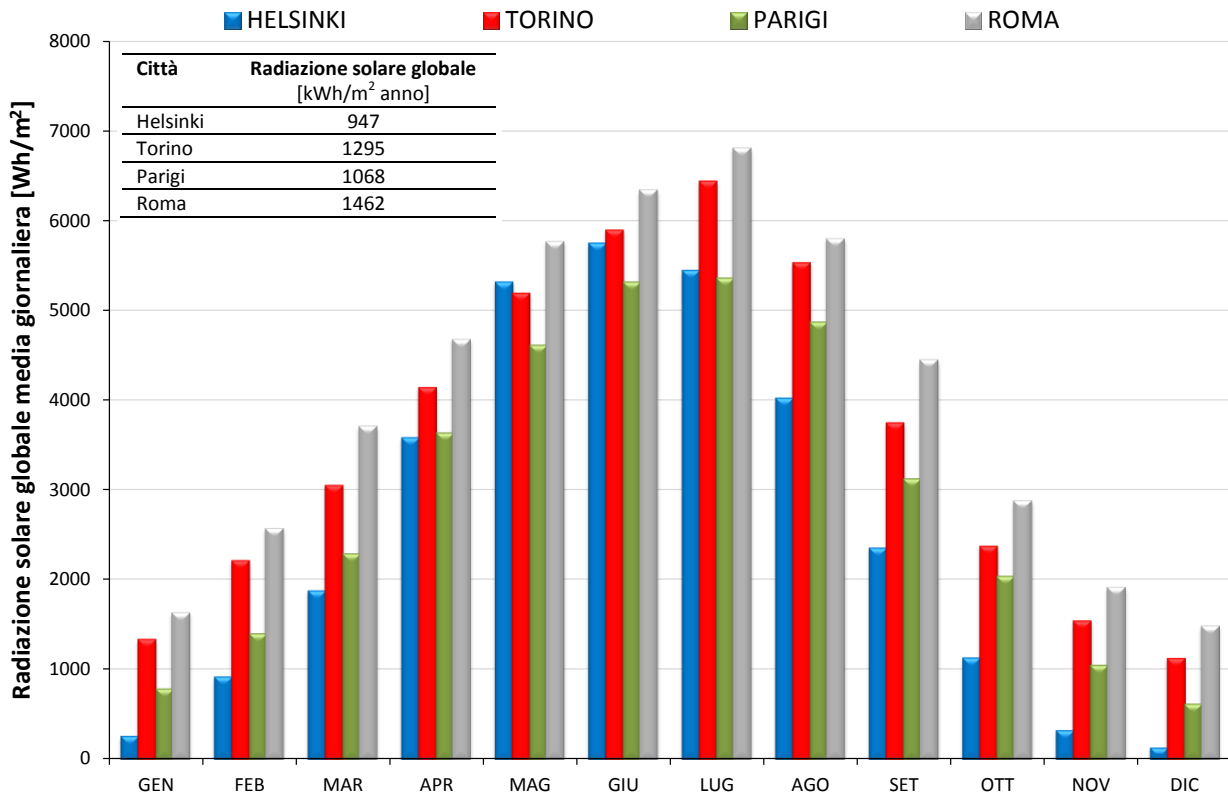


Figura 21. Radiazione solare globale delle località considerate.

Infine, per il WWR2 più elevato, per il quale circa il 100% delle stesse facciate è costituito da superfici trasparenti (Tabella 11), la nuova soluzione comporta benefici più evidenti nelle città con clima moderato e in quelle fredde: ad esempio, per la città di Torino, la riduzione della richiesta per il riscaldamento rispetto al LOW-E DGU è pari al 15% e, allo stesso tempo, l'incremento per il raffrescamento è il 6%; in condizioni evacuate, la riduzione del fabbisogno energetico in condizioni invernali potrebbe arrivare al 39%.

