



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**DEPARTMENT ON LIFE AND ENVIRONMENTAL SCIENCES**

*Doctoral in:*

Civil and Environmental Protection

**Development of innovative materials for building envelopes in dynamic  
behavior for energy saving and environmental sustainability**

*Ph.D Dissertation of:*

**Arch. Mauro Reali**

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and curves, representing the name Mauro Reali.

*Tutor:*

**Prof. Paolo Principi**

A handwritten signature in black ink, featuring a prominent initial 'P' followed by several loops and a final flourish, representing the name Paolo Principi.



---

<b>INDICE GENERALE</b>	3
<b>1. INTRODUZIONE</b>	9
<b>2. RUOLO E FISICA TECNICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO</b>	15
<b>2.1 Regesto degli involucri innovativi</b>	17
<b>2.2 Impatto ambientale e misure normative</b>	18
<b>2.3 Complessità dell'involucro dinamico</b>	19
<b>2.4 Tipologie di facciate a doppia pelle</b>	20
2.4.1 Involucri a direzione di ventilazione interna, esterna o mista	20
2.4.2 Famiglie di involucro con facciate trasparente-trasparente	21
2.4.3 Famiglie di involucro con facciate trasparente-opaco	22
2.4.4 Famiglie di involucro con facciate opaco-opaco	23
2.4.5 Famiglie di involucro traslucido - trasparente e traslucido - opaco	23
<b>2.5 Flusso termico nell'involucro edilizio opaco</b>	24
<b>2.6 Normativa di riferimento</b>	27
<b>2.7 L'involucro trasparente</b>	30
2.7.1 Proprietà dell'involucro trasparente	30
2.7.2 Trasmissione globale del calore nell'involucro edilizio trasparente	33
2.7.2.1 La radiazione solare incidente	33
2.7.2.2 Meccanismo di propagazione del calore su lastre vetrate	35
2.7.2.3 Trasmissione globale del calore per il sistema trasparente	39
2.7.2.4 La trasmittanza termica dei serramenti	40
<b>2.8 Bibliografia cap. 2</b>	44
<b>2.9 Sitografia cap. 2</b>	45
<b>3. STATO DELL'ARTE</b>	46
<b>3.1 Il vetro camera</b>	48
<b>3.2 Vetri integrati con i nanoisolanti</b>	49
3.2.1 Gli aerogels	49
3.2.2 I VIP Vacuum insulation panels	50
3.2.3 I TIM	50
<b>3.3 Sistemi di daylighting</b>	51
3.3.1 I vetri prismatici	51

---

3.3.2 I sistemi a lamelle o light shelves	53
3.3.3 Le pellicole olografiche	54
3.3.4 Vetri ad incisioni laser LCP	54
<b>3.4 Vetri assorbenti, riflettenti e a bassa emissività</b>	<b>55</b>
3.4.1 Vetri assorbenti	55
3.4.2 Vetri antisolari riflettenti	55
3.4.3 Vetri a bassa emissività	56
<b>3.5 Vetri stratificati</b>	<b>57</b>
<b>3.6 Vetri temperati</b>	<b>58</b>
<b>3.7 Vetri cromogenici</b>	<b>58</b>
3.7.1 Vetri cromogenici attivi	59
3.7.1.1 Vetri LCD	59
3.7.1.2 I vetri SPD (Suspended particle device)	60
3.7.1.3 Vetri elettrocromici	60
3.7.1.4 Vetri gasocromici	61
3.7.2 Vetri cromogenici passivi	62
3.7.2.1 Vetri termocromici	62
3.7.1.2 I vetri fotocromici	63
<b>3.8 Bibliografia cap. 3</b>	<b>64</b>
<b>3.9 Sitografia cap. 3</b>	<b>65</b>
<b>4. MATERIALI INNOVATIVI FOTOCROMATICI E FOTOCROMATISMO</b>	<b>66</b>
<b>4.1 La scelta dei materiali</b>	<b>66</b>
<b>4.2 Cenni storici del fotocromatismo</b>	<b>70</b>
<b>4.3 Il fotocromatismo</b>	<b>73</b>
4.3.1 Il fotocromatismo nei vetri minerali	76
4.3.2 Il fotocromatismo nei sistemi organici	78
4.3.2.1 Fotocromatismo in pasta nella matrice polimerica	80
4.3.2.2 Fotocromatismo su supporto polimerico	81
<b>4.4 Principali molecole fotocromatiche</b>	<b>82</b>
4.4.1 Azobenzeni	82
4.4.2 Spiropirani	84
4.4.3 Spirooxazine	85

4.4.4 Fulgidi	86
4.4.5 Diarileteni	87
4.4.6 Viologeni	89
4.4.7 Diidroindoline	89
4.4.8 Benzopirani e naftopirani	90
<b>4.5 Fotodegradazione dei fotocromatici organici</b>	91
<b>4.6 La durabilità dei materiali fotocromatici sperimentali</b>	96
4.6.1 Durabilità, radiazione di attivazione e tempi di oscuramento FC "Raleri"	96
4.6.2 Durabilità, radiazione di attivazione e tempi di oscuramento FC "Tens-H"	98
<b>4.7 Bibliografia cap. 4</b>	100
<b>4.8 Sitografia cap. 4</b>	101
<b>5. IL BENESSERE ABITATIVO</b>	102
<b>5.1 Il benessere termo-igrometrico</b>	102
<b>5.2 Termoregolazione del corpo umano</b>	103
<b>5.3 Influenza dei moduli sperimentali sul comfort termo-igrometrico</b>	104
<b>5.4 Il benessere visivo</b>	116
5.4.1 Daylighting e Fattore di luce diurna FLD	119
<b>5.5 Bibliografia cap. 6</b>	136
<b>5.6 Sitografia cap. 6</b>	137
<b>6. TEST DI LABORATORIO IN CAMERA CLIMATICA</b>	138
<b>6.1 Materiali e metodi</b>	139
6.1.1 Obiettivi principali dei test	139
6.1.2 Apparecchiature e moduli di prova	139
6.1.3 Gli strumenti di misura	141
6.1.4 Realizzazione dei prototipi sperimentali	142
<b>6.2 Avvio della fase sperimentale</b>	144
<b>6.3 Test energetici</b>	145
6.3.1 Radiazione termica trasmessa $E_{e \text{ trasm}}$	145
6.3.2 Il fattore di trasmissione solare diretta $\tau_e$	147

6.3.3 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria interna	148
6.3.4 Variazione del flusso termico superficiale $Q_{\text{flux sup.}}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	151
6.3.5 Flusso termico totale $Q_t$	152
<b>6.4 Conclusioni</b>	152
<b>7. LA CAMPAGNA SPERIMENTALE ESTERNA_ TEST FOTOMETRICI</b>	154
<b>7.1 Materiali e metodi</b>	155
7.1.1 Obiettivi principali del test	155
7.1.2 Apparecchiature di prova	156
7.1.3 Assemblaggio dei moduli sperimentali	159
7.1.4 Gli strumenti di misura	162
<b>7.2 Il sistema di rilevazione</b>	164
7.2.1 Le condizioni al contorno	164
7.2.2 Sistema di rilevazione esterno	165
7.2.2 Sistema di rilevazione interno	166
<b>7.3 I test fotometrici</b>	167
7.3.1 Configurazione ed avvio	167
7.3.2 Errore strumentale	167
7.3.3 Interferenza del box sul fattore di trasmissione luminosa $\tau_v$	168
7.3.4 Le grandezze fotometriche con il prototipo FC "Raleri"	169
7.3.5 Il flusso luminoso trasmesso $\Phi_v$ - confronto REF - FC "Raleri"	169
7.3.6 Studio della variazione della trasmissione luminosa $E_v$ - 28/02/2017	172
7.3.7 Calcolo del fattore di trasmissione luminosa $\tau_v$ secondo la UNI EN 410	173
<b>7.4 I test fotometrici con il prototipo FC "Tens-H"</b>	175
7.4.1 Il flusso luminoso trasmesso $\Phi_v$ - confronto REF - FC "Tens-H"	175
7.4.2 Calcolo del fattore di trasmissione luminosa $\tau_v$ secondo la UNI EN 410	176
<b>7.5 Analisi spettrale</b>	177
7.5.1 Analisi spettrale dei singoli materiali schermanti	177
7.5.2 Analisi spettrale dei moduli assemblati	180
<b>7.6 Conclusione sulle caratteristiche luminose</b>	182

---

<b>8. LA CAMPAGNA SPERIMENTALE ESTERNA_ TEST ENERGETICI</b>	184
<b>8.1 Calibrazione dei Test</b>	185
<b>8.2 Validazione Fattore di trasmissione solare diretta <math>\tau_e</math> del modulo REF</b>	186
<b>8.3 Test del 04-05/04/2017 - Moduli REF - Modulo FC "Raleri"</b>	187
8.3.1 Le radiazioni solari $E_v$	187
8.3.2 Variazione della radiazione solare trasmessa $E_v$ - cellule verticali	188
8.3.3 Il fattore di trasmissione solare diretta $T_e$ - cellule inclinate	189
8.3.4 Attivazione e disattivazione del modulo FC "Raleri"	190
8.3.5 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria al contorno	193
8.3.6 Variazione del flusso termico superficiale $H_F$ o $Q_s$ ( $W/m^2$ )	196
8.3.7 Test dal 7 al 19 aprile 2017- Le radiazioni solari $E_v$	198
8.3.8 Il guadagno in termini di isolamento termico, del prototipo FC "Raleri"	200
8.3.9 Il fattore di trasmissione solare diretta $T_e$ - Angolo incidenza nullo	202
8.3.10 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria al contorno	204
<b>8.4 Test dal 09 al 29/05/2017 - Moduli REF - Modulo FC "Tens-H"</b>	207
8.4.1 Le radiazioni solari $E_v$	207
8.4.2 Variazione della radiazione solare trasmessa $E_v$	209
8.4.3 Il fattore di trasmissione solare diretta $T_e$ - Prototipo FC "Tens-H"	211
8.4.4 Il guadagno in termini di isolamento termico, del prototipo FC "Tens-H"	213
8.4.5 La radiazione di attivazione e disattivazione del modulo FC	216
8.4.6 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria al contorno	220
8.4.7 Variazione del flusso termico superficiale $H_F$ o $Q_s$ ( $W/m^2$ )	224
<b>8.5 Stima del fattore solare "g" e del fattore di trasmissione solare diretta <math>\tau_e</math></b>	226
<b>8.6 Il flusso termico totale <math>Q_t</math></b>	229
<b>8.7 Il coefficiente di Shading (SHGC)</b>	229
<b>8.8 Indice di selettività (IS)</b>	230
<b>8.9 Trasmissione dei raggi ultravioletti UV %</b>	230
<b>8.10 Energia di Cooling</b>	231
<b>8.11 Conclusioni sulle caratteristiche energetiche</b>	233

---

<b>9. PROGETTO IMPRENDITORIALE (BUSINESS PLAN)</b>	235
<b>9.1 Il mercato e il contesto competitivo</b>	236
<b>9.2 Il prodotto, il processo o l'invenzione: l'offerta di valore</b>	237
<b>9.3 Il piano di marketing</b>	238
<b>9.4 Il piano operativo</b>	240
<b>9.5 Il piano economico e finanziario</b>	241
9.5.1 Il piano economico e finanziario	241
9.5.2 Prospetto di determinazione del margine di contribuzione	241
<b>10. CONCLUSIONI</b>	246



## CAP. 1 INTRODUZIONE

La ricerca qui illustrata, ha il fine di concentrare l'attenzione sull'importanza del ruolo svolto dall'involucro edilizio trasparente e di proporre soluzioni progettuali innovative nell'ottica della sostenibilità ambientale, del risparmio energetico e del comfort abitativo. L'involucro edilizio ha avuto un compito fondamentale ed esclusivo nelle architetture di ogni tempo ma oggi è chiamato a svolgere un ruolo molto più importante e complesso. Solo in Italia, l'impronta ecologica degli edifici incide per il 32% sui consumi energetici nazionali e per il 25% sulle emissioni di CO<sub>2</sub>. Per decenni si è costruito senza alcuna considerazione etica, traghettati solo dai facili guadagni della speculazione edilizia. Il territorio è stato invaso di costruzioni energeticamente inefficienti e di immensi "edifici serra", obsoleti e inquinanti, destinati a gravare pesantemente sulla qualità della vita, sui consumi energetici e sugli ecosistemi ambientali. In un'epoca dove le condizioni climatiche variano sempre più repentinamente anche a causa delle nefandezze umane, dove l'antropizzazione, l'inquinamento ambientale e lo sfruttamento delle risorse naturali hanno ampiamente superato i limiti di resilienza del pianeta; il tema della conservazione dell'ambiente e della gestione consapevole delle sue risorse, diventa un "obbligo" morale

dei progettisti. Tali considerazioni, hanno spinto sempre più il mondo scientifico a studiare strutture innovative, efficienti e sostenibili. Moltissime sono le soluzioni proposte in campo di isolamento termigrometrico e acustico per le pareti opache degli edifici. Soluzioni che vanno dai materiali più comuni come il polistirolo espanso sinterizzato (EPS) o la lana di roccia fino a materiali nanoisolanti in grado di garantire valori di conducibilità termica inferiori a 0.005 W/mK, come i "Vacuum Insulation Panels" (VIP) gli "Airegels" o i "Phase Change Materials". Il vero tallone di Achille di ogni involucro edilizio, restano le chiusure trasparenti perché hanno il compito di garantire un'adeguata illuminazione naturale e nello stesso tempo limitare gli apporti termici esterni. Aspetti spesso contrastanti e inflessibili che rappresentano un paradosso di complessa soluzione, specie in un'epoca ove la trasparenza e la smaterializzazione sono paradigmi imprescindibili dell'architettura. Infatti, le superfici vetrate, soppiantano spesso le pareti degli edifici, ma specie nei periodi estivi, non riescono a schermare debitamente la radiazione termica, generando per effetto serra, il surriscaldamento dei locali. Per avere un'idea di quanto una soluzione progettuale innovativa possa impattare sul risparmio

energetico, basti pensare che solo in Italia, stando ai requisiti minimi di rapporto aero-illuminante (RA) richiesti dal D.M. 5 luglio 1975, risultano installati circa 300 milioni di metri quadrati di serramenti (stime dell'ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile). Nel "Movimento Moderno" di Mies Van der Rohe, le superfici trasparenti diventano un principio fondante dell'architettura perché "permettono il passaggio dell'elemento più importante dello spazio: la luce". Per Mies "La storia dell'architettura è la storia della lotta dell'uomo per la luce". Quella luce naturale determinante per il comfort abitativo e il benessere fisiologico che agisce positivamente sul subconscio e l'animo umano. Oggi l'involucro trasparente ha nuovi ruoli e funzioni. Oltre ad assicurare spazialità e luce, nei termini del linguaggio architettonico, sostituisce sempre più gli elementi opachi fino ad assumere la funzione stessa degli elementi strutturali. Oltre ciò deve garantire un adeguato isolamento termico in contesti climatici come quello mediterraneo, caratterizzati da forti variazioni stagionali. Come suggerì l'architetto londinese Richard Rogers, già nel 1978, per svolgere tanti e tali compiti, *"L'edificio deve diventare come un camaleonte che si adatta"*. La vera sfida è creare edifici in grado di variare dinamicamente le proprie caratteristiche luminose ed energetiche, in funzione degli

stimoli ambientali esterni. Il pensiero di Rogers introduce al tema della ricerca che si pone l'obiettivo di studiare e sviluppare sistemi trasparenti mutevoli e adattabili ai diversi contesti ambientali, conciliando requisiti di comfort abitativo e risparmio energetico. Sistemi capaci di ridurre al minimo il ricorso alla climatizzazione impiantistica e le emissioni di CO<sub>2</sub> divenendo uno strumento di riqualificazione per il parco edilizio esistente, a vantaggio del settore edile e commerciale. I limiti di trasmittanza termica dei vetri, determinati dal D. Lgs n. 195/2005, impongono ai progettisti di ricorrere a sistemi trasparenti stratificati, composti da più lastre di vetro, separate con intercapedini di aria essiccata e gas. I più comuni e performanti installati dai serramentisti sono i basso-emissivi con rivestimento (*low-e*) di ossidi metallici in grado di riflettere le radiazioni infrarosse ad alta lunghezza d'onda. Di questa tipologia sono i vetri presi come campioni di riferimento per la fase sperimentale della ricerca. Esistono in commercio diversi sistemi performanti: i vetri selettivi con incisioni prismatiche in grado di deviare parte della radiazione incidente, i vetri con sistemi integrati a lamelle riflettenti orientabili, i vetri colorati nella massa, riflettenti e i vetri assorbenti ma l'unica tipologia di lastre in grado di rendere un edificio "Camaleonte", capace di variare le proprie caratteristiche ottiche ed energetiche in funzione degli

stimoli ambientali esterni, sono i vetri dinamici. Si tratta di vetri che variano le proprietà ottiche (cromo-genici) sotto l'azione di un campo elettrico, di una corrente ionica, dell'intensità della luce, della temperatura o di altri stimoli. Si dividono in cromogenici attivi quando la variazione delle proprietà è indotta da uno stimolo esterno e cromogenici passivi quando variano le proprie caratteristiche in modo autonomo. Nel caso di studio, condotto nell'ottica dello standard "Passivhouse", ovvero di un involucro energeticamente efficiente a fabbisogno "quasi zero", sono stati preferiti i vetri fotocromatici passivi; sia perché non necessitano di impulsi esterni e sia perché a differenza degli altri, permettono una variazione graduale e reversibile delle proprie caratteristiche in funzione delle condizioni ambientali esterne. In realtà l'uso dei vetri dinamici passivi in edilizia è già stato oggetto di studio dei ricercatori del "Lawrence Berkeley National Laboratory". Nell'ambito di un progetto condotto per la "View Dynamic Glass", sono stati installati dei prototipi fotocromatici minerali su alcuni importanti edifici della California. Il progetto non è risultato competitivo e non ha avuto sviluppo a causa degli elevati costi di produzione e dei problemi tecnici legati alla difficoltà di ottenere uniformità della reazione fotocromatica su lastre di grandi dimensioni e cicli di vita limitati. I ricercatori hanno quindi ritenuto opportuno concentrarsi sui vetri cromogenici di tipo attivo. Sulla scorta di

questa esperienza, è nata l'idea di riprendere in considerazione i fotocromatici passivi rivolgendo però l'attenzione ai materiali infrangibili di matrice organica. Dopo una attenta ricerca, l'analisi si è concentrata sui tecnopolimeri usati per la produzione di lenti ottiche organiche. Si tratta di polimeri leggeri, estremamente versatili, infrangibili e reperibili anche in lastre o film, impiegati anche per la produzione di visiere sportive agonistiche. A differenza dei vetri minerali garantiscono un oscuramento uniforme e reversibile, anche su lastre di grandi dimensioni, non richiedono nuove tecniche di produzione e possono essere applicati sui serramenti esistenti. Per la composizione dei moduli sperimentali ci si è rivolti ad una azienda bolognese, la "Raleri S.r.l.". Dalla ditta sono stati forniti diversi campioni di polimeri tecnici tra i quali sono stati scelti due fotocromatici di tipo termoplastico, in grado di essere completamente riciclati e riutilizzati come materia prima secondaria nel ciclo produttivo. Si tratta di un fotocromatico "Raleri" in pasta nella matrice di acetato di cellulosa e un fotocromatico "Tens-H" su supporto di Policarbonato. Questi pannelli, capaci di riflettere, in fase attiva, le radiazioni dell'ultravioletto e buona parte delle radiazioni visibili, sono stati assemblati con vetri basso-emissivi per formare moduli sperimentali capaci di schermare la radiazione termica dai raggi UV, fino alle radiazioni dell'infrarosso. Come campione di riferimento

per le valutazioni teoriche e sperimentali, è stato usato un vetro-camera della ditta "AGC", composto da due lastre stratificate con intercalare in PVB, di cui una con rivestimento basso-emissivo rivolto verso l'intercapedine di 12mm riempita al 90% con gas Argon. I campioni sperimentali hanno la stessa composizione con l'aggiunta, in un caso, del pannello fotocromatico "Raleri" sulla superficie esterna, direttamente esposto alla radiazione solare e in un altro con il fotocromatico "Tens-H" messo a posto dell'intercalare in PVB sul vetro stratificato esterno al fine di proteggerlo dall'attacco diretto degli agenti attivanti. Sulla base delle analisi spettrografiche dei singoli componenti e dei valori tecnici EN 410, dei produttori, sono state fatte delle prime considerazioni teoriche sulla funzionalità dei moduli sperimentali, confermate con test di laboratorio istruiti in condizioni ambientali controllate, attraverso un sistema di ventilazione meccanica. I dati sperimentali hanno permesso di stimare principalmente il vantaggio in termini di attenuazione del flusso termico entrante e riduzione delle temperature dell'aria interna dei moduli sperimentali rispetto al campione di riferimento. Considerato che le prove in regime statico non riproducono le reali condizioni ambientali di esercizio; è stata istruita una campagna sperimentale esterna. Per i test outdoor, condotti dal mese di marzo al mese di giugno 2017, sono state realizzate due celle di prova

delle stesse caratteristiche fisiche e geometriche. I dati sperimentali delle prove hanno permesso di stimare i parametri caratterizzanti dei sistemi trasparenti quali: il fattore di trasmissione dell'energia solare totale ( $g$ ), il flusso termico superficiale ( $q_{flux}$ ), il fattore di trasmissione luminosa ( $\tau_v$ ) e il flusso termico totale che attraversa le finestre ( $Q$ ). La validità dei vetro-camera fotocromatici, è stata confermata attraverso il confronto con le proprietà energetiche e ottiche del vetro di riferimento. Entrambi i moduli fotocromatici hanno confermato un comportamento dinamico reversibile, iniziando la fase attiva di oscuramento in modo graduale dalle prime ore diurne e raggiungendo il massimo oscuramento in concomitanze delle ore di massima intensità della radiazione solare. Il cambiamento di trasparenza consente ai moduli fotocromatici di adattarsi dinamicamente agli stimoli ambientali esterni, sicché anche lo scambio termico invernale risulta vantaggioso in quanto riescono a contenere le dispersioni termiche più dei comuni sistemi commerciali. I moduli rimangono trasparenti alle basse radiazioni incidenti, garantendo il guadagno solare e si oscurano gradualmente con l'aumentare della radiazione solare, limitando la trasmissione di calore nei momenti più caldi. Dai rilievi è emerso che i moduli riescono a contenere gli apporti solari esterni, e le temperature interne dell'aria inferiori a

quelle del vetro di riferimento. Al diminuire della radiazione incidente, i moduli si disattivano, tornando gradualmente trasparenti. Il valore più significativo riscontrato nei test, specie se si pensa che una variazione anche minima della temperatura ambientale, può generare una sensazione di discomfort all'essere umano, è la riduzione di circa 10°C della temperatura interna al mezzogiorno solare, rispetto a quella del modulo di riferimento. Oltre ai parametri caratteristici della Norma UNI EN 410, i test hanno permesso di definire altri parametri tecnici e commerciali i quali hanno ulteriormente comprovato la validità dei prototipi fotocromatici. Si tratta del coefficiente di Shading, dell'indice di selettività e dell'energia di Cooling. Oltre all'aspetto energetico, è stato curato anche l'aspetto ottico. In particolare la campagna sperimentale ha permesso di rilevare il flusso luminoso trasmesso dai prototipi sperimentali, sia allo stato trasparente inattivo che allo stato scuro attivo. Allo stato inattivo i fotocromatici hanno garantito lo stesso flusso luminoso del modulo di riferimento rispetto al quale nelle ore di massima intensità della radiazione solare hanno ridotto del 25% il flusso luminoso. La determinazione del fattore di trasmissione luminosa ha permesso di calcolare il fattore medio di luce diurna presente all'interno dei box. Attraverso un software di calcolo è stato poi possibile mappare il fattore di luce diurna, punto per

punto, la distribuzione dell'illuminanza e quella della luminanza all'interno dei box di prova. Consapevoli, dalla letteratura scientifica, della degradazione di alcuni materiali plastici, sono state condotte all'interno del laboratorio delle prove di durabilità sui polimeri fotocromatici, sottoponendoli a radiazione continua per mezzo di un pannello radiante di lampade "Osram". Dal test è emerso che il modulo FC "Raleri" è estremamente virtuoso; si attiva in 3-4 secondi e si disattiva in circa 10 secondi, ma subisce un decadimento prestazionale già dopo alcuni giorni. Il prototipo "Tens-H", seppur molto meno rapido all'oscuramento, dopo circa 100 ore di irraggiamento continuo non ha mostrato decadimento prestazionale. In termini impiantistici, il modulo FC "Raleri" e il modulo FC "Tens-H", hanno presentato rispettivamente, una riduzione di un terzo e di un quarto del carico energetico necessario per la climatizzazione ambientale, rispetto al vetro basso-emissivo di riferimento. Non vanno dimenticati poi altri aspetti vantaggiosi dei prototipi, quali: la facilità costruttiva, la reperibilità, la reversibilità, la possibilità di riciclaggio e la limitata manutenzione richiesta. Questo studio si è concentrato sul ruolo cardine svolto dalle chiusure trasparenti che rappresentano il punto debole degli involucri edilizi innovativi ad impatto ambientale minimo. E' stata focalizzata l'attenzione sulle potenzialità offerte da alcuni polimeri fotosensibili di

matrice organica capaci di concorrere allo sviluppo di finestre intelligenti in grado di adattarsi agli stimoli ambientali esterni. Il lavoro ha concluso un'indagine del comportamento dinamico di due moduli sperimentali a composizione mista, vetro-polimeri termoplastici, che hanno mostrato ottime capacità di gestione dinamica degli apporti energetici. Sulla base di questo lavoro l'intento è avviare un processo di sviluppo mirato ad affinare le caratteristiche prestazionali dei materiali cromogenici in ottica del loro impiego negli involucri

trasparenti. In particolare, sarebbe interessante intervenire sulla reazione chimica dei polimeri per massimizzare la funzionalità dei materiali foto-reattivi nel tempo e potenziare l'effetto schermante, spostando sull'intervallo di attivazione fotocromatica, verso le maggiori lunghezze d'onda dello spettro visibile. Sarebbe inoltre interessante variare l'intensità del flusso attivante e concentrare l'oscuramento del materiale nelle ore di massima intensità della radiazione solare, liberando l'introspezione di luce naturale nei restanti periodi del giorno.

## CAP.2 RUOLO E FISICA TECNICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

L'edificio contemporaneo deve potersi adattare dinamicamente alle mutevoli condizioni esterne e garantire allo spazio abitato un elevato livello di benessere fisico, di qualità dell'aria, di illuminazione e di comfort termico, igrometrico ed acustico. Forma e funzione dell'involucro edilizio hanno subito nel tempo continue trasformazioni, legate alle mutevoli esigenze funzionali dei tempi. L'involucro nasce come confine fisico tra lo spazio interno e lo spazio esterno, con la funzione di struttura portante dell'edificio. Le pareti verticali sono massive, pesanti, opache, e non lasciano aperture sufficienti per la luce naturale. Le piante e i prospetti risultano statici, legati alla rigide regole della statica. Già nel XIX sec. si assiste a un radicale cambiamento dei materiali e delle tecniche costruttive. L'involucro opaco costituito da pareti piene in pietra, legno o mattoni lascia sempre più spazio alle superfici vetrate. Nel XX secolo *Le Corbusier* rivoluziona il pensiero di edificio e tra i "5 punti dell'architettura moderna" annovera il principio di "Facciata libera". La pelle dell'edificio perde la funzione portante, si smaterializza, si plasma secondo il linguaggio architettonico e si compone, attraverso nuove tecnologie, di materiali sempre più innovativi per garantire le condizioni ideali di benessere abitativo. Oggi l'involucro edilizio svolge un

ruolo attivo primario per il risparmio energetico conformandosi ed adattandosi alle variazioni al contorno. Le esigenze funzionali richiedono elasticità costruttiva e limitazione all'uso di energie minerali. Il concetto attuale di involucro edilizio è completamente mutato nel tempo in virtù dei cambiamenti climatici, dello stato dell'ambiente, delle tecnologie, dei materiali e delle funzioni che esso deve svolgere. Esso deve essere il concetto di sintesi di diversi settori disciplinari che vanno dall'architettura, all'energetica, alla psicologia alle scienze mediche ecc. Considerando che l'edilizia è divenuta, negli ultimi 50 anni, l'attività umana a più alto impatto ambientale, la progettazione edile deve garantire la salute e il benessere umano, deve limitare tassativamente il consumo energetico e le emissioni nocive e clima-alteranti e deve ridurre la produzione di rifiuti pericolosi e non riciclabili. *"L'energia più pulita in assoluto è l'energia che non viene consumata. In questo senso l'isolamento termico rappresenta una delle fonti di energia più importanti in assoluto, in quanto consente di ridurre il consumo di energia per il riscaldamento degli edifici, e quindi di risparmiare preziosissime materie prime, ed evitare l'emissione di sostanze nocive o dannose per il clima, come il biossido di carbonio (CO2)"* [1].

Le funzioni principali di un involucro trasparente innovativo devono essere:

- **Isolamento termico:** anche le parti trasparenti di un edificio, devono limitare gli scambi di calore con l'ambiente esterno e garantire temperature interne confortevoli;
- **Apporto solare:** nei periodi invernali è importante captare la radiazione solare incidente e limitare le dispersioni di calore con vetrate basso emissive;
- **Protezione solare:** la radiazione incidente sulle componenti trasparenti dell'involucro, va intercettata e ridotta nei periodi più caldi;
- **Illuminazione naturale:** è garantita esclusivamente dall'involucro trasparente; essa è necessaria per tutte le attività che richiedono un compito visivo per essere assolte;
- **Ventilazione naturale:** attraverso il tipo di aperture è possibile modulare il flusso d'aria naturale. L'aria naturale è sinonimo di salubrità e pertanto va garantito il ricircolo interno. Vi sono poi altre funzioni attribuibili alle facciate vetrate che non attengono direttamente al tema di ricerca, esse sono:
  - **La funzione strutturale:** Le chiusure esterne opache degli edifici sono spesso completamente sostituite da chiusure trasparenti e, in alcuni casi il vetro è chiamato ad assicurare anche una funzione di elemento portante;

- **L'isolamento acustico:** molto importante per il comfort e il benessere interno negli edifici;
- **La sicurezza:** molti tipi di vetrate fungono da elementi blindati antintrusione (es. Istituti bancari), da sistemi antisfondamento (evitano la frantumazione dei cristalli) o da paramenti temprati (es. vetri laterali delle autovetture);
- **La connessione:** è l'importantissima funzione fisiologica, biologica e psicologica, di garantire agli abitanti di un luogo artificiale, una relazione costante con l'ambiente esterno [2]. L'evoluzione culturale sollecitata da crescenti problemi di gestione e conservazione dell'ambiente, ha reso l'uomo più consapevole nel progettare edifici eco-compatibili, non impattanti sull'ambiente e rivolti allo sfruttamento di energie rinnovabili. L'edificio deve adattarsi dinamicamente alle condizioni climatiche esterne e garantire un elevato livello di benessere fisico, di qualità dell'aria e dell'illuminazione, di confort termico, igrometrico ed acustico. Normalmente un involucro viene considerato innovativo in funzione delle tecnologie costruttive o per i materiali costruttivi. Gli ultimi sviluppi della ricerca hanno inteso l'innovazione come un concetto di sintesi di un sistema costruttivo composito, capace di integrare più soluzioni innovative in base alle condizioni ambientali esterne (orientamento e contesto) e interne (tipologia



edilizia, destinazione d'uso) [3]. Oggi l'involucro edilizio deve assumere un comportamento dinamico e gestire dinamicamente gli impulsi al contorno, riuscendo a variare le proprie prestazioni all'interno dello stesso edificio se non dello stesso prospetto. Lo sviluppo di involucri innovativi ha dato luogo a molteplici e valide soluzioni progettuali. Come ispirato dai contesti normativi del DLgs. 192/05 e del Dlgs. 311/06 sviluppati dal legislatore in ottemperanza a quanto indicato dalla Direttiva 2002/91/CE, il funzionamento degli edifici deve essere considerato il responsabile del

## 2.1 Regesto degli involucri innovativi

Ogni tecnologia funzionale al contesto ambientale in cui è inserita può essere considerata innovativa. La prima generazione di involucri di nuova concezione rivoluziona il rivestimento degli edifici. Le chiusure opache diventano sistemi a doppia pelle vetro-vetro, integrati con nanotecnologie e complessi sistemi di automazione, in facciate continue o strutturali. Tali elementi rimangono confinati a particolari applicazioni perché consideravano fenomeni fisici e fattori ambientali come elementi distinti, separati, fissi e variabili. La seconda generazione di involucri ricerca soluzioni progettuali in grado di integrare gli elementi fisici e i fenomeni ambientali fissi e

40% dei consumi energetici comunitari. Tale assunto va esteso non solo alla nuova edilizia ma anche al patrimonio esistente. L'involucro non può più essere l'elemento statico monofunzionale ma deve assumere una funzioni variabili e reversibili. Non esistono soluzioni generali; ogni contesto necessita di algoritmi specifici con i quali la struttura normativa, spesso, non riesce a tenere il passo. Non va ricercata l'innovazione nella materia ma nel funzionamento. La progettazione deve assumere un approccio critico integrato capace di sintetizzare in modo organico i molteplici aspetti funzionali.

variabili. Le chiusure trasparenti si compongono e l'involucro traslucido interagisce con quello opaco. La terza generazione spinge la ricerca a non considerare solo la materia degli edifici ma favorisce lo sviluppo di involucri a comportamenti dinamico capaci di gestire il rendimento energetico. La pelle dell'edificio non è più un elemento ma diventa sistema dinamico. Si sviluppano i sistemi a facciata ventilata, i frangisole, i muri di trombe ecc. L'ultima generazione di involucri rende mutabili i sistemi della terza generazione, componendoli e scomponendoli in funzione del contesto e delle esigenze funzionali. Nel

nostro contesto nazionale, è stato l'obbligo della certificazione energetica ad avviare la diffusione degli involucri edilizi di quarta generazione [3]. Nel nostro paese, più che in altri contesti, non può essere trovata una soluzione definitiva per diversi motivi. Il nostro denso patrimonio edilizio, storico e artistico, non può rispondere adeguatamente

## 2.2 Impatto ambientale e misure normative

L'impatto del parco edilizio sull'ambiente naturale è considerevole. Uno degli obiettivi cardine di questa ricerca è proporre soluzioni innovative in grado di contenere l'impronta ecologica generata dall'antropizzazione del settore residenziale e terziario. L'Unione Europea si è impegnata a ridurre entro 10 anni, le emissioni di gas serra dell'8% rispetto al valore registrato nel 1990, e raddoppiare l'uso di energie rinnovabili, secondo quanto concordato nel protocollo di Kyoto nel 1997. L'Europa pur rappresentando solo il 5% della popolazione mondiale, è responsabile del 15% delle emissioni globali. L'intento di ridurre le emissioni di gas serra può essere intrapreso anche attraverso la cooperazione dei vari paesi al fine di sviluppare tecnologie innovative per la generazione di energia. altri strumenti previsti riguardano i "crediti di emissione" ai quali possono attingere i Paesi industrializzati che attivano progetti di efficienza energetica nei Paesi in via di

sviluppo che non hanno sottoscritto un protocollo di riduzione. E' stato creato un mercato dei crediti di emissione tra i vari Paesi industrializzati per mezzo della Direttiva europea 2003/87/EC. La limitazione delle emissioni gassose consente all'Unione di ottemperare agli obblighi normativi contratti nell'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici [3]. Il 57% dei consumi energetici del settore edilizio europeo, è imputabile alla climatizzazione degli ambienti interni e il 25% all'acqua calda per i sanitari mentre, nel settore terziario, il 52% dei consumi è per il riscaldamento e il 14% per l'illuminazione artificiale. In Italia l'impronta ecologica è ancora maggiore: per i riscaldamenti si registra un'incidenza dei consumi del 68.4% e per gli elettrodomestici e i condizionatori del 14.2%. Nel terziario, responsabile del 29.5% dei consumi energetici, si destina il 59% dei consumi, al riscaldamento (47% gas naturale

e 12% derivati del petrolio), e il 41% all'energia elettrica per la climatizzazione e l'illuminazione artificiale. Questi numeri spiegano da soli l'importanza che ha una scelta progettuale responsabile, sull'impatto ambientale degli edifici. I rapporti sul

cambiamento climatico dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) hanno stimato che l'antropizzazione incide quasi il 90% sull'aumento della concentrazione dei gas serra [3].

