

## CARATTERIZZAZIONE DI VETRATE CON MATERIALI TRASPARENTI ISOLANTI INNOVATIVI

Cinzia Buratti<sup>1</sup>, Elisa Moretti<sup>1</sup>, Marco Barbanera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi Perugia - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia

<sup>2</sup>CRB Centro di Ricerca sulle Biomasse, Strada S.Lucia Canetola s.n., 06125 Perugia

### SOMMARIO

Negli ultimi anni si assiste ad un sempre maggiore interesse nella ricerca di soluzioni che prevedano l'impiego di materiali trasparenti isolanti innovativi (TIMs) da sostituire ai normali sistemi per ridurre le spese di riscaldamento e raffrescamento, senza però penalizzare il comfort visivo. Nel presente lavoro sono state indagate alcune soluzioni vetrate innovative costituite da un materiale tecnologicamente avanzato in intercapedine: l'aerogel, considerato in forma granulare e monolitica. Per ogni campione si sono eseguite misure di trasmissione e di riflessione in funzione della lunghezza d'onda, grazie allo spettrofotometro UV/VIS/NIR SolidSpec-3700. Dai risultati ottenuti è stato possibile calcolare i principali parametri energetici e luminosi, ai sensi della norma UNI EN 410:2000, e la trasmittanza termica, secondo le prescrizioni della UNI EN ISO 10077-1:2007 e della UNI EN 673:2002. Tra i materiali esaminati, il sistema più performante risulta essere quello con vetro float da 4 mm e aerogel monolitico, con ipotesi di evacuazione dell'aria. Il campione, infatti, presenta al contempo bassi valori di trasmittanza termica ( $U = 0.63 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ), un fattore solare adeguato ( $g = 0.70$ ) e alti valori di trasmissione luminosa ( $\tau_v = 0.60$ ); le soluzioni con aerogel granulare invece risultano penalizzate dal punto di vista della trasmissione luminosa ( $\tau_v = 0.27$ ). Infine, l'indagine sperimentale su un prototipo di finestra in alluminio con una vetrata innovativa con aerogel granulare in intercapedine ha evidenziato la validità delle stime teoriche; le prove termiche con il metodo della camera calda hanno confermato una trasmittanza termica per il vetrocamera inferiore a  $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . L'aerogel presenta inoltre anche eccellenti proprietà di isolamento acustico: l'indice di valutazione del potere fonoisolante  $R_w$  misurato ai sensi della UNI EN ISO 140 – 3 per l'infisso con aerogel risulta pari a 37 dB, superiore di 3 dB rispetto allo stesso infisso con vetrocamera tradizionale di uguale spessore.

### 1. INTRODUZIONE

Le recenti disposizioni normative, a partire dal D.lgs. 311/2006 [1], impongono valori dei parametri energetici delle vetrate sempre più restrittivi, al fine di limitare le dispersioni termiche e ridurre i consumi energetici derivanti dalla climatizzazione e dal condizionamento degli edifici. Per tali ragioni, si assiste ad un sempre maggiore interesse nella ricerca di soluzioni che prevedano l'impiego di materiali trasparenti isolanti innovativi (TIMs), da sostituire ai normali sistemi per ridurre le spese di riscaldamento e raffrescamento, senza però penalizzare il comfort visivo [2].

Nel presente lavoro sono stati indagati alcuni sistemi innovativi da poter inserire all'interno dei tradizionali vetrocamera, al fine di migliorarne le prestazioni energetiche. Di particolare interesse è risultato l'aerogel, una sostanza solida nanoporosa caratterizzata dal 96-98% di aria e il 2-4% di silice, mille volte meno densa del vetro comune, creata da Steven Kistler nel 1931 [3]. L'aerogel può essere prodotto a partire da varie sostanze quali silice, carbonio e allumina, anche se quello di silice è decisamente il più diffuso, e può assumere due forme principali: granulare e monolitica. Da quando fu sintetizzato la prima volta 80 anni fa, l'aerogel ha rivelato molteplici potenziali applicazioni negli ambiti più disparati, come la microelettronica per la sua bassa costante dielettrica, l'isolamento acustico, la cattura di microparticelle

nello spazio, l'ottica, ecc. e tra questi l'isolamento termico è sicuramente uno dei più significativi [4-9].

Dopo un'accurata analisi delle proprietà dell'aerogel, con particolare riferimento all'isolamento termico e all'impiego in sistemi per involucri trasparenti, sono stati individuati alcuni campioni prodotti da varie aziende europee leader nel settore del daylighting, quali l'inglese Xtralight [10] e la tedesca Okalux [11]. I sistemi indagati sono costituiti da elementi trasparenti con aerogel granulare in intercapedine del tipo Nanogel<sup>®</sup>, prodotto dall'americana Cabot Corporation [12], unica azienda al mondo a sintetizzare aerogel granulare su vasta scala. Inoltre si sono reperiti campioni di aerogel in forma monolitica, prodotto dall'azienda svedese Airglass AB [13], e vetri di vario tipo (float, con PVB acustico, con trattamento basso-emissivo) della ditta AGC [14], successivamente assemblati a creare vetrate innovative di diverso spessore, con intercapedine costituita da aerogel granulare o monolitico.

Per ogni campione si sono effettuate misure di trasmissione e riflessione in funzione della lunghezza d'onda, nel range compreso tra 300 e 2500 nm, grazie allo spettrofotometro UV/VIS/NIR SolidSpec-3700 [15], dotato di sfera integratrice per la determinazione della componente diffusa della radiazione.

Dai risultati ottenuti è stato possibile calcolare i principali parametri energetici e luminosi, ai sensi della norma UNI EN

410:2000 [16], e la trasmittanza termica, secondo le prescrizioni della UNI EN ISO 10077-1: 2007 [17] e della UNI EN 673:2002 [18].