7. Conclusioni

Tra le soluzioni avanzate più promettenti per l'involucro trasparente nel campo degli edifici NZEB si annoverano i sistemi con aerogel in intercapedine. L'aerogel di silice è una sostanza nanoporosa con conducibilità termica a temperatura ambiente tipicamente nel range 0.010 – 0.020 W/mK e densità inferiore a 200 kg/m³. Nella forma granulata, è attualmente integrato in diverse tipologie di sistemi trasparenti disponibili sul mercato, quali sistemi con struttura di contenimento multicamera in policarbonato o sistemi vetrati isolanti. Le soluzioni ottenute presentano ottime prestazioni termiche, acustiche e ottiche, grazie alla capacità di diffondere la luce e all'elevato coefficiente di trasmissione nel visibile. Tuttavia, essendo l'aerogel granulato traslucido, le vetrate non permettono la visione dell'esterno. Sono quindi in corso di studio soluzioni vetrate che impiegano l'aerogel nella sua forma monolitica che, pur risentendo degli effetti di diffusione della luce, appare trasparente. Tuttavia, sistemi vetrati con aerogel monolitico non sono ancora in commercio, poiché non si riescono ad ottenere lastre di grandi dimensioni omogenee e resistenti a costi ragionevoli.

L'accurata campagna sperimentale effettuata su un prototipo con aerogel monolitico in intercapedine appositamente realizzato e la fase di analisi numerica per un caso di studio hanno quindi permesso di valutarne le prestazioni ottiche, termiche ed energetiche allo stato attuale e di evidenziarne le prospettive di sviluppo future per l'edilizia non residenziale. Il prototipo di vetrata è stato assemblato impiegando aerogel monolitico realizzato con metodo innovativo, ovvero l'estrazione rapida in condizioni supercritiche. Tale processo, a oggi in corso di studio e ottimizzazione, potrebbe permettere una riduzione significativa dei tempi di produzione e dei costi, fattori indispensabili per una diffusione di tali tecnologie negli edifici su vasta scala.

L'inserimento di un aerogel monolitico nell'intercapedine (15 mm) tra due lastre vetrate float (spessore 4.7 mm) permette di avere una trasmittanza termica (U) complessiva di 1.1 W/m²K, valore misurato impiegando un apparato strumentale denominato *Small Hot Box*, costruito e messo a punto presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia al fine di valutare le prestazioni termiche di campioni di dimensioni modeste (30 cm x 30 cm), come quello in esame. Dalle misure è possibile stimare la conducibilità termica per la sola lastra di aerogel in intercapedine a circa 35 °C (temperatura media del campione durante la prova), che risulta pari a 0.021 W/mK.

La soluzione investigata potrebbe fornire risultati più interessanti se si considerasse la prospettiva futura, a oggi in corso di studio, di una vetrocamera con aerogel in condizioni evacuate: la trasmittanza termica stimata per una vetrata di spessore complessivo pari a circa 25 mm si ridurrebbe fino a 0.6 W/m²K.

La campagna di misure ottiche, svolta con uno spettrofotometro convenzionale a doppio raggio, disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria, e con uno non convenzionale, dotato di sfera integratrice di diametro 75 cm e disponibile presso il Centro di Ricerca ENEA Casaccia, hanno evidenziato che gli strumenti convenzionali tendono a sottostimare, soprattutto nel range del visibile, la trasmissione di campioni complessi e diffondenti come quello in esame. Nel caso in esame, tuttavia, tale sottostima è risultata modesta a causa dell'elevata trasparenza del campione.

La trasmissione luminosa (τ_v) del prototipo, calcolata dai dati spettrali misurati nel range 380-2300 nm ai sensi della UNI EN 410, è pari a 0.69; allo stesso tempo, la lastra di aerogel comporta un incremento della riflessione luminosa (ρ_v), che risulta pari a 0.25. La trasmissione nel range del visibile appare quindi elevata, anche se il campione oggetto di studio è stato assemblato mediante l'unione di diverse lastre e presentava alcune imperfezioni superficiali, fattori che hanno penalizzato le prestazioni ottiche complessive. Si prevede

tuttavia nel medio termine un miglioramento delle proprietà di trasparenza dei sistemi con aerogel monolitico, mediante l'ottimizzazione del processo di estrazione supercritica.

Si osserva inoltre che il decadimento angolare della trasmissione visibile e solare misurata a 30° rispetto a quella misurata a incidenza normale appare modesto, simile a quello di una vetrocamera convenzionale. Tuttavia, si suggerisce lo studio del comportamento ad angoli di incidenza maggiori, quali ad esempio 45° e 60°.

Il fattore solare (g), stimato mediante un metodo approssimato secondo la procedura riportata nella norma UNI EN 410, è elevato e risulta pari a 0.70.