### **2.3 Complessità dell'involucro dinamico**

Un involucro capace di rispondere a diverse e spesso contrastanti esigenze funzionali va incontro ad una serie di problematiche a cui dover far fronte. Considerato che spesso le chiusure sono il risultato dell'assemblaggio di strati aventi caratteristiche diverse, si incorre in criticità costruttive dovute ai diversi comportamenti legati alle sollecitazioni termiche e meccaniche o alla mancanza di elementi di congiunzione tra i vari strati. Altre criticità di carattere economico, normativo e progettuale si possono incontrare in quanto un progetto esecutivo è la sintesi del lavoro di più maestranze e competenze specifiche. A volte, proposte progettuali di involucri a doppia pelle costituiscono criticità normative, in quanto le

commissioni edilizie, non hanno le competenze e gli strumenti idonei, per fare valutazioni critiche e coerenti. Le normative se da un lato sollecitano lo sviluppo di progetti performanti attraverso l'imposizione di criteri minimi, dall'alto non stanno al passo con i tempi e le esigenze reali dei progettisti. Un altro aspetto da non sottovalutare è legato alla mentalità. Nel nostro Paese siamo ancora legati alle metodologie costruttive tradizionali e guardiamo con occhio traverso alle soluzioni innovative per un modo di pensare conservativo e poco incline ai cambiamenti. Inoltre l'aspetto economico spesso frena la committenza convogliandola ai sistemi costruttivi tradizionali.

## 2.4 Tipologie di Facciate a doppia pelle

In questo paragrafo si parla degli involucri edilizi più innovativi del quadro contemporaneo. Nello specifico le facciate a doppia pelle sono quelle che offrono le maggiori possibilità funzionali a seconda delle intercapedini e della capacità di direzionare i

flussi d'aria, delle scelte tipologiche, dell'organizzazione degli spazi e dei contesti. Gli involucri a comportamento dinamico vengono classificati in base alla direzione di ventilazione dell'aria nell'intercapedine.

### 2.4.1 Involucri a direzione di ventilazione interna, esterna o mista

Negli involucri possono essere distinti in base alla dinamica della ventilazione. Negli **involucri a direzione di ventilazione esterna**, l'aria contenuta nell'intercapedine viene introdotta dall'esterno ed espulsa all'esterno senza che vi sia contatto alcuno con l'aria nell'ambiente interno. Nel caso di **involucri a direzione interna** il funzionamento è opposto ovvero l'aria dell'intercapedine viene introdotta ed espulsa esclusivamente dall'interno dell'edificio. Il caso di **involucri a ventilazione mista** si ha invece quando l'intercapedine è collegata sia con l'interno che con l'esterno dell'involucro e attraverso meccanismi appositi è possibile variare la direzione dell'aria. Le facciate poi possono essere distinte a seconda del tipo di intercapedine dell'aria. Si hanno **facciate a tutta superficie**, quando vi è un'intercapedine interposta tra due strati di chiusura estesa all'intero edificio. Lo strato esterno è indipendente da quello interno e non risultano

presenti elementi di compartimentazione dell'intercapedine. Gli elementi di ventilazione della camera sono confinati nelle parti superiore ed inferiore della facciata esterna e vi è la possibilità di praticare ulteriori aperture per la dispersione del calore accumulato, lungo la superficie esterna. L'intercapedine è collegata direttamente con i vani attraverso aperture a bocca di lupo. Il funzionamento di un involucro è connesso a diversi fenomeni fisici che si traducono in prestazioni. Si tratta di: "*effetto camino*", ove nei periodi caldi, l'aria fresca estiva entra nella parte inferiore della facciata, assorbe calore dall'edificio e viene espulsa nella parte superiore e nei periodi invernali, con la chiusura dei vani, le aperture della facciata creano nell'intercapedine uno strato isolante di aria ferma che genera l'isolamento termico e laddove l'estensione della superficie o l'intercapedine non sono sufficienti si ricorre a sistemi di ventilazione meccanica controllata.

Nelle **facciate a canali**, l'intercapedine viene suddivisa in più canali di ventilazione a seconda del tipo di canalizzazione. Si distinguono in facciate a canali orizzontali e facciate a canali verticali. Gli involucri a canali orizzontali hanno i moduli di ventilazione corrispondenti a un interpiano posti ad altezza solaio, quindi il numero di canali equivale al numero di piani e facciate a canali verticali. Per questo tipo di involucri la ventilazione è esterna o mista. Nelle facciate verticali i canali di ventilazione sono collegati direttamente alle intercapedini sovrapposte corrispondenti al massimo sviluppo dei vani prospicienti l'involucro. Nelle unità di ventilazione, sulla facciata esterna, sono collocati i dispositivi di entrata dell'aria nell'intercapedine mentre le uscite sono ubicate lungo gli elementi di compartimentazione. La tipologia a canali orizzontali, per la sua facilità costruttiva, è più diffusa di quella a canali verticali anche se a

volte meno efficiente. Ogni unità di ventilazione funziona in modo autonomo per cui si ha la libera gestione di ogni camino senza influenzare gli altri canali. Vi sono poi **facciate ventilate a singoli elementi** fisicamente e funzionalmente autonomi che hanno piccole unità di ventilazione costituite da celle vetrare. I dispositivi di ventilazioni fissi od orientabili sono collocati alle estremità dei vani, in prossimità delle pavimentazioni e dei solai. La ventilazione può essere di tipo meccanico o naturale. Il principio di funzionamento è lo stesso delle facciate a canali con l'opportunità di avere, per le ridotte dimensioni delle intercapedini, il convogliamento dell'aria trasversale, ottimizzando le funzioni di raffrescamento e ventilazione. La grande possibilità di questo tipo di facciate è la possibilità da parte di ogni singolo utente prospiciente di configurare la propria cella di ventilazione.

#### 2.4.2 Famiglie di involucro con facciate trasparente-trasparente

Le facciate possono appartenere a diverse famiglie in funzione dei materiali compositivi. Ogni famiglia offre un comportamento dinamico delle chiusure, variabili, in funzione delle tipologie e dei materiali adottati. La prima famiglia riguarda le **facciate trasparente - trasparente**. Si tratta di due facciate vetrate che delimitano l'intercapedine

d'aria. Attraverso la gestione dei flussi d'aria si ottengono configurazioni dinamiche in funzione degli stimoli climatici esterni. Le facciate sfruttano i principi "*dell'effetto serra*" nei periodi freddi e "*dell'effetto camino*" nei periodi caldi. Questo tipo di facciate può essere usato per ogni tipologia di involucro e per tutte le direzioni di ventilazione. Gli

involucri a doppia pelle possono avere: **facciate continue tradizionali** quando le superfici vetrate sono ancorate ad un telaio metallico di acciaio o alluminio, fissato sulla struttura dell'edificio; **facciate continue strutturali** se sono ancorate con un silicone strutturale (con funzione di supporto del carico con vincolo elastico delle lastre di vetro e della struttura portante) ad un telaio metallico di supporto, sulla facciata o direttamente

all'edificio; **facciate a fissaggi puntiformi** quando sono ancorate con elementi puntuali metallici di raccordo in acciaio o alluminio, alla facciata o all'edificio stesso e infine **facciate a lamelle** quando la facciata è costituita da singoli elementi lamellari (orizzontali o verticali) fissati tramite parti meccaniche puntuali ad una struttura portante di supporto.

### 2.4.3 Famiglie di involucro con facciate trasparente-opaco

Si tratta di involucri con tamponamenti interni opachi (legno, laterizio ecc.) ed esterni trasparenti, frutto dello sviluppo di chiusure tradizionali (classica chiusura opaca, muro di trombe ecc.). Le prestazioni di queste facciate risultano diverse in funzione del fatto che cambia il funzionamento dinamico della facciata opaca che blocca la radiazione solare e funge da elemento inerziale termico. Si ha di contro l'annullamento dell'introspezione di

luce naturale. Questi involucri possono essere costruiti con **facciate interne pesanti**, se costituite da materiali di grande massa ed elevata inerzia termica o con **facciate interne leggere** costituite da materiali a basso peso specifico con costruzioni a secco. In questo caso per ovviare a problemi di isolamento termico si usano dei pannelli isolanti in aderenza.

#### **2.4.4 Famiglie di involucro con facciate opaco-opaco**

Sono involucri nei quali entrambi gli strati sono in materiale opaco. In questi involucri, la penetrazione di acqua piovana è minima e tramite il riciclo dell'aria generato dai differenziali termici e di pressione, si elimina il problema della condensa. Nel caso delle basse temperature avviene l'eliminazione della condensa nella parte posteriore del rivestimento mentre nei periodi caldi il flusso

dell'aria raffredda gli strati interni eliminando condensa e acqua piovana. In entrambi i casi vengono mantenute le prestazioni offerte dal materiale isolante retrostante l'intercapedine. Con intercapedini di 40÷50 cm. si ha l'efficienza ottimale. La grande difficoltà di questo tipo di involucri è l'integrazione con i sistemi impiantistici.

#### **2.4.5 Famiglie di involucro traslucido - trasparente e traslucido - opaco**

Gli involucri caratterizzati da una superficie esterna traslucida sono sviluppati per la gestione della radiazione solare diretta e per l'ombreggiamento. La pelle traslucida può avere un'alta permeabilità alla luce e all'aria in base al materiale compositivo. Si può ad esempio trattare di reti metalliche, frangisole o

anche tessuti. Normalmente sono facciate a lamelle che permettono la dinamicità dei frangisole. Con le lamelle è possibile ottenere diverse configurazioni della superficie esterna in relazione agli stimoli solari esterni. La facciata interna può essere trasparente od opaca.

## 2.5 Flusso termico nell'involucro edilizio opaco

La trasmissione di calore nell'involucro edilizio opaco, avviene in tutti e tre le forme di propagazione termica, definite: **conduzione**, **convezione** e **irraggiamento**. La trasmissione di calore per **conduzione** avviene principalmente all'interno degli strati solidi, meno nei liquidi o aeriformi, dell'involucro o per contatto tra strati di materiale, dalle zone a temperatura maggiore verso le zone a temperatura minore. Negli strati con un livello termico superiore le molecole oscillano con

maggior velocità urtando con le altre molecole degli strati più freddi e scambiano energia sotto forma di quantità di moto che si traduce in scambio di energia termica per conduzione. Il flusso termico **Q** che viene scambiato dipende dal gradiente di temperatura  $\Delta T$ , tra gli strati dell'involucro, dallo spessore degli strati **d**, dalla superficie di scambio termico **A** e dal coefficiente di conducibilità termica del materiale **K** o  $\lambda$ , secondo la relazione di Fourier [4].

$$\dot{Q} = k \cdot A \frac{\Delta T}{d}$$

Per quanto concerne la trasmissione per **convezione**, tipica dei fluidi, il trasporto avviene per spostamento stesso della materia del fluido quando si trova a temperatura diversa da quella di un altro fluido o corpo o aeriforme. In particolare avviene per lo spostamento della massa d'aria contro le pareti esterne dell'involucro edilizio. Negli interstizi

delle pareti ove l'aria non è libera di muoversi, la trasmissione avviene per conduzione. Secondo Newton la velocità di trasferimento di calore di un corpo è proporzionale alla differenza di temperatura tra il corpo e l'ambiente che lo circonda. In condizioni stazionarie il calore scambiato per convezione secondo l'uguaglianza di Newton [5] è:

$$Q/t = h \times A \times (T_{AIR} - T_{SURFACE})$$

Il tale uguaglianza, il calore scambiato per convezione **Q**, nell'unità di tempo **t** è dato dal coefficiente termico convettivo **h** per la superficie di scambio **A**, per il gradiente di temperatura tra la temperatura della massa d'aria e la temperatura della superficie a contatto (**T<sub>air</sub>**-**T<sub>surface</sub>**). Vi è poi il calore



scambiato per **irraggiamento**. Questa forma di calore non ha bisogno di un vettore in quanto si propaga per onde elettromagnetiche, nel vuoto. Si trasmette nei fluidi ma difficilmente nei solidi. Nello studio della “trasmissione globale di calore”, i flussi di calore vanno studiati separatamente per i materiali opachi, per le intercapedini d’aria e

per i materiali trasparenti. Nel caso di involucri non trasparenti si considerano gli scambi convettivi e conduttivi nei vari strati delle pareti e per quanto riguarda le superfici a contatto con gli ambienti esterni vengono considerati dei coefficienti liminari di scambio termico di adduzione per convezione e radiazione  $h_{int}$  e  $h_{est}$ .

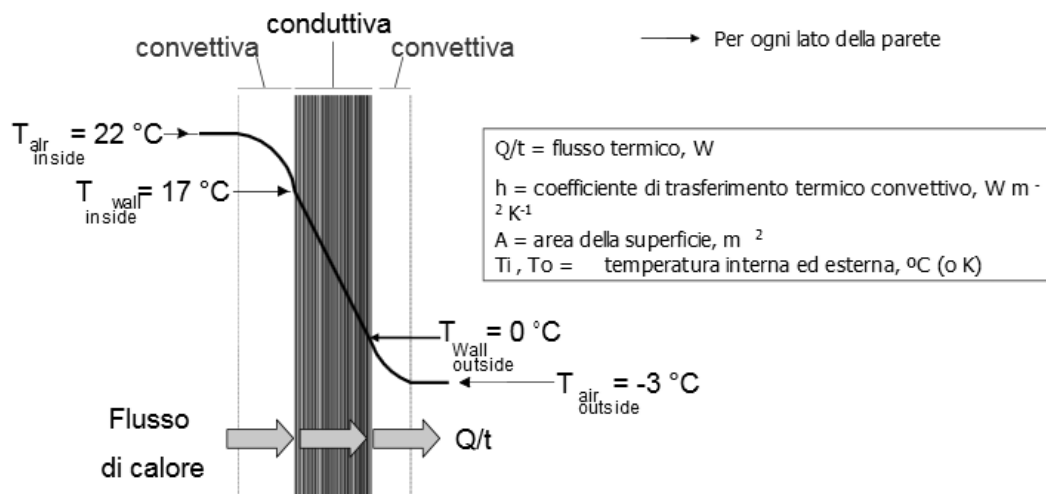


Fig. 1 - Cap 2 - Scambio termico in una parete opaca - <http://www.Infrared Training Center> [6].

Per gli involucri opachi, viene definito il parametro della “**trasmittanza termica U**” secondo la Norma UNI EN ISO 6946, come coefficiente di trasmissione del calore globale interno-esterno. La trasmittanza termica è un coefficiente di conduttanza globale che indica la quantità di calore che viene dispersa da una superficie di un metro quadrato di involucro ed è definita dall’inverso della sommatoria delle singole resistenze termiche degli strati

che costituiscono la parete. A bassi valori di trasmittanza termica corrisponde una minore dispersione termica corrispondente ad una maggior coibentazione dell’edificio. Il trasporto di energia per conduzione termica all’interno dell’involucro opaco, viene calcolato in base alla conduttività termica  $\lambda$  dei materiali dei vari strati. Si fa notare che i valori di  $\lambda$  delle schede tecniche dei produttori sono valori di conduttività di riferimento

rilevati in laboratorio; per cui i valori di progetto devono tener conto delle condizioni di esercizio, ossia della prestazione peggiorativa del componente rispetto alle condizioni ottimali di laboratorio, dovuta al trasporto, alla movimentazione, agli errori di messa in opera, al decadimento prestazionale nel tempo, al degrado e alle sollecitazioni esterne. Per questo motivo la norma UNI 10351 fornisce valori di  $\lambda$  indicando una percentuale di maggiorazione tra conduttività termica di riferimento  $\lambda_m$  e conduttività termica di calcolo  $\lambda$ . Convenzionalmente, per il calcolo dello scambio termico globale, ci si riferisce ad una parete edilizia composta da strati di materiali opachi omogenei ed isotropi, disposti in strati piani multipli in condizioni stazionarie (proprietà dei materiali e condizioni al contorno indipendenti dal tempo) e in direzione di propagazione del calore perpendicolare alla parete (flusso monodirezionale). Il coefficiente globale di trasmittanza termica "U" tiene conto dei

diversi tipi di propagazione del calore ovvero: dell'irraggiamento dall'esterno verso l'involucro, della convezione a ridosso delle pareti intonacate esterne ed interne e dei fenomeni di conduzione e in piccola parte convezione che avvengono nei vari strati della parete. La trasmittanza termica totale di un sistema opaco " $U_{op}$ " è l'inverso della somma delle resistenze ottenute dall'inverso delle conduttività termiche  $\lambda$  dei vari strati, per i relativi spessori, le resistenze termiche relative agli strati iesimi non omogenei, come ad esempio le murature composte da materiali diversi e intercapedini d'aria, sono ricavate dall'inverso delle relative conduttanze termiche e le resistenze termiche di ammissione ed emissione relative agli scambi termici convettivi e radianti che si manifestano sulle superfici interne ( $R_{si}$ ) ed esterne ( $R_{se}$ ) vengono ottenute attraverso gli inversi dei coefficienti liminari di scambio termico o di adduzione per convezione e radiazione  $h_{int}$  e  $h_{est}$  o  $\alpha_i$  e  $\alpha_e$ .

$$U_{op} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^m R_j + \frac{1}{\alpha_e}}$$

Un altro aspetto molto importante che deve essere considerato negli involucri dinamici riguarda il riciclo dell'aria. Un ambiente confinato ove non vi è un adeguato ricambio

d'aria è fonte di discomfort abitativo. A tal scopo vanno considerati materiali in grado di garantire per traspirazione un adeguato ricircolo dell'aria [7].

## 2.6 Normativa di riferimento

Per la caratterizzazione delle prestazioni energetiche minime richieste ai fabbricati, la giurisprudenza nazionale, in recepimento della Legislazione Europea, ha emanato una serie di provvedimenti normativi. In particolare, il D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, ha suddiviso il territorio italiano in **6 zone climatiche**, in funzione del clima medio annuo, indipendentemente dalla posizione geografica.

Il clima medio delle località, è misurato con i **gradi giorno (GG)** che rappresentano la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media esterna giornaliera [7]. Le zone climatiche individuate, sono di seguito riportate:

Zona A: comuni che presentano un numero di gradi-giorno non superiore a 600;
Zona B: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 600 e non superiore a 900;
Zona C: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 900 e non superiore a 1.400;
Zona D: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 1.400 e non superiore a 2.100;
Zona E: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 2.100 e non superiore a 3.000;
Zona F: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 3.000.

Tab. 1 - Cap 2 - Zone climatiche Italiane - D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 [7].

Il Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 26/06/2015, ha determinato i valori limite dei parametri caratteristici degli elementi edilizi. Nelle tabelle vengono

riportati i valori che dovevano essere rispettati all'anno di emanazione del Decreto e i valori richiesti per l'anno 2021.

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tab. 2 - Cap 2 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali,- D.M. 26 giugno 2015 [8].

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Tab. 3 - Cap 2 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura [8].

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

Tab. 4 - Cap 2 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento [8].

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Tab. 5 - Cap 2 - Trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti [8].

Il Ministero dello Sviluppo economico, ha stabilito anche una classificazione degli involucri opachi relativi a edifici di nuova costruzione o ristrutturati, in base alle prestazioni energetiche offerte. Nella classificazione vengono considerate le

prestazioni in termini di **sfasamento termico** e di **attenuazione**. Lo sfasamento rappresenta la differenza di tempo fra l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie esterna dell'involucro, e l'ora in cui si registra la massima temperatura sulla superficie

interna dello stesso mentre l'attenuazione (o fattore di decremento) è il rapporto tra la variazione di temperatura esterna ed il flusso che è necessario somministrare all'interno per

mantenere costante la temperatura interna. In tal senso esso può essere assunto come "indice delle dispersioni termiche" (dei consumi) [9].

Sfasamento [ore]	Attenuazione	Prestazioni	Qualità prestazionale
$S > 12$	$fa < 0,15$	ottime	I
$12 \geq S > 10$	$0,15 \leq fa < 0,30$	buone	II
$10 \geq S > 8$	$0,30 \leq fa < 0,40$	medie	III
$8 \geq S > 6$	$0,40 \leq fa < 0,60$	sufficienti	IV
$6 \geq S$	$0,60 \leq fa$	mediocri	V

Tab. 6 - Cap 2 - Qualità prestazionali degli involucri [9].

La norma più recente, in termini di limiti massimi di trasmittanza termica per gli involucri opachi, riguarda la riqualificazione degli edifici pubblici, a partire dal 13 febbraio 2017. Le disposizioni in questione riguardano i "Criteri Ambientali Minimi per gli edifici pubblici" contenuti nel Decreto Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 11 gennaio 2017. In particolare, per

progetti di ristrutturazione importante di secondo livello e di riqualificazione energetica riguardanti gli involucri edilizi, vanno rispettati i valori minimi di trasmittanza relativi all'anno 2021, mentre per nuove costruzioni o assimilabili il valore termico dei serramenti deve essere richiesto dal progettista.

ZONA CLIMATICA	U (W/m <sup>2</sup> K)
A e B	3,00
C	2,00
D	1,80
E	1,40
F	1,00

Tab. 7 - Cap 2 - Qualità prestazionali degli involucri [9].

## 2.7 L'involucro trasparente

All'involucro trasparente sono affidate svariate funzioni fondamentali al comfort abitativo e al rendimento energetico. Le finestre consentono l'introspezione della luce naturale, consentono l'accesso agli elementi aggettanti od esterni, consentono uscite di sicurezza, consentono il guadagno solare invernale ma al contempo dovrebbero ridurre al massimo gli apporti termici estivi. Il dimensionamento, l'orientamento e le proprietà dei vetri sono fondamentali per la gestione dei flussi termici e luminosi. Il bilancio energetico positivo dell'involucro trasparente può essere

raggiunto usando vetrate innovative (ad es. triplo vetro sistema di finestre con due strati di vetro basso emissivo, alto guadagno di calore solare) e serramenti ben isolati (telaio a bassa conduttività, sistemi esterni di ombreggiatura), integrati con schermature architettoniche [11]. I Paesi membri dell'OCSE (Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico) con clima freddo stanno sviluppando involucri trasparenti non più formati da tripli vetri ma da doppi vetri con basso spessore e trattamento superficiale basso-emissivo, in grado di garantire prestazioni anche superiori.

### 2.7.1 Proprietà dell'involucro trasparente

Le proprietà dell'involucro trasparente che influiscono principalmente sulla trasmissione della radiazione elettromagnetica sono di matrice ottica. In funzione di queste, la radiazione solare incidente, a seconda dell'angolo di incidenza e della lunghezza d'onda, viene in parte trasmessa dal vetro, in

parte assorbita ed in parte riflessa. Per il principio di conservazione dell'energia, Questa scomposizione è quantificata con tre coefficienti:  $\alpha$  (coeff. di assorbimento),  $\rho$  (coeff. di riflessione),  $\tau$  (coeff. di trasmissione),  $\alpha + \rho + \tau = 1$ .

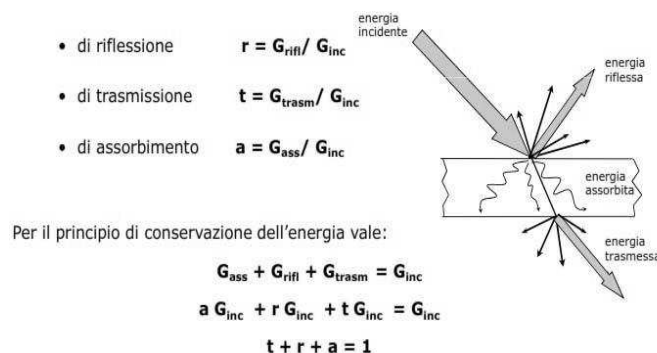
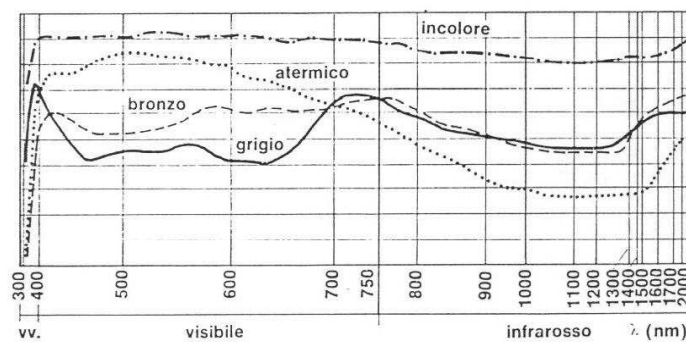


Fig. 2 - Cap 2 - Schema illustrativo della scomposizione del flusso energetico su lastra vetrata.

La **trasparenza** è la proprietà ottica principale del vetro per l'impiego nell'edilizia. Il fattore numerico che indica di quanto la velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica viene rallentata nell'attraversamento del vetro, rispetto alla velocità nel vuoto, è l'**indice di rifrazione  $n$** . Se un indice di rifrazione  $n=1.5$ , vuol dire che in quel vetro, una particolare lunghezza d'onda si propaga a una velocità ridotta a  $1/1.5=0.67$  rispetto a quella nel vuoto. L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione e dalla natura del materiale attraversato. Più è alto e minore può essere lo spessore di un vetro a parità di potere diottrico. Qualche tempo fa, il vetro ad alto IR veniva prodotto con introduzione nella composizione di ossido di piombo in quanto esso aumentava parecchio la densità della lastra. Vi erano però problematiche di

inquinamento. Oggi questo ossido è sostituito con l'ossido di Titanio che permette un alto IR a densità minori (vetri al Titanio); sono inoltre presenti anche altri elementi come Niobio, Zirconio e Stronzio. Un parametro importante nella tecnologia del vetro è l'**aberrazione Cromatica**. Essa consiste in un difetto della formazione dell'immagine dovuto al diverso valore di rifrazione, in base alle diverse lunghezze d'onda che compongono la luce che attraversa il mezzo ottico. In pratica si formano immagini con bordi sfrangiati e colorati (rosso/blu). Il **potere dispersivo** di un materiale viene definito con il numero di Abbe  $V$  e si calcola sovente in base agli indici di rifrazione alle diverse lunghezze d'onda spettrali. Ogni vetro, in funzione delle proprie caratteristiche ottiche presenta una curva di trasmissione elettromagnetica.



- Curve di trasmissione di un vetro incolore, di un vetro bronzo, di un vetro grigio ed un vetro atermico (verde chiaro per ferro)

Fig. 3 - Cap 2 - Curve di trasmissione spettrale di alcuni tipi di vetro.

Il fattore che determina il flusso luminoso trasmesso da un modulo trasparente è il fattore di trasmissione luminosa  $\tau_e$ . È la quota parte di flusso luminoso trasmesso rispetto al flusso luminoso incidente, nell'intervallo di lunghezza d'onda della radiazione visibile. Per quanto concerne le caratteristiche conduttive dei vetri, il primo parametro che va considerato per è la conducibilità termica del materiale. Una singola lastra di vetro ha un valore di conducibilità termica di 1 W/mK ma in edilizia vengono usate lastre di piccoli spessori, per cui la resistenza termica offerta dalle stesse, risulta assai bassa (0,004-0,006 m<sup>2</sup> K/W). In virtù di ciò risulta che la trasmittanza termica delle singole lastre di vetro chiaro trasparente è alta e non adeguata ai requisiti di gestione degli apporti climatici esterni.

Per aumentare le proprietà isolanti del vetro sono state studiate diverse soluzioni:

- Vetrocamera (sistema costituito dall'accoppiamento di più lastre con intercapedine),
- Nuovi isolanti termici traslucidi (es. Aerogel) o complessi di materiali plastici (es. Tim),
- Intercapedini riempite con gas a elevato peso molecolare (Argon, Xenon, Krypton),
- Vetrocamere evacuate (vuoto nell'intercapedine),

- Vetri a riflessione selettiva dei raggi solari,
- Vetri assorbenti,
- Vetri riflettenti,
- Vetri a bassa emissività,
- Vetri con materiali cromo genici.

Per le applicazioni di facciate trasparenti di grandi dimensioni è importante verificarne il coefficiente di dilatazione termica che rappresenta l'allungamento unitario per una variazione di temperatura di 1°C. Viene dato per un intervallo di temperatura da 25°C a 300°C. Un basso coefficiente di dilatazione termica permette ai vetri di essere sottoposti a cicli di alta temperatura per trattamenti di tempera, di deposito sotto vuoto e di colorazione o antiriflesso. Normalmente ad assicurare un basso valore di dilatazione ed evitare fenomeni di shock termico, si mettono nella composizione chimica, dei borosilicati. La valutazione del calore globale che attraversa un sistema vetrato viene fatta attraverso il cosiddetto **fattore solare g**. Si tratta di uno scalare puro che rappresenta la quota totale di energia termica trasmessa dal vetro rispetto alla radiazione incidente su di esso. Il fattore **g** è composto dalla radiazione solare direttamente trasmessa  $\tau_e$  più la radiazione assorbita e riemessa verso l'ambiente interno  $q_i$ , dal sistema vetrato. Oltre ai suddetti parametri, esistono altri fattori tecnici e commerciali dei quali si tratta nel prosieguo della trattazione.



## 2.7.2 Trasmissione globale del calore nell'involucro edilizio trasparente

Un l'involucro trasparente, al pari di un involucro opaco, rappresenta un confine tra l'ambiente naturale esterno e lo spazio costruito interno e in quanto tale è soggetto ad una serie di flussi termici causati dalla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno dell'edificio. I flussi termici sono condizionati dall'apporto solare diretto e diffuso che incide sulle superfici, dalla ventilazione naturale e dalle infiltrazioni d'aria involontarie. Il meccanismo fondamentale dello scambio termico in un sistema vetrato è quello dell'irraggiamento che avviene per propagazione di onde elettromagnetiche (o fotoni), anche in assenza di materia, a seguito di modificazioni nelle configurazioni elettroniche degli atomi o delle molecole. Non

avviene attraverso un mezzo interposto e si trasmette alla velocità della luce. Qualsiasi corpo caldo che si trovi ad una temperatura maggiore di 0 °K (temperatura assoluta), emette radiazione termica. I corpi scuri, il nero per eccellenza, sono quelli che assorbono calore mentre quelli chiari, per eccellenza il bianco, riflettono calore. Il corpo ideale viene definito corpo nero. La radiazione da considerare per lo studio di un involucro edilizio, è quella del sole, corpo nero per eccellenza, che emette ed assorbe energia radiante a lunghezze d'onda variabili. La radiazione elettromagnetica responsabile della trasmissione di calore, è detta radiazione termica.

### 2.7.2.1 La radiazione solare incidente

Il 99% della radiazione solare, che agisce sul nostro sistema climatico, è compresa nello spettro elettromagnetico dell'ultravioletto ( $uv - \lambda < 0.4 \mu m$ ) per il 9%, del visibile ( $vis - 0.4 < \lambda < 0.8 \mu m$ ) per il 49% e del vicino infrarosso ( $near-IR - \lambda > 0.8 \mu m$ ) per il 42%. A seguito di ripetute osservazioni nel anni, è stato dimostrato che il flusso solare è sostanzialmente costante, ed è stato definito il concetto di costante solare o **radiazione solare incidente**  $G_{cs}$ . Per poter calcolare la

radiazione incidente su una superficie inclinata, si scompone la radiazione nelle sue tre componenti: diretta, diffusa e riflessa. La radiazione diretta colpisce una qualsiasi superficie con un unico e ben definito angolo di incidenza, la radiazione diffusa agisce con diversi angoli di incidenza e la radiazione riflessa (detta albedo) dipende da altre superfici emittenti come specchi d'acqua, terreno o edifici adiacenti. La stima delle componenti dell'irraggiamento viene fatta con

il metodo di Liu-Jordan. La **costante solare** misura la quantità di radiazioni, in termini di potenza, per unità di area, che incidono su una superficie, normale alla direzione di propagazione del flusso, posta alla distanza di una unità astronomica  $u.a. = 1496 \cdot 10^{11}$  m dalla superficie terrestre. Al di fuori dell'atmosfera terrestre,  $G_{cs}$  è pari a  $1353 \text{ W/m}^2$ . Per il calcolo delle prestazioni energetiche dell'involucro, della suddetta radiazione va considerata solo la componente perpendicolare al serramento dell'edificio  $G$  ( $G = G_{cs} \cos \theta$ ). L'intensità della radiazione solare incidente su una superficie al suolo è influenzata dall'angolo di inclinazione della radiazione stessa. Per una serie di fenomeni legati all'attraversamento della radiazione solare

nell'atmosfera, **sulla troposfera** arriva un flusso di circa  $1000 \text{ W/m}^2$ , in quanto una parte di radiazione viene deviata (scattering), una parte riflessa dagli aerosol, dalle nubi e dai vari gas atmosferici e una parte viene assorbita. L'energia solare che incide su una superficie unitaria in un determinato intervallo di tempo (tipicamente un giorno), dipende dall'irraggiamento del luogo. Esso è condizionato da vari fattori, quali il clima locale (nuvolosità, foschia ecc.), la latitudine e l'altitudine. L'energia solare raggiunge il massimo dell'emissione nella banda del visibile ( $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$ ). Di seguito un diagramma della radiazione solare nei periodi mensili dell'anno.

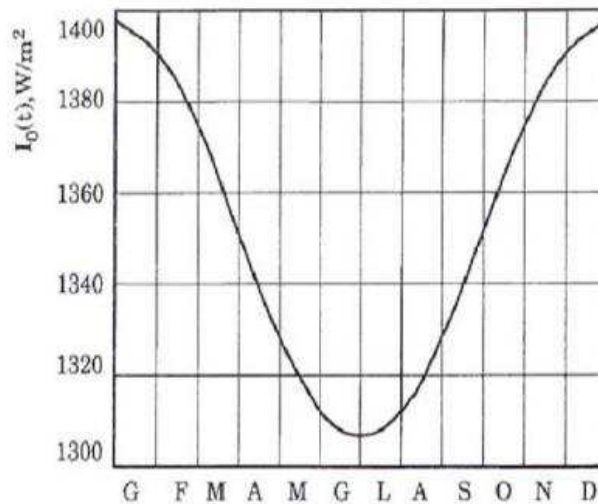


Fig. 4 - Cap 2 – Radiazione solare extra atmosferica nei mesi dell'anno [12]

Per ciò che concerne le procedure di calcolo delle prestazioni teoriche dei sistemi, si fa riferimento alle mappe isoradiative rilevate presso le stazioni meteorologiche, che

esprimono i valori medi dell'insolazione su superfici orizzontali. Nei luoghi ricompresi in una stessa area isoradiativa si riscontrano gli stessi valori medi di radiazione solare.