Infine, si è realizzato il prototipo di una finestra in alluminio con vetrocamera e aerogel granulare in intercapedine. Su tale campione si sono effettuate misure di trasmittanza termica globale in camera calda, ai sensi della norma UNI EN ISO 12567-1:2002 [19], al fine di verificare l'attendibilità dei valori stimati per via teorica. Per una completa caratterizzazione del campione, si sono valutate anche le prestazioni acustiche di tale soluzione innovativa mediante misure di potere fonoisolante ai sensi della UNI EN ISO 140-3 [20]. Infine, per evidenziare i benefici di infissi con materiali trasparenti innovativi, le prestazioni termiche ed acustiche del prototipo sono state confrontate con quelle misurate per un infisso analogo con una vetrata tradizionale di uguali caratteristiche e spessore complessivo.

## 2. CAMPIONI ESAMINATI

### 2.1 Aerogel monolitico e granulare

L'aerogel monolitico si presenta come una lastra trasparente simile al vetro, ma dotata di estrema leggerezza; è costituito chimicamente da quarzo e da una grande quantità di aria, pertanto è un materiale piuttosto fragile, che si sfalda facilmente al tatto. Le dimensioni dei grani del quarzo sono molto piccole rispetto alle lunghezze d'onda del visibile, garantendo così buone proprietà di trasparenza. L'Aerogel monolitico è stato fornito da AIRGLASS [13], in 4 pezzi di dimensioni 90x90x14 mm circa (fig. 1).

La conducibilità termica risulta pari a 0.17 W/(m K) nelle condizioni non evacuate e diminuisce fino a 0.07 W/(m K) nel caso di installazione in condizioni evacuate.

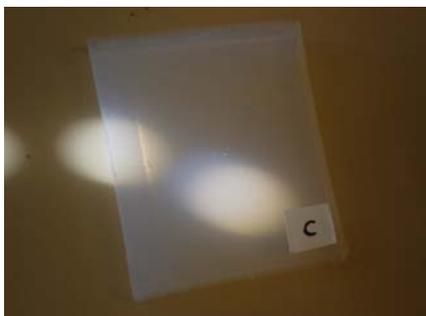


Figura 1: Esempio di campione di aerogel monolitico

L'aerogel granulare preso in esame è prodotto dall'americana Cabot Corporation [12], con il nome di Nanogel®. Fornito nella versione translucent, è un materiale isolante nanoporoso costituito da granuli di forma irregolare, con dimensioni che variano tra 0.5 e 3.5 mm. Nanogel® è impiegato soprattutto nell'ambito dell'isolamento termico in edilizia, anche in considerazione della sua conducibilità termica pari a 0.18 W/(m K), e si può trovare sia in forma sciolta, da inserire in sistemi vetrati isolanti (applicazioni per Daylighting), sia inglobato in rotoli flessibili e leggeri (Nanogel Thermal Wrap) per l'isolamento degli involucri non trasparenti, di pavimenti e coperture [12]. Il materiale fornito nella quantità di 30 litri è stato impiegato per la realizzazione

dei campioni oggetto di indagine spettrofotometrica e del prototipo di finestra in alluminio (paragrafo 4).

### 2.2 Campioni con aerogel granulare

I campioni già assemblati contenenti aerogel granulare forniti a scopo di ricerca dalle aziende del settore sono:

- polycarbonato contenente aerogel granulare, prodotto da XTRALIGHT [10], in due spessori differenti (16 mm e 25 mm) (fig. 2.b);
- Okagel, vetrocamera contenente aerogel granulare, prodotto dalla OKALUX [11], di dimensioni 21 x 29.7 x 2 cm (fig. 2.b).

I campioni di polycarbonato con aerogel granulare Nanogel® in intercapedine uniscono la tecnologia della azienda inglese Xtralight, nella produzione di lucernari e soffitti vetrati, con le caratteristiche di isolamento dell'aerogel granulare. I campioni forniti sono costituiti da due elementi delle dimensioni di fogli ISO A4 di diverso spessore, caratterizzati da granuli di aerogel inseriti all'interno del materiale impiegato dalla Xtralight per i soffitti trasparenti. Queste due tecnologie si uniscono per raggiungere un sistema energeticamente efficiente in cui la luce viene diffusa all'interno degli ambienti, pur garantendo un adeguato isolamento acustico e termico grazie alla presenza dell'aerogel. L'impiego di aerogel granulare, infatti, è particolarmente adatto per soffitti trasparenti e lucernari, ma non per finestre, non consentendo la visione attraverso di esso. I campioni hanno spessori di 16 mm e 25 mm e secondo i dati del produttore possono raggiungere valori di trasmittanza che vanno da 1.3 W/(m<sup>2</sup> K) a 0.89 W/(m<sup>2</sup> K) per pannelli dello spessore di 25 mm [10]; inoltre, il modesto valore della massa superficiale, pari a 3.6 kg/m<sup>2</sup>, ovvero circa dieci volte minore di un vetrocamera tradizionale, rende i pannelli facili da mettere in opera senza gravare sull'equilibrio strutturale dell'edificio.

Il secondo sistema innovativo, Okagel, è stato sviluppato dalla ditta tedesca OKALUX ed è costituito da un vetrocamera in cui lo strato intermedio è riempito con aerogel granulare Nanogel® traslucido. Le caratteristiche dell'aerogel presente all'interno rendono il sistema particolarmente adatto alle applicazioni in cui sono richieste diffusione della luce e isolamento termico ed acustico, come ad esempio musei, palestre, finestre di elevate dimensioni. Okagel è costituito da due lastre di vetro dello spessore di 6 mm ed è in grado di garantire una buona distribuzione della luce negli ambienti. Le caratteristiche energetiche ed ottiche dichiarate dal produttore sono le seguenti: trasmittanza termica compresa tra 0.3 e 0.9 W/(m<sup>2</sup> K) in funzione dello spessore dell'intercapedine; fattore di trasmissione luminosa compreso nel range 10-38%.