La soluzione innovativa indagata è caratterizzata anche da un'ottima resa cromatica ($R_a=96$), garantendo un'alterazione minima della radiazione luminosa che attraversa la superficie vetrata e quindi un ottimo comfort visivo all'interno dell'edificio.

Il confronto con una vetrocamera doppia convenzionale con lastra basso-emissiva ha evidenziato che la soluzione investigata presenta prestazioni termiche di poco superiori (la trasmittanza termica si riduce del 9%), a discapito di trasmissione luminosa di poco inferiore (-9%); allo stesso tempo il guadagno solare si mantiene più alto (+27%), situazione vantaggiosa in condizioni invernali. Le prestazioni misurate sono paragonabili a soluzioni innovative alternative con aerogel granulare in intercapedine, ma queste ultime, come detto, non consentono la visione dell'esterno essendo traslucide.

Infine, i dati ottenuti dall'accurata caratterizzazione sperimentale ottica e termica della vetrocamera innovativa sono stati impiegati in simulazioni in regime dinamico delle prestazioni termoenergetiche degli edifici, considerando un edificio commerciale come caso di studio. Le simulazioni hanno evidenziato che la nuova soluzione investigata comporta una riduzione significativa della richiesta per il riscaldamento rispetto a una vetrocamera con basso-emissivo. In generale, il risparmio aumenta con la radiazione solare incidente nella località nei mesi invernali, a causa dell'elevato fattore solare di AER-DGU; i benefici risultano quindi più evidenti nel clima moderato: per la città di Torino la riduzione della richiesta per il riscaldamento è pari al 10% (WWR1) e sale al 15% per il WWR più elevato (WWR2). Tuttavia, come prevedibile, si osserva un incremento dei fabbisogni per il raffrescamento che varia con la località considerata: per Torino è pari al 5% e al 6% per WWR1 e WWR2 rispettivamente. L'impatto sui fabbisogni energetici per l'illuminazione è invece trascurabile, viste le buone proprietà di trasparenza.