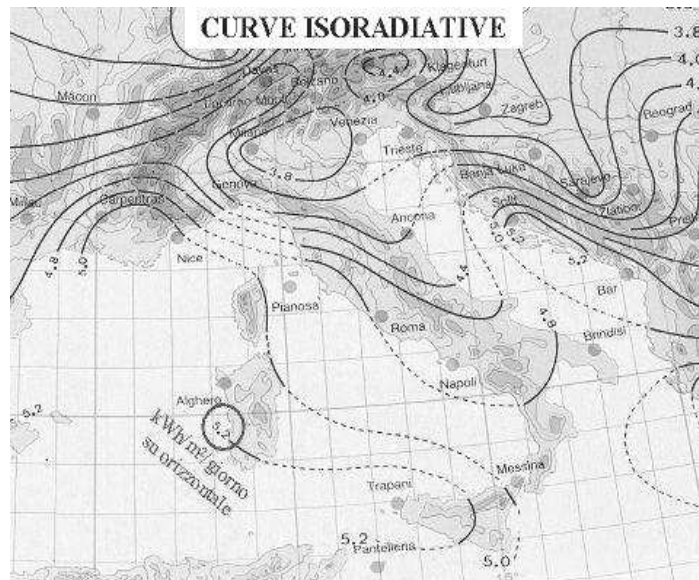


Fig. 5 - Cap 2 – Curve isoradiative [13]

Nell'immagine precedente, è possibile rilevare che, nella zona marchigiana si ha un valore medio di insolazione su superficie orizzontale di 4.2 kW/m<sup>2</sup>. In questa sezione sono riportati i risultati dell'attività svolta dall'ENEA per la stima della radiazione solare globale sul piano

orizzontale in Italia, mediante l'elaborazione delle immagini secondarie trasmesse dal satellite Meteosat nella banda del visibile. I valori stimati approssimano quelli misurati entro il 6-7 % [13].

### 2.7.2.2 Meccanismo di propagazione del calore su lastre vetrate

La potenza radiante **G** che incide su una superficie di area unitaria disposta al di fuori dell'atmosfera terrestre perpendicolarmente ai raggi solari è pari a 1353 W/ m<sup>2</sup>. Essa non è però ortogonale alla superficie quindi come detto, si fa riferimento al valore **G<sub>cs</sub>** che tiene conto dell'angolo di incidenza in funzione della latitudine del luogo e della posizione del sole. La radiazione termica comprende tre bande di onde elettromagnetiche a seconda della lunghezza d'onda  $\lambda$  : infrarossi (0.7-9), visibili (0.42-0.7) e ultravioletti (0.2-0.42). In fisica tecnica, il sole è considerato un corpo

nero avente temperatura efficace tra 5800 e 6300 K. Le misurazioni recenti indicano un valore di costante solare tra 1553-1367 W/ m<sup>2</sup>. Oltre all'energia totale trasmessa dal sole, è importante conoscere la sua distribuzione spettrale che è somma di lunghezze d'onda teoricamente infinite ma praticamente comprese tra 150 e 10  $\mu\text{m}$  . Per ogni corpo sono associati tre coefficienti:  $\alpha$  (coeff. di assorbimento),  $\rho$  (coeff. di riflessione), e  $\tau$  (coeff. di trasmissione), in relazione ai 3 flussi trasmessi: flusso riflesso, flusso trasmesso e

flusso assorbito. Per un corpo nero il flusso termico unitario  $q^*$  è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura ( $q^* = \sigma T^4$ ). Per una serie di fenomeni legati all'effetto filtro atmosferico, generato dall'assorbimento di radiazione in atmosfera e la riflessione solare verso lo spazio esterno, dalla variazione di distribuzione spettrale dovuta al comportamento selettivo di alcuni componenti atmosferici ( $O_2$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) e dall'effetto di riflessioni multiple (scattering), nonché

dalle condizioni geometriche tra il sole e la superficie irradiata, va considerato che la costante solare, ha valori molto superiori a quelli riscontrati sulla superficie terrestre. La quantità di energia solare accumulata da una superficie, in relazione alle geometrie tra essa ed il sole, dipende dall'inclinazione e dall'orientamento della superficie stessa. Di seguito viene illustrato un grafico riportante i valori medi mensili di insolazione, per superfici aventi diverso orientamento.



Fig. 6 Cap. 2 – Radiazione solare media mensile per diversi orientamenti [15]

Noti i valori delle tre energie incidenti su un involucro trasparente, è possibile calcolare l'energia solare entrante nello spazio interno mediante il rapporto tra l'energia trasmessa

oltre la lastra e quella incidente. Tale rapporto corrisponde al parametro di **Solar Heating Gain Coefficient SHGC** o guadagno solare **g Value** o **fattore solare FS** (europeo).

Di seguito si riporta uno schema delle componenti della radiazione termica e dei relativi valori di fattore solare per alcuni vetri comuni.

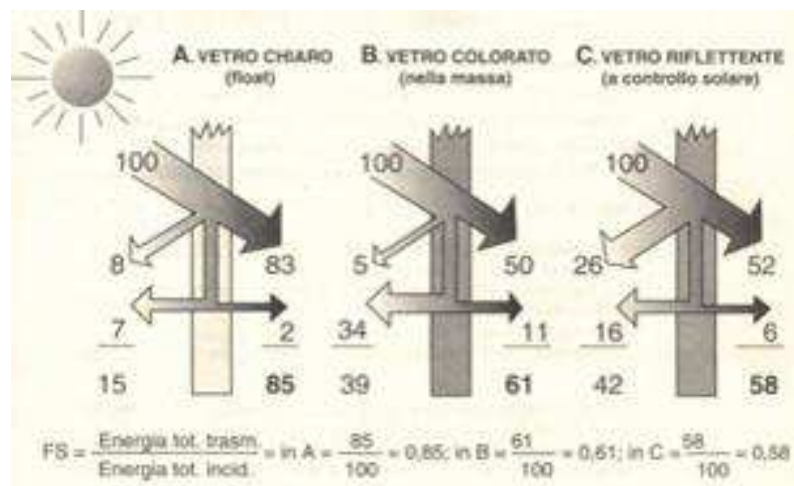


Fig. 7 Cap. 2 – Fattori solari per diversi tipi di vetro [16]

Noto il **fattore solare g** è determinata l'energia termica che il vetro trasmette per irraggiamento. Per un corpo nero, i coefficienti di riflessione e trasparenza sono nulli e la

potenza termica radiante globalmente emessa, è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta del corpo ed è definita dalla **Legge di Stefan Boltzmann**:

#### Legge di Stefan-Boltzmann

$$E_n = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Nota la potenza termica radiante globale è possibile valutare l'energia termica irraggiata  $\dot{Q}$  da un corpo nero conoscendo la superficie radiante  $S$ :

$$\dot{Q} = S \sigma T^4$$

Per poter applicare la **Legge di Stefan-Boltzmann** ad un corpo reale, occorre tener conto che nel caso di superficie reale, il flusso emesso è inferiore a quello emesso dal corpo ideale nero alla stessa temperatura. Per questo

motivo viene introdotto il parametro dell'emissività della superficie  $\epsilon$ . Quest'ultima varia da 0 a 1 ed è una misura di quanto una superficie differisce da un corpo nero per il quale  $\epsilon=1$ .

Quindi nel caso di un corpo reale, il calore scambiato sarà dato dall'energia termica radiata da un corpo nero alla stessa temperatura per il coefficiente riduttivo di emissività  $\epsilon$ :

$$\dot{Q} = S \epsilon \sigma T^4$$

Stabilito che la trasmissione per irraggiamento è il risultato di un bilancio fra energia emessa ed energia assorbita, possiamo affermare, per il “**principio di Kirchoff**”, che il rapporto fra emittanza monocromatica e coefficiente di assorbimento di uno stesso corpo è indipendente dal corpo stesso e funzione della sola lunghezza d’onda e della temperatura. Nel

caso degli involucri trasparenti tra il corpo emittente (sole) e superficie irradiata vi è interposizione di uno spazio gassoso. In questo caso in luogo della temperatura assoluta va considerato il gradiente tra la temperatura della superficie maggiore emittente  $T_e$  e la temperatura della superficie minore ricevente  $T_s$ :

$$Q = \epsilon \sigma S (T_s^4 - T_e^4)$$

### Superfici separate da un gas

Attraverso la **Legge dello spostamento di Wien**, nota la temperatura assoluta del corpo T, si può ricavare il valore della lunghezza d’onda  $\lambda_m$  per la quale è massima l’energia irradiata globalmente, :

$$\lambda_{\max} \cdot T = C_3$$

$$C_3 = 2897,8 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Infine la **Legge di distribuzione di Plank** ci permette di ottenere il valore del potere emissivo monocromatico  $q_0'$  in funzione di  $\lambda$  e T, cioè il flusso termico specifico, irradiato, per lunghezza d’onda:

$$q_0' = \frac{c}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

$\epsilon_0$  = emittanza cromatica [W/ m<sup>2</sup>  $\mu$ m]

$c = 3.7418 \cdot 10^{-6}$  [W/ m<sup>2</sup>]

$c_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2}$  [m K]

T = temperatura assoluta [°K]

$\lambda$  = lunghezza d’onda emessa [ $\mu$ m]

Dalle leggi dell'irraggiamento, si deduce che all'aumentare della temperatura assoluta del corpo, aumenta la potenza globale emessa per ogni singola lunghezza d'onda emessa e si la

massima intensità di emissione per le lunghezze d'onda più piccole. Per calcolare lo scambio termico per irraggiamento tra due corpi, si applica la seguente formula

$$Q/t = q_i = \frac{A_1 \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$$

In equazione,  $\epsilon_1$  ed  $\epsilon_2$  sono rispettivamente le potenze emittenti specifiche del corpo radiante e del corpo irradiato,  $T_1$  e  $T_2$  le relative

temperature e  $A_1$  e  $A_2$  le temperature del corpo radiante e del corpo irradiato.

### 2.7.2.3 Trasmissione globale del calore per il sistema trasparente

Nei paragrafi precedenti sono state esaminate separatamente, le modalità di trasmissione del calore. Nella realtà la trasmissione del calore per irraggiamento e convezione, coesistono. Si parla in questi casi di trasmissione di calore per **adduzione**, e si esprime con la seguente equazione:

$$q_a = h A (T_p - T_f)$$

Il fattore **h** è la somma dell'apporto termico convettivo **h<sub>c</sub>** e dell'apporto termico radiativo **h<sub>r</sub>**. Analizzando nello specifico il flusso di calore, si constata che tra il primo scambio termico tra l'aria interna e il primo elemento solido del divisorio, è di **convezione**, e contestualmente tra lo stesso elemento e l'ambiente, di **irraggiamento**. Vi sarà poi scambio per conduzione tra le facce del

divisorio a diverse temperature. Infine tra la seconda faccia del divisorio e l'ambiente esterno, lo scambio termico avverrà di nuovo per **adduzione**. Noti i fattori di adduzione interno ed esterno, **h<sub>i</sub>** e **h<sub>e</sub>**, è la trasmittanza termica del sistema vetrato **U<sub>g</sub>**, di cui si è già trattato, si trova il valore della potenza termica scambiata dall'involucro trasparente **q**:

$$q = UA (T_i - T_e)$$

L'ingresso dell'energia termica attraverso le facciate trasparenti, avviene per trasmissione diretta della radiazione solare, per assorbimento parziale di tale radiazione da parte degli strati vetrati e conseguente riemissione interna. La normativa italiana, prevede delle specifiche norme tecniche per la valutazione delle prestazioni di un involucro trasparente. In particolare, la Norma UNI EN 673 (vetro per edilizia) riguarda la determinazione della trasmittanza termica della lastra vetrata mentre per il calcolo delle caratteristiche luminose e solari dei cristalli si fa riferimento alla Norma UNI EN 410 (vetro per edilizia). La Norma EN 673 è una procedura semplificata per la determinazione del coefficiente di trasmissione della parte centrale, ovvero finestrata, della chiusura. Le

variabili che influenzano il calcolo della trasmittanza termica di una chiusura trasparente sono la dimensione e la tipologia di vetro, la tipologia di telaio e la tipologia di un eventuale distanziatore. Per ciò che concerne gli elementi opachi dei sistemi vetrati, porte, finestre e chiusure, La norma di riferimento per il calcolo della trasmittanza termica è la UNI EN ISO 10077-1 (finestre porte e chiusure) e alla norma UNI EN 12207 (finestre e porte) per la classificazione della permeabilità all'aria. Nello specifico per il bordo finestra si fa riferimento al coefficiente di trasmissione lineico di cui alla UNI EN ISO 177 "Windows, doors and shutters thermal transmittance : calculation method" mentre per il telaio si deve procedere con la misura diretta o con l'analisi dettagliata.

#### **2.7.2.4 La trasmittanza termica dei serramenti**

Come per l'involucro opaco, anche per i vetri è definito un parametro di trasmittanza termica  $U_g$  secondo la Norma UNI EN 673. La trasmittanza  $U_g$  è definita come la potenza termica che attraversa il modulo trasparente ai cui estremi la differenza di temperatura è di  $1^\circ\text{C}$ , avente una superficie di scambio unitaria. Per quanto concerne i serramenti, va distinta la

trasmittanza termica dei moduli trasparenti dalla trasmittanza dei telai e da quella dei distanziatori eventualmente presenti nei vetrocamere. Il decreto 11 gennaio 2017 pubblicato in G.U. 23 del 28/01/2017, ha stabilito nuovi limiti massimi di trasmittanza termica ivi compresi i limiti per i serramenti completi.



ZONA CLIMATICA	U (W/m <sup>2</sup> K)
A e B	3,20
C	2,40
D	2,10
E	1,90
F	1,70

Tab. 8 Cap. 2 – limiti massimi di trasmittanza termica serramenti [17]

Per i serramenti, note le trasmittanze termiche dei vetri, dei distanziatori e degli infissi, è possibile determinare un coefficiente globale di trasmittanza termica del serramento  $U_w$ , secondo la relazione riportata sulle norma UNI EN ISO 10077, con un metodo di calcolo semplificato. I dati richiesti sono l'area della

superficie vetrata  $A_g$ , la trasmittanza termica del vetro  $U_g$ , l'area del telaio  $A_f$ , la trasmittanza termica del telaio  $U_f$ , la lunghezza del perimetro visibile del vetro  $I_g$  e la trasmittanza termica lineare dei distanziatori  $\psi_g$ . La trasmittanza globale del serramento è calcolata con la relazione:

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + I_g \psi_g}{A_g + A_f}$$

I valori della trasmittanza del vetro,  $U_g$ , vengono calcolati secondo la norma UNI EN 673, mentre la trasmittanza del telaio  $U_f$ , e del distanziatore  $\psi_g$ , vengono definite dalla UNI EN ISO 10077-1.

Tipo di vetro	$U_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
Vetro singolo	5,7
Vetro singolo selettivo	3,2
Doppio vetro normale	3,3
Doppio vetro con rivestimento selettivo	2,0
Triplo vetro normale	1,8
Triplo vetro con rivestimento selettivo	1,4

 Tab. 9 Cap. 2 – Valori di trasmittanza termica  $U_g$  per alcuni tipi di vetro [18]

Normalmente, per il D.Lgs. n. 5796, la suddivisione delle aree delle superfici disperdenti viene fatta in automatico dal software. In particolare, indipendentemente

dalla reale geometria del serramento, l'area del telaio viene assunta pari al 20% dell'area dell'intero serramento, di conseguenza l'area del vetro risulta pari all'80% dell'area

dell'intero serramento. Le caratteristiche del vetro dipendono anche dal tipo di intercapedine considerata e dal tipo di distanziatore usato. La trasmittanza dell'intercapedine è funzione della dimensione, del trattamento superficiale, del

gas ivi contenuto e delle superfici vetrate che la delimitano. Tale resistenza termica è proporzionale allo spessore dell'intercapedine e all'inverso dell'emissività delle superfici delimitanti.

Vetrata				Tipo di gas nell'intercapedine (concentrazione del gas ≥ 90%)				
Tipo	Vetro	Emissività normale	Dimensioni [mm]	Aria	Argon	Krypton	SF <sub>6</sub>	Xeno n
Vetrata doppia	Vetro normale	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	3,0	2,6
			4-8-4	3,1	2,9	2,7	3,1	2,6
			4-12-4	2,8	2,7	2,6	3,1	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,20	4-6-4	2,7	2,3	1,9	2,3	1,6
			4-8-4	2,4	2,1	1,7	2,4	1,6
			4-12-4	2,0	1,8	1,6	2,4	1,6
			4-16-4	1,8	1,6	1,6	2,5	1,6
			4-20-4	1,8	1,7	1,6	2,5	1,7
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,15	4-6-4	2,6	2,3	1,8	2,2	1,5
			4-8-4	2,3	2,0	1,6	2,3	1,4
			4-12-4	1,9	1,6	1,5	2,3	1,5
			4-16-4	1,7	1,5	1,5	2,4	1,5
			4-20-4	1,7	1,5	1,5	3,4	1,5
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,10	4-6-4	2,6	2,2	1,7	2,1	1,4
			4-8-4	2,2	1,9	1,4	2,2	1,3
			4-12-4	1,8	1,5	1,3	2,3	1,3
			4-16-4	1,6	1,4	1,3	2,3	1,4
			4-20-4	1,6	1,4	1,4	2,3	1,4
Una lastra con trattamento superficiale	≤0,05	4-6-4	2,5	2,1	1,5	2,0	1,2	
		4-8-4	2,1	1,7	1,3	2,1	1,1	
		4-12-4	1,7	1,3	1,1	2,1	1,2	
		4-16-4	1,4	1,2	1,2	2,2	1,2	
		4-20-4	1,5	1,2	1,2	2,2	1,2	
Vetrata tripla	Vetro normale	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,20	4-6-4-6-4	1,8	1,5	1,1	1,3	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,3	1,0	1,3	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8	1,3	0,8
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,15	4-6-4-6-4	1,7	1,4	1,1	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,2	0,9	1,2	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,7	1,3	0,7
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,10	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0	1,1	0,8
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8	1,1	0,7
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6	1,2	0,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,05	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5

Tab. 10 Cap. 2 – Trasmittanza termica di vetri riempiti con differenti gas [18]

Il telaio del serramento è composto dal telaio fisso ancorato alla struttura e dal telaio mobile che permette apertura e chiusura del dispositivo, agganciato al telaio fisso per mezzo di cerniere. L'importanza del telaio va rilevata in merito ai filtraggi d'aria e quindi

alle guarnizioni di battuta in grado di sigillare elementi fissi e mobili dello stesso. Normalmente un telaio influisce per il 20-30% rispetto alla superficie totale del serramento.

<b>Materiale</b>	<b>Tipo</b>	<b>Trasmittanza Termica <math>U_t</math> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>
Poliuretano	Con anima di metallo e spessore di PUR $\geq 5$	2,8
PVC Profilo vuoto	Con due camere cave	2,2
	Con tre camere cave	2,0
Legno duro	Spessore 70 mm	2,1
Legno tenero	Spessore 70 mm	1,8
Metallo	-	5,5
Metallo con Taglio termico	Distanza minima di 20 mm tra sezioni opposte di metallo	2,4

 Tab. 11 Cap. 2 – Valori di trasmittanza termica  $U_t$  per alcuni tipi di telaio [18]

A garanzia della resistenza meccanica della vetratura, viene posto un distanziatore, generalmente in metalli, alluminio o in polimeri rinforzati. Nel distanziatori, al fine di evitare la condensa del vapore acqueo presente

nell'intercapedine, sono inseriti dei sali igroscopici. I distanziatori di ultima generazione o "warm edge" sono coibentati su tre lati per conferire un basso valore di trasmittanza termica.

<b>Materiali del telaio</b>	<b>Vetrata doppia o tripla non rivestita, intercapedine con aria o gas <math>\Psi</math> [W/mK]</b>	<b>Vetrata doppia con bassa emissività, vetrata tripla con due rivestimenti a bassa emissività intercapedine con aria o gas <math>\Psi</math> [W/mK]</b>
Telaio in legno o telaio in PVC	0,06	0,08
Telaio in alluminio con taglio termico	0,08	0,11
Telaio in metallo senza taglio termico	0,02	0,05

<b>Materiali del telaio</b>	<b>Vetrata doppia o tripla non rivestita, intercapedine con aria o gas <math>\Psi</math> [W/mK]</b>	<b>Vetrata doppia con bassa emissività, vetrata tripla con due rivestimenti a bassa emissività intercapedine con aria o gas <math>\Psi</math> [W/mK]</b>
Telaio in legno o telaio in PVC	0,05	0,06
Telaio in alluminio con taglio termico	0,06	0,08
Telaio in metallo senza taglio termico	0,01	0,04

 Tab. 12 Cap. 2 – Trasmittanza termica lineare  $\Psi$  per distanziatori in metallo e in PVC [18]

## 2.8 Bibliografia cap. 2

- [1] Armin Gasser, Thomas Simma, Provincia autonoma di Bolzano, *Isolamento termico degli edifici*, Tipografia Athesia, Bolzano 2007;
- [2] Stefano Agnoli, Michele Zinzi, *INVOLUCRO TRASPARENTE ED EFFICIENZA ENERGETICA, Tecnologie, prestazioni e controllo ambientale*, Dario Flaccovio Editore, Milano 2013, ISBN 978-88-579-0201-2;
- [3] Giulia Archetti, *Involucri edilizi a comportamento dinamico: tecnologie e modelli applicativi nel contesto geografico, normativo e imprenditoriale della Regione Emilia Romagna*, Facoltà di Ricerca in Tecnologie dell'Architettura, Università degli Studi di Ferrara, Luglio 2009;
- [4] E. O. Brigham, *The Fast Fourier Transform*, Prentice Hall Englewood Cliffs, Boston, 1974.
- [5] Andrea Bazzani, *Simulazioni e tecniche KBE per l'ottimizzazione di uno scambiatore di calore*, Politecnico di Torino 2011;
- [9] Michele Zinzi, *Efficienza energetica dell'involucro edilizio: aspetti tecnici e normativi*, ENEA Unità Tecnica Efficienza Energetica, Smart Energy Verona 2013;
- [10] Samuel A., Imbabi M. S., Peacock A., Strachan P. A., *AN ENGINEERING APPROACH TO MODELLING OF DYNAMIC INSULATION USING*;
- [11] Corlet, *Technology Roadmap Energy efficient building envelopes*, OECD/IEA, 2013;
- [14] Alessandro Pisano, *Le radiazioni solari e le relative procedure di calcolo*, Cluster Energie Rinnovabili, Sardegna Ricerche, 2008;
- [17] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, *Trasmissione del calore*, Ed. Cleup, Padova, 1992;

## 2.9 Sitografia cap. 2

[6] <http://www.Infrared Training Center;>

[7] <http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/doc/dpr412-93;>

[8] [http:// www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/normativa/DM\\_requisiti\\_minimi;](http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/normativa/DM_requisiti_minimi;)

[12] [http:// www.ilportaleambiente.it;](http://www.ilportaleambiente.it;)

[13] [http:// www.foruse.enea.it;](http://www.foruse.enea.it;)

[15] <http://www.edeamicis.com;>

[16] [https://www.architettodileo.it/vetrate\\_isolanti;](https://www.architettodileo.it/vetrate_isolanti;)

[17] <http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/GPP/2017/dm>

[18] <http://store.uni.com/catalogo/index.com>

## CAP. 3 STATO DELL'ARTE

La gamma di prodotti innovativi trasparenti presente sul mercato si è notevolmente sviluppata negli ultimi 15 anni, spronata dai crescenti problemi di politica ambientale e risparmio energetico e anche dalla progettazione architettonica sempre più rivolta alla smaterializzazione e all'uso delle superfici vetrate. Allo stato attuale è sempre più cospicua la gamma di prodotti innovativi sviluppati o in fase avanzata di sviluppo. Tra le tecnologie consolidate ad alta efficienza, vi sono quelle a bassa emissività, capaci di assemblare moduli vetrati con emissività pari a 0.3. Materiali avanguardistici in fase di sviluppo saranno presto sul mercato con valori di emissività pari a 0.01. In questa sezione non vengono trattati gli infissi innovativi per i quali si rimanda ad altra trattazione ma solo le componenti trasparenti. Prima di fare una rassegna dei prodotti principali attualmente più sviluppati nel settore edilizio, è utile fare una considerazione sui vetri ottici. Questi vetri devono essere altamente isotropi (stesso indice di rifrazione in tutte le direzioni), trasparenti, inalterabili, omogenei, esenti da bolle o striature, non devono presentare tensioni interne e devono permettere la lavorazione a freddo sino al completo pulimento. La proprietà ottica di questi vetri è l'indice di rifrazione e la dispersione ottica, ovvero la

variazione dello stesso in funzione della differente lunghezza d'onda dei raggi luminosi. Nella composizione del vetro rientrano due tipi di ossidi: gli ossidi vetrificanti che formano il reticolo ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e gli ossidi correttori che ne modificano le proprietà basilari di viscosità, proprietà elettriche, resistenza chimica e coefficiente di dilatazione ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$ ). Vi sono ossidi bivalenti ovvero sia vetrificanti che correttori ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ). Per evitare la formazione di bolle e inclusioni gassose nel vetro in fusione, vengono miscelati degli affinantanti come ossido di antimonio e nitrati alcalini. Considerano che un vetro trasparente permette la trasmissione di tutta la lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico, quando occorre un assorbimento selettivo per diverse lunghezze d'onda del campo del visibile, si conferisce una tinta del colore complementare alla lastra di cristallo con dei coloranti. Ad esempio, l'ossido ferroso ( $\text{FeO}$ ) assorbe rosso e infrarosso generando una colorazione blu, l'ossido ferrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) assorbe UV, violetto e blu generando una colorazione giallo-verdastra, una miscela di ossido ferrico e ossido ferroso, assorbe nella zona del blu e del rosso e genera un colore verde mentre gli ossidi di nichel e le terre rare come niobio e erbio generano una colorazione bruna.

I principali tipi di vetri ottici sono: 1) vetri Crown, 2) vetri Flint, 3) vetri Cromogenici. Esistono nel mercato varietà di vetro ottico ibrido le cui proprietà variano a seconda delle concentrazioni e degli additivi ivi contenuti. I vetri Crown contengono borosilicati e bario, risultano leggeri, limpidi e poco dispersivi, risultando molto simili, nella composizione, ai vetri da finestra. Essi contengono alte percentuali di silice e quantità variabili di calce e soda (vetro soda-calce), hanno un basso indice di rifrazione ( $\sim 1.52$ ) e bassa dispersione (numero di Abbe tra 55 e 85). Tra questi si trova il vetro Crown extra bianco a base di silice purissima che gli conferisce una grandissima trasparenza. Esistono sul mercato dei crown colorati contenenti ossidi metallici

(nichel e cobalto), che conferiscono proprietà di assorbimento variabili. I vetri Flint contengono alte percentuali di piombo e bario, sono molto dispersivi (numero di Abbe  $>$  di 55) e hanno un alto indice di rifrazione (tra 1.45 e 2). A causa dell'elevata concentrazione di ossido di piombo, il loro uso e la loro lavorazione risultano estremamente inquinanti. Nei moderni Flint, il piombo è stato sostituito con altri additivi, quali il biossido di titanio e il biossido di zirconio che hanno mantenuto significativamente le proprietà ottiche del materiale. Per i vetri cromogenici nella trattazione viene dedicato un capitolo a parte in quanto costituiscono la classe di materiali usati per i moduli sperimentali di ricerca [10].

### 3.1 Il vetro camera

Il vetro camera è stato il primo sistema trasparente ad alte prestazioni energetiche. Tramite l'accoppiamento di due lastre di vetro separate da un'intercapedine di aria essiccata si è riusciti a ridurre lo scambio conduttivo e convettivo trasmesso. Essi hanno segnato il passaggio dall'involucro trasparente considerato come un singolo elemento al "sistema" di involucro trasparente. Hanno rappresentato un grande impulso per la ricerca e lo sviluppo dei moduli vetrati innovativi. Sono stati i primi materiali studiati per ridurre l'impatto ambientale. Oltre ad apportare migliorie in campo di isolamento termico, hanno garantito ottime prestazioni come isolanti acustici e igrometrici pur conservando la trasparenza. Si tratta di sistemi composti da più lastre separate da un canalino o distanziatore ed unite da un sigillante primario di adesione (polisobutilene), che garantisce la tenuta dell'intercapedine. Il distanziatore può

essere in metallo, in alluminio o in polimeri rinforzati. Sui fianchi laterali del canalino viene messo il sigillante secondario (polisolfuro), come mastice di unione tra i vari componenti. Al fine di evitare la condensa all'interno dell'intercapedine, viene inserito all'interno dei canalini, un essiccante (zeolite), che assorbe l'umidità presente. Nell'intercapedine può essere presente semplicemente aria essiccata che di per se è già un ottimo isolante oppure può essere riempita di gas isolanti (solitamente Argon o Krypton). Riempita l'intercapedine, l'assemblaggio è completato e il vetro camera viene pressato e poi sigillato lungo tutto il perimetro esterno per unire le singole lastre e formare un cordolo impermeabile alle infiltrazioni di vapore. Nell'immagine a seguire è illustrato un sistema di vetro camera tradizionale [1].

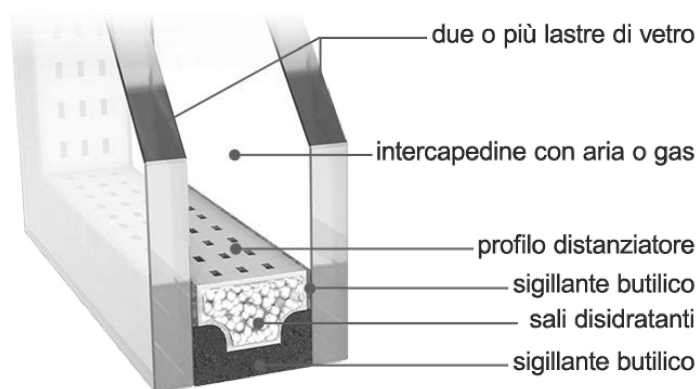


Fig. 1 - Cap 3 - Schema tipico di un vetro camera [2]



### 3.2 Vetri integrati con i nanoisolanti

Si tratta vetri altamente isolanti, composti da classici vetrocamera nei quali l'intercapedine è riempita con strutture estruse trasparenti in policarbonato o polimetilmetacrilato. Si tratta degli aerogel, dei VIP, o TIM. I nanoisolanti possono essere sotto forma di film sottili, di

vernici, di aerogel, di pannelli isolanti a vuoto (VIP, Vacuum Insulation Panels) contenenti aerogel o PCM (materiali a cambiamento di fase). Con questi sistemi si raggiungono bassissime trasmittanze termiche, assimilabili a quelle degli involucri opachi [3].

#### 3.2.1 Gli Aerogels

L'aerogel è il nanoisolante più leggero e isolante al mondo. Viene prodotto disidratando un gel siliceo portato in condizioni supercritiche. Allo stato solido ha una conformazione estremamente porosa, composta da schiuma gel in cui il liquido sostituito dal gas. In sostanza, la parte solida costituisce solo il 5% del volume. La schiuma solida ha un potere altamente isolante. E' detto comunemente fumo ghiacciato, fumo solido o

fumo blu per la sua trasparenza. Ha la densità più bassa dei materiali isolanti conosciuti ed è composto dal 99,8% di aria e dal 0,2% di diossido di silicio (silice), il principale componente del vetro. Ha una conducibilità che varia da 0,17 a 0,0042 W/mK.. L'aerogel più isolante è quello a base di silice con aggiunta di carbonio. Unica caratteristica limitante è la limitata trasparenza del materiale.

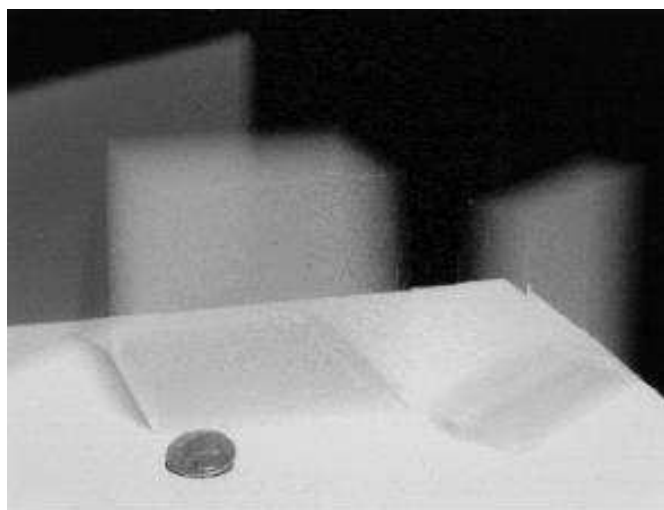


Fig. 2 - Cap 3 - Schema tipico di un vetro camera [2]

Al fine di conferire al materiale caratteristiche isolanti maggiorate, viene interdetto il trasporto di calore per convezione del gas intorno ai pori applicando al materiale il sottovuoto. In tal modo gli aerogels acquisiscono proprietà isolanti superiori a

### 3.2.2 I VIP Vacuum Insulation Panels

Si tratta di pannelli isolanti sottovuoto costituiti da un involucro esterno di alluminio che delimita in modo ermetico una schiuma di acido silicico, priva di aria. Garantiscono valori di conducibilità termica da 0,003 a

### 3.2.3 I TIM

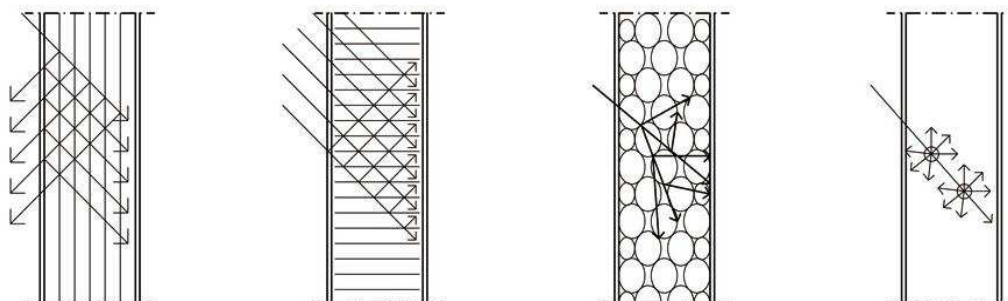
Si tratta di materiali isolanti trasparenti di elevato grado di isolamento termoacustico. Hanno una buona trasparenza. Per l'involucro edilizio si usano i TIM trasparenti isolanti in forma di pannello autoportante o all'interno di un vetrocamera. Sono ottimi materiali per

quelle delle fibre minerali. Le problematiche degli aerogels sono l'elevata fragilità del materiale e il comportamento idrofobo del materiale causato dalla bassa resistenza a trazione del materiale.