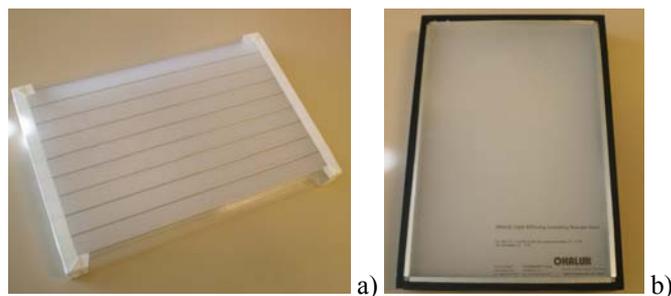


Figura 2: Campioni con aerogel granulare: Xtralight (a) e Okagel (b)

## 2.3 Campioni assemblati con aerogel monolitico e granulare

Per la realizzazione dei campioni di vetrocamera innovativi con aerogel in intercapedine sono state selezionate le tipologie di lastre più rappresentative dal punto di vista delle proprietà ottiche ed energetiche, al fine di ottenere performance migliori in associazione con i due tipi di aerogel disponibili (Nanogel<sup>®</sup> granulare e monolitico AIRGLASS). Le lastre impiegate nell'assemblaggio dei campioni sono:

- vetro float semplice, spessore 4 mm;
- lastra stratificata con laminato acustico (PVB acustico 0.76 mm) 6/7 (33.2);
- lastra stratificata con laminato acustico (PVB acustico 0.76 mm) e trattamento basso-emissivo TOPN 6/7 (33.2);
- lastra stratificata con laminato acustico (PVB acustico 0.76 mm) 10/11 (55.2);

Le caratteristiche degli otto campioni assemblati sono riportate in tabella 1; per ciascun campione è fornita la tipologia della lastra esterna ed interna, lo spessore dell'intercapedine e lo spessore totale del campione assemblato.

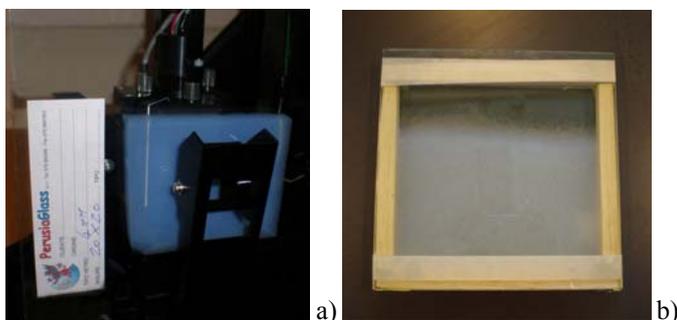


Figura 3: Campioni di vetro assemblati con aerogel monolitico (a) e granulare (b)

Tabella 1: Campioni di vetro assemblati con aerogel

Campione	Lastra esterna	Intercapedine con aerogel	Lastra interna	Spessore totale (mm)
4 - aer - 4	float 4 mm	monolitico 14 mm	float 4 mm	22
4 - aer - 6/7acu	float 4 mm	monolitico 14 mm	6/7 mm acustico	24
4 - aer - 6/7be	float 4 mm	monolitico 14 mm	6/7 mm TOPN acustico	24
10/11acu - aer - 6/7acu	10/11 mm acustico	monolitico 14 mm	6/7 mm acustico	30
4 - gran - 4	float 4 mm	granulare 14 mm	float 4 mm	22
4 - gran - 6/7acu	float 4 mm	granulare 14 mm	Vetro 6/7 mm acustico	24
4 - gran - 6/7be	float 4 mm	granulare 14 mm	6/7 mm TOPN acustico	24
10/11acu - gran - 6/7acu	10/11 mm acustico	granulare 14 mm	6/7 mm acustico	30

## 3. MISURE SPETTROFOTOMETRICHE

### 3.1 Strumentazione e metodologia di misura

Lo spettrofotometro impiegato è il SolidSpec-3700 di Shimadzu [15]. E' un dispositivo di elevata sensibilità, dotato

di tre rivelatori: 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, ed un fotodiode al solfuro di piombo (PbS) a bassa temperatura per la porzione NIR. Essendo dotato di un comparto porta campioni di dimensioni piuttosto elevate (900x700x350 mm), lo strumento consente di alloggiare anche campioni di grandi dimensioni, grazie al cammino ottico disposto in verticale che permette di alloggiare i provini in posizione orizzontale (fig. 4).

Lo spettrofotometro è dotato di una sfera integratrice con un diametro pari a 60 mm, rivestita internamente da uno strato di solfato di bario (bianco perfettamente diffondente). La caratteristica principale della sfera è che è in grado di distribuire equamente, attraverso riflessioni diffuse consecutive, i raggi luminosi incidenti in un punto qualsiasi su tutta la superficie interna, eliminando completamente gli effetti dell'originale direzione della luce e quindi le informazioni spaziali su di essa. Grazie alla presenza di tale elemento ottico, è possibile determinare la componente di luce diffusa dal campione e le proprietà di riflessione. Le componenti diretta e diffusa possono essere misurate separatamente e la somma dei due contributi dà luogo alla trasmissione (o riflessione) totale, determinabili direttamente mediante grazie ad un'opportuna configurazione dello strumento.

Per ogni campione sono stati misurati i fattori di trasmissione e di riflessione spettrali, diretti, diffusi e totali. A causa delle differenze riscontrate tra una misura e l'altra in funzione della posizione occupata dal campione, dovute a disomogeneità o particolari caratteristiche del campione, sono state effettuate 5 misure di trasmittanza e riflettanza per ogni campione [21-22]. Le misure sono state effettuate nel range di lunghezze d'onda tra 300 e 2500 nm, con intervalli di misura di 1 nm.



Figura 4 – Spettrofotometro SolidSpec-3700: comparto porta campioni e vista del percorso ottico

### 3.2 Risultati

Nel seguito sono riportati ed esaminati i risultati delle misure di trasmissione. I risultati del fattore di riflessione non sono riportati per brevità di trattazione, ma sono stati impiegati per il calcolo dei parametri energetici e luminosi.

Lastre di aerogel monolitico. In figura 5 sono mostrati i risultati relativi al fattore di trasmissione diretto e totale per il campione di aerogel monolitico. Nel grafico si osservano picchi di assorbimento selettivo a determinate lunghezze d'onda ( $\lambda = 1400$  nm,  $\lambda = 1900$  nm e un altro di maggiore intensità per  $\lambda = 2200$  nm). Inoltre si evidenzia la natura parzialmente diffondente del materiale, soprattutto nel campo del visibile e del vicino IR. Nel seguito saranno quindi

mostrati i grafici relativi alla trasmissione totale, al fine di includere il contributo della parte diffusa della radiazione per tutti i campioni.