Riferimenti bibliografici

1. U. Berardi, "The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofiting project", *Applied Energy*, 154 (2015), pp. 603–615.
2. A.M. Anderson, C.W. Wattle, M.K. Carroll, "Silica aerogels prepared via rapid supercritical extraction: Effect of process variables on aerogel properties", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355 (2009), pp. 101–108.
3. M.K. Carroll, A.M. Anderson, C.A. Gorka, "Preparing Silica Aerogel Monoliths via a Rapid Supercritical Extraction Method", *Journal of Visualized Experiments*, 84 (2014), e51421.
4. M.M.H. Bhuiya, A.M. Anderson, M.K. Carroll, B.A. Bruno, J.L. Ventrella, B. Silberman, and B. Keramati,
5. "Preparation of Monolithic Silica Aerogel for Fenestration Applications: Scaling up, Reducing Cycle Time, and Improving Performance", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55 (2016), pp. 6971–6981.
6. Z. Guoqing, S. Jun, W. Xiaoqing, N. Xingyuan, Z. Zhihua, W. Jichao, L. Guangwu, "Preparation and characterization of monolithic alumina aerogels", *Journal of Non-Crystalline Solids* 357 (2011), pp. 2903–2906.
7. K. Duer, S. Svendsen, "Monolithic silica aerogel in superinsulating glazings", *Solar Energy*, 63(1998), pp. 259–267.
8. K.I. Jensen, J.M. Schultz, F.H. Kristiansen, "Development of windows based on highly insulating aerogel glazings", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350 (2004), pp. 351–357.
9. J.M. Schultz, K.I. Jensen, F.H. Kristiansen, "Super insulating aerogel glazing", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89 (2005), pp. 275–285.
10. M. Reim, W. Korner, J. Manara, S. Korder, M. Arduini-Schuster, H.P. Ebert, J. Fricke, "Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting", *Solar Energy*, 2 (2005), pp. 131–139.
11. R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, "Aerogel insulation for building applications: a state-of- the-art review", *Energy and Buildings*, 43 (2011), pp. 761–769.
12. C. Buratti, E. Moretti, "Lighting and energetic characteristics of transparent insulating materials: experimental data and calculation", *Indoor and Built Environment*, 20(4) (2011), pp. 400–411.
13. C. Buratti, E. Moretti, "Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems", *Applied Energy*, 97 (2012), pp. 430–437.
14. C. Buratti, E. Moretti, "Glazing systems with silica aerogel for energy savings in buildings", *Applied Energy*, 98 (2012), pp. 396–403.
15. J.C.H. Wong, H. Kaymak, S. Brunner, M.M. Koebel, "Mechanical properties of monolithic silica aerogels made from polyethoxydisiloxanes", *Microporous and Mesoporous Materials*, 183 (2014), pp. 23–29.
16. J.M. Schultz, K.I. Jensen, "Evacuated aerogel glazings", *Vacuum*, 82 (2008), pp. 723–729.
17. C. Buratti, E. Moretti, "Nanogel windows", *Nearly Zero Energy Building Refurbishment: A Multidisciplinary Approach*, Chapter 20 (2013), F.P. Torgal, M. Mistretta, A. Kaklauskas, C.G. Granqvist, L.F. Cabeza (eds), Springer-Verlag, London, 2013, pp. 555-582.
18. C. Buratti, E. Moretti, E. Belloni, "Nanogel windows for energy building efficiency", *Nano and biotech based materials for energy building efficiency*, (2016), F.P. Torgal, C. Buratti, S. Kalaiselvam, C.G. Granqvist, V. Ivanov (eds), Springer International Publishing, Switzerland, 2016, pp. 41-69.
19. C. Buratti, E. Moretti, E. Belloni, "Aerogel plasters for energy building efficiency", *Nano and biotech based materials for energy building efficiency*, (2016), F.P. Torgal, C. Buratti, S. Kalaiselvam, C.G. Granqvist, V. Ivanov (Eds.), Springer International Publishing, Switzerland, 2016, pp. 17-40.
20. E. Moretti, F. Merli, E. Cuce, C. Buratti, "Thermal and acoustic properties of aerogels: preliminary investigation of the influence of granule size", *Energy Procedia*, 111 (2017), pp. 472-480.
21. C. Buratti, E. Moretti, "Silica nanogel for energy-efficient windows", *Nanotechnology in eco-efficient construction*, (2013), F.P. Torgal, M.V. Diamanti, A. Nazari, C.G. Granqvist (Eds.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013, pp. 207-235.

22. C. Buratti, E. Moretti, E. Belloni, "The influence of glazing systems on energy performance of non-residential buildings", Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation of Energy Conversion Systems and Processes ECOS, 26 – 29 Giugno 2012, Perugia, Italy, pp. 281-294.
23. C. Buratti, F. Merli, E. Moretti, "Aerogel-based materials for building applications: Influence of granule size on thermal and acoustic performance", Energy and Buildings, 152 (2017), pp.472–482.
24. U. Berardi, "Development of glazing systems with silica aerogel", Energy Procedia, 78 (2015), pp.394 – 399.
25. N. Lolli, I. Andresen, "Aerogel vs. argon insulation in windows: A greenhouse gas emissions Analysis", Building and Environment, 101 (2016), pp.64-76.
26. Maccari, M. Montecchi, F. Treppo, M. Zinzi, "CATRAM: an apparatus for the optical characterization of advanced transparent materials", Applied Optics, 37 (1998), pp. 5156–5161.
27. C. Buratti, E. Moretti, M. Zinzi, "High Energy-Efficient Windows with Silica Aerogel for Building Refurbishment: Experimental Characterization and Preliminary Simulations in Different Climate Conditions", Buildings (2017), 7, 8.
28. E. Moretti, M. Zinzi, E. Carnielo, F. Merli, "Advanced polycarbonate transparent systems with aerogel: preliminary characterization of optical and thermal properties", Energy Procedia, 113 (2017), pp. 9-16.
29. E. Moretti, M. Zinzi, E. Belloni, "Polycarbonate panels for buildings: experimental investigation of thermal and optical performance", Energy and Buildings, 70 (2014), pp. 23-35.
30. UNI EN 410, "Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing", 2011.
31. C. Buratti, E. Belloni, L. Lunghi, M. Barbanera, "Thermal Conductivity Measurements By Means of a New 'Small Hot-Box' Apparatus: Manufacturing, Calibration and Preliminary Experimental Tests on Different Materials", International Journal of Thermophysics, (2016) 37:47.
32. C. Buratti, E. Belloni, L. Lunghi, A. Borri, G. Castori, M. Corradi, "Mechanical characterization and thermal conductivity measurements using of a new "small hot-box" apparatus: innovative insulating reinforced coatings analysis", Journal of Building Engineering, 7 (2016), pp. 63-70.
33. A. Borri, M. Corradi, R. Sisti, C. Buratti, E. Belloni, E. Moretti, "Masonry wall panels retrofitted with thermal-insulating GFRP-reinforced jacketing", Materials and Structures, 49 (2016), pp. 3957-3968.
34. UNI EN ISO 8990, "Isolamento termico - Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario - Metodo della doppia camera calibrata e della doppia camera con anello di guardia", Giugno 1999.
35. UNI EN ISO 12567-1, "Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della Hot Box, finestre e porte complete", Luglio 2010.
36. UNI EN 1934, "Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della Hot Box con termoflussimetro", Maggio 2000.
37. EnergyPlus 8.4. Available at: <https://energyplus.net/>.
38. Engineering Documentation of EnergyPlus, 2001. Available at: <https://energyplus.net/documentation>.
39. Sketchup 2015. Available at: <https://www.sketchup.com/it>.
40. OpenStudio 1.12. Available at: <https://www.openstudio.net/>.
41. Window 7.4. Available at: <https://windows.lbl.gov/software/window/window.html>.
42. Optics 6. Available at: <https://windows.lbl.gov/software/optics/optics.html>.
43. C. Buratti, F. Merli, E. Moretti, "Valutazione preliminare dell'influenza della granulometria e dello spessore sulle proprietà ottiche di vetrate innovative con aerogel granulare", XVII Congresso Nazionale CIRIAF- Sostenibilità Energetico-Ambientale e consolidamento sismico del patrimonio costruito, Marsciano (PG), 6-7 Aprile 2017. ISBN: 978-88-6074-783-9
44. UNI EN ISO 10456, "Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto", Maggio 2008.