0,005 W/mK e sono tra i materiali più performanti attualmente sul mercato. Hanno ancora costi molto elevati e come gli aerogels non riescono a garantire elevate trasparenze.

la tenuta agli agenti esterni e per la resistenza agli urti. Un pannello alveolare di spessore 3 cm di Polimetilmetacrilato, ha un fattore di trasmissione luminosa  $T_v$  del 92% e una trasmittanza termica  $U_g$  di 0.5 W/mq K.

#### PANNELLI VETRATI COMPOSTI CON TIM



- A -TIM con struttura parallela (rispetto alla superficie vetrata) : pellicole plastiche, ecc.  
 B -TIM con struttura perpendicolare alla superficie vetrata: piccoli tubi disposti a nido d'ape, fibre capillari, ecc.  
 C -TIM con struttura senza geometria precisa (schiuma, bolle, alveoli) .  
 D -TIM con struttura quasi omogenea: fibre di vetro, aerogel, ecc.

Fig. 3 - Cap 3 - Moduli vetrati con pannelli TIM [6]

### 3.3 Sistemi di daylighting

I Sistemi di daylighting o vetri a riflessione selettiva sono moduli in grado di intercettare e deviare la radiazione solare diretta riflettendola all'esterno o, in zone più interne dell'edificio, poco luminose, dell'edificio.

Sono sistemi applicati internamente o esternamente ai vetri multistrato. Le tecnologie principali sono: vetri prismatici, pellicole olografiche, vetri a lamelle e vetri a elevata riflessione luminosa [5].



Fig. 4 - Cap 3 - Esempio di sistema daylighting [4]

#### 3.3.1 I vetri prismatici

Tra i vetri a riflessione selettiva vi sono i sistemi a pannelli prismatici, costituiti da una doppia lastra di vetro, una liscia tradizionale e l'altra esterna sulla quale sono presenti coste prismatiche triangolari in grado di deviare un'aliquota variabile di radiazione solare a

seconda dell'inclinazione delle coste stesse e dell'angolo di incidenza della radiazione. I pannelli consentono la penetrazione interna della radiazione e l'illuminazione naturale nel periodo invernale e la protezione della radiazione solare diretta nel periodo estivo.

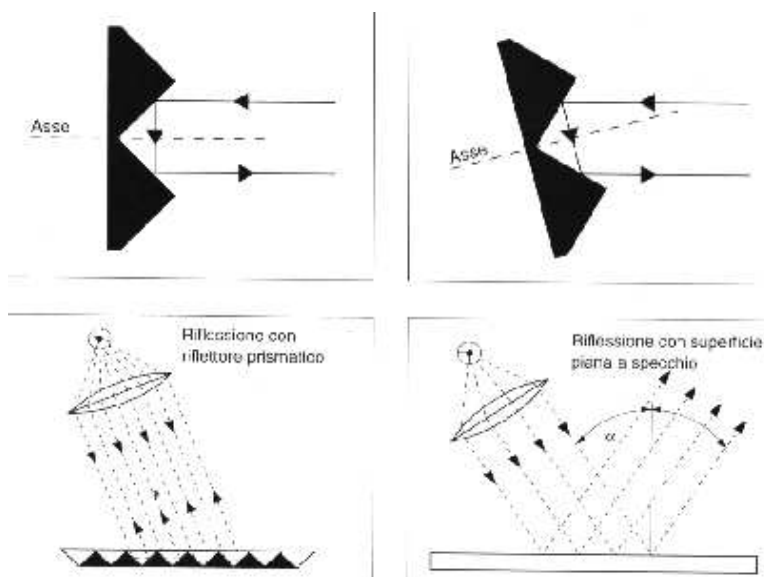


Fig. 5 - Cap 3 - Riflessione dei pannelli prismatici [4]

Sono sistemi studiati soprattutto per il controllo della radiazione termica estiva. Vengono solitamente ricavati con pannelli acrilici o in policarbonato. Presentano una superficie liscia e una sulla quale vengono ricavate le coste prismatiche e triangolari in

grado di riflettere la radiazione incidente. La riflessione è funzione del materiale, dell'angolo di inclinazione delle coste triangolari dell'angolo di incidenza della radiazione solare [9].

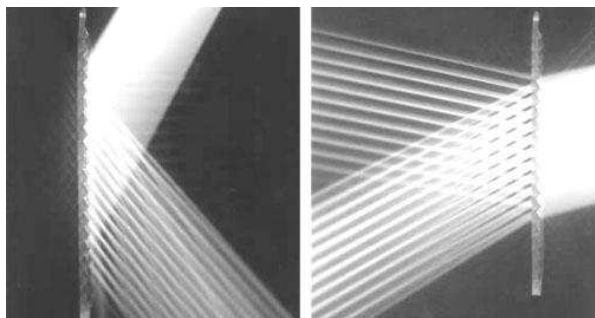


Fig. 6 - Cap 3 - Riflessione estiva a sinistra, invernale a destra [9]

Il problema di queste soluzioni è che non essendo totalmente trasparenti, non consentono una vista esterna omogenea. Inoltre il comportamento riflettente è troppo

vincolato all'esposizione e all'inclinazione della radiazione incidente per cui solo in alcuni periodi dell'anno si hanno i comportamenti ottimali.

### 3.3.2 I sistemi a lamelle o Light Shelves

Si tratta sistemi nei quali è inserito un set di lamelle posizionate all'esterno o inserite nell'intercapedine dei vetrocamera. L'orientamento delle lamelle può essere variabile a seconda dell'effetto di ostruzione, assorbimento, riflessione o trasmissione della radiazione, che si vuole ottenere. Tra i sistemi a lamelle, particolare interesse rivestono i

“profili fish” contenenti sistemi di lamelle con superficie superiore concava ed altamente riflettente, in grado di riflettere tutta la radiazione incidente, verso l'interno. Ovviamente l'abbagliamento diretto dei raggi solari viene interdetto ma non vi è alcuna riduzione dell'apporto termico entrante[5].

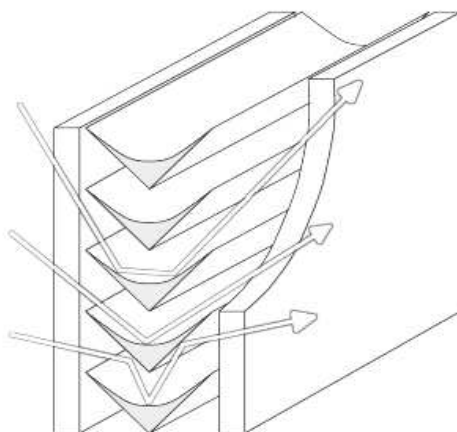


Fig. 7 - Cap 3 - Sistema a lamelle [4]

Un altro sistema interessante a lamelle è costituito dai sistemi Okasolar. Si tratta di profili triangolari inseriti all'interno dell'intercapedine dei vetrocamera. In base all'ubicazione del sito, si regolano in funzione

dell'angolo di inclinazione della radiazione solare, garantendo la schermatura della radiazione diretta nel periodo estivo e il guadagno solare nel periodo invernale. Il punto critico a lamelle è la trasparenza visiva.

### 3.3.3 Le pellicole olografiche

Anche le pellicole olografiche rientrano tra i sistemi a riflessione selettiva. Consistono in sottili film applicati all'interno di vetrocamera, di vetri stratificati o di pannelli plastici. Esse hanno la capacità di deviare la

radiazione solare incidente. Il loro utilizzo è ancora limitato. Un esempio interessante è quello realizzato a Stoccarda in occasione dell'esposizione "WOHNEN 2000"[7].



Fig. 8 - Cap 3 - Sistema con pellicola olografica [4]

### Cap 3.3.4 Vetri ad incisioni laser LCP

Consistono in sistemi stratificati di lastre acriliche. I pannelli trasparenti interni presentano delle incisioni orizzontali, ottenute con taglio laser. Tali incisioni, si trasformano in superfici riflettenti capaci di deviare parte

della radiazione incidente. Tutto il flusso incidente sulla faccia inferiore delle incisioni viene riflesso verso l'alto mentre il flusso restante viene normalmente trasmesso.

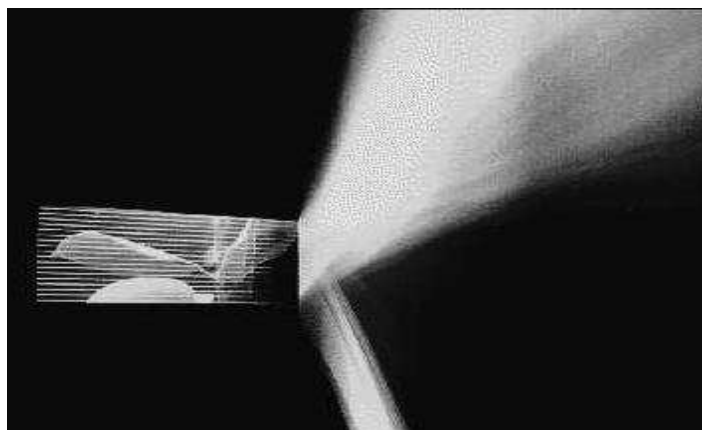


Fig. 9 - Cap 3 - Funzionamento di un LCP orizzontale [9]

La quota di radiazione riflessa, dipende dall'angolo di incidenza del flusso luminoso e dalla geometria del pannello. La vista esterna risulta garantita dalle superfici di taglio

perfettamente piane che non riflettono la luce ma non riescono a garantire il giusto contenimento degli apporti termici estivi.

### 3.4 Vetri assorbenti, riflettenti e a bassa remissività

Si tratta di prodotti ad alte prestazioni classificabili in tre categorie principali: i vetri assorbenti, i vetri riflettenti e i vetri a bassa emissività.

#### 3.4.1 Vetri assorbenti

I vetri assorbenti sono vetri colorati nella massa che consentono il controllo dell'irraggiamento solare per assorbimento energetico. Il grado di assorbenza termica dipende dallo spessore della lastra e dall'intensità della sua colorazione. Maggiore è l'intensità della colorazione e minore è la trasmissione luminosa. Si ottengono con

sostanze coloranti diverse. Si possono miscelare con gli ossidi metallici di ferro, cobalto, cromo, vanadio o rame. Per il rame, la colorazione dipende dalla natura dell'ossido, dalla composizione del vetro e dallo stato di ossidazione. La cromatizzazione rende il materiale assorbente conferendo al vetro maggiore inerzia termica [11] .

#### 3.4.2 Vetri antisolari riflettenti

Le lastre di questo tipo, riflettono una quota consistente di radiazione incidente. Sono costituiti da una faccia, pretrattata con metodi fisici o chimici, su cui è depositato un ossido metallico riflettente. Le proprietà ottiche, termiche ed estetiche del vetro dipendono

dallo spessore e dal tipo di ossido depositato [11]. I vetri antisolari sono prodotti in grado di limitare l'apporto energetico della radiazione solare incidente. La proprietà è conferita attraverso un rivestimento riflettente e assorbente.



Fig. 10 - Cap 3 - Vetri Solarsiv [15]

La problematica di questi vetri per le applicazioni del settore edile, è legata al basso fattore di trasmissione luminosa che può

essere fonte di discomfort abitativo. I più diffusi in commercio, sono lo "Stopsol" e il "Solarsiv".

### 3.4.3 Vetri a bassa emissività

Sono vetri con un trattamento superficiale basso-emissivo che limita lo scambio radiativo. Le lastre di questo tipo, riflettono una quota consistente di radiazione incidente nello spettro dell'infrarosso. Sono costituiti da una faccia, pretrattata con metodi fisici o chimici, su cui è depositato un ossido

metallico riflettente con emissività inferiore a 0.3. In tal modo diminuiscono le dispersioni per radiazione ad elevata lunghezza d'onda, dall'interno verso l'esterno, mentre rimane elevata la trasmissione a bassa lunghezza d'onda.

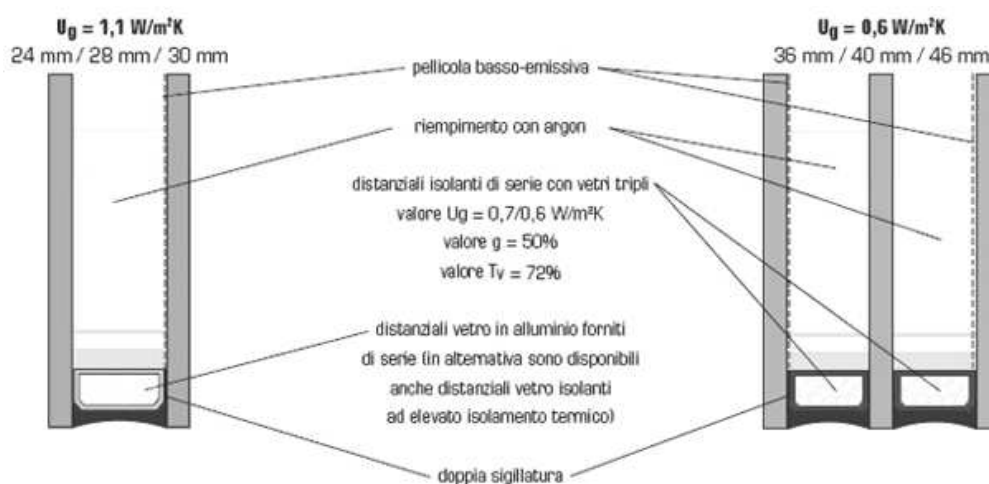


Fig. 11 - Cap 3 - Vetro camera bassoemissivi [16]

Per un vetrocamera 6-12-6 con  $U = 3,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , con trattamenti basso emissivi si raggiungono valori intorno a  $1-2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (heat mirror). Le

proprietà ottiche, termiche ed estetiche del vetro dipendono dallo spessore e dal tipo di ossido depositato.



### 3.5 I vetri stratificati

I vetri stratificati sono lastre unite tra loro attraverso l'interposizione di un film di PVB (polivinilbutarrile). Nascono per soddisfare le caratteristiche antinfortunistiche. Il film plastico infatti, in caso di rottura riesce a trattenere i frammenti di vetro attaccati ad esso. per le superfici esterne degli involucri edilizi, sono obbligatori, ai sensi del D.Lgs

81/2008. Il film plastico che assicura l'assemblaggio meccanico dei vetri, è una poliolefina (plastica) della famiglia dei polivinili, ad alto contenuto calorico costituita solo da Carbonio, idrogeno e ossigeno. Hanno buona adesione al metallo e al vetro, ottima resistenza agli alcali e alle muffe.

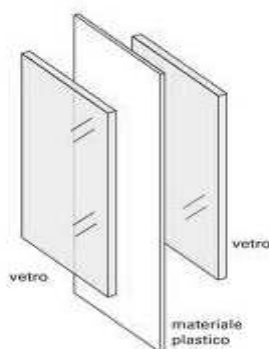


Fig. 12 - Cap 3 - Composizione dei vetri stratificati [13]

L'intercalare in PVB viene prodotto in film di spessori che vanno da 0,38 mm a 0,76 mm. Variando opportunamente gli spessori del PVB, il vetro assume le caratteristiche antinfortunistico, antivandalismo e anticrimine. La stratificazione è ottenuta nei forni ad

infrarosso a 70°C dove il film subisce una azione di de-aereazione e parziale sigillatura. successivamente viene inserito in autoclave a 13 bar e a temperature di 100-135°C che fanno aderire il plastico al vetro e lo rendono trasparente [12].

### 3.6 I vetri temperati

Sono particolari vetri usati in specie dove devono resistere a temperature molto elevate o nel settore automobilistico per applicazione ove è richiesto un elevato grado di sicurezza. Questi vetri hanno una elevatissima durezza ma al contempo sono estremamente fragili se colpiti con materiali diamantati o ceramici.

Rompendosi esplodono in piccoli frammenti non taglienti e non creano situazioni di pericolo. La tempra dei vetri ricalca il trattamento dei metalli. I vetri vengono portati a 600° di temperatura poi repentinamente raffreddati con getto d'aria fino a 0° [14].

### 3.7 I vetri cromogenici

Si tratta di materiali che variano le proprietà ottiche sotto l'azione di un campo o carico elettrico, di una corrente ionica, dell'intensità spettrale della luce, della temperatura o di altri stimoli. Quando viene applicata al sistema una differenza di potenziale, il materiale elettrocromico perde o acquista ioni variando le proprietà ottiche. Nel settore delle

costruzioni questi materiali permettono di creare un involucro edilizio dinamico, grazie a prestazioni variabili, ottimizzando i consumi energetici e garantendo condizioni di comfort ambientale interno. Infatti, la varianza delle proprietà ottiche consente una mutazione dello stato del materiale da altamente trasmittente a parzialmente riflettente o riflettente [9].



Fig. 13 - Cap 3 - Esempio di vetro cromogenico [13]

Si distinguono in due categorie: materiali passivi automodificanti (fotocromici e termocromici) che consentono

l'autoregolazione delle proprietà ottiche del sistema e materiali attivi (cristalli liquidi, Spd, elettrocromatici e gasocromici) che

necessitano, per la variazione delle proprietà ottiche, della regolazione da parte dell'utente. Normalmente questi dispositivi vengono

prodotti in film sottili e applicati all'interno di vetrocamera o pannelli plastici. Il loro utilizzo è ancora limitato a causa dell'elevato costo.

### 3.7.1 I vetri cromogenici attivi

#### 3.7.1.1 I vetri LCD

I vetri a cristalli liquidi, rientrano nei materiali cromogenici ma sono molto meno costosi. La caratteristica dei cristalli è quella di passare da uno stato caotico a uno stato ordinato se sottoposti a una differenza di potenziale elettrico. I dispositivi a cristalli liquidi polimerici (PDLC) sono composti da particelle micrometriche incapsulate in matrici polimeriche. Uno strato di questo materiale viene interposto tra due elettrodi trasparenti di poliestere rivestito da un "coating" di ossido di indio. Nello stato inattivo le molecole dei cristalli sono orientate casualmente quindi, la

luce incidente, viene diffusa a causa del mancato allineamento tra le particelle e il mezzo circostante. Quando viene applicata una differenza di potenziale le molecole si dispongono in direzione del campo elettrico consentendo alla luce incidente di non essere rifratta e il materiale resta trasparente. La matrice polimerica passerà, quindi, da uno stato opaco a uno stato trasparente quando i cristalli si disporranno in sezioni parallele. Il difetto di questa applicazione è il passaggio dallo stato acceso allo stato spento senza dare possibilità di avere stati intermedi.



Fig. 14 - Cap 3 - Vetro LCD, a sinistra disattivo, a destra attivo [17]

### 3.7.1.2 I vetri SPD (Suspended particle device)

Hanno un comportamento analogo ai cristalli liquidi. All'interno di due lastre vetrate, è presente una matrice polimerica in cui sono sospese le particelle, che, libere di muoversi disordinatamente rendono traslucido il pannello trasparente. a differenza dei cristalli liquidi consentono delle configurazioni intermedie. Quando viene applicato un piccolo campo elettrico, le particelle si orientano istantaneamente in modo parallelo seguendo uno stesso orientamento. In questo modo il vetro diviene trasparente e consente l'introspezione della luce naturale. La trasmissione luminosa varia da 0.5% al 57%.



Fig. 15 - Cap 3 - Vetro SPD, sopra attivo, sotto inattivo [19]

### 3.7.1.3 I vetri elettrocromici

Risultano ad oggi quelli con prestazioni più apprezzabili. Mediante l'attivazione elettrica modificano il fattore di trasmissione luminosa  $T_v$  tra il 70% e il 3%, mentre la trasmissione del campo dell'infrarosso  $T_e$  (parte di variazione solare percepita sotto forma di calore) varia tra il 50% e il 10% circa. Questi sistemi sono in grado di variare le proprietà ottiche in modo reversibile a causa di un impulso elettrico. Tale proprietà è consentita dall'inserimento o dall'estrazione di ioni mobili

che reagiscono al campo elettrico generando composti colorati che modificano il cromatismo del materiale. All'interno del dispositivo vi è un conduttore di ioni (elettrolita) compreso tra due film elettrocromici (elettrodi) e uno strato per l'accumulo di elettroni (controlettrodo). Gli strati esterni sono materiali trasparenti conduttori, anche se lo strato per l'accumulo di elettroni può essere incorporato con il conduttore trasparente. Quando viene

applicato il potenziale elettrico tra i due conduttori trasparenti, gli ioni estratti dallo strato di accumulo passano per lo strato conduttore per essere poi inseriti nello strato elettrocromico variandone le proprietà ottiche.

Al contrario, tolto l'impulso elettrico, gli ioni estratti dallo strato elettrocromico, attraverso lo strato conduttore, vengono depositati nello strato di accumulo rendendo il dispositivo trasparente [19].



Fig. 16 - Cap 3 - Vetro elettrocromico, a sinistra attivo, a destra disattivo [18]

Il problema di questi sistemi è la scelta di trovare idonei substrati e terminali di comando. Normalmente i depositi sono costituiti da due supporti vetrati differenti rivestiti mediante film conduttori.

Successivamente a uno dei supporti è applicato un film elettrocromico e all'altro un film di contro-elettrodo che permette il funzionamento del dispositivo ma ancora il livello della ricerca non risulta conveniente

#### 3.7.1.4 I vetri gasocromici

Tali materiali reagiscono ad opportune sostanze gassose; solitamente il triossido di tungsteno  $WO_3$ , inserito in sottili film nell'intercalare di due lastre vetrate. Le lastre sono di colore blu scuro, allo stato inattivo e,

quando vengono a contatto con una specifica quantità di idrogeno biatomico iniettato nell'intercalare, si attivano e tornano trasparenti.

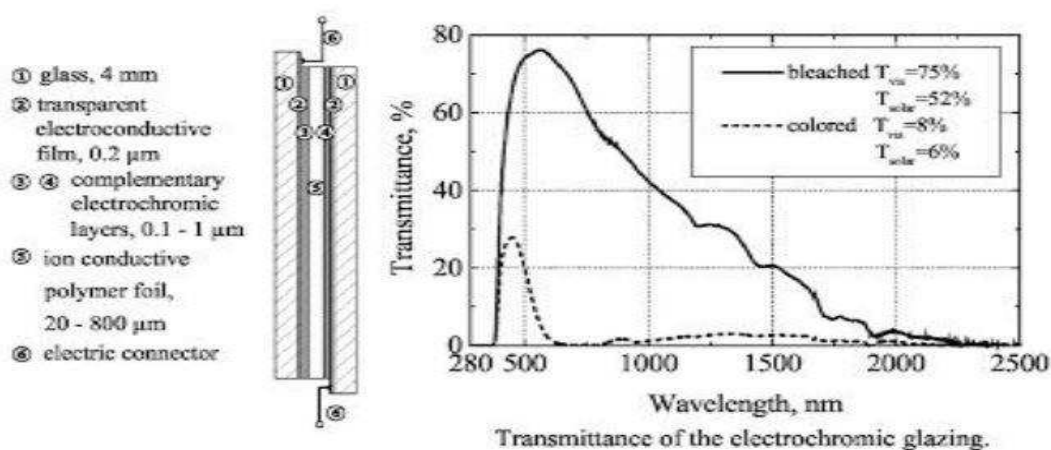


Fig. 17 - Cap 3 - Vetro gasocromici - trasmittanza e composizione [19]

Riescono a variare la propria trasmittanza nel campo visibile, dal 75% al 18% e su tutto lo spettro della radiazione termica, dal 74 al 14%. Il fattore solare  $g$  varia dal 12% al 46% in 20 secondi. Unico neo che allo stato "normale" il materiale non è trasparente. Sono

materiali ancora in fase di studio pertanto non diffusi sul mercato. Inoltre Non danno la possibilità di configurazioni intermedie ma variano le proprietà ottiche dallo stato off allo stato on in modo netto [19].

### 3.7.2 I vetri cromogenici passivi

I materiali cromo genici passivi hanno la facoltà di autoregolare le loro proprietà ottiche. Questa categoria comprende i materiali termocromici e i materiali fotocromatici . Sono usati principalmente nei

settori dell'industria, dell'aeronautica e soprattutto dell'ottica. L'applicazione in edilizia è ancora molto limitata a causa del difetto principale di disomogeneità del processo cromogenico.

#### 3.7.2.1 I vetri termocromici

Essi presentano una variazione delle proprietà ottiche se sottoposti a variazioni di temperatura. Queste variazioni ottiche, temporanee e reversibili, possono essere attivate per mezzo di composti organici o inorganici e in film di ossidi metallici. Di

particolare interesse risulta l'uso dell'ossido di vanadio. Questo composto, al superamento della sua temperatura critica, passa dallo stato di semiconduttore allo stato metallico conduttore inducendo nel materiale un comportamento riflettente maggiormente

sensibile nella zona dell'infrarosso. Già nel 1974, i materiali termocromici, furono utilizzati in edilizia ma successivamente vennero abbandonati a causa dell'elevato costo. Attualmente nel settore edile è in uso il "Tald", gel stabile con basso punto di raffreddamento e il "Could gel" le cui proprietà sono da attribuire ad un sottile strato di soluzione acquosa polimerica racchiusa tra due pellicole esterne plastiche: le molecole

### 3.7.2.2 I vetri fotocromici

Sono materiali capaci di variare il proprio colore e la trasparenza quando sono esposti alla radiazione solare incidente, per tornare, allo stato iniziale, quando questa viene meno. Questo fenomeno, indotto dall'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche, si basa sul cambiamento di stato reversibile e ripetibile di alcune sostanze chimiche, inserite tra due strati energetici aventi diversi spettri di assorbimento della radiazione incidente. Allo stato trasparente la trasmissione della radiazione è molto elevata, circa 80-90 % della banda del visibile mentre allo stato colorato si riduce fino al 10 % del visibile. Il passaggio dallo stato trasparente, allo stato opaco, risulta abbastanza veloce mentre, dallo stato opaco allo stato trasparente si ha un tempo di risposta di alcuni minuti. Ritengo che la loro applicazione sia di rilevante interesse, non solo nel campo delle lenti per occhiali ove

polimeriche restano trasparenti fino ad una temperatura critica, al di sopra della quale il materiale diventa bianco e riflette la radiazione solare. Tra i materiali termocromici usati per la schermatura della radiazione solare e la prevenzione del surriscaldamento estivo, di particolare interesse risultano i gel termocromici. Tali materiali creano condizioni di comfort ambientale e consentono un risparmio energetico per il raffreddamento interno.

attualmente vengono ampiamente usate ma, anche, nel settore dell'edilizia. Questi materiali, oltre ad essere autoregolanti, hanno una buona resistenza agli agenti chimici e una buona durata dei cicli reversibili trasparente-colorato e viceversa. Tra i problemi da affrontare si hanno: drastica riduzione della trasmissione luminosa allo stato oscurato, la riduzione della radiazione luminosa anche nei periodi invernali, i problemi di stress termico dovuti all'assorbimento allo stato opaco, le ridotte superfici dei prodotti in commercio e il costo ancora elevato. Le prospettive della ricerca sono quelle di: migliorare la perdita di fotocromismo alle alte temperature e la creazione di dispositivi sufficientemente grandi per l'edilizia. Attualmente sono molto usati nell'ottica ma ancora in fase di studio per l'applicazione nel settore edile.

### 3.8 Bibliografia capitolo 3

- [1] Davanzo Matteo, *Sistema automatizzato in linea produttiva per l'analisi dell'atmosfera all'interno di vetrocamere*, Università degli studi di Padova, Vicenza, 2016;
- [3] Sposito C., *Sul recupero delle aree industriali dismesse: tecnologie, materiali, impianti ecosostenibili e innovativi*, Maggioli Editore, 2012
- [5] Marco Pittaluga, *SISTEMI E MATERIALI PER LA DOLCEVITA IN ARCHITETTURA*, Università degli Studi di Cagliari;
- [7] Robert Collier, *Optical Holography*, Academic Press, Maggio 1971 ISBN: 978-0-12-181050-4;
- [9] Francesco Fiorito, Giovanni Fuzio, *L'involucro edilizio, Evoluzione della Progettazione e del Processo realizzativo*, Edilportale 2004;
- [10] Giovanni Giusfredi, *Manuale di ottica*, Springer 2013;
- [11] Fabrizio Aimar, Strachan P. A., *Edifici alti e grattacieli, Facciate*, Wolters Kluwer 2016 - ISBN 9788867503575;
- [12] Alessandro Carpo, *Prove per l'identificazione del comportamento di solidi viscoelastici*, Università degli Studi di Firenze 2009;
- [14] Alberto De Capua, Alberta Ciulla, *Materiali per l'architettura*, Università degli studi di Reggio Calabria, 2017;
- [19] Alessandro Greco, Enrico Quagliarini, *L'involucro edilizio, una progettazione complessa*, Alinea editrice S.r.l., Firenze 2007;



### 3.9 Sitografia capitolo 2

- [2] <http://www.palumboglass.it/blog/82-vetrocamera-tipologie-e-vantaggi>;
- [4] <https://schulzitalia.com/risparmio-energetico/progetto-vetro-selettivo>
- [6] <http://www.ecodility.it>;
- [8] <http://www.olograficasitaitalia.it>
- [13] <http://www.marchisonercaucchioli.it/vetri-stratificati-antisfondamento>;
- [15] <http://www.archiexpo.it/prod/permasteelisa/.html>
- [16] <https://www.arredamento.it>
- [17] <http://blog.vetroin.it/it/Vetro-LCD.html>
- [18] <http://www.prefabbricatisulweb.it/guida/smart-glass-le-vetrate-che-si-autoregolano-e-fanno-risparmiare-energia.html>

## CAP. 4 – MATERIALI INNOVATIVI FOTOCROMATICI E FOTOCROMATISMO

### 4.1 La scelta dei materiali

Il tallone di Achille degli involucri edilizi, in termini di comfort ambientale, sono le chiusure trasparenti; specie in un'epoca ove la trasparenza è un paradigma imprescindibile dell'architettura. Il problema di queste superfici è di carattere funzionale; esse lasciano passare la luce naturale, fondamentale per il benessere psico-fisico ma non riescono a schermare opportunamente la radiazione termica. Come anticipò l'architetto londinese Richard Rogers, in uno studio del 1978 condotto per la "Pilkington": "*L'edificio deve diventare come un camaleonte che si adatta*". Esso deve essere in grado di gestire tutte le variabili interne ed esterne, temperature, igrometrie e livello della luce, radiazioni solari ecc..[1] **Garantire un'adeguata illuminazione** naturale e nel contempo

**limitare gli apporti termici esterni**, sono due aspetti spesso contrastanti e inflessibili visto che la radiazione termica è costituita, in buona parte, da onde elettromagnetiche dello spettro visibile. Attualmente, in edilizia, i più diffusi sono vetro-camera stratificati con trattamenti basso-emissivi, commercialmente noti come vetri "Low-E" [2]. Questi materiali hanno costituito il campione di riferimento della ricerca. Si tratta di vetri sui quali è applicato un trattamento superficiale che limita lo scambio radiativo. Il trattamento, costituito dal deposito di ossidi metallici riflettenti, determina una emissività ridotta della lastra, ( $\varepsilon \leq 0.3$ ), che riflette le radiazioni del campo infrarosso ad elevata lunghezza d'onda e garantisce il passaggio delle radiazioni visibili a bassa lunghezza d'onda.