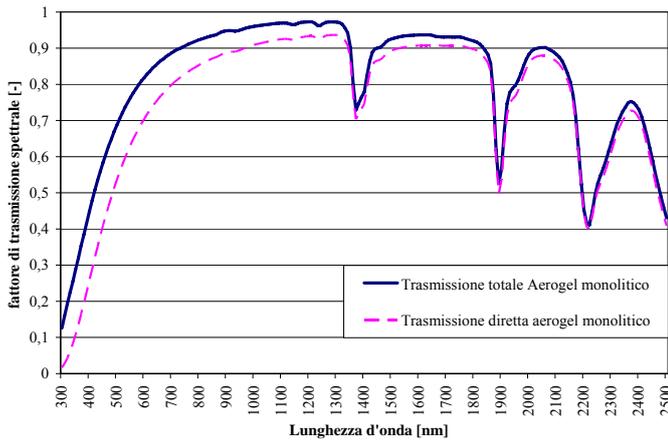


Figura 5: Confronto tra il fattore di trasmissione diretto e totale per l'aerogel monolitico

Campioni con aerogel granulare. Nella figura 6 sono mostrati i risultati per i campioni Xtralight e Okagel. Dai grafici emerge un comportamento migliore del campione Xtralight con spessore dell'intercapedine pari a 16 mm, poiché presenta valori superiori a quello di spessore superiore del 20% circa per tutto lo spettro. Nei grafici si evidenziano vari picchi di assorbimento; il più evidente è localizzato a 1700 nm. I risultati estesi mostrano come la componente di trasmissione diretta sia molto ridotta e, in particolare, inferiore al 10% per entrambi gli elementi indagati. Il campione Okagel presenta valori di trasmissione piuttosto bassi per tutte le lunghezze d'onda, con valori sempre inferiori al 20%, e al di sotto del 10% per lunghezze d'onda minori di 500 nm e maggiori di 2200 nm. Per quanto riguarda la componente di trasmissione diretta, essa risulta praticamente trascurabile, come nel caso dei campioni Xtralight.

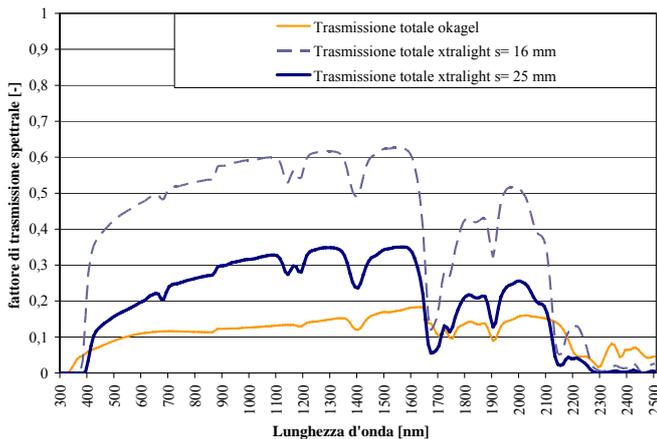


Figura 6: Fattore di trasmissione spettrale media totale dei campioni Xtralight e Okagel

Campioni assemblati. Nei grafici relativi ai campioni assemblati con aerogel monolitico e granulare in intercapedine (fig. 7.a e 7.b) si osservano andamenti analoghi per i campioni con vetri privi di trattamento basso-emissivo, che presentano

valori di trasmissione totale abbastanza elevati per tutte le lunghezze d'onda, con gli stessi picchi di assorbimento tipici dell'aerogel monolitico. I valori più elevati del fattore di trasmissione sono raggiunti dal campione assemblato con vetro float semplice (vetro 4 - airglass - 4), superiori addirittura al 60% per l'aerogel monolitico. Più bassi risultano invece gli spettri dei campioni con lastre stratificate con PVB acustico: ciò è imputabile sia all'incremento di spessore dei vetri (infatti quello con vetro 10/11 acustico è il più basso dei tre) sia alla presenza della pellicola che, oltre alle proprietà acustiche, influenza anche le proprietà ottiche del materiale. I campioni con vetro basso-emissivo, per effetto del trattamento su una delle due facce, presentano valori di trasmissione inferiori alle lunghezze d'onda più elevate e comunque ridotti nel campo del visibile di un 5% rispetto ai vetri semplici.

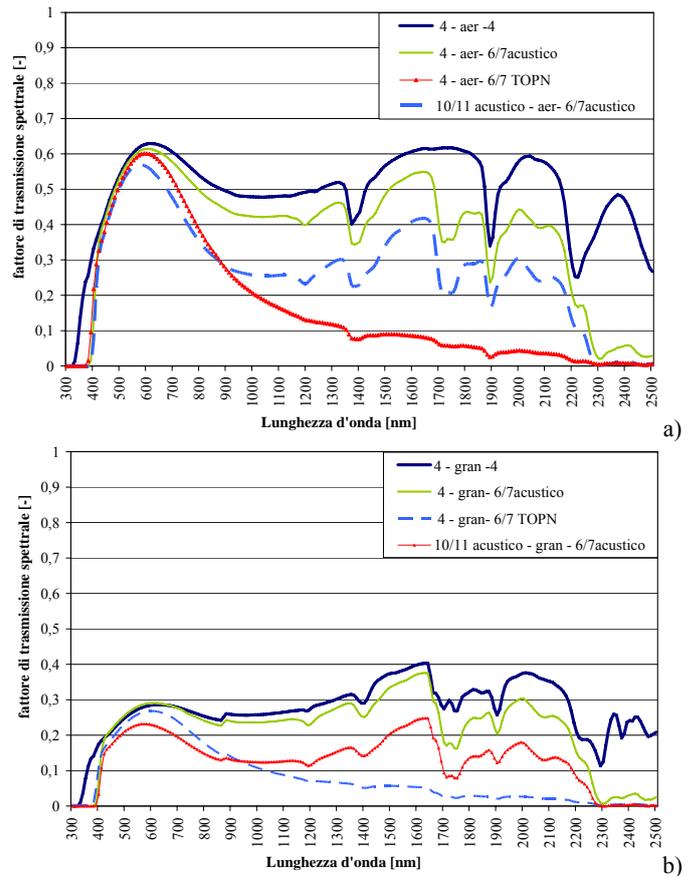


Figura 7: Spettri di trasmissione media totale per i vetri assemblati con aerogel monolitico (a) e granulare (b)