Abbreviazioni ed acronimi

$\tau(\lambda)$: trasmissione spettrale [-]
 τ_v : fattore di trasmissione visibile [-]
 τ_e : fattore di trasmissione solare diretta [-]
 $\rho(\lambda)$: riflessione spettrale [-]
 ρ_v : fattore di riflessione visibile [-]
 ρ_e : fattore di riflessione solare diretta [-]
 q_i : fattore di trasferimento di calore secondario verso l'interno [-]
 α_e : assorbimento solare diretto [-]
 g : fattore solare [-]
 U : trasmittanza termica [W/m^2K]
 R : resistenza termica [m^2K/W]
 λ : conducibilità termica [W/mK]
 s_a : spessore aerogel [m]
 λ_a : conducibilità termica aerogel [W/mK]
 s_v : spessore lastra float [m]
 λ_v : conducibilità termica lastra float [W/mK]
 $T_{lato\ caldo}$: temperatura aria lato caldo [$^{\circ}C$]
 $T_{lato\ freddo}$: temperatura aria lato freddo [$^{\circ}C$]
 ΔT_{aria} : differenza di temperatura aria [$^{\circ}C$]
 ΔT_{sup} : differenza di temperatura superficiale campione [$^{\circ}C$]
 Φ : flusso termico [W/m^2]
 R_a : indice di resa cromatica [-]
 R_i : indice specifico di resa del colore [-]
 ΔE_i : distorsione totale del colore i-esimo [-]
DGU: vetrocamera doppia con argon (90%)
LOW-E DGU: vetrocamera doppia con trattamento basso-emissivo
LOW-E TDGU: tripla vetrocamera con due lastre con trattamento basso-emissivo
AER DGU: vetrocamera con aerogel monolitico in intercapedine
AER DGU (condizioni evacuate): vetrocamera con aerogel monolitico in intercapedine in condizioni evacuate
GRAN- AER- DGU 10: Vetrocamera con aerogel granulare (10 mm) in intercapedine
GRAN- AER- DGU 20: Vetrocamera con aerogel granulare (20 mm) in intercapedine
WWR: Window to Wall Ratio