Fig. 1 Cap. 4 - Stratigrafia di un vetro Low-E [3]

Il "**concept**" sperimentale è stato quello di **sviluppare dei moduli trasparenti innovativi**

attraverso l'integrazione e il potenziamento dei componenti vetrati più diffusi e performanti

presenti sul mercato, usando materiali in grado di assumere un comportamento **dinamico** e **reversibile**. Per materiali innovativi, non sono stati intesi solo componenti **performanti** e **dinamici**, ma materiali **di facile applicazione**, che **non** richiedano nuove e costose **tecnologie produttive**, che si **attivino passivamente**, che siano **reversibili**, che **non** esigano **manutenzione** straordinaria e soprattutto che possano essere **riciclabili** come "materia prima secondaria" nella trafila produttiva. Per superare il paradosso degli involucri trasparenti chiamati ad essere elementi trasparenti alla radiazione visibile e al contempo opachi alla radiazione termica, ci si è concentrati su alcuni materiali in grado di "mutare" il proprio stato di trasparenza in funzione degli stimoli ambientali esterni; quindi in grado di schermare la radiazione nei cicli di forte irraggiamento solare e garantire un adeguato illuminamento dei locali nei periodi meno irradiati. Da quanto argomentato è emersa l'idea di concentrarsi sui **materiali cromo-genici** capaci di autoregolare le proprie caratteristiche ottiche ed energetiche in modo dinamico e reversibile [4]. La scelta è stata condotta seguendo lo **standard** della "casa passiva a consumo zero", o "**Passivhaus**" che prevede la riduzione dell'impronta ecologica degli edifici, attraverso il contenimento del fabbisogno energetico entro certi limiti; tali da garantire il benessere abitativo senza richiedere installazioni impiantistiche [6]. In

questa ottica sono stati scelti materiali **cromo-genici passivi**, in grado di auto-attivarsi. Questa categoria comprende i prodotti **termocromatici** e i prodotti **fotocromatici**. La differenza sostanziale risiede negli stimoli attivanti. I vetri termo-cromici, variano l'assorbimento della radiazione luminosa in funzione della temperatura superficiale esterna [5]. Ad una certa temperatura (specifica per ogni prodotto) si opacizzano passando dallo stato di semiconduttore allo stato metallico conduttore e inducendo nel materiale un comportamento riflettente, maggiormente nella zona dell'infrarosso. L'opacizzazione genera una riduzione della radiazione solare trasmessa all'interno. Quando la temperatura esterna scende, tornano impulsivamente allo stato trasparente. Queste variazioni ottiche, temporanee e reversibili, possono essere attivate per mezzo di composti organici o inorganici e in film di ossidi metallici [6]. Di particolare interesse risultano: il rivestimento della lastra di vetro in triossido di tungsteno o diossido di vanadio. I punti critici di questo sistema, sono: il passaggio netto dalla trasparenza all'opacità, senza situazioni intermedie e la disomogeneità del processo cromo-genico. L'altra categoria di materiali dinamici passivi, è quella scelta per l'assemblaggio dei moduli sperimentali e riguarda i **prodotti fotocromatici**. Questi materiali variano la propria trasparenza in funzione della radiazione solare incidente, per

tornare, allo stato iniziale, quando questa viene meno. Il fenomeno, indotto dall'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche, si basa sul cambiamento di stato reversibile e ripetibile di alcune sostanze chimiche, inserite tra due strati energetici aventi diversi spettri di assorbimento della radiazione incidente. Allo stato trasparente la trasmissione della radiazione è molto elevata, circa 80-90 % della banda del visibile mentre, allo stato opaco, si riduce fino al 10 % del visibile. Il passaggio dallo stato trasparente, allo stato opaco, risulta abbastanza veloce mentre, dallo stato opaco allo stato trasparente, si ha un tempo di risposta di alcuni minuti. Oltre ad essere **autoregolanti**, hanno una buona resistenza agli agenti chimici e una buona durata dei **cicli reversibili** trasparente-colorato e viceversa. L'inconveniente dei fotocromatici è legato all'esposizione diretta alla radiazione solare in quanto con l'aumento dell'irradianza incidente, essi passano da uno stato riflettente ad uno stato assorbente riducendo le proprie caratteristiche prestazionali. Questa problematica ha limitato l'applicazione dei primi fotocromatici in quanto reagendo solo allo spettro dell'ultravioletto, assorbivano tutta la radiazione termica. I nuovi FC, usati in ambiti agonistici sportivi, dovendo permettere l'oscuramento anche in condizioni di luce diffusa, sono capaci di riflettere nello spettro del visibile e schermare buona parte della radiazione termica fino al basso infrarosso. i

materiali lastre fotocromatiche sono da tempo impiegate nel settore automobilistico e nel campo dell'ottica per occhiali ma non hanno trovato sviluppo nel settore edile, fatta eccezione per alcune applicazioni di **fotocromatici minerali**, prodotti dalla "View Dynamic Glass". L'azienda californiana, a seguito di uno studio condotto dai ricercatori Arman Shehabi e Katy Kenealy del "Lawrence Berkeley National Laboratory", è stata la prima a sviluppare vetri fotocromatici per il settore edile. Si tratta di vetri minerali applicati sui serramenti di alcuni edifici americani, tra i quali : il "W San Francisco Hotel", lo "Starbucks di Denver" e il Miramar Marine Corps Air Station di San Diego. Per queste realizzazioni, l'azienda ha ottenuto dal "U.S. Green Building Council", la certificazione energetica "Leed Silver" (The Leadership in Energy and Environmental Design). Ma la produzione dei vetri minerali FC, è stata sospesa, come spiega lo stesso Arman Shehabi, a causa degli elevati costi di produzione che non rendevano competitivo il prodotto, per la **difficoltà di garantire un effetto oscurante uniforme** su lastre di grandi dimensioni e perché l'**aumento di temperatura** determinava un **indebolimento** sostanziale delle **prestazioni**, rendendo l'industrializzazione del prodotto **inconveniente**. Da una attenta disamina dei prodotti cromo-genici presenti sul mercato, è nata l'idea di sviluppare componenti

innovativi costituiti da **polimeri fotocromatici organici**, normalmente usati per le lenti ottiche, in luogo dei vetri minerali. Tra i materiali plastici, sono stati selezionati polimeri "eco-sostenibili", in grado di essere riciclati e non formare scarti inquinanti. Si tratta di **polimeri termoplastici** [7]; materiali plasmabili alle alte temperature che conservano la proprietà di scorrere per un tempo relativamente lungo. Al raffreddamento riacquistano lo stato rigido e conservano la forma. La loro **trasformazione è reversibile** e, anche se il numero di cicli non è illimitato, possono essere **riciclati** come materia prima secondaria [8]. La scelta dei materiali fotocromatici è stata legata anche alla facilità di installazione. Questi prodotti, reperibili sul mercato in forma di film o lastre possono essere inseriti direttamente nella stratificazione o negli intercalari dei vetro-camera, senza richiedere nuove tecnologie produttive. Possono essere applicati anche direttamente sulle superfici esterne dei vetri esistenti e costituire un elemento di ristrutturazione e riqualificazione energetica degli edifici. Determinante per la scelta dei materiali, è il polimero di supporto al rivestimento o al

trattamento fotocromatico. Esso deve essere un polimero ottico con **elevata trasparenza**, deve essere **resistente** agli **agenti chimici**, deve avere **resistenza meccanica** e **resistere agli agenti fisici e meteorici**. Un'altra considerazione che ha motivato la scelta dei materiali, è legata alla variazione delle caratteristiche spettrometriche dei materiali derivanti dalle reazioni chimiche dei rivestimenti fotocromatici. Osservando che i polimeri cromo-genici, attivandosi (oscurandosi) assorbono bande di radiazione che vanno dall'ultravioletto allo spettro del visibile e che i comuni vetri basso-emissivi riflettono le radiazioni nel campo dell'infrarosso, è sorto il pensiero di realizzare moduli sperimentali fotocromatici dinamici, capaci di schermare le sole radiazioni dell'infrarosso allo stato inattivo (trasparente) del materiale e schermare la radiazione solare, dal visibile all'infrarosso, nella fase attiva (oscurata) del rivestimento fotocromatico. Tra le materie termoplastiche esaminate, sono stati selezionati due polimeri fotocromatici, largamente usati nel settore ottico, risultati ideali agli scopi della ricerca: il **diacetato di cellulosa** e il **policarbonato**.

## 4.2 Cenni storici del foto-cromatismo

I materiali fotocromatici, scelti per l'assemblaggio dei moduli sperimentali, rientrano nella categoria dei prodotti cromatici passivi. Si tratta di materiali fotosensibili che affondano le proprie radici nel mondo della fotografia. Le prime lastre di vetro fotosensibili furono messe a punto nel 1847, da Abel Niépce de Saint-Victor, rivestendo un vetro un sottile strato di albumina sensibilizzata con nitrato di argento [9]. Nello stesso anno, Mark Fritsche osservò per la prima volta lo sbiancamento di una soluzione color arancione, di tetracene (naftacene) alla luce del giorno e la successiva ricolorazione durante la notte [17].

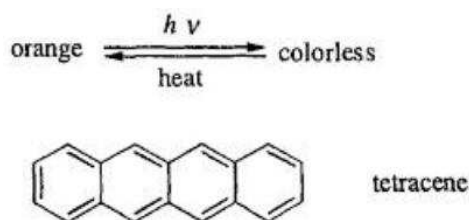


Fig. 2 Cap. 4 - Cambiamento cromatico del tetracene [17]

Nove anni dopo, il chimico tedesco Fritz Ter Meer descrisse lo stesso fenomeno con sali di potassio di dinitroetano. Un altro esempio fu pubblicato da Herbert Phipson quando osservò che un cancello, dopo esser stato dipinto con pigmenti di zinco, era nero quando esposto al sole ma bianco durante la notte (probabilmente il fenomeno era dovuto a pigmenti di zinco).

Nel 1899 Un altro chimico tedesco, Willy Markwald studiò il cambiamento reversibile del benzo-naftiridina e del tetracloro-naftalene alla luce, riscontrandone il cambiamento cromatico. Credendo che si trattasse di un puro fenomeno fisico lo chiamò "fototropismo" [17]. I fotocromatici che oggi conosciamo, in grado di controllare dinamicamente la radiazione termica e la luce che attraversa le superfici trasparenti, variando lo spettro della trasmissione in funzione della radiazione ultravioletta e dell'intensità luminosa nel campo del visibile, traggono origine dal mondo dell'ottica, circa un secolo dopo. Il termine foto-cromismo fu suggerito per la prima volta nel 1940, dal chimico Yehuda Hirshberg Weizmann dell'Istituto di Scienza in Israele che, insieme a Ernst Fischer, iniziò ad occuparsi del fenomeno, sulla scorta degli studi sul cambiamento reversibile del colore, condotti da Willy Markwald. La parola fotocromatici (composta dai termini greci: "Phos = luce e "Chroma" = colore), risultò molto appropriata a descrivere il fenomeno del cambiamento cromatico. I gruppi di ricerca di Hirshberg e Fischer, condussero studi approfonditi sui cambiamenti di colore irradiati e sui cambiamenti fisici e chimici delle diverse molecole organiche [8]. Nello stesso periodo furono scoperti altri compound fotocromatici.

Il professor Johannes Wislicenus, osservò che il benzil-fenil-idrazone e gli osazoni, erano fotocromatici. La sintesi delle molecole cromogeniche, la radiazione di eccitazione, la velocità di reazione, lo sbiancamento e la fatica, furono i principali temi affrontati al tempo. Dal 1900 al 1920, gli studi segnarono un momento di disinteresse fino al 1940 quando innovative tecnologie riportarono l'attenzione e favorirono gli sviluppi delle sostanze fotosensibili. Nel 1960, il dott. Corning, iniziò a sviluppare le prime lenti fotocromatiche mediante un vetro siliceo dopato con argento. Gli studi della "Corning Glass Work", furono la pietra miliare della ricerca. Gli sviluppi si concentrarono sui "fulgidi", sullo spirano e sui relativi composti eterociclici. Grazie ai nuovi sistemi fu studiata la foto-addizione di ossigeno puro ai composti aromatici e alla spiroindolizina e fu scoperto che l'inserimento delle molecole cromogeniche direttamente nel composto, comportava importanti modificazioni delle proprietà fisiche dei materiali. In realtà, i primi esperimenti pionieristici risalgono agli anni '50 ma l'inconveniente della fotodegradazione rallentava lo sviluppo. Negli stessi anni fu sviluppata anche la prima lente in plastica: la "CR-39". L'applicazione dei cromo-genici passivi fu limitata al settore ottico in quanto non era possibile produrre ampie superfici e rendere uniforme il trattamento fotocromatico su grandi lastre [10], mentre i materiali

cromogenici attivi (la parola è formata da due termini greci: cromo che sta per colore e genici che sta per creazione) portarono allo sviluppo dei primi display con sistemi elettrocromici e LCD. Negli anni '70 ci fu il tentativo di rendere fotocromatiche le lenti CR-39 con lo stesso processo delle lenti in vetro ma non andò a buon fine [11] [12]. Solo a partire dal 1981, si svilupparono le lenti infrangibili in materiale plastico, contenenti sostanze fotocromatiche organiche. Si trattava delle lenti "Photolite", prodotte dalla società americana "Optical Corporation". Furono ottenute con una tecnologia diversa da quella delle lenti in vetro in quanto i processi di applicazione del cromatismo erano totalmente differenti. Le Photolite non ebbero successo a causa della bassa durata e della colorazione troppo intensa ma diedero spunto ai ricercatori per trovare un sistema fotocromatico funzionale, che si associasse al monomero CR-39 e avviasse il mercato delle lenti cromogeniche. In realtà le prestazioni erano ancora scadenti, la transizione allo stato scuro era lenta e insufficiente e i materiali degradavano velocemente. Dagli anni '70 agli anni '90 furono riconosciuti diversi brevetti su prodotti fotocromatici, e si diede avvio ad una serie di relazioni internazionali tra cui, quelle avvenute nel 1993 sull'Isola francese di Enbies, nel 1996 a Clearwater, in Florida o a Fukuoka in Giappone nel 1999 [13]. Le prime lenti infrangibili fotocromatiche con prestazioni

accettabili furono sviluppate dalla Transition Optical Inc. della PPG, nel 1991 [11]. In questa occasione l'azienda garantiva le lenti con la formula "soddisfatti o rimborsati". Fu il boom commerciale e la "Transition" diventò di lì a breve, leader mondiale delle lenti fotocromatiche. Inizialmente, le prestazioni delle lenti organiche non erano paragonabili a quelle delle lenti minerali. Le Transition, composte dal polimero CR-39 mescolato con un materiale fotocromatico in grado di reagire ai raggi UV, non si scurivano adeguatamente

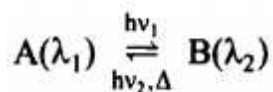
e la transizione era ancora molto lenta. Nel 1996 è stata sviluppata la terza generazione di lenti Transition con prestazioni molto superiori alle precedenti. Di lì a poco il CR39 fu sostituito dal CR330 che pur conservando le stesse proprietà era in grado di assorbire meglio le sostanze chimiche fotocromatiche. Oggi le lenti organiche hanno ampiamente surclassato le lenti minerali in vetro, offrendo prestazioni sempre più elevate e difetti contenuti.



### 4.3 Il fotocromatismo

Nella definizione scientifica data da Yehuda Hirshberg, Il fotocromatismo è una trasformazione reversibile di una singola specie chimica che può essere indotta in una o entrambe le direzioni dalla radiazione elettromagnetica, tra due stati aventi differenti e distinguibili spettri di assorbimento. Un composto organico fotocromatico può essere

considerato come una colorazione reversibile azionata da un agente fotochimico. Il fenomeno è indotto dall'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche, e si basa sul cambiamento reversibile di stato di alcune sostanze chimiche, inserite tra due strati energetici "A" e "B", aventi spettri diversi di assorbimento della radiazione [13].



Normalmente lo stato "B" ha una banda di assorbimento a lunghezze d'onda maggiori rispetto ad "A". Le radiazioni di attivazione del processo, possono essere indotte dai raggi UV, dai raggi VIS o dai raggi IR. La reazione fotocromatica di oscuramento ( $A \rightarrow B$ ), avviene normalmente nella regione dell'ultravioletto (UV 300÷400 nm) e del

visibile VIS (400÷700 nm). La reversibilità della reazione ( $B \rightarrow A$ ), è il criterio principale del fotocromatismo. Nel caso di spiropirani, spirooxazine e cromeni, la reversibilità avviene principalmente per un meccanismo termico (fotocromismo di tipo T), anche se può essere accompagnata da un agente fotochimico [14].

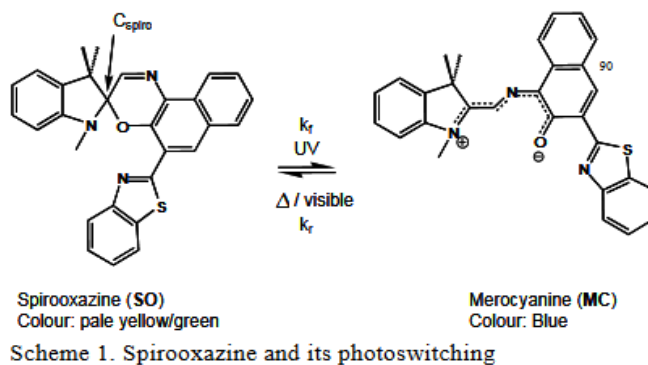


Fig. 3 Cap. 4 - Photoswitching della molecola di spiroxazine [14].

I principali sistemi fotocromatici sono basati su reazioni unimolecolari. In altri sistemi (ad esempio, fulgidi o arileteni), avviene per attivazione fotochimica. La trasformazione fotocromatica è legata al cambiamento della distribuzione elettronica nella geometria del

sistema. Nello schema seguente, riguardante una reazione unimolecolare, il materiale di partenza "A" sotto l'azione della radiazione elettromagnetica, libera il prodotto "P". La reazione inversa "P→A", può verificarsi termicamente o fotochimicamente.

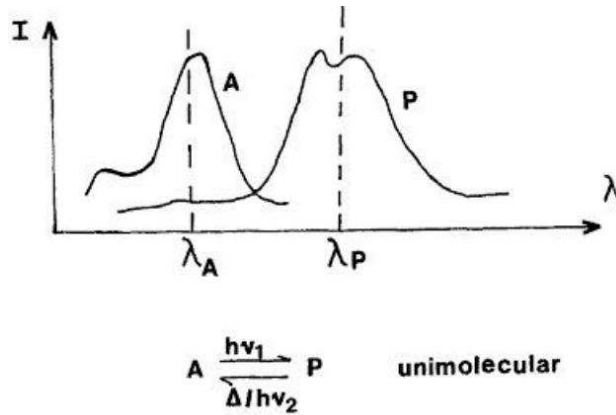


Fig.4 Cap. 4 - Reazione fotocromatica unimolecolare generica [17].

La definizione di Hirshberg, non riguardava tuttavia le reazioni bimolecolari. Le reazioni

bimolecolari avvengono per foto-addizione reversibile o per trasferimento di elettroni.

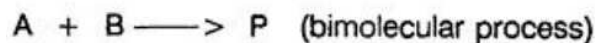


Fig.5 Cap. 4 - Reazione bimolecolare generica [17].

A seconda del sistema, (mono o bimolecolare) vi è un sistema di reazione inversa che porta al compound di partenza. Nella fase di

attivazione del processo, come nella fase di disattivazione, si verifica la variazione dell'assorbanza spettrale, mostrata in fig. 6.

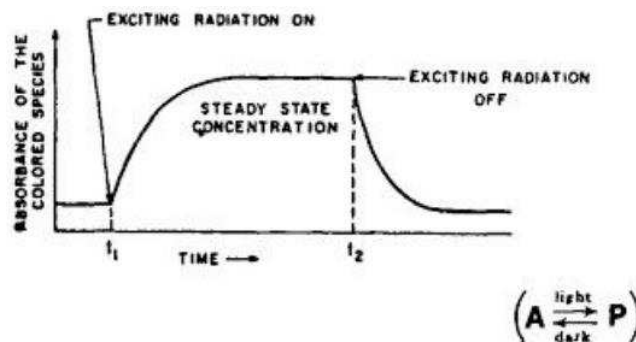


Fig.6 Cap. 4 - Assorbanza ad una data lunghezza d'onda, nel tempo [17].

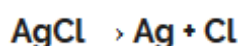
I cambiamenti intrinseci che si verificano nei sistemi fotocromatici, sono l'assorbimento e l'emissione spettrale di "A" e "P", l'indice di rifrazione e la costante dielettrica. La reazione inversa è generata dai cambiamenti di entalpia termica o fotochimica. E' molto importante il mezzo nel quale il compound fotochimico è incorporato. Esso può influenzare o controllare la cinetica della reazione termica di ritorno e in alcuni casi, la colorazione seguente e altre proprietà del processo cromo-genico. Il fotocromatismo può essere condizionato in base al tipo di applicazione a cui è destinato. Vi sono applicazioni direttamente dipendenti dal cambiamento cromatico, generato dalla variazione delle strutture molecolari ed

elettroniche o di emissione. Un esempio sono le lenti oftalmiche nel settore dell'ottica, i giocattoli, i cosmetici o gli inchiostri di stampa. L'altro tipo di applicazione, è quello in cui il cromatismo avviene per cambiamento delle proprietà fisiche o chimiche; come la conduttività, l'indice di rifrazione, la costante dielettrica, la dissociazione ionica, la transizioni di fase, la solubilità e la viscosità [13]. Esempi di queste applicazioni sono: i sistemi optoelettronici (semiconduttori modulati con pigmenti fotocromatici), sistemi olografici reversibili, interruttori ottici, memorizzatori ottici di informazioni, sistemi enzimatici scambiati foto-chimicamente e dispositivo ottico non lineari.

### 4.3.1 Fotocromatismo nei vetri minerali

La composizione dei vetri fotocromatici è assai complessa. Essi sono dotati di particolari proprietà di reazione alle radiazioni luminose che variano le proprietà ottiche, alterando lo stato di trasparenza e colore, durante l'esposizione alla radiazione solare, tornando allo stato di trasparenza al termine dell'esposizione. Tale variazione avviene principalmente nel campo dell'ultravioletto. La loro struttura è molto vetrosa e molto stabile. Normalmente si tratta di vetri Crown borosilicati a forte tenore di Boro, ai quali vanno ad aggiungersi una serie di elementi che servono a provocare il fenomeno fotocromatico per mezzo dello sviluppo di microcristalli di alogenuro di Argento. Questi sistemi sfruttano il cambiamento cromatico reversibile di alcuni "sensibilizzatori ottici" che sotto l'effetto della radiazione ultravioletta

diventano agenti riducenti (diminuiscono la valenza positiva o la presenza di ossigeno nei composti dell'idrogeno tramite l'aggiunta di elettroni). I metalli contenuti nei vetri fotocromatici, assorbono le radiazioni ultraviolette ( $\lambda = 300-400 \mu\text{m}$ ) causano la rottura dei cristalli, coesi da basse forze di legame tra l'argento e il cloro, diventano "colloidali". Gli additivi responsabili della reazione fotochimica, secondo la quale si forma Ag metallico, sono cristalli di cloruro d'argento **AgCl** o bromuro d'argento **AgBr**. In presenza di radiazione solare, avviene una reazione di ossidoriduzione dei sali in cui lo ione argento **Ag<sup>+</sup>**, viene ridotto ad argento metallico **Ag** mentre lo ione cloruro **Cl<sup>-</sup>** viene ossidato a cloro atomico **Cl**, con contemporaneo oscuramento del vetro generato dai cluster di Argento.



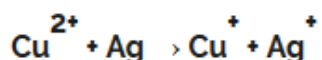
A garantire la reversibilità del processo di oscuramento ed evitare l'aggregazione degli atomi di cloro con rilascio di cloro gassoso dalla matrice, si inseriscono nel materiale, microcristalli di cloruro rameoso **CuCl**. In

questo modo, gli ioni rame **Cu<sup>+</sup>** del cloruro rameoso, riducono gli atomi di Cloro atomico neutro **Cl**, liberati con l'esposizione alla luce, formando anioni cloruro **Cl<sup>-</sup>**.



A questo punto gli ioni  $\text{Cu}^{2+}$  reagiscono con l'argento metallico  $\text{Ag}$ , formatosi dalla

reazione fotocromatica, riducendosi a cationi positivi  $\text{Cu}^+$  e  $\text{Ag}^+$ .



In assenza di luce i cationi  $\text{Ag}^+$  reagiscono con gli ioni  $\text{Cl}^-$  ripristinando il cloruro d'argento iniziale  $\text{AgCl}$  mentre i cationi  $\text{Cu}^+$  legandosi agli anioni  $\text{Cl}^-$  vanno a ripristinare il cloruro rameoso  $\text{CuCl}$ . Il sistema di produzione di questi vetri, consiste nell'aggiunta di Sali d'argento (alogenuri d'argento) e di composti metallici di fluoro, cloro, bromo o iodio nella pasta vetrosa (in generale, una lastra a base di boro-silicio), tramite la fusione a 1250-1450 °C, in cui avviene la formazione di cristalli  $\varnothing$  15  $\mu\text{m}$  e il successivo trattamento termico. Tra le problematiche delle tecnologie di produzione, si osservano:

- Aumento dei tempi di risposta nel caso di improvvise variazioni della radiazione luminosa, considerando che il tempo di di reazione dallo stato

trasparente a quello oscurato è compreso tra i 4-5 minuti, mentre il tempo di reazione dallo stato oscurato a quello trasparente tra gli 8-10 minuti;

- In seguito alla transizione fotocromatica verso l'oscuramento, i vetri diventano assorbenti creando problemi di surriscaldamento del materiale e abbattendo il livello di rendimento;
- Eventuale presenza di elementi schermanti esterni che possono generare diverse intensità di luce e di ombra;
- Perdita dei fenomeni di reversibilità nel tempo causate dalla difficoltà applicative di distribuzione uniforme dei materiali cromo genici sulle lastre di vetro;

### 4.3.2 Il fotocromatismo nei sistemi organici

Come già accennato, il supporto polimerico gioca un ruolo fondamentale per le caratteristiche fotocromatiche. Molte applicazioni richiedono materiali in film, fogli o lastre, come per una eventuale applicazione sui serramenti edilizi. Normalmente le molecole fotocromiche sono incorporate direttamente alle matrici polimeriche mediante legame covalente o dissolvendole o sospendendole in solidi polimerici.

Le differenze di proprietà fisiche e chimiche sono generate da molecole fotocromatiche inserite nel compound polimerico o a livello sovra molecolare. nella tabella sotto, sono mostrate le variazioni reversibili delle proprietà dei materiali, sia nel caso in cui le molecole sono inserite direttamente nel compound, sia se poste su una struttura sovra molecolare, indipendente dalla matrice.

Reversible changes of properties in photochromic compounds and materials (adapted from K.Ichimura , see Chapter 26).

Properties	Reversible change in	
	Molecular structure	Supramolecular structure of matrices
optical	absorption spectrum emission spectrum refractive index dielectric constant	absorption spectrum emission spectrum refractive index dielectric constant  light scattering birefringence optical rotatory power reflectivity
chemical	chelate formation ion dissociation enthalpy	chelate formation ion dissociation enthalpy catalysis enzyme activity membrane permeability
electrical		conductivity photoconductivity capacitance membrane potential
bulk	phase transition solubility	phase transition solubility viscosity wettability density

Fig. 7 Cap. 4 -  
 Variazione delle prestazioni fisiche in base alle strutture molecolari [17].

In base alla natura dell'induttore fotochimico attivante, i fotocromatici possono essere classificati in 5 gruppi principali:

- **sistemi fotoreversibili**, in cui la matrice "A" si attiva quando subisce una reazione indotta dalla luce liberando il prodotto "P" (processo unimolecolare) o "A" e "B" (processo bimolecolare), si intende che "A" assorbe radiazione ad onda più corta del foto-prodotto "P";
- **sistemi termoreversibili**, in cui la variazione di colore si inverte e si ritorna termicamente allo stato "A" o "A e B";
- **sistemi fotoreversibili e termoreversibili**,
- **sistemi fotocromici inversi** nei quali le forme iniziali "A" o "A e B" assorbono ad alte lunghezze d'onda e la forma "P" a basse lunghezze d'onda;
- **sistema multi-fotocromici** nei quali più di due forme sono sottoposte a interconversione fotochimica o termochimica [17]. Bisogna considerare non solo l'effetto della matrice sul fotocromatismo ma anche l'effetto del fotocromatismo sulla matrice. Nel primo caso, l'intensità della reazione e la variazione delle proprietà ottiche sono fortemente influenzate dalla matrice, specie se le molecole fotocromatiche sono incorporate nel polimero. Nel secondo caso i cambiamenti reversibili delle proprietà sono dovuti alla reazione fotocromatica, che influisce non solo sulle caratteristiche ottiche, ma anche chimiche,

elettriche e di massa. L'inserimento delle molecole fotocromatiche nella pasta matrice, ha il limite di non garantire un effetto oscurante uniforme su tutta la superficie, dipendente tra l'altro dallo spessore. Quando il fotocromatico è inserito in un substrato indipendente, l'effetto si distribuisce in modo un uniforme. Esistono diverse categorie di fotocromie a seconda della trasformazione chimica subita. La **trasformazione cromatica** reversibile, può avvenire per:

**1.E-Z isomerizzazione** di doppie legami (diarileteni, azobenzeni, polimetine, indigini, ecc.);

**2.Trasferimento di elettroni** (Clorofilla cellulare, Fe (II) tiazine, ecc.);

**3.Trasferimento di idrogeno** (tautomerismo) (dithizonates di metalli, N-salicilidene-aniline, ecc.);

**4.(Foto) dissociazione** (ad esempio, triarilmetani);

**5.Reazione periciclica:** reazione elettrociclica intramolecolare (Spiropirene, spiroossazine, fulgidi, ecc.), reazione di cicloadizione (2+2).

L'applicazione di composti fotocromatici richiede una buona trasformazione cromatica reversibile e una lunga durata. A tal riguardo le molecole fotocromatiche più performanti sono quelle degli spiroirani (SP) e delle spiroossazine (SO). Queste molecole sono composte da una parte eterociclica e una parte

del cromeno legate ortogonalmente da un atomo di carbonio. Gli studi condotti su di esse con i derivati nitro di spirobenzopirani hanno mostrato ottimi risultati dal punto di vista della colorabilità ma con basso numero di cicli. Nel 1980 Richard J. Hovey scoprì

l'alta stabilità della spioossazina alla fotoeccitazione e da lì la ricerca universitaria e l'industria, si sono concentrate sulla progettazione di sistemi SO aventi buona colorabilità e lunga durata.

#### 4.3.2.1 Fotocromatici in pasta nella matrice polimerica

Questo tipo di sistemi prevede che le molecole fotocromatiche siano inserite nella matrice polimerica. I fotocromatici colorati, distribuiti in tutta la matrice, sono rari e comunque, a differenza degli omonimi in vetro minerale, subiscono un oscuramento più uniforme e conservano tempi di reazione omogenei anche in caso di spessori diversi. Si tratta di polimeri sostituiti da molecole con elettroni delocalizzati sull'orbitale pi-greco, come nel caso dello spiropirano e dei suoi compound. L'interesse dei fotocromatici direttamente inseriti nel compound ha trovato motivazione nel fatto che esista una vasta gamma di polimeri usati in applicazioni ottiche.

I principali sono il PC (policarbonato), il PMMA (polimetilmetacrilato) e il CTA (acetato di cellulosa). In questi sistemi, la molecola fotocromatica può essere legata alla matrice in due modi. Può essere direttamente dispersa nella matrice polimerica in forma di additivo ma la sua concentrazione non può essere eccessiva per evitare la formazione di aggregati, oppure può essere legata con legami covalenti alla catena polimerica principale. I fotocromatici possono essere direttamente legati alla matrice in luogo di un monomero (grafted) oppure come parte della catena principale (backbone)[21].



### 4.3.2.2 Fotocromatici su supporto polimerico

Le molecole organiche con proprietà fotocromiche sono svariate. Si tratta di sistemi composti da supporti organici in grado di massimizzare l'assorbimento dei reagenti fotocromatici. I supporti polimerici, vengono trattati superficialmente. Milioni di particelle fotocromatiche vengono inserite in un substrato nella superficie anteriore fino ad una profondità di 0.15 mm, al fine di proteggerle dalle sollecitazioni meccaniche e dagli agenti atmosferici [18]. Le molecole usate sono principalmente sostanze organiche: **indolino-spiro-nafto-xazine**, **oxazine** o **naftopirani** che includono stereoisomeri e idrocarburi aromatici polinucleari. Il trattamento avviene per imbibizione; i composti cromatici sono depositati mediante trattamento superficiale di immersione in un bagno chimico. Il fenomeno del fotocromismo è dovuto a divisioni eterolitiche e omolitiche, o a processi di isomerizzazione, per cui si verificano delle scissioni nei legami molecolari (in seguito all'esposizione alla radiazione ultravioletta e

visibile), con la conseguente formazione di micro fori nel campo spettrale del visibile: la riformazione delle catene molecolari avviene quando termina l'esposizione alla radiazione incidente garantendo di nuovo la trasparenza dei composti. In sostanza, la loro orbita elettronica viene modificata con l'esposizione a radiazioni UV e VIS, e le molecole aprendosi determinano la colorazione del materiale. Viceversa col venir meno della radiazione si chiudono e riportano il materiale allo stato trasparente. Diversamente dai polimeri che contengono le molecole nella pasta, in questo caso sono superficiali e ciò rende il grado di oscuramento e la velocità di reazione, uniformi e indipendenti dallo spessore e dal potere diottrico. I fotocromatici su supporto polimerico, constano di 3 strati principali:

- strato di polimero trasparente filtro UV;
- substrato fotocromatico;
- strato polimerico trasparente.

## 4.4 Principali molecole fotocromatiche

### 4.4.1 Azobenzeni

L'azobenzene è un composto aromatico, la cui molecola è costituita da due atomi di azoto legati tra loro e ciascuno ad un anello benzenico. Essi sono l'esempio più comune di foto-interruttore molecolare [21]. La reazione fotocromatica è dovuta ad un meccanismo di isomerizzazione E-Z di un doppio legame azoto. L'irraggiamento o il calore generano contrazioni o rilassamenti caratteristici dei foto-deformabili, convertendo la molecola dalla forma più stabile *trans* alla forma *cis* conferendo nuove proprietà quali la birifrangenza (scomposizione di un raggio di luce in due raggi) e il dicroismo (presentazione per trasparenza di due colorazioni distinte quando sono attraversati da un fascio di luce bianca) [19]. Il cambiamento cromatico è generato dalla

sovrapposizione delle bande di assorbimento degli isomeri, nel campo del visibile. La reazione dell'azobenzene è una foto-isomerizzazione geometrica reversibile, dovuta ad una rotazione del doppio legame N=N a formare 2 specie isomeriche ben distinte, di forma Z e E, con differenti spettri di assorbimento. Con l'assorbimento di radiazioni U.V. nell'intervallo 360-370 nm, l'isomero E maggiormente assorbente, viene convertito nell'isomero Z. La reazione inversa avviene per irraggiamento dell'isomero Z che assorbe nell'intervallo del visibile 430-440 nm. Considerato che Z è termicamente instabile, la riconversione può avvenire anche per via termica o in assenza di luce. Per tale motivo, gli azobenzeni sono fotocromatici di tipo "T".

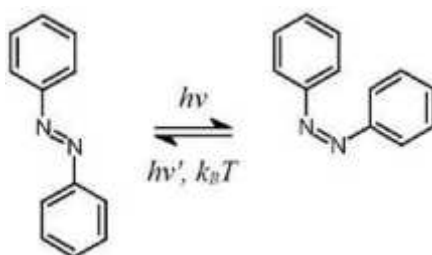


Fig. 8 Cap. 4 - Fotocromismo degli azobenzeni (X=N) [21]

Gli studi sulla isomerizzazione termica di azobenzeni attaccati come gruppi in polimeri laterali, condotti da C. S. Paik e H. Morawetz, hanno fatto comprendere il comportamento

cinetico dei cromofori (aggruppamenti nelle molecole dei coloranti, responsabili dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica nel campo del visibile) di

azobenzene nei polimeri. La fotoisomerizzazione degli azobenzeni in matrice polimerica solida è costituita da una fase iniziale veloce seguita da un processo molto più lento. La fotoreazione veloce diminuisce con l'invecchiamento fisico del polimero. Per lo studio del comportamento monomolecolare in matrice solida sono stati usati sistemi polimerici con piccole quantità di azobenzeni.

Christopher J. Barrett ha analizzato la reversione termica di a miscela di monomeri rossi dispersi in PMMA (polimetilmetacrilato) e a copolimero con MMA (metacrilato di metile). Ha ottenuto una termoisomerizzazione in tre processi esponenziali corrispondenti a tre tipi di triadi, DDD, DDM e MDM, dove D e M indicano il monomero rosso disperso e il MMA[20].

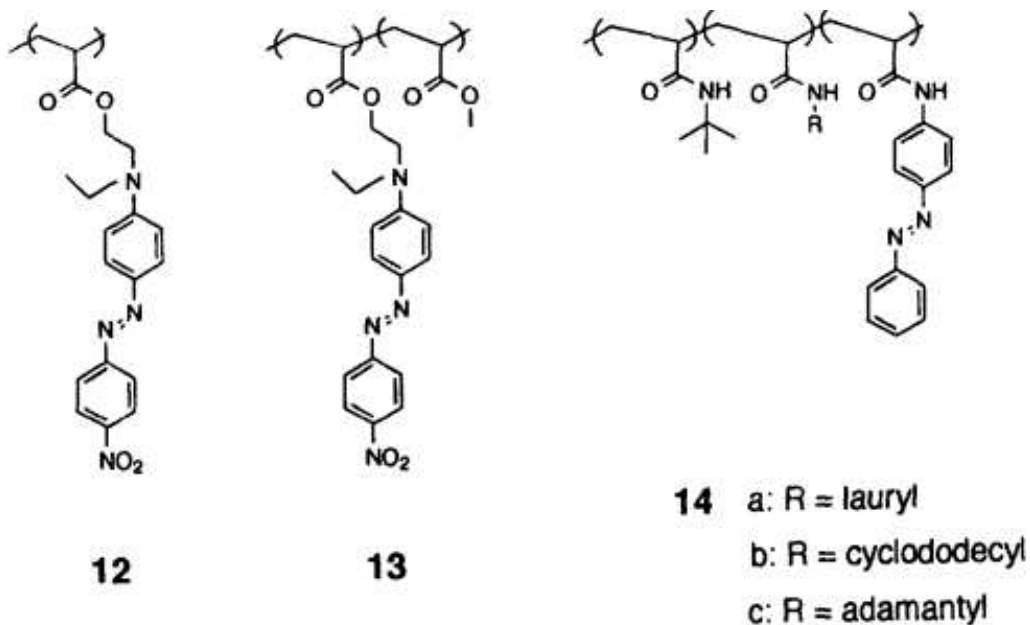


Fig. 9 Cap. 4 - Matrice polimerica con azobenzene [20]

### 4.4.2 Spiropirani

Gli spiroirani o spirocromeni, sono caratterizzati, in forma chiusa, dalla presenza di due porzioni eterocicliche perpendicolari, collegate da un atomo di carbonio tetraedrico. Molte volte presentano una porzione benzopiranic al loro interno. Nella forma chiusa, gli spiroirano sono incolori e trasparenti. Sottoposti ad irraggiamento nell'intervallo 200-400 nm, subiscono la rottura del legame carbonio spiro e l'ossigeno, con rotazione del sistema aromatico e

generazione di due molecole ibride, planari e assorbenti nel campo del visibile. La seconda molecola (chiamata merocianina) subisce un'isomerizzazione cis-trans del doppio legame C=C al prodotto più stabile. La struttura generata, assorbe radiazioni a lunghezze d'onda maggiori, rispetto alla forma chiusa originale. La reversione può avvenire sia in forma termica che in forma fotochimica con l'assorbimento di luce visibile a lunghezze d'onda maggiori.