Dal confronto tra aerogel granulare e monolitico (fig. 8) emerge un migliore comportamento dei campioni assemblati con aerogel monolitico rispetto a quelli con aerogel granulare, a parità di spessore. Si osserva, infatti, una differenza percentuale del fattore di trasmissione che in alcuni casi raggiunge anche il 30%, riconducibile alla natura più trasparente e meno diffondente dell'aerogel in forma monolitica.

Calcolo dei parametri energetici e luminosi. Dai risultati ottenuti è stato possibile calcolare i principali parametri energetici e luminosi, ai sensi della norma UNI EN 410:2000 (Tab. 2).

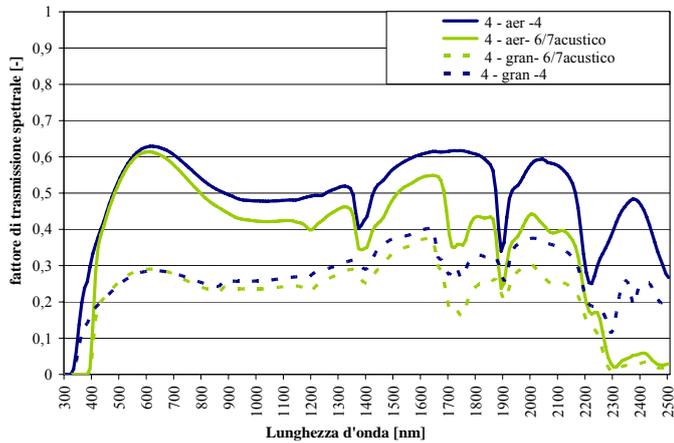


Figura 8: Confronto tra aerogel monolitico e granulare a parità di lastre esterne

Tabella 2: Fattori caratteristici calcolati per i diversi campioni

Campione	$\tau_v$	$\tau_e$	$\rho_v$	$\rho_e$
Aerogel monolitico	0.76	0.80	0.07	0.06
Okagel	0.10	0.11	0.13	0.11
Xtralight, s = 16 mm	0.45	0.46	0.16	0.15
Xtralight, s = 25 mm	0.18	0.21	0.17	0.14
4 - aer - 4	0.60	0.51	0.13	0.11
4 - aer - 6/7acu	0.58	0.46	0.13	0.10
4 - aer - 6/7be	0.57	0.35	0.13	0.14
10/11acu-aer-6/7acu	0.55	0.37	0.11	0.08
4 - gran - 4	0.27	0.26	0.14	0.12
4 - gran - 6/7acu	0.28	0.24	0.13	0.10
4 - gran - 6/7be	0.25	0.16	0.13	0.13
10/11acu-gran-6/7acu	0.22	0.16	0.11	0.08

Per effettuare una valutazione complessiva delle prestazioni dei sistemi vetrati con aerogel in intercapedine, sono stati considerati i seguenti parametri caratteristici:

- il fattore di trasmissione luminosa  $\tau_v$ , che rappresenta la percentuale di luce naturale trasmessa dalla superficie vetrata;
- il fattore solare g, che rappresenta l'energia solare totale trasmessa dall'elemento trasparente, calcolato ai sensi della UNI EN 410 solo per i campioni assemblati;
- la trasmittanza termica U.

Per agevolare il confronto, tra i sistemi assemblati si sono scelti solo quelli con vetro float semplice, perché rappresentativi delle condizioni più sfavorevoli, essendo privi di trattamenti per ridurre l'emissività.

Per la trasmittanza termica (tab. 3) sono stati assunti i valori dichiarati nelle schede tecniche per i sistemi forniti dai produttori, mentre per i campioni di vetro assemblati in sede di misura con aerogel granulare e monolitico, U è stata calcolata ai sensi delle norme UNI EN ISO 10077-1 [17] e UNI EN 673 [18].

I campioni Okagel e Xtralight presentano ottime prestazioni termiche: la più bassa trasmittanza termica è associata al sistema Okagel, tuttavia esso presenta anche il valore minore del fattore di trasmissione luminosa ( $\tau_v=0.10$ ) e ciò lo rende peggiore degli altri campioni nel daylighting. Le stesse considerazioni si possono fare per il sistema Xtralight (spessore 25 mm), che fornisce trasmittanze basse ma allo

stesso tempo non consente un adeguato passaggio della luce ( $\tau_v = 0.18$ ). Al contrario l'altro campione della Xtralight (spessore 16 mm) assume valori di  $\tau_v$  abbastanza elevati ( $\tau_v = 0.45$ ), raggiungendo quasi quelli assunti dall'aerogel monolitico ( $\tau_v = 0.60$ ), ma ha la trasmittanza più elevata rispetto a tutti gli altri sistemi ( $U=1.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ).

In figura 9 è mostrato il confronto tra i campioni assemblati con aerogel monolitico e granulare e vetrate alternative in relazione alla capacità di rispettare gli stringenti limiti imposti dai Decreti in funzione della zona climatica ( $U \leq 1.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  per la zona F al 1/01/2010).

Come si evince dalla tabella 2, i valori di  $\tau_v$  sono praticamente doppi per l'aerogel monolitico, che consente quindi, a parità di spessore, una maggiore penetrazione di luce naturale negli ambienti interni. Tuttavia i valori di g per la forma monolitica (fig. 9) sono più elevati di quelli dell'aerogel granulare: ciò è una condizione positiva in inverno o nel Nord-Europa, poiché può compensare in parte le dispersioni, consentendo un risparmio energetico, ma la situazione si inverte in estate quando, per grandi superfici vetrate in esposizioni e latitudini sfavorevoli, l'irraggiamento solare può risultare eccessivo, generando surriscaldamento e disagio luminoso all'interno dell'edificio.