Appendice: Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Elisa Moretti

Elisa Moretti, nata a Foligno il 18/03/1976, è laureata in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio presso l'Università degli Studi di Perugia con votazione 110/110 e lode (2002) e ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale nel 2006. È iscritta all'Albo Professionale dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia dal 24/01/2006. È ricercatore a tempo determinato in Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università di Perugia dal 2008 ed è stata nominata professore di ruolo di II fascia nel settore ING-IND/11 (Fisica tecnica ambientale) presso il Dipartimento di Ingegneria di Perugia a decorrere dal 29.12.2017. Svolge attività didattica presso l'Università degli Studi di Perugia dall'anno accademico 2007-2008 ed è attualmente docente del corso di "Impianti Tecnici" (10 CFU). È membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in "Energia e Sviluppo Sostenibile" dell'Università di Perugia dal 2016 ed è stato membro del Collegio del Dottorato in "Ingegneria Energetica" dal 2009 al 2015. Ha svolto e svolge attività di supervisione e tutoraggio per dottorati di ricerca ed è stato relatore e correlatore di numerose Tesi di Laurea. È stato membro del Consiglio Direttivo del CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente Mauro Felli) da Aprile 2010 ad Aprile 2013 e ed è membro del Consiglio Scientifico del CIRIAF dal 2009. Dal 2002 svolge attività di ricerca e ricerca applicata nell'ambito di progetti di ricerca, nazionali e internazionali, e convenzioni di ricerca con Enti pubblici e Società private. Le attività di ricerca riguardano principalmente le prestazioni energetiche degli edifici e lo studio e l'ottimizzazione materiali innovativi per l'edilizia, con particolare riferimento a soluzioni a base di aerogel di silice. È autore di oltre 80 pubblicazioni scientifiche su riviste, atti di congressi o libri aventi ampia diffusione nazionale o internazionale (<http://orcid.org/0000-0002-6582-8752>) e ha partecipato in qualità di relatore o relatore a invito a Congressi e Convegni nazionali e internazionali.

Cinzia Buratti

Cinzia Buratti, nata a Marsciano (PG) il 26/02/1966, laureata in Ingegneria Civile nel 1990, Ph.D in Proprietà Termofisiche dei Materiali nel 1995, è Professore Associato di Fisica Tecnica Ambientale dal 2005 e idonea all'abilitazione per Professore Ordinario nel settore concorsuale 09/C2 dal 03/02/2014. E' attualmente membro della Giunta del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Perugia dal 2014; del Collegio dei docenti del Dottorato di Ricerca in Energia e Sviluppo Sostenibile dal 2016; del Consiglio del CRC - Centro di Ricerca sul Clima (Università di Perugia), del Consiglio Scientifico del CIRPS - Centro Interuniversitario di Ricerca Per lo Sviluppo sostenibile (Università di Roma "Sapienza") e del Consiglio del CIRIAF – Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici (Università di Perugia). E' inoltre rappresentante dell'Università di Perugia nel Cluster Umbria Spring (Chimica Verde), Comitato di Sviluppo Territoriale e di Disseminazione dal 2017 e Delegato AIDI (Associazione Italiana di illuminazione) per l'Umbria dal 2011. E' stata Coordinatore del Dottorato in Energia e Sviluppo Sostenibile istituito presso il Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente "Mauro Felli" dell'Università degli Studi di Perugia dal 2013 al 2016 e Direttore del Centro di Ricerca sulle Biomasse (CRB) dal 2013 al 2016. Ha partecipato ai lavori dell'ANNEX 65 *Long Term Performance of Super-insulation in Building Components & Systems (EBC-Energy in Buildings and Communities Programme, Executive Committee of the International Energy Agency)* dal 2014 al 2017. E' stata inoltre membro del Senato Accademico dell'Università degli Studi di Perugia dal 2002 al 2005 in qualità di rappresentante dei Ricercatori, membro del Collegio dei docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale (Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Perugia) e del Collegio dei docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Energetica (Centro di Ricerca sulle Biomasse, Università di Perugia). E' stata infine membro del Comitato Pari Opportunità dell'Ateneo dal 2009 al 2011 in qualità di rappresentante del personale docente. Afferisce al Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Perugia ed è Docente presso la stessa Università dall'a.a. 1998-'99; attualmente è titolare dei corsi di *Fisica Tecnica* e di *Impianti Tecnici per l'Edilizia* presso i Corsi di laurea in Ingegneria Civile Triennale e Magistrale e di *Impianti Termotecnici* presso il Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica. Ha svolto anche attività didattica all'estero, presso l'Università di Mar del Plata (Argentina) e la Huazong