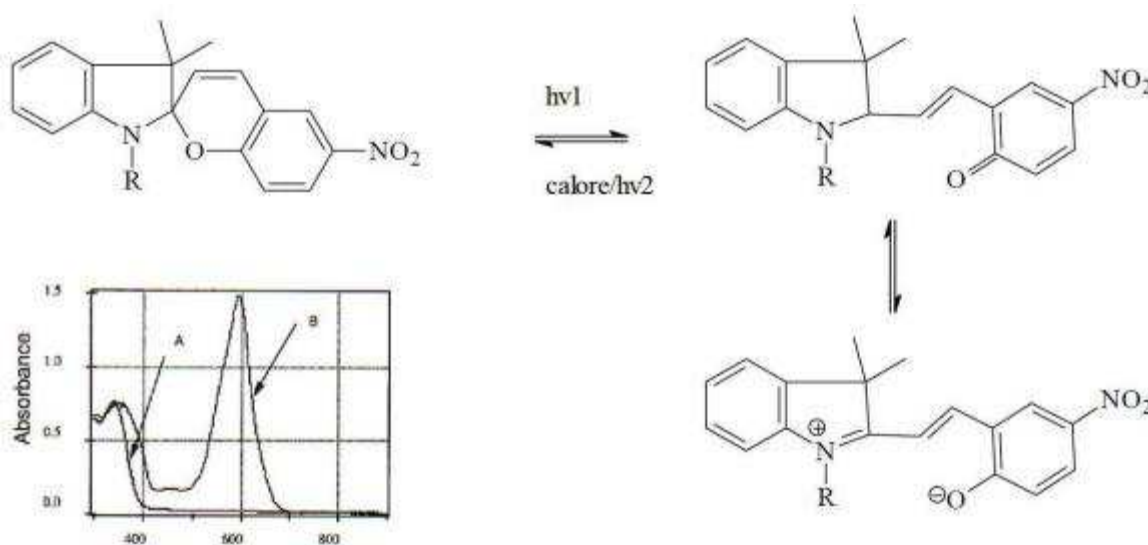


Fig. 10 Cap. 4 - Conversione di uno spiroirano e diagramma dell'assorbanza nelle due forme [20]

### 4.4.3 Spirooxazine

Le spirooxazine hanno una struttura simile agli spiropirani, dai quali differiscono per la presenza di un anello ossazinico con carbonio in posizione 3, al posto dell'anello pirano. L'irraggiamento causa la rottura del legame tra il carbonio spiro e l'ossigeno dell'ossazina con conseguente cambiamento della

conformazione spaziale ed elettronica della molecola. La forma aperta ottenuta è una merocianina metastabile con spettro di assorbimento differente. Questo tipo di polimeri sono stati impiegati da diversi anni per le lenti fotocromatiche da sole, grazie alla loro capacità di passare da una forma all'altra.

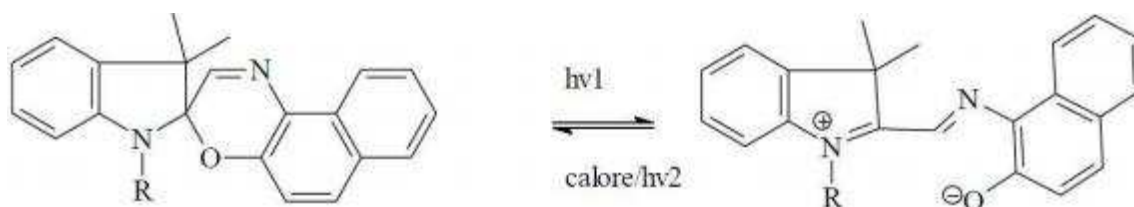


Fig. 11 Cap. 4 - Fotocromismo delle spirossazine alla corrispondente merocianina [21]

#### 4.4.4 Fulgidi

I fulgidi sono composti da una anidride ciclica (dell'acido succinico) e 2 gruppi metilenici bivalenti. Uno dei due metileni, legato ad un anello aromatico. Quando sottoposti ad irraggiamento, la colorazione è generata dalla rottura o la formazione di un anello a causa dell'elettrociclicizzazione (reazione periciclica) del sistema esatrienico che da luogo al diidronaftalene. Si passa da un legame sigma (i componenti mettono in comune un elettrone

ciascuno) ad un legame pi-greco (sovrapposizione di due orbitali simmetrici) [19]. La reversibilità della reazione, non è di tipo termico ma avviene con la radiazione visibile e UV. Questo tipo di fotocromatici risultano molto interessanti per l'ottima resistenza a fatica e la possibilità di modificare le caratteristiche fotocromatiche.

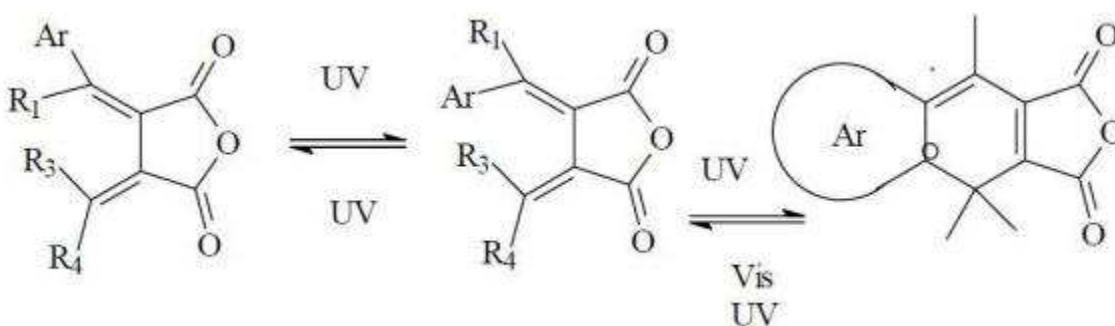


Fig. 12 Cap. 4 - Conversione di un fulgido [19]

#### 4.4.5 Diarileteni

Si tratta di idrocarburi, composti da un etene sostituito con un gruppo fenilico su entrambi gli atomi di carbonio. Nella forma aperta presentano una struttura non planare, composta da due anelli aromatici ramificati, legati ad un "etene". Quando sono sottoposti a radiazione UV e VIS, la struttura molecolare incrementa la propria planarità, schiacciando la nube elettronica che si estende fino a

comprendere l'anello centrale, che si chiude. Questo processo ciclico genera la colorazione del polimero con conseguente spostamento della banda di assorbimento a lunghezze d'onda maggiori. Il diariletene più semplice è lo stilbene anche se la sua forma chiusa tende ad ossidarsi in aria e rendere la reazione irreversibile [21].

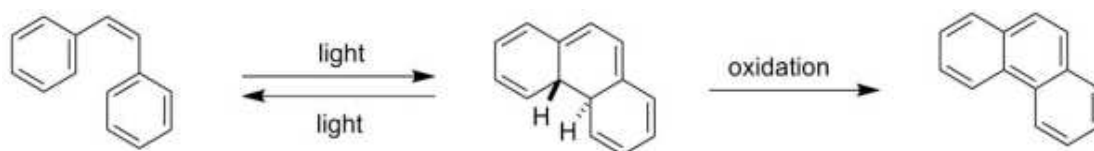


Fig. 13 Cap. 4 - Conversione di un fulgido [19]

Per ovviare a tale inconveniente, vengono sostituiti gli atomi di H in posizione 2 e 6 con sostituenti alchilici i quali però sono termicamente instabili e si riconvertono anche a temperatura ambiente. Per cui i gruppi alchilici vengono a loro volta sostituiti con composti eterociclici dando luogo a molecole stabili anche nella forma chiusa. La reversibilità della reazione avviene gradualmente con la diminuzione della radiazione luminosa I diarileteni sono la classe più interessante di polimeri fotocromatici: essi hanno una elevata stabilità termica di entrambi gli isomeri, una **buona resistenza a fatica** nel processo di interconversione tra le due forme, conservano le proprie caratteristiche

fotocromiche anche in stato cristallino, hanno **elevata sensibilità** e **reattività** nello stato solido, e soprattutto possiedono una notevole versatilità che permette di ottenere **diversi assorbimenti nel visibile** e molecole in grado di legarsi a diversi tipi di matrice. Queste caratteristiche, specie la stabilità, la resistenza a fatica e la capacità di assorbimento nello spettro del visibile, rendono i polimeri di notevole interesse per le applicazioni architeturali. Tra i diarileteni, i polimeri più interessanti sono i ditienileteni (DTE). In essi gli anelli eteroaromatici sono di natura tiofenica. La loro reazione fotocromatica è mostrata nell'immagine seguente.

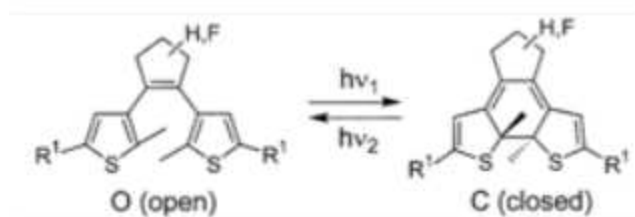


Fig. 14 Cap. 4 - Fotocromismo di un generico dietilene simmetrico [21]

La reazione fotocromatica genera una variazione notevole dello spettro di assorbimento della radiazione elettromagnetica. Come mostrato sotto, nella forma aperta (curva nera) lo spettro di

assorbimento del ditienilene è simile a quello di un tiofene sostituito mentre nella forma chiusa (curva rossa), lo spettro di assorbimento si sposta verso lunghezze d'onda maggiori.

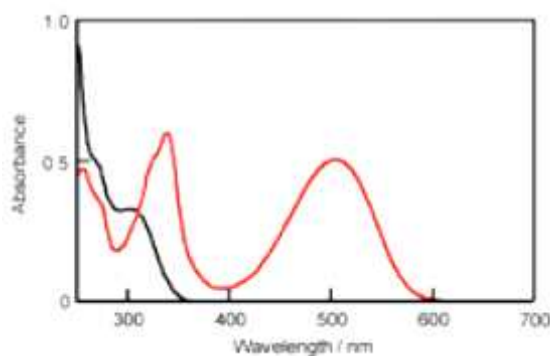


Fig. 15 Cap. 4 - Fotocromismo di un generico dietilene simmetrico [21]

Le bande di assorbimento e i conseguenti colori dipendono dalle tipologie di arile e ponte e dai loro sostituenti. La forma aperta dei diarilene presenta una forte stabilità termica. Per ciò che riguarda la forma chiusa, la stabilità oltre ai sostituenti elettron-attrattori

degli anelli arilici e ai sostituenti ad elevato ingombro sterico, dipende dal tipo di anello acrilico e dalla relativa energia di stabilizzazione aromatica. L'anello aromatico più stabile è quello tiofenico.



#### 4.4.6 Viologeni

I viologeni reagiscono secondo una reazione ciclica di ossido-riduzione. Per migliorarne le proprietà fotocromatiche, i viologeni, sono stati incorporati ai polimeri unendoli con legami covalenti. In questo modo sono state

ottenute molecole con cicli di vita maggiori, è stato migliorata la colorazione, incorporando le molecole diatoniche in solidi aprotici come il polivinilpirrolidone [13].



Fig. 16 Cap. 4 - Fotocromismo di un generico dietilene simmetrico [21]

#### 4.4.7 Diidroindoline

Il fotocromismo di queste molecole è generato dall'apertura reversibile della 2-pirolina sotto irraggiamento U.V. e VIS. Tale apertura trasforma la forma incolore in una betaina

colorata. La forma chiusa si autogenera per elettrociclizzazione. Sono tra le molecole fotocromatiche più usate in ottica.

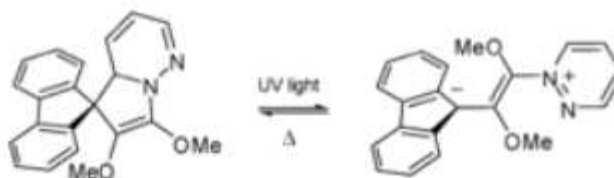


Fig. 17 Cap. 4 - Fotocromismo di un generico dietilene simmetrico [21]

#### 4.4.8 Benzopirani e Naftopirani

I Benzo e naftopirani presentano l'anello benzopiranoico o naftopiranoico legato tramite un carbonio tetrasostituito a due gruppi aromatici. Quando vengono sottoposti a irraggiamento si ottiene l'apertura dell'anello piranoico e la struttura elettronicamente

delocalizzata risulta metastabile e colorata. La reversibilità della reazione è garantita fotochimicamente sotto irraggiamento a lunghezze d'onda maggiori rispetto alla fase chiusa [21].

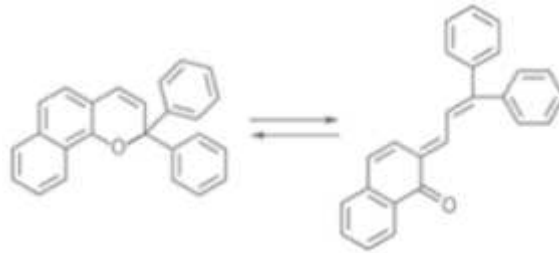


Fig. 18 Cap. 4 - Fotocromismo dei naftopirani [21]

## 4.5 Fotodegradazione dei fotocromatici organici

Nel presente paragrafo si espongono le specie fotocromatiche organiche, più significative e performanti dal punto di vista della durabilità e della colorabilità, cioè gli spiropirani e le spiroossazine. La durabilità rispetto alla fotoeccitazione e alla resistenza alla fatica fotochimica è determinata, in essi, dalla reattività della forma statica spiro e/o della merocianina, che a sua volta è legata direttamente alle proprietà fotofisiche (es. colorabilità) dei cromofori [13]. Per colorabilità, in letteratura, si intende la capacità di una specie incolore A, di trasformarsi in una specie colorata B. Essa è

misurata attraverso il coefficiente apparente di assorbimento. R. Gautron fu il primo ad indagare sulla fotodegradazione degli spiropirani nitro-sostituiti, rilevando che **più le molecole sono fotoreattive e più è bassa la loro stabilità**. Questo assunto è mostrato nel diagramma sottostante dove può notare che aumentando le concentrazioni di spiropirano, si ottiene un aumento della fotocromatizzazione e un corrispondente incremento della degradazione. Il punto di incontro delle due curve segna la situazione di compromesso ideale.

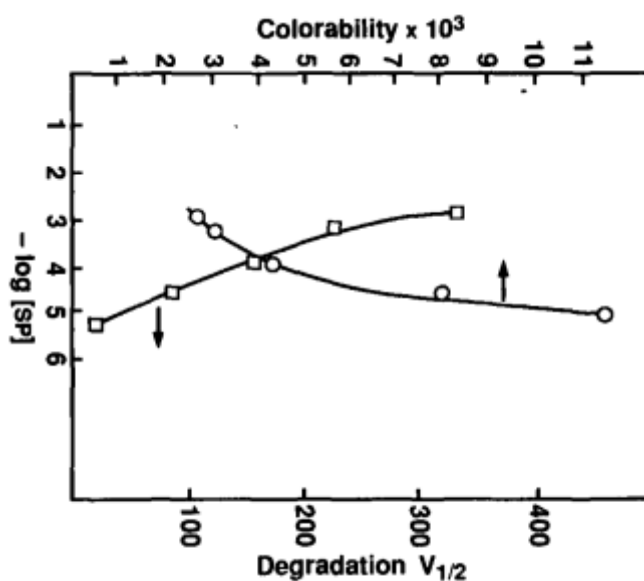


Fig. 19 Cap. 4 - dipendenza della colorabilità (O) e della resistenza a fatica (□) dalla concentrazione di spiroirano [13]

Gautron comprese che la fotodegradazione dipende dalla natura e dalla posizione dei fotosostituenti e che inserendo dei gruppi elettro-donatori nelle molecole si ottenevano

grandi miglioramenti sulla durabilità. Lo studio della fotodegradazione iniziato da Gautron ha ripreso vivacità quando si è capito, negli anni '80, che spiroirani e spiroossazine potessero essere applicati al settore dell'ottica

innestandoli direttamente con alcuni polimeri, quali il polistirene (PS), il polimetilmetacrilato (PMMA), il policarbonato (PC), il poliisoprene (PI). Per le matrici polimeriche per le quali la reattività dipende dalla viscosità

$$A_m = (\mu_1 I \epsilon_B I[SP]) / (\mu_1 I + k_2 + \mu_2 I + \mu_2' I' + \mu_3 I + \mu_4 I)$$

Nell'equazione sopra,  $I$  è l'intensità della radiazione attivante UV,  $\mu_1$  è la costante di fotocolorazione,  $K_2$  è la costante del tasso di colorazione termica,  $\mu_2$  è la costante di colorazione della merocianina, indotta dai raggi UV,  $\mu_2'$  è la costante di colorazione della merocianina indotta dai raggi VIS,  $I'$  è l'intensità della radiazione visibile,  $\mu_3$  e  $\mu_4$  sono rispettivamente le costanti di

del mezzo, la durabilità è stata valutata esponendo i materiali a irradiazione continua e prendendo in considerazione il massimo assorbimento  $A_m$ :

degradazione fotochimica da raggi UV dello spiroirano e della merocianina. Di seguito si riportano i valori della degradazione di alcuni fotocromatici innestati con vari polimeri. La fotodegradazione degli omo-polimeri, come si può notare, è legata alla temperatura di transizione vetrosa dei polimeri  $T_g$  e alla percentuale di innesto dello spiroirano. La tabella conferma le stime di Gautron.

Compound no.	Polymer <sup>b</sup>	$T_g$ (°C)	$M_w$	Percent of second polymer	Grafting degree of SP (%)	Degradation time (h)
69	SP <sub>3</sub> -PS-SP <sub>3</sub>	100	11,000		51	10
70	SP <sub>1</sub> -PS-SP <sub>1</sub>	100	11,000		80	10
71	PI-SP <sub>1</sub>	-3	8,000		72	0.25
72	PMMA-SP <sub>1</sub>	105	15,000		68	15
73	SP <sub>1</sub> -PHMA-SP <sub>1</sub>	-5	21,000		70	0.5
74	PS/PI-SP <sub>1</sub>	—	13,000	13	38	1
75	PMMA/PHMA-SP <sub>1</sub>	—	15,000	10	62	6
76	PMMA/PHMA-SP <sub>2</sub>	—	14,000	10	24	6

Tab. 1 Cap. 4 - degradazioni indotte da radiazioni continue su fotocromatici innestati su vari polimeri [13]

Un'altra categoria molto importante è quella dei fulgidi. Come anticipato, essi mostrano un'ottima resistenza a fatica e da una buona stabilità termica alla reazione fotocromatica. Si riportano a titolo di esempio i grafici sperimentali di un polimero fotocromatico con matrice di poliglicolide-trimetilene carbonato.

Sono stati rilevati i valori della trasmittanza spettrale (a), della colorabilità espressa secondo la percezione visiva dell'occhio umano (b), del cinematismo di attivazione e disattivazione (c) in funzione di 4 diversi cromatismi.

VARIACROL® BLUE D in  
 Polymer matrix : Rav 7 ® - polyallyl diglycol carbonate  
 Specimen : plano lens, thickness 1.8 mm  
 Application method : thermal transfer

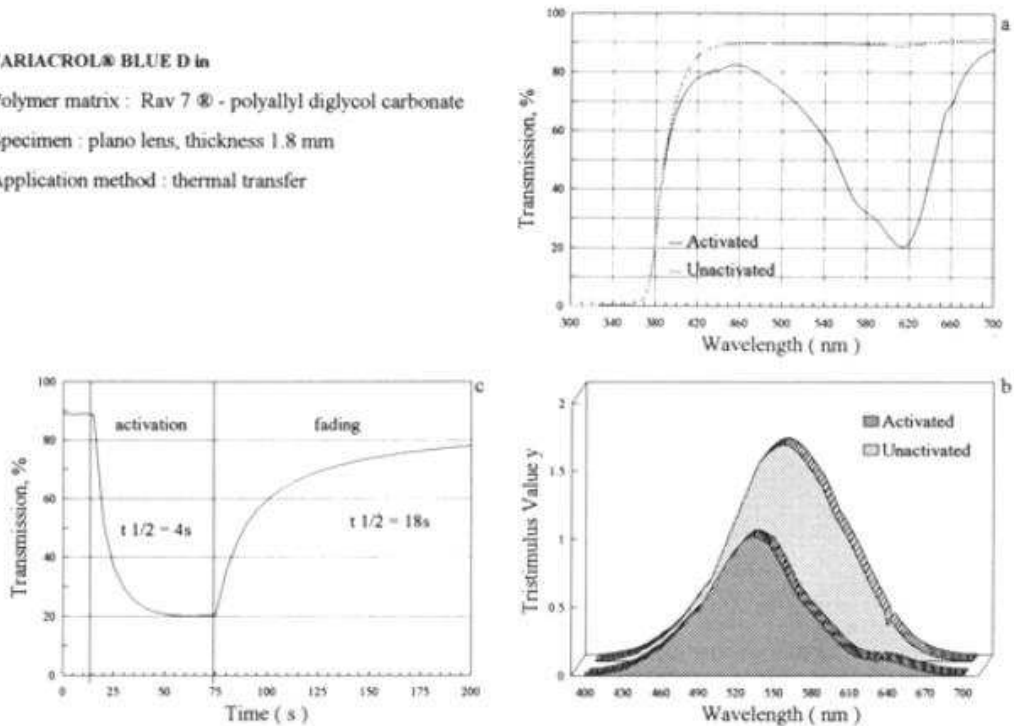


Figure 37. Spectral features (a), colorability expressed as tristimulus value y of the transmittance perceived by the human eye (b), activation and fading kinetics (c), and accelerated weatherability (d) of Variacrol Blue A in polyallyl diglycol carbonate RAV7 plano lens (1.8 mm). (Reprinted from Ref. 52 with permission of Great Lakes Chemical Italy.)

Fig. 20 Cap. 4 - poliglicolide-trimetilene carbonato FC BLUE D [13]

**VARIACROL® BLUE A in**

Polymer matrix : Rav 7 ® - polyallyl diglycol carbonate

Specimen : plano lens, thickness 1.8 mm

Application method : thermal transfer

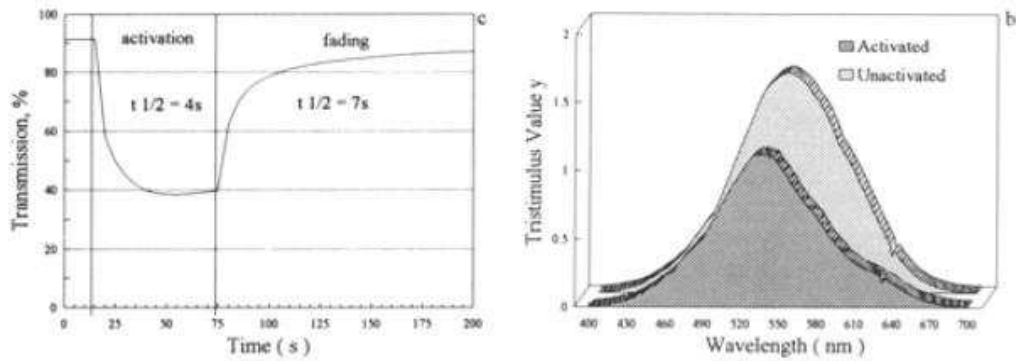


Figure 38. Spectral features (a), colorability expressed as tristimulus value  $y$  of the transmittance perceived by the human eye (b), activation and fading kinetics (c), and accelerated weatherability (d) of Variacrol Blue D in polyallyl diglycol carbonate RAV7 plano lens (1.8 mm). (Reprinted from Ref. 52 with permission of Great Lakes Chemical Italy.)

Fig. 21 Cap. 4 - poliglicolide-trimetilene carbonato FC BLUE A [13]

**VARIACROL® RED PNO in**

Polymer matrix : Rav 7 ® - polyallyl diglycol carbonate

Specimen : plano lens, thickness 1.8 mm

Application method : thermal transfer

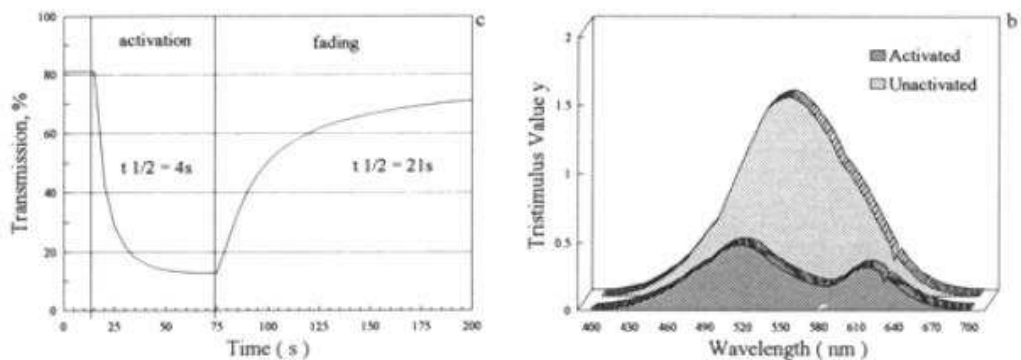


Figure 39. Spectral features (a), colorability expressed as tristimulus value  $y$  of the transmittance perceived by the human eye (b), activation and fading kinetics (c), and accelerated weatherability (d) of Variacrol Red PNO in polyallyl diglycol carbonate RAV7 plano lens (1.8 mm). (Reprinted from Ref. 52 with permission of Great Lakes Chemical Italy.)

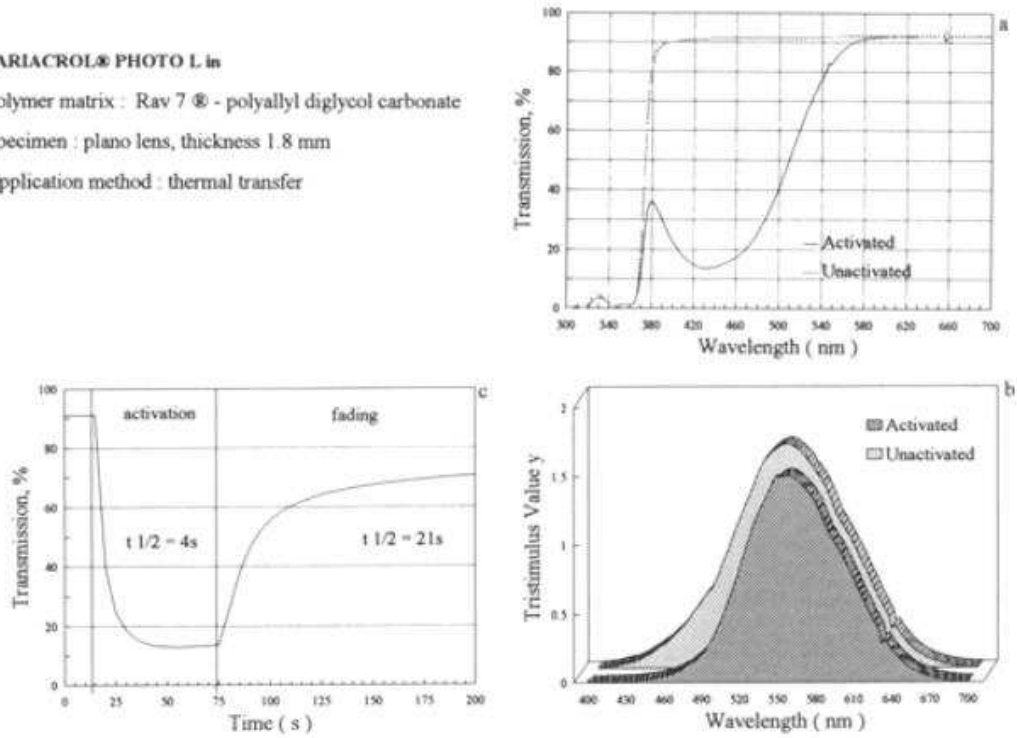
Fig. 22 Cap. 4 - poliglicolide-trimetilene carbonato FC RED PNO [13]

**VARIACROL® PHOTO L in**

Polymer matrix : Rav 7 ® - polyallyl diglycol carbonate

Specimen : plano lens, thickness 1.8 mm

Application method : thermal transfer



**Figure 40.** Spectral features (a), colorability expressed as tristimulus value  $y$  of the transmittance perceived by the human eye (b), activation and fading kinetics (c), and accelerated weatherability (d) of Variacrol Yellow L in polyallyl diglycol carbonate RAV7 plano lens (1.8 mm). (Reprinted from Ref. 52 with permission of Great Lakes Chemical Italy.)

Fig. 23 Cap. 4 - Poliglicolide-trimetilene carbonato FC YELLOW L [13]

## 4.6 La durabilità dei materiali fotocromatici sperimentali

La misura della durezza dei materiali è stata eseguita per conoscere la capacità di conservazione delle proprietà fotometriche del materiale nel tempo e valutare la convenienza di una eventuale industrializzazione del prodotto. Questa grandezza misura il decadimento prestazionale del trattamento cromo-genico di cui sono rivestiti i polimeri, quando sono sottoposti ad attivazione continua. E' bene distinguere la durabilità dei trattamenti fotosensibili superficiali, dalla degradazione termica dei polimeri. Quest'ultima riguarda solo il supporto dei rivestimenti fotocromatico ed è un decadimento prestazionale dovuto alla rottura dei legami chimici delle catene polimeriche. I test di verifica della durabilità, sono stati condotti all'interno del laboratorio di "Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche" dell'Università. Per la prova

sono stati usati due provini dei materiali fotocromatici sperimentali, di dimensione 0.1m x 0.1m: un campione del fotocromatico "Raleri" con supporto in acetato di cellulosa, dello spessore di 0.0005 m e un campione del fotocromatico "Tens-H" con supporto in policarbonato, spesso 0.001 m. Come fonte irradiante, sono state usate delle lampade "Osram" da 100 W, poste perpendicolarmente alla superficie dei provini, ad una distanza di 0.01 m. Per la rilevazione, i provini sono stati esposti a radiazione continua e costante. La radiazione termica globale trasmessa dai campioni, è stata rilevata con un piranometro "Li-cor-2005z pyranometer kit", conforme alle norme ISO 9060 prima classe, del tipo a termopila, disponendo il ricettore parallelo alla superficie interna dei campioni fotocromatici ma non aderente ad essi, per evitare l'interferenza degli apporti termici conduttivi.

### 4.6.1 Durabilità, radiazione di attivazione e tempi di oscuramento FC "Raleri"

Le prove di durabilità del prodotto "Raleri", sono state condotte sottoponendo il solo materiale fotocromatico ad un ciclo di radiazione termica continuativa di 50 ore. Un pannello di dimensioni 0,1m x 0.1 m è stato alloggiato su un apposito dispositivo a distanza di 0.01 m dal pannello radiante in

modo da formare un angolo retto con la direzione del flusso termico. Il Nella fase di prova il materiale, sottoposto a stress termico si è trovato sempre allo stato attivato. Ciò non rispecchia fedelmente il ciclo solare giornaliero dove le ore di luce diurna sono limitate ed intervallate a



periodi di buio ma è sufficiente a capire stabilità del materiale nel lungo periodo.  
 come la radiazione termica influisce sulla

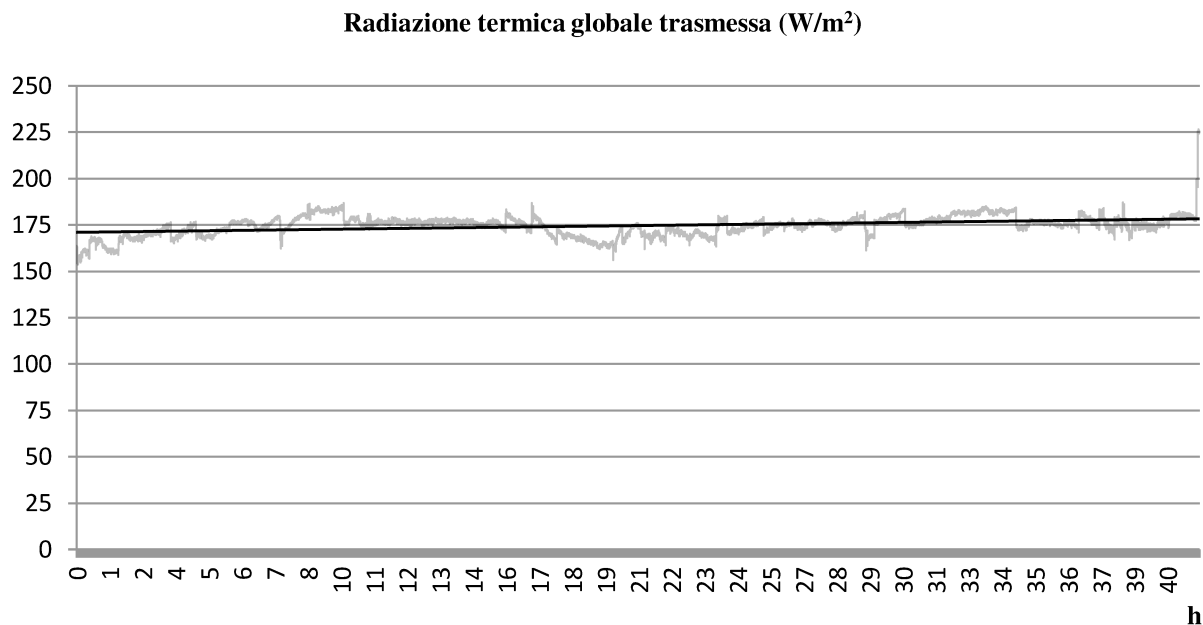


Fig. 24 Cap. 4 - Lastra FC "Raleri" - Radiazione termica trasmessa a irraggiamento continuo

La linea di tendenza della curva relativa alla radiazione trasmessa dal materiale ha un andamento lievemente crescente. Ciò significa che la radiazione termica trasmessa dalla lastra fotocromatica tende ad aumentare nel tempo. La causa risiede nel decadimento prestazionale del materiale dovuto al fatto che il polimero per le sue applicazioni agonistiche (settore automobilistico e motociclistico sportivo), è progettato per essere estremamente reattivo agli agenti attivanti, favorendo le alte prestazioni in luogo della durevolezza. In merito a ciò l'attivazione del fotocromatico "Raleri" è immediata; nell'ordine di qualche secondo.