Per quanto riguarda le proprietà di isolamento termico (tab. 3), l'aerogel in forma monolitica presenta una trasmittanza termica inferiore, che può ridursi fino a  $0.63 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  nel caso di condizioni evacuate.

Infine, il confronto con i limiti normativi permette di comprendere la validità dell'impiego di sistemi di questo tipo, considerando che valori di trasmittanza termica inferiori a  $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  possono essere raggiunti senza ricorrere a vetrate triple con trattamenti basso-emissivi e intercapedini riempite con gas argon, mantenendo inoltre contenuto lo spessore.

Tabella 3: Trasmittanza termica per i campioni

Campione	U [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ]
Okagel	0.70
Xtralight, s = 16 mm	1.30
Xtralight, s = 25 mm	0.91
4 - aer - 4 (condizioni non evacuate)	0.99
4 - aer - 4 (condizioni evacuate)	0.63
4 - gran - 4	1.04

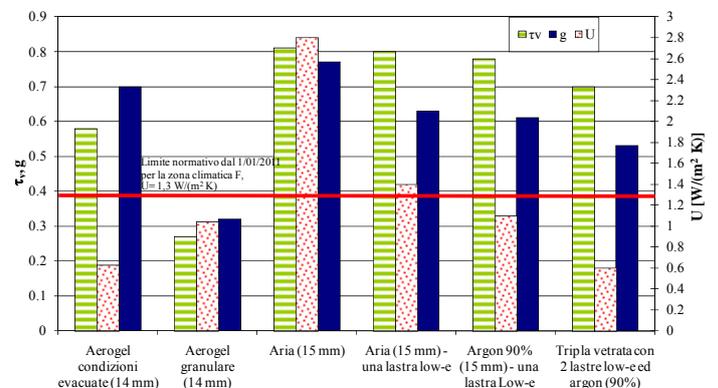


Figura 9: Confronto tra le prestazioni dei campioni con aerogel e vetrocamera convenzionali

#### 4. PROTOTIPO IN ALLUMINIO CON AEROGEL GRANULARE

Nella seconda fase dello studio si è realizzato il prototipo di una finestra in alluminio con vetrocamera e aerogel granulare in intercapedine. Il vetrocamera è stata assemblato inserendo l'aerogel granulare in intercapedine, per uno spessore di 15 mm, tra due lastre di vetro float dello spessore di 4 mm (Fig. 10). L'infisso impiegato per la realizzazione del prototipo è costituito da una finestra in alluminio a taglio termico a due ante a battente; le sezioni dei profili dell'anta sono pari a 58 mm mentre quella del telaio è di 51 mm. Al fine di effettuare un confronto tra la soluzione innovativa e quelle convenzionali, sullo stesso infisso è stato installato un vetrocamera di uguale spessore complessivo (23 mm), con aria in intercapedine (15 mm) e con trattamento basso emissivo su una delle due lastre da 4 mm.



Figura 10: Fase di realizzazione del vetrocamera con aerogel in intercapedine

Sui due campioni, di dimensioni pari a 1175 x 1454 mm (misure esterne telaio), si sono effettuate misure di trasmittanza termica globale in camera calda, ai sensi della norma UNI EN ISO 12567-1:2002, al fine di verificare l'attendibilità dei valori stimati per via teorica.

L'apparato strumentale impiegato è quello della doppia camera calibrata (hot-box), che si compone di due parti principali: una struttura di sostegno di proprietà termiche note per sostenere il campione che su di essa risulta alloggiato e due camere climatizzate, le cui pareti presentano un elevato isolamento, grazie a 24 cm di polistirene espanso. Le camere hanno dimensioni di 3,2 metri di altezza, 2,5 di larghezza e 1,2 di profondità per dare spazio alle strumentazioni necessarie per la climatizzazione (Fig. 11).

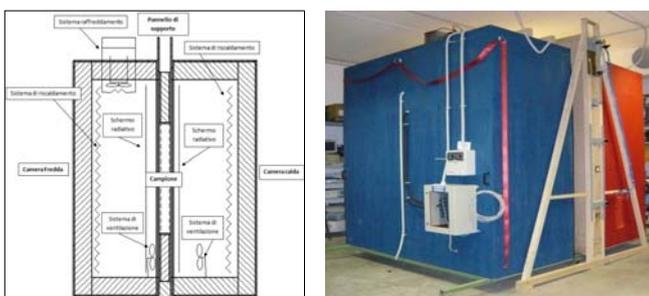


Fig. 11: Hot box impiegata per la misura della trasmittanza di infissi

Le condizioni di temperatura in camera calda sono mantenute mediante un sistema a filo caldo che permette il mantenimento della camera a 20°C, con una regolazione di tipo PID. Un sistema di raffreddamento serve la camera fredda, controllando la temperatura in maniera accurata grazie anche a una resistenza scaldante. In entrambe le camere è presente un pannello di proprietà emissive note, per evitare gli effetti dell'irraggiamento diretto tra le sorgenti di calore e le sonde posizionate sul campione. Inoltre, per evitare stratificazione dell'aria nella parte calda ed assicurare un corretto scambio convettivo sul lato freddo, ciascuna camera è dotata di sistemi di ventilazione.

Le prove sono state precedute da una procedura di calibrazione mediante l'apposizione di un pannello di caratteristiche note (spessore e conducibilità termica del materiale), in conformità alle prescrizioni della norma [19].

Inoltre, al fine di evidenziare il contributo dei vetrocamera alle prestazioni termiche globali degli infissi, sono stati installati 3 termoflussimetri in corrispondenza di punti ritenuti significativi (vetrata e telaio) (Fig. 12).



Figura 12: Vista del prototipo completo durante le prove termiche

I risultati relativi alle principali grandezze misurate e calcolate sono riportati in tabella 4.