University of Science and Technology (Wuhan, Cina). E' stata tutor di oltre 20 dottorandi di ricerca e relatore di oltre 200 tesi di laurea. Svolge attività di ricerca e di ricerca applicata presso l'Università di Perugia dal 1990 in qualità di responsabile scientifico di convenzioni e contratti di ricerca con importanti enti pubblici e privati e/o nell'ambito di progetti nazionali e internazionali. L'attività di ricerca scientifica è incentrata sulle seguenti tematiche: materiali trasparenti e opachi innovativi per il risparmio energetico in edilizia, soprattutto a base di aerogel; trasmissione del calore negli edifici; condizioni ambientali di conservazione delle opere d'arte; impiego energetico delle biomasse; acustica architettonica ed edilizia, acustica ambientale; impatto ambientale dei sistemi energetici e analisi di ciclo di vita (LCA) di materiali e processi. È autore di oltre 200 pubblicazioni scientifiche su riviste, atti di congressi e libri ad ampia diffusione nazionale e internazionale (<https://orcid.org/0000-0001-5653-3701>), è editor di libri e riviste a diffusione internazionale e ha partecipato in qualità di chairman, relatore a invito e relatore a numerosi congressi nazionali e internazionali.

Elisa Belloni

Elisa Belloni, nata a Perugia il 16/06/1984, è laureata in Ingegneria Civile (laurea specialistica) presso l'Università degli Studi di Perugia con votazione 110/110 e lode (2009) e ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Energetica nel 2013 con la tesi dal titolo *Il ruolo delle pareti trasparenti nell'involucro edilizio: indagine sulle prestazioni termiche, visive e acustiche di materiali innovativi mediante prove sperimentali e simulazioni numeriche*. È iscritta all'Albo Professionale dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia dal 24/04/2010. Ha svolto l'attività di tutorato per i corsi di studio del Dipartimento di Ingegneria negli anni accademici 2010-2011 e 2011-2012. Nel gennaio 2015 ha svolto attività di docenza per l'Università La Sapienza di Roma - CIRPS su Energy Economy and LCA presso Wuhan Huazhong University (CHINA) - progetto "Support to Institutional and capacity building of the China-EU Institute for Clean and Renewable Energy ICARE". Dal 2013 ad oggi è stata titolare di n.3 Assegni di Ricerca e n.2 Borse di Studio presso il Dipartimento di Ingegneria. È idonea all'abilitazione per professore di II fascia nel settore concorsuale 09/C2 Fisica Tecnica e Ingegneria Nucleare. Le attività di ricerca che ha svolto nel corso di questi anni riguardano principalmente lo studio delle prestazioni di materiali innovativi per l'involucro trasparente ed opaco in edilizia, le prestazioni energetiche degli edifici, l'analisi di comfort termico, acustico e visivo di ambienti confinati. È stato correlatore di diverse Tesi di Laurea Triennale e Specialistica. È autore di oltre 30 pubblicazioni scientifiche su riviste, atti di congressi e libri di diffusione nazionale e internazionale e ha partecipato in qualità di relatore a numerosi Convegni.

Francesca Merli

Francesca Merli, nata a Perugia il 05/12/1984, è laureata in Ingegneria Civile (laurea specialistica) presso l'Università degli Studi di Perugia con votazione 110/110 e lode (2015) con la Tesi dal titolo *Materiali isolanti innovativi a base di aerogel: caratterizzazione sperimentale delle prestazioni termiche ed acustiche*. È iscritta all'Albo Professionale dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia dal 19/01/2016. Dal 2015 sta frequentando il corso di Dottorato di Ricerca in Energia e sviluppo sostenibile. Le principali attività di ricerca riguardano lo studio di materiali innovativi avanzati per l'edilizia dal punto di vista termico, acustico e illuminotecnico. È autore di pubblicazioni scientifiche su rivista, atti di congresso e ha partecipato in qualità di relatore a Congressi e Convegni nazionali. Ha ottenuto il riconoscimento *Best Senior Paper Award* all'International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies – CONECT 2016 per il lavoro *Advanced polycarbonate transparent systems with aerogel: preliminary characterization of optical and thermal properties* (2016).