#### 4.6.2 Durabilità radiazione di attivazione e tempi di oscuramento del "Tens-H"

I test di durabilità condotti sul campione FC "Tens-H" sono iniziati il 19 giugno e sono proseguiti fino al 24 giugno 2017. Il materiale è stato sottoposto ad un ciclo di radiazione continua di 100 ore, durante il quale si è trovato continuamente allo stato attivato. In realtà, lo studio della durabilità, sottoponendo

il materiale a stress termico continuo e prolungato, non rispecchia fedelmente il ciclo solare giornaliero dove le ore di luce diurna sono limitate ed intervallate da periodi di buio ma è sufficiente a capire come la radiazione termica interagisce sulla stabilità del materiale nel lungo periodo.

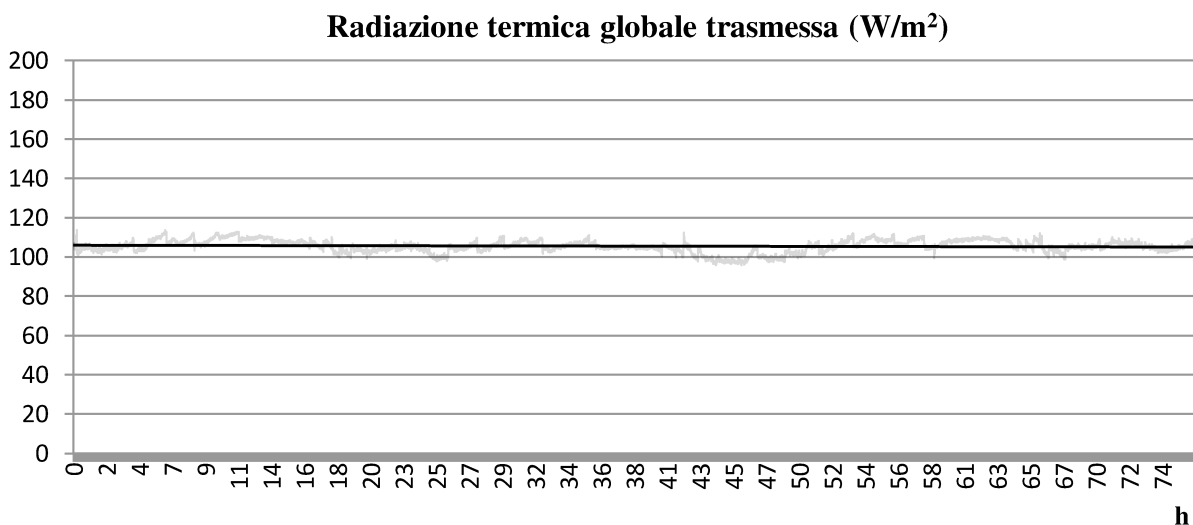


Fig. 25 Cap. 4 - Lastra FC "Tens-H" - Radiazione termica trasmessa a irraggiamento continuo

Osservando la linea di tendenza del diagramma si nota che la radiazione trasmessa dal materiale conserva un andamento costante nel tempo. L'intensità media della radiazione trasmessa dopo 100 ore di esposizione continua risulta appena inferiore a quella iniziale. Ciò dimostra che dopo 100 ore di radiazione continua, nel materiale non si è

attivato alcun processo di decadimento. Oltre al test di misurazione della durabilità del prodotto, è stata condotta una prova per conoscere l'intensità della radiazione attivante, il processo fotocromatico e i tempi di reazione completa del materiale. A tal fine sono state effettuate due misurazioni, una il 28 giugno e una il 3 luglio.

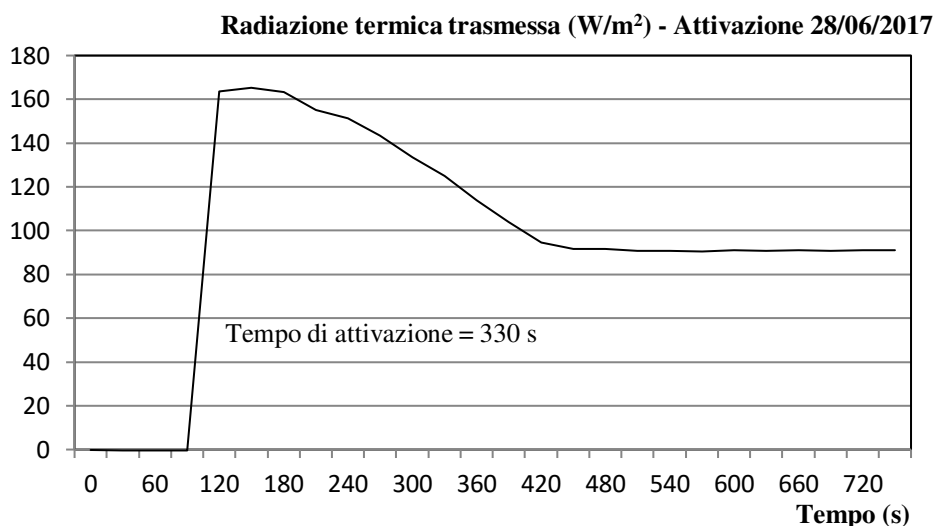


Fig. 26 Cap. 4 - Fase di attivazione 28/06/2017 - Andamento della radiazione termica trasmessa

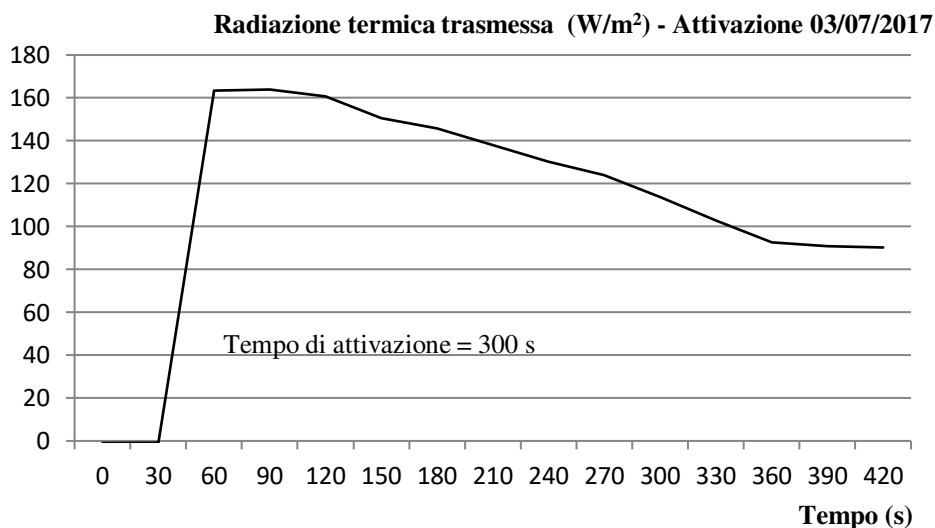


Fig. 27 Cap. 4 - Fase di attivazione 03/07/2017 - Andamento della radiazione termica trasmessa

Le radiazioni trasmesse dal FC "Tens-H" in fase di attivazione, rilevate il 28 giugno, risultano del tutto simili a quelle del 3 luglio successivo. Il materiale si è dimostrato stabile, conservando le proprie caratteristiche prestazionali dopo giorni di irraggiamento continuo. Nei test del 28 giugno, l'oscuramento del polimero si è **attivato** con un'intensità della radiazione trasmessa di

**163.672 W/m<sup>2</sup>**; circa la stessa che è stata rilevata il 3 luglio quando la reazione si è attivata a **163.286 W/m<sup>2</sup>**. I **tempi di attivazioni** per la reazione completa del materiale sono risultati in media di **315 secondi**. Il "Tens-H" a differenza del prodotto "Raleri" ha dimostrato minor reattività un'ottima stabilità in luogo di una minor ma maggior affidabilità.

## 4.7 Bibliografia cap. 4

- [1] Nicola Sinopoli, Valeria Tatano, *sulle tracce dell'innovazione TRA TECNICA E ARCHITETTURA*, Serie di architettura FrancoAngeli S.r.l Milano 2006, ISBN 88-464-3921-X - Pag.176;
- [2] Gianluca Brunetti, Bollati Stefano, *SOLUZIONI BIOCLIMATICHE PER LA RIQUALIFICAZIONE EDILIZIA*, Facoltà di Architettura e società, Politecnico di Milano 2014 - Pag.17-18;
- [4] Matteo Pavese, Vincenzo Balsamo, *La Trasparenza e i Materiali Innovativi in Edilizia*, Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino, Luglio 2012;
- [7] Michel Biron, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, William Andrew 2012, ISBN 9781455730353;
- [9] Sandro Fogli, *Storia e stili della fotografia, dalle origini al 1950*, Sandro Fogli Editore 2015, ISBN 9786050361780;
- [13] John C. Crano, Robert J. Guglielmetti, *Organic Photochromic and Thermochromic Compounds*, Kluwer Academic Publishers, NEW YORK 1999, ISBN 0-306-45883-7;
- [14] Simon Coleman, Robert Byrne, Stela Minkovska, Dermot Diamond, *Thermal reversion of Spirooxazine in ionic liquids containing the [NTf<sub>2</sub>]<sup>-</sup> anion*, Royal Society of Chemistry 2009;
- [15] Rafal Klajn, *Spiropyran-based dynamic materials*, Royal Society of Chemistry gennaio 2014; ISSN 0306-0012
- [16] Richard A Evans, Tracey L Hanley, Melissa Skidmore, David Lewis, *The generic enhancement of photochromic dye switching speeds in a rigid polymer matrix*, Nature Materials, Southern Cross University ePublications@SCU aprile 2005;
- [17] Heinz Dürr Henri Bouas-Laurent, *Photochromism: Molecules and Systems*, Elsevier Science, March 2003;
- [19] Giorgia Franchin, Giovanna Brusatin, Stefano Bonora, *Lenti fotocromatiche per ottica adattiva*, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di ingegneria meccanica-Settore Materiali, 2011;
- [20] C. Barren, A. Natansohn, and P. Rochon, *Thermal cis–trans isomerization rates of azobenzene bound in the side chain of some copolymers and blends*, *Macromolecules*, Department of Chemistry, Queen's University, Kingston, Ontario, K7L3N6 Canada 1994;
- [21] Mattia Bazan, Giorgio Strukul, *Sintesi e caratterizzazione di molecole guest foto-isomerizzabili per la modulazione di sistemi catalitici supramolecolari*, Università Cà Foscari di Venezia, Dipartimento di Chimica e Tecnologie Sostenibili, 2015;

## 4.8 Sitografia capitolo 4

- [3] <http://biblus.acca.it/guida-al-vetro-in-edilizia-i-vetri-bassoemissivi/>
- [5] <http://www.rinnovabili.it/greenbuilding/vetro-intelligente-e-ad-alte-prestazioni-efficienza-e-risparmio-energetico/>
- [6] <http://www.zephir.ph/index.php?id=2>
- [8] <http://www.chimicamo.org/chimica-organica/polimeri-termoindurenti-e-termoplastici.html>
- [10] <http://edificiocamaleonte.blogspot.it/2012/01/vetro-fotocromico.html>
- [11] [http://www2.mater.unimib.it/utenti/giordano/esami/vetro\\_ofthalmico\\_2012-2013.pdf](http://www2.mater.unimib.it/utenti/giordano/esami/vetro_ofthalmico_2012-2013.pdf)
- [12] <http://www.visio-rx.it/articoli-sulla-vista/history/storia-delle-lenti-fotocromatiche>
- [18] [https://www.zeiss.it/vision-care/it\\_it/eye-care-professionals/compendio-di-ottica/basi-dell\\_ottica/materiali-delle-lenti/fotocromatiche.html](https://www.zeiss.it/vision-care/it_it/eye-care-professionals/compendio-di-ottica/basi-dell_ottica/materiali-delle-lenti/fotocromatiche.html)

## CAP. 5 IL BENESSERE ABITATIVO

*"L'Architettura è il gioco sapiente, rigoroso e magnifico di volumi assemblati nella luce"*. Questa citazione di Le Corbusier evoca la dominanza della luce nella progettazione architettonica. Lo scopo di questa ricerca è ideare un sistema di chiusura trasparente in grado di rendere più confortevole,

gradevole e sostenibile uno spazio abitato sia riguardo all'aspetto termico e quindi in relazione allo spettro di radiazione termica e sia rispetto all'aspetto visivo per cui ove è necessario concentrarsi sulle lunghezze d'onda del campo "visibile".

### 5.1 Il benessere termo-igrometrico

Il benessere termo-igrometrico è la percezione di soddisfazione che le persone provano all'interno di un ambiente. E' la sensazione termica (sentire caldo o freddo); che modifica lo stato di comfort termico. La **sensazione termo-igrometrica** dipende dalla combinazione di **sei grandezze**, di cui quattro condizioni ambientali: 1) **Temperatura dell'aria  $T_a$** ; 2) **Temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente  $T_{mr}$** ; 3) **Umidità relativa**

**dell'aria UR**; 4) **Velocità dell'aria  $V_a$** ; due caratterizzanti gli individui: 1) **Attività fisica svolta  $M$** ; 2) **Resistenza termica dell'abbigliamento  $I_{cl}$** . Per capire come un elemento architettonico influisca sul comfort abitativo è necessario comprendere il meccanismo di termoregolazione del corpo umano. Il sistema umano, come esposto al paragrafo successivo, è un sistema "aperto" simile ad un fabbricato di un contesto architettonico [1].

## 5.2 Termoregolazione del Corpo Umano

Il **nostro corpo** è assimilabile ad un **involucro edilizio**: "Produce calore come se fosse una caldaia, ha un involucro che sono i vestiti, e come un edificio perde vapore, con una continua emanazione di vapore dall'esterno all'interno, così fa a anche il corpo umano tramite la sudorazione, quindi con una perdita di calore latente [1] ". La distribuzione del calore nel corpo umano non è omogenea ma nei punti in cui vi è maggiore trasmissione di calore, la temperatura sarà inferiore rispetto ai punti più caldi ove vi è ridotta trasmissione termica. Seppur "non esista una temperatura corporea standard, essa deve essere valutata secondo le condizioni di stato stazionario e deve soddisfare i requisiti di equilibrio termico [2] ". **Per poter avere** condizioni di **comfort termico**, il corpo deve rimanere in un intervallo di temperatura attorno ai 37° e lo fa attraverso un **sistema di termoregolazione** dell'ipotalamo che, sulla base degli stimoli provenienti dai termocettori cutanei, mette in azione sistemi di compensazione termica. La termoregolazione è il "Meccanismo fisiologico che tende a mantenere costante la temperatura interna dell'organismo adattando i processi di produzione e di dispersione del calore alle variazioni della temperatura ambientale [3] ". Il **bilancio energetico S** del corpo umano è:

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - C - R - K \quad (1)$$

dove **M** = potenza sviluppata per attività metabolica; **W** = potenza meccanica dissipata per attività lavorativa; **E<sub>res</sub>** = Potenza termica per evaporazione nella respirazione; **C<sub>res</sub>** = Potenza termica scambiata per convezione; **E** = Potenza termica che se ne va per evaporazione; **C** = Potenza termica scambiata per convezione; **R** = Potenza termica scambiata per irraggiamento e **K** = Potenza termica scambiata per conduzione. Per avere situazione di comfort termo-igrometrico, il bilancio energetico deve essere nullo: **S = 0**. Quando S diventa maggiore di zero, la temperatura del corpo tende ad aumentare, quando è minore di zero tende a decrescere e quando è zero si è in stato di equilibrio termico e quindi di potenziale benessere anche se, a causa dei meccanismi di autoregolazione della temperatura corporea, è una condizione necessaria ma non sufficiente. La trattazione dei singoli elementi dell'equazione, esula da questa trattazione, quindi ci si è soffermati sui 4 parametri ambientali che determinano il benessere termico: 1) **Temperatura dell'aria**; 2) **Temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente**; 3) **Umidità relativa dell'aria**; 4) **Velocità dell'aria**. Oltre all'involucro edilizio opaco, anche le superfici vetrate concorrono alla regolazione di queste 4 grandezze e spesso rappresentano il punto debole degli edifici.

Oltre i 4 parametri ambientali che sono influenzato dall'involucro edilizio, vi sono i parametri individuali,  $M$  e  $I_{cl}$ . Il bilancio energetico è funzione di 6 grandezze:  $S = f(M, I_{cl}, T_a, T_{mr}, V_a, U.R)$ ;  $T_a$  è la **Temperatura dell'aria**;  $T_{mr}$  è la **Temperatura media radiante** delle superfici

che delimitano l'ambiente; **UR** è l'**umidità relativa dell'aria**;  $V_a$  la **Velocità dell'aria**;  $M$  è l'**attività fisica svolta**  $M$  e  $I_{cl}$  è la **resistenza termica dell'abbigliamento**. Come si può notare, ben 4 grandezze su 6 sono regolate dal corpo edilizio.

### 5.3 Influenza dei moduli sperimentali sul comfort termo-igrometrico

I test radiometrici hanno dimostrato che i prototipi FC determinano vantaggi di comfort termico, sia contenendo l'innalzamento della temperatura dell'aria nei box, e quindi gli scambi termici convettivi, che contenendo le variazioni di temperatura della superficie vetrate che influiscono sugli scambi termici radiativi. Inoltre i moduli FC si comportano in modo dinamico e selettivo risultando vantaggiosi tanto nei periodi estivi che nei periodi più freddi. Nella successiva campagna sperimentale vengono analizzati i vantaggi offerti dall'azione combinata delle **temperature medie radianti (Trad)** delle pareti e delle **temperature dell'aria interna** ai box ( $T_a$ ). I benefici, apportati dal contenimento delle temperature suddette possono essere letti seguendo il "metodo di Fanger [4]", in base alle differenze di temperatura dell'aria interna ai box ( $T_a$ ) e al

gradiente di temperatura media radiante delle superfici confinanti (**Trad**). Fanger condusse degli studi su un campione di 1600 studenti in condizioni di benessere, e dimostrò l'interdipendenza della temperatura della pelle e della sudorazione, dall'attività metabolica. Impostò l'equazione (1), per una coppia di variabili, tenendo costanti le altre, ed ottenne i grafici, delle linee ideali di benessere termo-igrometrico. Per l'applicazione del suo metodo, oltre alla temperatura superficiale interna dei vetri, e alla temperatura dell'aria interna ai box, va considerata la temperatura media radiante delle pareti interne. Note le temperature interne ed esterne ai box, è stato calcolata la trasmittanza termica ( $U$ ) delle pareti opache, in base agli **spessori (S)** e alle **conducibilità termiche ( $\lambda$ )**, dei singoli strati di materiale, secondo **la norma UNI EN ISO 6946:200**:



$$U_m = \frac{1}{R_{si} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n} + R_{se}}$$

Come noto, per una parete multistrato senza intercapedini d'aria, il valore della trasmittanza termica **U** equivale all'inverso della sommatoria di tutte le resistenze termiche offerte dai singoli strati della parete

( $S_n / \lambda_n$ ), e delle resistenze liminari **R<sub>si</sub>** e **R<sub>se</sub>**. Nella tabella che segue sono riportate le caratteristiche dei materiali componenti e il valore della trasmittanza termica delle pareti.



Ordine	DESCRIZIONE DELLO STRATO (dall'interno all'esterno)	s (mm)	C (W/m²K)	M.V. (Kg/m²)	Px10 <sup>12</sup> (Kg/msPa)	R (m²K/W)
	Adduttanza interna		7.7			0.13
1	Polistirene espanso bianco-EPS lastre stampate	90	0.0390	30	3.15	2.308
2	Pannelli in legno OSB abete e pino	12	0.1300	650	5.00	0.092
	Adduttanza esterna		25.0			0.04

s = Spessore dello strato; C = Conducibilità termica del materiale; M.S. = Massa superficiale; P = Permeabilità al vapore; R = Resistenza termica

Trasmittanza (W/m²K): **0.389**  
 Massa superficiale (Kg/m²): **11**  
 Resistenza termica (m²K/W): **2.57**  
 Spessore totale (mm): **102**

Comune di **Ancona**  
 Zona Climatica: D, Gradi Giorno **1688**  
 T interna (°C): **20.0**  
 T esterna (°C): **-2.0**  
 U interna (%): **52.0**  
 U esterna (%): **37.0**

Tab. 1 Cap. 5 - Calcolo Trasmittanza **U** delle pareti opache dei box

Per ogni box è stata calcolata la temperatura media radiante interna, facendo la media ponderata della temperatura radiante degli elementi opachi e la temperatura radiante degli elementi trasparenti in relazione alla **superficie trasparente** di ogni cella pari a **0.25 m²**, e alla **superficie radiante delle**

**pareti**, pari a **3.55 m²**. Per il prototipo fotocromatico "Raleri" sono stati considerati i dati relativi al giorno 9 aprile 2017 mentre per il modulo FC "Tens-H" i dati del 27 maggio 2017. Di seguito è riportato il diagramma di Fanger con le linee di benessere in funzione delle temperature medie radianti.

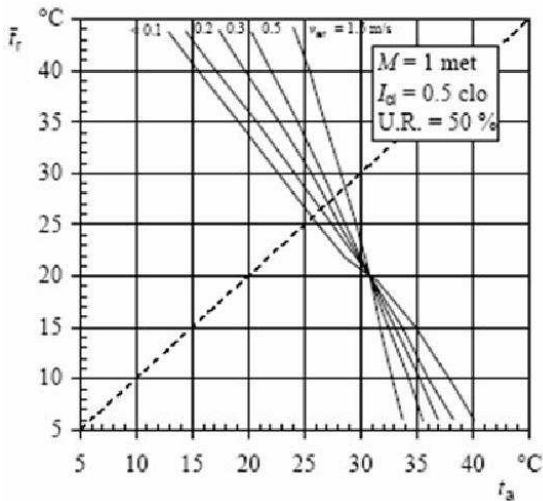


Fig. 1 Cap. 5 Diagramma di Fanger

Nel grafico di Fanger a lato, vengono valutate le condizioni di benessere al **variare** della **velocità dell'aria** ( $V_a$ ), della **temperatura dell'aria** ( $T_a$ ) e della **temperatura media radiante** ( $T_{rad}$ ), fissando il **dispendio metabolico**  $M= 1$  met, la **resistenza termica conduttiva ed evaporativa** del vestiario  $I_{cl}= 0.5$  clo e l'umidità relativa  $U.R.= 50\%$ .

In base al diagramma è possibile notare come le **condizioni di benessere** siano garantite quando la media tra le temperature dell'aria interna e le temperature medie radianti delle pareti, sta intorno ai **25 °C**. Per la determinazione delle temperature medie radianti delle pareti, è stato determinato il **flusso termico q**:

$$q=U*(\Delta T) \quad (1)$$

con  $\Delta T$  gradiente di temperatura tra l'aria esterna e l'aria interna. Successivamente, noto il coefficiente liminare interno  $h_i= 7.7$  W/m<sup>2</sup>K

è stato trovato il valore delle temperature radianti  $T_{rad}$ :

$$T_{rad} = T_{aria\ int} - q/h_i \quad (2)$$

Avanti si riportano le curve sperimentali delle temperature dell'aria in relazione alle temperature radianti delle pareti messe in paragone con la curva ideale di benessere di Fanger. Considerando che i **box** di prova sono **chiusi** e privi di ventilazione meccanica controllata, è stata fissata la **velocità dell'aria**  $V_a= 0.1$  m/s.

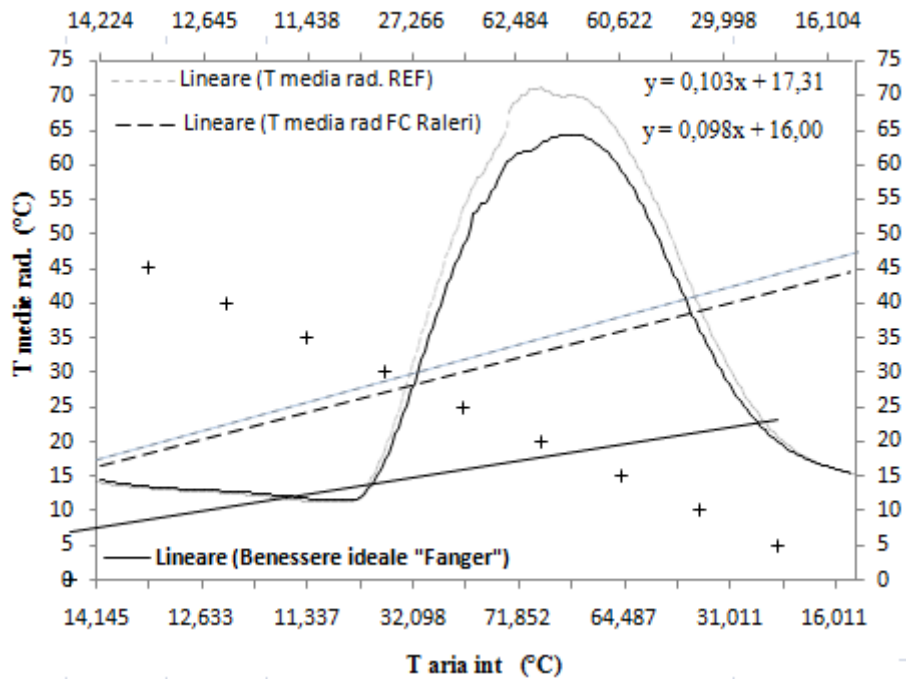


Fig. 2 Cap. 5 - Linee di benessere termico con modulo REF e modulo FC "Raleri"

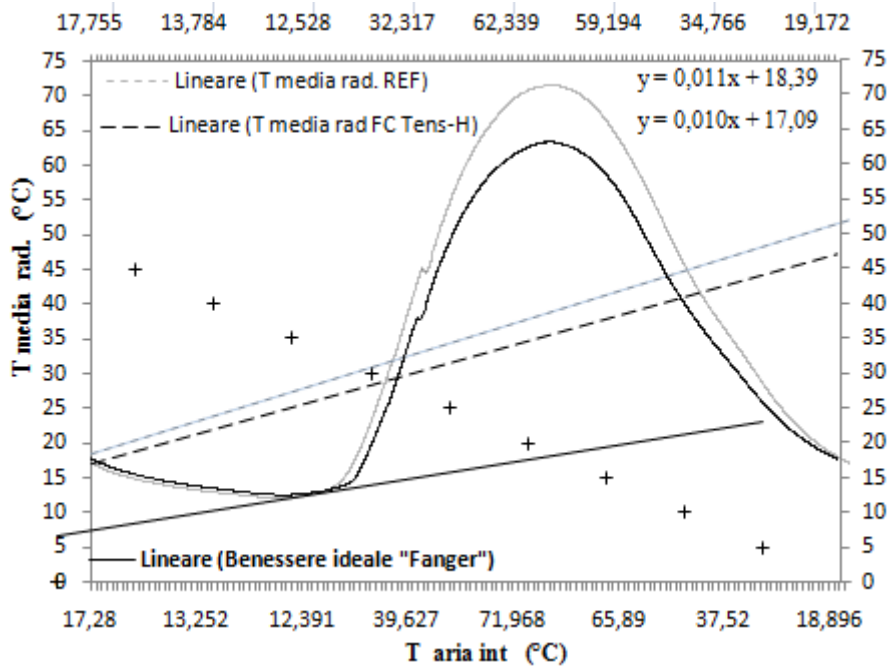


Fig. 3 Cap. 5 - Linee di benessere termico con modulo REF e modulo FC "Tens-H"

In entrambi i moduli sperimentali FC, a parità di temperatura dell'aria interna, sono state rilevate temperature medie radianti inferiori rispetto al campione di riferimento, tali da favorire il benessere termico; infatti, rispetto

alla linea di tendenza del benessere ideale di Fanger, le linee sperimentali FC nelle fig. 3 e 4, formano un angolo compreso, inferiore di quelle dei box di riferimento. Considerato che la campagna sperimentale è stata condotta

secondo un sistema "passivo", senza fattori che influenzassero le grandezze campionate, all'interno dei box sono state raggiunte temperature elevate che non hanno permesso una stima del benessere, sulla base dei valori assoluti delle temperature rilevate, bensì una

stima si tendenza rispetto alle linee ideali di comfort. I benefici dei prototipi sperimentali, apportati in termini di temperature interne dell'aria interna e temperature sono rappresentati dai diagrammi sottostanti, rilevati nell'arco dell'intera giornata.

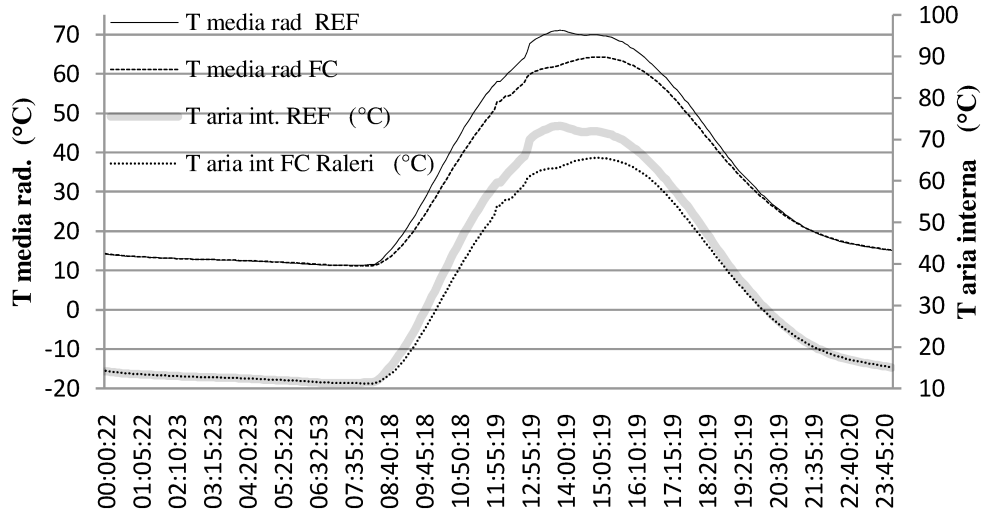


Fig. 4 Cap. 5 - Temperature medie radianti e temperature aria interna al box REF e al box FC Raleri

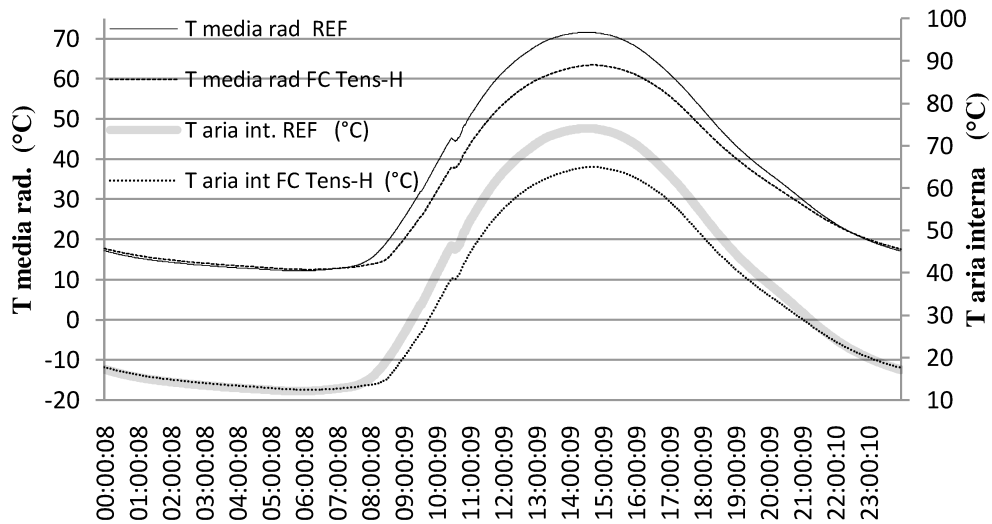


Fig. 5 Cap. 5 - Temperature medie radianti e temperature aria interna al box REF e al box FC Tens-H

I grafici in figg. 4 e 5, evidenziano che il contenimento massimo degli apporti termici dei moduli sperimentali, avviene nelle ore di massima radiazione solare. Inoltre la curve dei fotocromatici risultano più basse e più strette

delle curva prese a campione, a dimostrazione che i moduli sperimentali offrono una resistenza termica maggiore agli apporti termici solari, posticipando il riscaldamento degli ambienti interni e anticipando il

rilascio di calore nelle ore di calo termico solare. Il modulo FC Tens-H si è dimostrato più performante del "Raleri". Di seguito di

rappresenta come variano gli intervalli di comfort termico all'interno dei box rispetto alla cella del vetrocamera preso a campione.

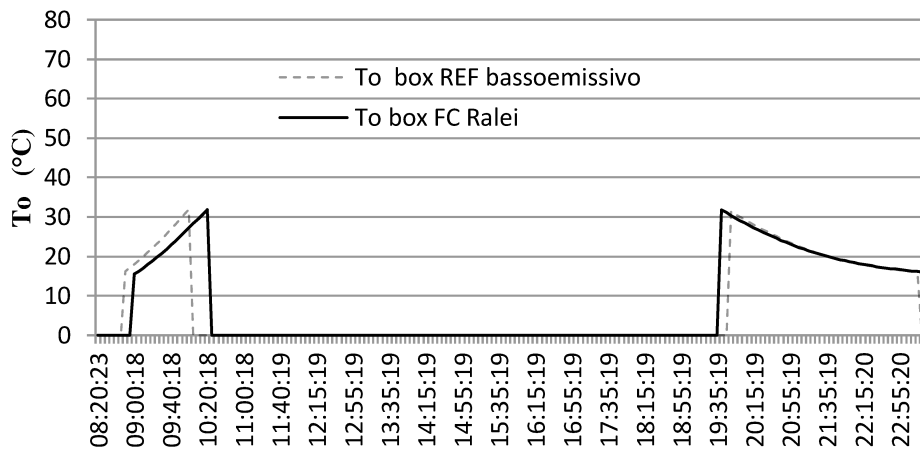


Fig. 6 Cap. 5 - Intervalli di comfort termico box REF e FC Raleri

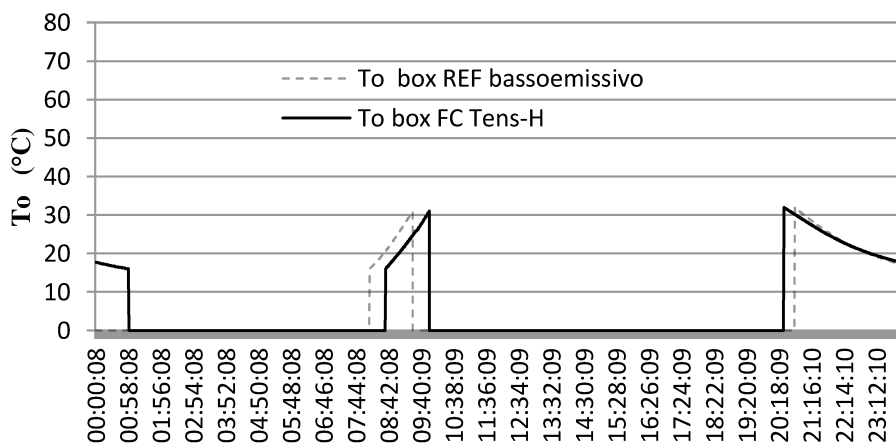


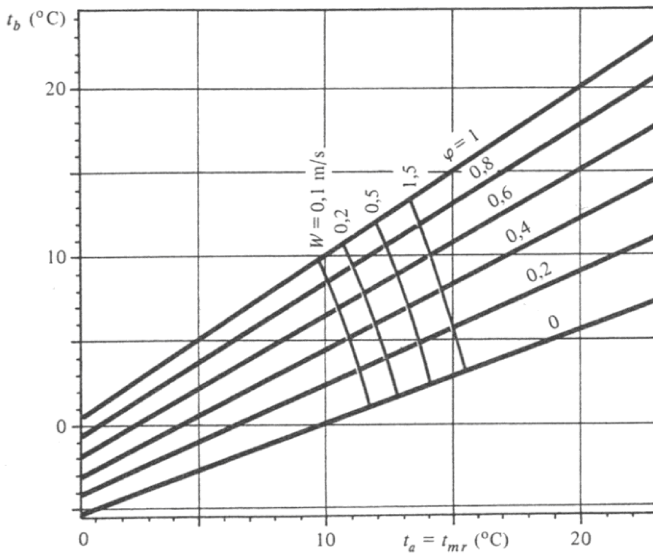
Fig. 7 Cap. 5 - Intervalli di comfort termico box REF e FC Tens-H

Il beneficio dei moduli sperimentali è rappresentato (figg. 6 e 7) dall'ampiezza degli intervalli di comfort. Nei diagrammi sono state considerate le **temperature operative To** ottenute dalla media aritmetica tra le temperature dell'aria interna e le temperature medie radianti negli intervalli di **temperatura**

**operativa To** tra **16°C** e **31 °C**. Fanger ha elaborato un secondo diagramma di benessere (riportato in fig. 5), nel quale fa variare la temperatura operativa (To), intesa come media aritmetica della temperatura dell'aria (Ta) e della temperatura radiante (T rad); in funzione della temperatura di bulbo bagnato

( $T_b$ ), legata all'**umidità relativa (U.R.)**. Gli altri parametri che vengono **fissati** sono: **M= 1 met** e **Icl = 0.5 clo**. Egli ha considerato la temperatura interna dell'aria uguale alla

temperatura media radiante delle pareti, tant'è che nel diagramma vengono riportate le temperature operative indicate come  $T_a=Tr$ .