Tabella 4: Risultati delle prove termiche su prototipo di finestra con vetrocamera tradizionale e con aerogel

	Vetrocamera tradizionale	Vetrocamera con aerogel
<b>Valori misurati</b>		
Temperatura media aria lato caldo (°C)	19.44	19.19
Potenza immessa in camera calda (W)	99.26	80.57
Temperatura media aria lato freddo (°C)	-1.51	-0.78
Flusso termico medio per la vetrata (misurato dai termoflussimetri)	26.95	18.04
<b>Valori calcolati</b>		
Flusso attraverso il provino [W/m <sup>2</sup> ]	40.59	30.50
Differenza di temperatura ambiente lato caldo-lato freddo	20.43	19.52
Trasmittanza termica globale metodo Hot box normalizzata <sup>1</sup> [W/(m K)]	2.20	1.69
Trasmittanza termica per la vetrata calcolata dai termoflussimetri normalizzata <sup>1</sup> [W/(m K)]	1.46	0.99

<sup>1</sup> Normalizzata considerando la resistenza termica superficiale dell'aria pari a 0.17 (m<sup>2</sup> K)/W.

Grazie al vetrocamera realizzato con aerogel granulare, la trasmittanza termica globale dell'infisso si riduce del 23%, passando da 2.20 W/(m<sup>2</sup> K) a 1.69 W/(m<sup>2</sup> K); il contributo del sistema vetrato innovativo è infatti rilevante: la trasmittanza misurata con il metodo dei termoflussimetri risulta infatti pari a 1.48 W/(m<sup>2</sup> K) per il vetrocamera convenzionale con una delle due lastre trattata con deposito low-e, mentre risulta inferiore a 1 W/(m<sup>2</sup> K) per la vetrata con aerogel in intercapedine. Il valore di trasmittanza misurato per la vetrata con aerogel in intercapedine conferma la validità della stima effettuata per via teorica ai sensi della normativa tecnica.

Per una completa caratterizzazione dei campioni, si sono valutate anche le prestazioni acustiche mediante misure di potere fonoisolante ai sensi della UNI EN ISO 140-3 [20]. Le prove sono state eseguite all'interno delle camere riverberanti accoppiate del Laboratorio di Acustica dell'Università di Perugia, costruite rispettando le prescrizioni relative alla UNI EN ISO 140-1 [23]. È stato misurato il potere fonoisolante  $R$  secondo la metodologia prevista dalla normativa tecnica [20, 24] e calcolato l'indice del potere fonoisolante  $R_w$  ai sensi della norma UNI EN ISO 717-1 [25].

In figura 13 sono riportati gli andamenti in frequenza del potere fonoisolante in bande di un terzo di ottava e i valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante  $R_w$  dei due campioni sottoposti a prova. A parità di infisso, l'inserimento di aerogel granulare in intercapedine comporta un aumento del potere fonoisolante nell'intero range di frequenze esaminato, soprattutto in corrispondenza di quelle centrali (500 - 2000 Hz); inoltre, per effetto dell'aerogel, si osserva una marcata riduzione degli effetti di risonanza (200 Hz) e di coincidenza (3150 Hz) dovuti alle due lastre di identico spessore (4 mm).

In termini di indice di valutazione  $R_w$ , la vetrata innovativa comporta un aumento di 3 dB per l'infisso con aerogel (37 dB), confermando per esso anche ottime proprietà di isolamento acustico.

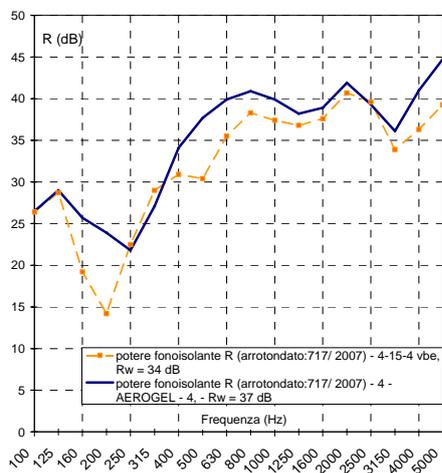


Figura 13: Andamento in frequenza del potere fonoisolante  $R$  e valori di  $R_w$  (dB) per i campioni di infissi (convenzionale e innovativo)

## 5. CONCLUSIONI

Essendo le vetrate tradizionali non più in grado di garantire livelli adeguati di isolamento ai sensi delle sempre più stringenti normative in materia di risparmio energetico e isolamento acustico, la ricerca si sta indirizzando verso lo

sviluppo e lo studio di sistemi isolanti trasparenti innovativi (TIMs). Nel presente lavoro sono stati indagati alcuni sistemi innovativi costituiti da aerogel inserito all'interno di vetrocamera per migliorarne le prestazioni.

Tra i campioni esaminati, il sistema più performante risulta essere quello con vetro float da 4 mm e aerogel monolitico, con ipotesi di evacuazione dell'aria, di cui si è tenuto conto nel calcolo della trasmittanza termica. Il campione, infatti, presenta al contempo bassi valori di trasmittanza termica ( $U = 0.63$  W/(m<sup>2</sup> K)), un fattore solare adeguato ( $g = 0.70$ ) e alti valori di trasmissione luminosa ( $\tau_v = 0.60$ ). In ogni caso, per tutti i campioni analizzati, i valori di trasmittanza risultano inferiori a quelli limite imposti dal Dlgs. 311/2006 per le vetrate a partire dal 1 gennaio 2011 anche nella zona climatica più restrittiva.

L'indagine sperimentale su un prototipo di finestra in alluminio con la vetrata innovativa con aerogel granulare in intercapedine ha infine evidenziato la validità delle stime teoriche e dei risultati sperimentali ottenuti sui campioni; la trasmittanza termica misurata per il vetrocamera risulta infatti inferiore a 1 W/(m<sup>2</sup> K) e comporta per l'infisso esaminato una diminuzione di  $U$  del 23% rispetto ad un vetrocamera tradizionale con lastra low-e. Inoltre, l'aerogel presenta anche eccellenti proprietà di isolamento acustico: l'indice di valutazione del potere fonoisolante  $R_w$  per l'infisso con aerogel risulta superiore di 3 dB rispetto allo stesso infisso con vetrocamera tradizionale di uguale spessore.

L'aerogel, inserito in vetrate tradizionali, può quindi fornire un contributo notevole alla riduzione delle dispersioni termiche attraverso i vetri, pur mantenendo un grado abbastanza soddisfacente di trasparenza e trasmissione della luce, specialmente se in forma monolitica. Ciò lo rende un materiale promettente per le future applicazioni nel campo del daylighting e, pertanto, è auspicabile la prosecuzione del lavoro di ricerca per incrementarne sempre di più le prestazioni luminose, affinare il processo di produzione e ridurre i costi di realizzazione.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Decreto legislativo n. 311, Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo n.192 del 2005, recante attuazione della direttiva europea 2002/791/CE relativa al rendimento energetico in edilizia, 2006.
2. AbuBakr S. Bahaj, Patrick A.B. James, Mark F. Jentsch, Potential of emerging glazing technologies for highly glazed buildings in hot arid climates, *Energy and Buildings* 40 (5) (2008) 720–731.
3. S.S Kistler, *Nature* (London) 127 (1931) p. 741.
4. Akimov Yu. K., Fields of Application of Aerogels (Review), *Instruments and Experimental Techniques* 46 (3) (2003) 287-299.
5. M. Schultz, K.I. Jensen, F.H. Kristiansen, Super insulating aerogel glazing, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 89 (2005) 275-285.
6. 19.Reim, M., Beck, Körner, Petricevic, Glora, Weth, Schliermann, Schmidt, Pötter, Fricke, Highly insulating aerogel glazing for solar energy usage, *Sol. Energy* 72 (1) (2002) 21–29.
7. 20.K. Duer, S. Svendsen, Monolithic Silica Aerogel in Superinsulating Glazings, *Solar Energy* 63 (1998) 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) 351–357.
9. 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* 79 (2) (2005) 131-139.
10. Xtralight Rooflights, Specialised Glazing with Nanogel, Schede tecniche, disponibili in <http://www.xtralite.co.uk/>.
11. Okalux GmbH, Germany, <http://www.okalux.com/>.
12. Cabot Corporation, USA, <http://w1.cabot-corp.com/index.jsp>.
13. Airglass AB, Sweden, <http://www.airglass.se/>.
14. AGC Flat Glass Europe, Brussels, 2009.
15. Shimadzu, UV/VIS Spectrophotometer, Training course for analysis of solid samples, 2008.
16. UNI EN 410:2000 Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate.
17. UNI EN ISO 10077-1:2007, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure. Calcolo della trasmittanza termica – metodo semplificato.
18. UNI EN 673:2002, Determinazione della trasmittanza termica – metodo di calcolo.
19. UNI EN ISO 12567-1:2002, Isolamento termico di finestre e porte - Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda - Finestre e porte complete
20. UNI EN ISO 140-3:2006, Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 3: Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio.
21. C. Buratti, E. Moretti, Misura delle proprietà energetiche e luminose di sistemi vetrati con aerogel granulare, in: *Proceedings of the Convegno annuale ATI, Salerno, 2007*.
22. C. Buratti, Transparent insulating materials: experimental data and buildings energy saving evaluation, in: *Proceedings of ENERGY & ENVIRONMENT 2003, First International Conference on Sustainable Energy, Planning & technology in Relationship to the Environment, Halkidiki, Greece, 2003*.
23. UNI EN ISO 140-1, Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Requisiti per le attrezzature di laboratorio con soppressione della trasmissione laterale, 2006.
24. G. Moncada Lo Giudice, C. Buratti, E. Moretti, E. Belloni, Fonoisolamento di serramenti in legno: influenza dei componenti sulle prestazioni complessive, 10° Congresso Nazionale CIRIAF – Atti, 9/10 aprile 2010, Perugia.
25. UNI EN ISO 717-1: 2007, Acustica. Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Isolamento acustico per via aerea.

## RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare la FAIL S.p.A. (Marsciano – PG) e la Perugia Glass S.r.l (Torgiano – PG) per la preziosa collaborazione nella realizzazione dei campioni oggetto della presente memoria. Si ringrazia inoltre il dott. Francesco Bianchi per l'effettuazione delle prove di trasmittanza termica sugli infissi.

## NOMENCLATURA

g = fattore solare [-]  
 R= potere fonoisolante [dB]  
 U = trasmittanza termica [W/(m<sup>2</sup> K)]  
 λ = lunghezza d'onda [nm]  
 ρ<sub>e</sub> = fattore di riflessione diretta dell'energia solare [-]  
 ρ<sub>v</sub> = fattore di riflessione luminosa [-]  
 τ<sub>e</sub> = fattore di trasmissione diretta dell'energia solare [-]  
 τ<sub>v</sub> = fattore di trasmissione luminosa [-]

## SUMMARY

The aim of the present paper is the study of thermal and optical properties of an innovative transparent material for glazing systems: monolithic and granular silica aerogel. Some samples supplied by manufacturer of daylighting systems were investigated; moreover different samples were manufactured, by assembling several types of glass with aerogel, monolithic and granular, in the interspace. Measurements of transmission and reflection coefficients vs. wavelength were carried out. Results were employed to calculate the energetic and luminous parameters: light transmittance (τ<sub>v</sub>), solar factor (g) and thermal transmittance (U). The performances of the different samples were compared. U-values slightly higher than 1 W/(m<sup>2</sup> K) were obtained for all the samples. The monolithic aerogel introduces a better light transmittance (τ<sub>v</sub> = 0.60) than granular one (τ<sub>v</sub> = 0.27), while the thermal transmittance values are comparable in not evacuated conditions (about 1 W/(m<sup>2</sup> K)). Nevertheless glazing systems with monolithic aerogel are not still commercialized because the production process is very complex and expensive.

Finally, thermal and acoustic measurements on a prototype of an aluminium frame window with granular aerogel in interspace were carried out. The thermal transmittance of the innovative glazing system was little lower than 1 W/(m<sup>2</sup> K). Moreover the windows with granular aerogel show also good acoustic properties: the R<sub>w</sub> index was 3 dB higher than the one of conventional windows.