Si può notare che, ad una certa temperatura operativa  $T_o$ , varia la temperatura del bulbo bagnato  $T_b$  al crescere dell'umidità relativa **U.R.** Quando l'umidità relativa **U.R.** è al **100%**,  $T_a=T_b$ , in quanto non c'è più raffreddamento evaporativo; mentre al diminuire della umidità relativa, cala la temperatura di bulbo bagnato. In queste condizioni, il comfort varia in funzione della velocità relativa dell'aria ( $V_a$ ).

Fig. 8 Cap. 5 - Diagramma di Fanger - M=1met, Icl =0.5 clo

Di seguito si riportano le temperature operative rilevate all'interno dei box.

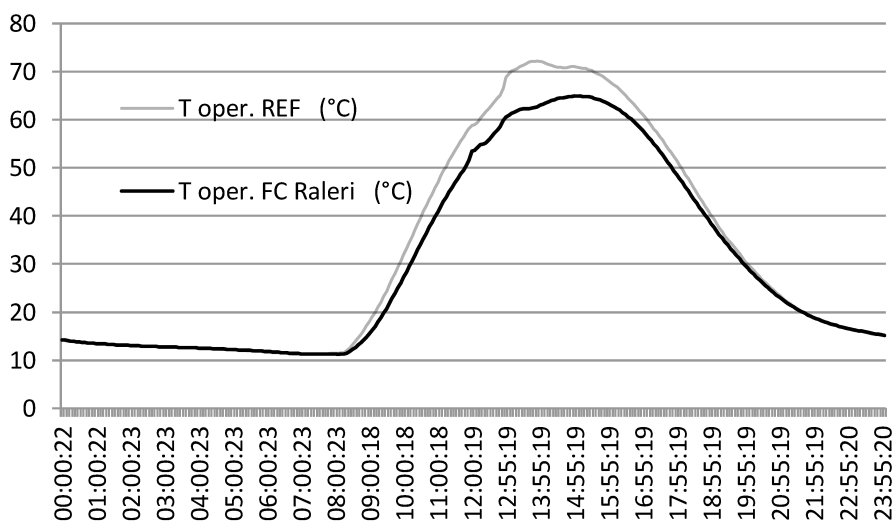


Fig. 9 Cap. 5 - Diagramma temperature operative  $T_o$  - box REF e box FC Raleri

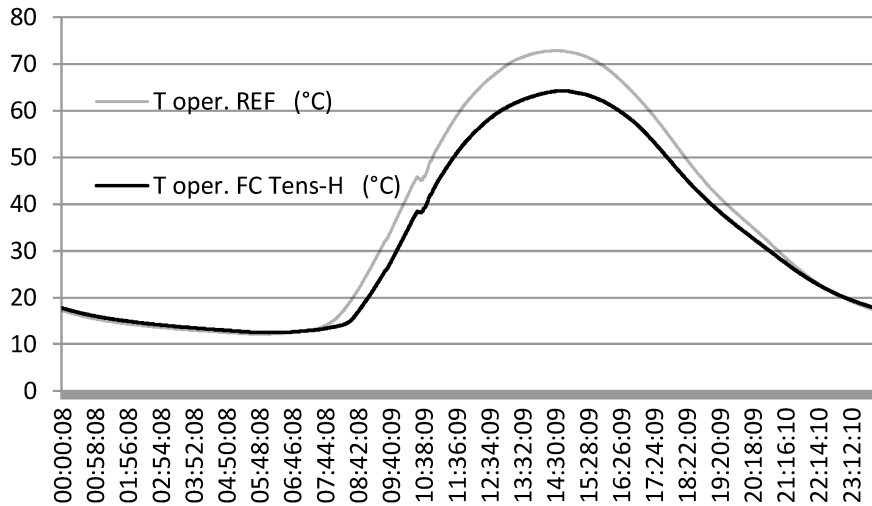


Fig. 10 Cap. 5 - Diagramma temperature operative  $T_o$  - box REF e box FC Tens-H

Nelle ore di massima radiazione, all'interno del **box sperimentale FC "Raleri"**, è stata registrata una **temperatura operativa** di **5÷9 °C inferiore** rispetto alla cella di riferimento basso-emissiva e nel **box FC "Tens-H"**, fino a 10 °C inferiore.. E' stata considerata la **temperatura media operativa  $T_o$**  nell'intervallo termico da **11 a 23 °C**. Come riferimento è stata presa la linea con **U.R.= 0.6**. La **massima prestazione** dei moduli

**fotocromatici** è stata rilevata alle ore **13:50** nel **vetro "Raleri"** e alle **14:10** nel **vetro "Tens-H"**, con differenze di temperatura operativa, rispettivamente di **9.7 °C e 8.6 °C**. Seppur ristretto ad un limitato intervallo termico, il diagramma seguente evidenzia nei box sperimentali, **temperature medie del bulbo bagnato  $T_b$**  inferiori rispetto a quelle del box campione, grazie al contenimento delle **temperature operative  $T_o$** .

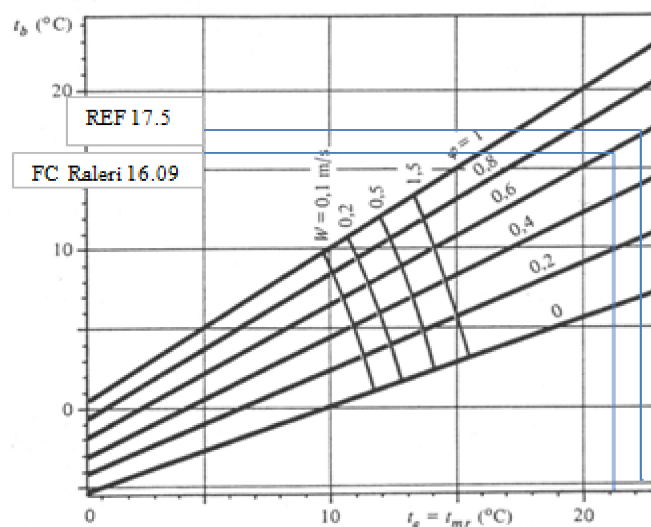


Fig. 11 Cap. 5 - Diagramma temperature operative  $T_o$  - Box REF e box FC Raleri

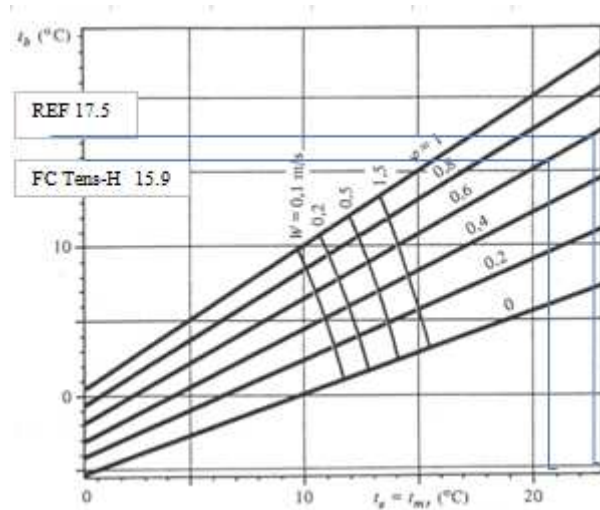


Fig. 12 Cap. 5 - Diagramma temperature operative  $T_o$  - Box **REF** e box **FC Tens-H**

Al contenimento delle temperature operative  $T_o$ , nei moduli fotocromatici corrisponde un abbassamento della temperatura del bulbo bagnato  $T_b$ . Nel box FC "Raleri" considerando le temperature operative da da 12 °C a 56 °C è stata registrata una temperatura operativa media  $T_b$  di 21.16°C rispetto ai 22.31 °C del box campione. A tale variazione corrisponde un 'abbassamento della temperatura del bulbo bagnato  $T_b$  da 17.5 °C del box REF a 16.09 °C del box FC"Raleri". Nel box FC "Tens-H" nell'intervallo di temperature operative  $T_o$  da 12 a 45 °C, è stata stimata una temperatura operativa media  $T_b$  di 21.19 °C rispetto ai

22.84 °C del box di riferimento, la quale ha ridotto il livello di temperatura del bulbo bagnato da 17.5°C a 15.9 °C.

Un altro **metodo** di valutazione del comfort termo-idrometrico è stato messo a punto dalla "**ASHRAE**" (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers), che ha proiettato il risultati di Fanger sul diagramma psicrometrico, imponendo la resistenza termica conduttiva ed evaporativa del vestiario **I<sub>cl</sub> = 1.0 clo**, il metabolismo **M=1 met** e la **velocità dell'aria <0.1 m/s**.



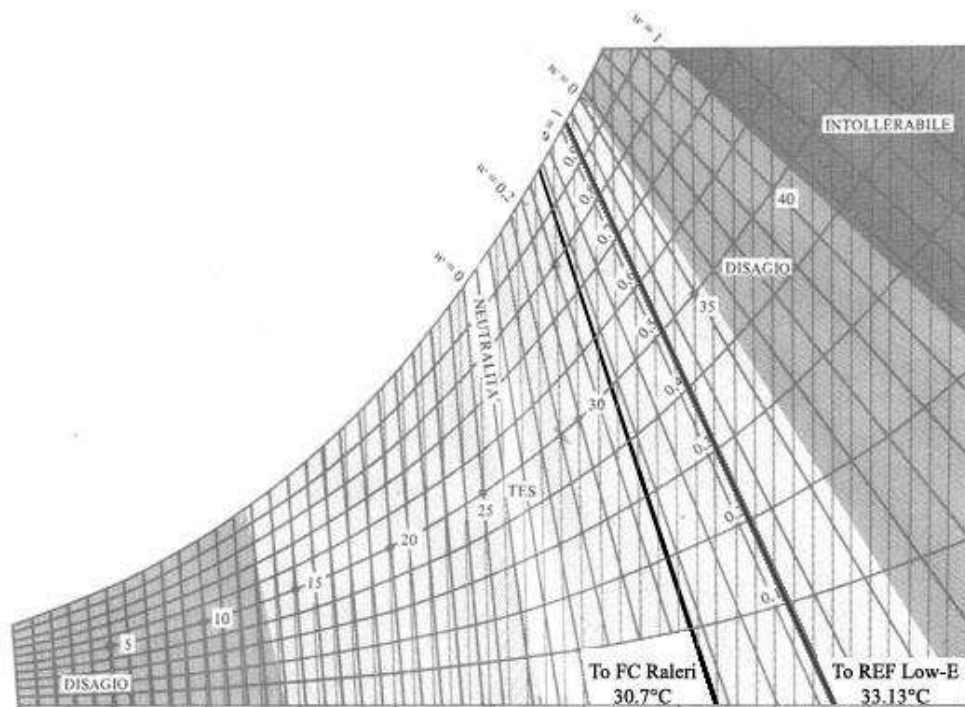


Fig. 13 Cap. 5 - Diagramma Ashrae con linee di comfort dei box di prova.

Il diagramma di Ashrae è diviso in più fasce. Al centro vi è una fascia di neutralità rappresentano lo stato di comfort che man mano diminuisce spostandosi verso le bande esterne. Ai lati vi sono le aree di disagio e sulla fascia esterna destra, l'area di intolleranza termo-igrometrica. La fascia di disagio sulla parte sinistra è relativa alla sensazione di freddo, e quella a destra la sensazione di caldo. Nelle fasi di test, i box non provvisti di sistemi di ventilazione meccanica, hanno raggiunto temperature operative molto elevate per cui, la stima secondo il metodo "Ashrae" è limitata al guadagno termo-idrometrico

corrispondente al livello massimo di comfort termo-idrometrico. Le fasce centrali generato dalla differenza delle temperature operative rilevate. In figura 7 e 8, il guadagno termo-igrometrico, va valutato in base alla prossimità delle Temperature operative medie, alla fascia di neutralità. La temperatura operativa media del **box di riferimento**, pari a 33.12°C, si avvicina all'**area di disagio**. Viceversa la linea del **box sperimentale FC "Raleri"**, rientra pienamente **nell'area di comfort**, grazie ad una temperatura operativa di 30.7 °C. Anche per il boc FC "Tens-H" è stato elaborato il **diagramma di Ashrae**.

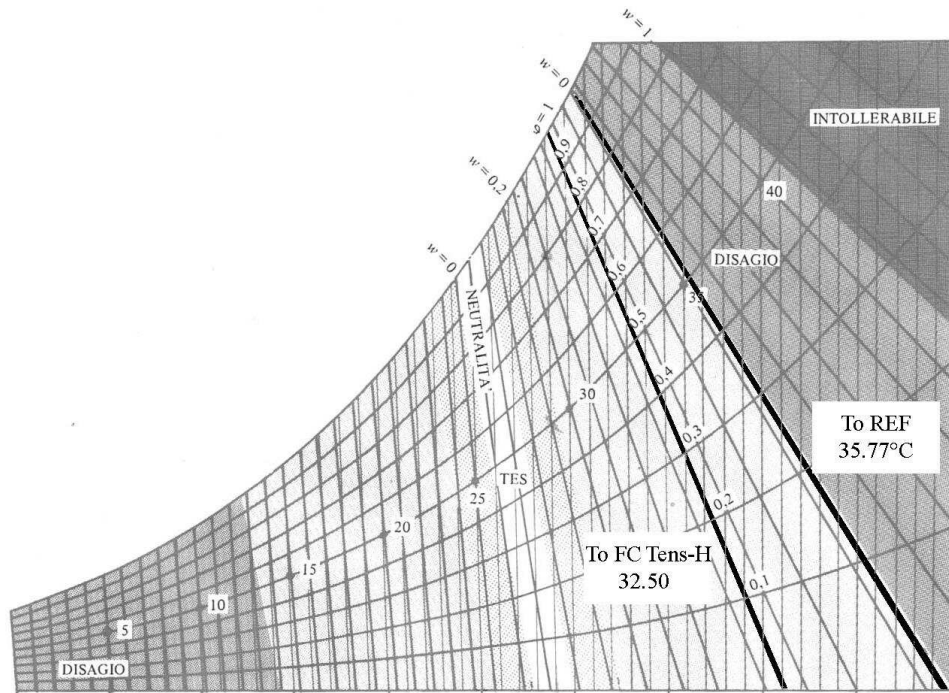


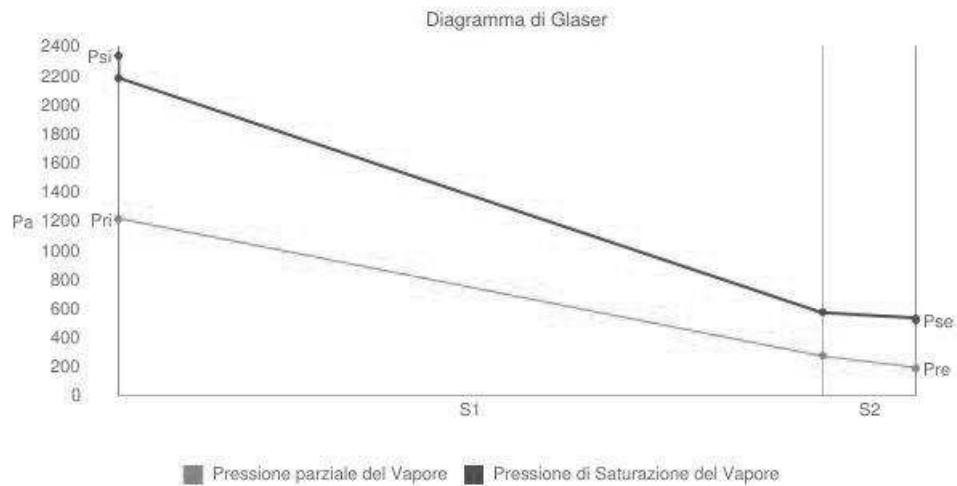
Fig. 14 Cap. 5 - Diagramma Ashrae con linee di comfort dei box di prova.

Il prototipo **FC "Tens-H"** ha mostrato una temperatura media operativa giornaliera **To** di **32.5°C**, rispetto a quella del modulo **REF** di **35.77°C**. La fig. 7, si mostra che il modulo

sperimentale, rientra in piena zona comfort mentre la linea del campione di riferimento lambisce l'area di disagio.

Una breve considerazione va fatta sulla resistenza all'appannamento dei vetri e alla formazione di condensa delle pareti opache. Per ciò che riguarda la condensa delle pareti confinanti, noti i valori di Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%

(Kg/ms Pa), massa volumetrica (Kg/m<sup>3</sup>), conduttività termica (W/m) e spessore (mm), tramite un software di calcolo è stato prodotto il diagramma si "Glasser" in fig. 8, dal quale risulta che sugli elementi opachi delle cellule non si formano fenomeni di condensa.



All'interno della parete in esame non si generano fenomeni di condensa

Fig. 15 Cap. 5 - Diagramma di "Glaser" relativo alle pareti dei box di prova.

Per quanto attiene le superfici vetrate, è importante sottolineare che i **materiali fotocromatici usati** nella ricerca rientrano, secondo la normativa **EN 166-2001**, punto 7.3.2., nella classe di materiali con **requisito**

"N" ovvero "**Resistenza all'appannamento degli oculari (0 ÷ 60 sec)**". Infatti sia il FC "Raleri che il FC "Tens-H" sono usati nel settore ottico per la produzione di maschere, visiere ed occhiali anti -fog.

## 5.4 Il benessere visivo

Il benessere visivo è funzione di molteplici fattori, alcuni dei quali già definiti in questa trattazione. La quantità netta di luce che attraversa i moduli vetrati è stata rilevata in sede di campagna sperimentale esterna, misurando il fattore di trasmissione luminosa  $\tau_v$ . In questa sezione, viene analizzata la luce in uno spettro più ampio, legato alla qualità percettiva della radiazione. La luce è una forma di energia che si trasmette per onde elettro-magnetiche e ci dà lo stimolo che genera la percezione fisica dello spazio e dei colori. La gestione della luce naturale è fondamentale per il benessere visivo e la qualità abitativa. Le lunghezze d'onda del **comfort visivo**, comprese tra **360 e 780 nm**, influenzano i foto-ricettori dell'occhio umano e quindi la percezione e lo stato d'animo. La sensibilità dell'occhio umano alle diverse lunghezze d'onda, non è la stessa, ogni lunghezza d'onda fornisce uno stimolo

diverso. Per queste ragioni, le caratteristiche fotometriche dei materiali determinano gli stimoli all'apparato visivo e influenzano lo stato di comfort e qualità abitativa. La **luce** è legata al benessere termico in quanto rappresenta ben il **42% dell'energia solare** e al benessere visivo perché ne determina la percezione visiva. Per tali ragioni, l'illuminotecnica ha studiato la risposta dell'occhio umano alle diverse lunghezze d'onda della radiazione, sia in visione diurna (visione fotopica) che in visione notturna (visione scotopica). La **CIE (Commission internationale d'Eclairage)** ha condotto uno studio su diversi individui, sia in visione fotopica che scotopica, e ha codificato la "**sensibilità media dell'occhio umano**" riportandola sul diagramma della "**curva di visibilità**". E' stato quindi definito il fattore **FVR (fattore di visibilità relativa)**.

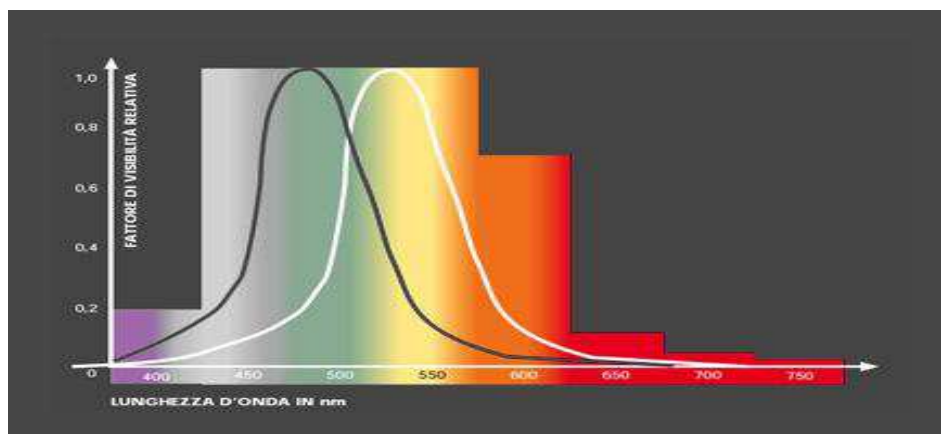


Fig. 16- Cap 5 – *Fattore di visibilità relativa* ( [www.arching.wordpress.com](http://www.arching.wordpress.com) ) [6]

Le diverse lunghezze d'onda, vengono interpretate dal cervello come colori che vanno dal rosso delle lunghezze d'onda più

ampie al violetto delle lunghezze d'onda minori [7]. Tra il rosso e il violetto si trovano, l'arancio, il giallo, il verde, il blu e l'indaco.

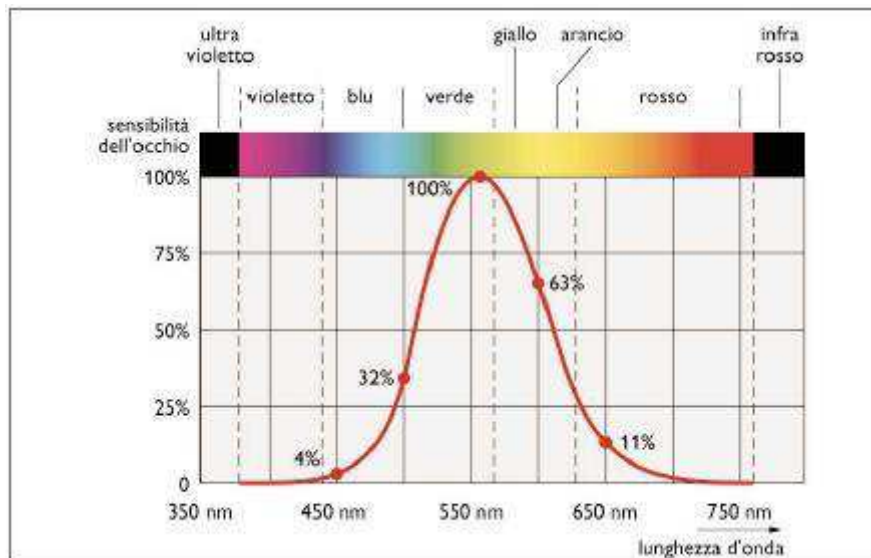


Fig. 17 Cap. 5 - Percezione cromatica dell'occhio umano alle diverse lunghezze d'onda. [8]

La **massima sensibilità dell'occhio umano** è nella zona del **giallo-verde** alla lunghezza d'onda di **555 nm**. A margine della banda visibile, percepibile all'occhio umano, si trova l'infrarosso **IR** per le basse frequenze e l'ultravioletto **UV** per le alte. Le radiazioni dell'infrarosso, seppur non visibili, sono percepite dall'uomo come sensazione di calore mentre le radiazioni **UV** provocano, per esposizione prolungata, scottature e danni permanenti al corpo. Il nostro modo di vedere, è unico in natura [8], condiviso solo dalle scimmie antropomorfe e da pochi altri animali. Esistono esseri viventi che vedono nell'ultravioletto, come le api e altri che vedono nell'infrarosso come i serpenti. La luce inoltre non influisce sul benessere umano

non solo per ragioni termiche e ottiche ma anche per ragioni sanitarie. Essa favorisce lo sviluppo di serotonina, l'ormone che dà la sensazione di benessere e piacere e riduce la concentrazione sanguinea di noradrenalina e adrenalina, ormoni responsabili dello stress. L'assenza di luce accresce la melatonina che indebolisce il sistema immunitario causando patologie nervose e depressive. Nello specifico, gli effetti della carenza di luce naturale sono di tre tipologie. Vi sono effetti fisiologici legati alla tendenza alla miopia, all'affaticamento oculare, alla cefalea, all'abbattimento percettivo e all'esaltazione dei difetti oculari; vi sono effetti psicofisiologici sull'alterazione del ritmo cardiaco e dell'orologio biologico, sull'alterazione

metabolica e sull'alterazione della pressione arteriosa; infine vi sono effetti psicologici che causano stress, depressione, SAD, instabilità e alterazione dell'equilibrio neurovegetativo. Di contro un ambiente con buona illuminazione naturale, ha effetto battericida negli ambienti, per aero-diffusione, ha effetti fisiologici legati alla stimolazione di produzione della vitamina D, ha effetti antirachitici, attiva il ricambio calcio-fosforo, ha effetto sulle attività endocrine e sul metabolismo del glucosio e aumenta le difese immunitarie. Inoltre ha effetti psicofisiologici legati al mantenimento

del corretto equilibrio dell'orologio biologico e l'alternanza veglia-riposo, nonché sull'aumento della produttività lavorativa [17]. La quantità e la qualità dell'illuminazione naturale degli ambienti, viene descritta da 3 fattori principali: il fattore **FLD** e l'illuminamento **E** e la luminanza **L**. Vi sono poi altri fattori caratterizzanti, non oggetto diretto di approfondimento di questa trattazione, che sono: l'abbagliamento, la luminanza, l'indice di resa del colore, la direzione della luce, il contrasto, e la brillantezza.

### 5.4.1 Daylighting e Fattore di luce diurna FLD

Il daylighting è un parametro funzionale che rappresenta l'uso della luce naturale per ridurre al minimo il ricorso alla luce artificiale, negli edifici. Per la sua vocazione rappresenta un parametro di etica progettuale, finalizzato al risparmio energetico e all'uso di fonti rinnovabili. E' importante poter fare un bilancio complessivo dei vantaggi prodotti dai prototipi fotocromatici con gli svantaggi dovuti al ricorso eventuale di luce artificiale. Tra i parametri fotometrici dell'illuminotecnica, la grandezza che definisce la qualità dell'ambiente illuminato in funzione della luce naturale esterna, è il **FLDm** (fattore medio di luce diurna). E' una grandezza percentuale pari al rapporto tra l'illuminamento misurato in un punto dato dell'ambiente e l'illuminamento misurato all'esterno, su una superficie orizzontale che vede l'intera volta celeste senza ostruzioni, escludendo da entrambe le misure la luce solare diretta [7]. Insieme al rapporto aero-illuminante **RA**, è uno dei 2 fattori previsti dal

Decreto Ministeriale 5 luglio 1975 che stabiliscono come garantire una corretta illuminazione e ventilazione degli ambienti. Il rapporto **RA** è direttamente legato alla ventilazione naturale e poco c'entra con la qualità dell'illuminazione naturale. A tale scopo è stato appunto definito il fattore **FLDm** che tiene conto oltre che alle caratteristiche geometriche delle finestre, anche della posizione, della quantità e della forma delle finestre, della direzione della radiazione solare, del tipo di superfici dell'involucro, dei colori, dei materiali e della scabrezza delle pareti. Il **Decreto Min. Sanità 5/7/75**, il **Decreto Min. 18/12/75** e la **Circ. Min. Lavori Pubblici n.13011, 22/11/74**, in ambito di edilizia residenziale, scolastica ed ospedaliera, definiscono dei valori medi di riferimento del **FLDm**, in relazione alle destinazioni d'uso dei locali. Sono stabiliti dei **FLDm** minimi oltre i quali non sono verificate le condizioni minime di illuminazione naturale.

FLDm < 1%	insufficiente
1% < FLDm < 2%	discreto
2% < FLDm < 4%	buono
FLDm > 4%	ottimo

Tab. n.2 Cap. 5 - Valori di riferimento dei FMLD

Per i locali residenziali, il **FLDm** minimo è del 2%. Contrariamente a quanto si possa immaginare sono pochi, in realtà, i locali residenziali dove si raggiungono livelli del 2%, a causa spesso di coperture, pensiline, elementi esterni di disturbo, posizione errata delle aperture ecc.. Per valori del fattore di luce diurna inferiori all'1%, si è in presenza di locali scarsamente illuminati mentre per valori superiori al 12% si è in ambienti molto luminosi. Non sempre per valori molto alti del **FLDm** si è in condizioni di benessere visivo in quanto potrebbero verificarsi fenomeni di abbagliamento o direzione dell'illuminazione sgradevoli per le attività svolte. In sostanza si è in stato di comfort visivo quando nell'ambiente vi è un adeguato livello di luce naturale, vengono percepiti colori appropriati, non si generano fenomeni di abbagliamento e le direzioni della radiazione risultano gradevoli per i lavori svolti. Il **FLDm** è importante soprattutto per la progettazione degli ambienti che richiedono elevati consumi energetici per l'illuminazione naturale, come scuole, ospedali, uffici, centri commerciali, studi tecnici ecc..E' ormai prassi considerare il fattore luce diurna di primaria importanza anche nell'edilizia residenziale e non solo per ragioni di benessere ma anche per fattori estetici. La luce naturale non può essere sostituita dalla luce artificiale. La luce naturale ha un rendimento maggiore nella percezione del colore e nelle variazioni nel tempo del colore, offre inoltre un contrasto e

una luminanza delle superfici che nessuna luce artificiale può sostituire. E' importante sottolineare che il comfort visivo è legato all'attività svolta dagli utenti all'interno dello spazio abitato. I progettisti cercano di creare ambienti luminosi, gradevoli e non affaticanti tramite una soddisfacente resa cromatica delle tinte, una buona resa del contrasto, un adeguato illuminamento degli ambienti, una corretta distribuzione delle luminanze, il contenimento dell'abbagliamento e la scelta del colore di luce [9], ogni ambiente richiede una attenta analisi che conduca alla giusta progettualità luminosa. Sebbene la genesi del **FLDm** siano i luoghi di lavoro, è ormai estesa e consolidata la sua valenza anche in ambito residenziali, sia per ragioni tecniche che estetiche. Nell'ambito residenziale, la luce costituisce un elemento molto soggettivo ma è fondamentale progettare spazi che consentano una adeguata illuminazione naturale secondo gli standard medi dettati dal **FLDm**, spazi ove la luce non provochi fastidio agli occhi e non crei abbagliamento. La luce negli ambienti di lavoro è determinante. Essa deve consentire il regolare svolgimento delle funzioni svolte dagli addetti in ogni momento e in ogni periodo dell'anno. E' importante che la fonte naturale sia sfruttata il più possibile per ridurre l'apporto di illuminazione artificiale. La luce non ha effetti solo sul benessere fisico ma anche sulle attività mentali. infatti aumenta lo stimolo lavorativo e la concentrazione, ritardando l'insorgere della



stanchezza. Da una zona mal illuminata ad una zona ben illuminata, l'attività intellettuale può progredire del 9%, l'attenzione del 15% e la velocità di calcolo del 5%. Generalmente, e in particolare negli ambienti di lavoro, i principali parametri che definiscono i requisiti e gli standard di illuminazione sono: l'illuminanza **E** e il **FLD**. Il calcolo del fattore medio luce diurna è alla base del progetto di illuminazione naturale [12]; esso permette di garantire l'illuminazione ottimale nei locali e valutare la capacità di ottenere condizioni di illuminazione naturale confortevole negli edifici. Il calcolo viene definito nelle condizioni più sfavorevoli, quindi in caso di cielo coperto ovvero quando le condizioni di illuminazione naturali sono al minimo. Il **FLD** è il rapporto percentuale tra l'illuminazione esterna senza ostruzioni, in condizioni di cielo coperto e quella interna misurate sul piano orizzontale. Siccome tale rapporto deve essere costante e non deve dipendere dall'ora, dal giorno e dal periodo dell'anno, né dall'orientamento del locale, si fa riferimento ad un valore medio. Il fattore di luce diurna medio **FLD<sub>m</sub>**. Il **valore minimo** richiesto dalla normativa è  $\geq 2\%$ . Il calcolo preventivo in ambienti chiusi è funzione di tre elementi: 1) l'apporto di luce naturale esterna (volta celeste, sole); 2) l'apporto di luce dovuto alle riflessioni superficiali di elementi esterni; 3) l'apporto di luce dovuto alle riflessioni degli elementi presenti nell'ambiente interno. Vi sono 2 metodi di

calcolo: il metodo della scuola italiana-mediterranea redatto secondo la norma **UNI 10840:2000** e il metodo anglosassone. Il secondo metodo risulta più complesso del metodo mediterraneo in quanto non ragiona solo in termini quantitativi ma anche qualitativi e scompone il fattore in tre componenti: 1) il fattore cielo **SC (Sky Component)**; 2) il fattore di riflessione esterna **ERC (Externally Reflected Component)** e 3) il fattore di riflessione interna **IRC (Internally Reflected Component)**. Nel nostro caso è stato fatto il calcolo preventivo del fattore medio di luce diurna **FLD<sub>m</sub>** con il metodo "semplificato" (NTR Emilia Romagna 1984 e Circolare Ministero LL. PP. n.3151/22/5/1967) inserendo in luogo del coefficiente di trasparenza del vetro  $\tau_i$ , il fattore di trasmissione luminosa rilevato sperimentalmente. Successivamente è stato rilevato il fattore medio di luce diurna attraverso un software di calcolo (**Velux**) ed è stato possibile elaborare la distribuzione spaziale del coefficiente nell'ambiente confinato interno.

Il fattore medio di luce diurna indicato anche con  $\eta$  è il rapporto  $\eta = E_i/E_e * 100$ , con **E<sub>i</sub>**, **illuminanza interna** in lux ed **E<sub>e</sub>**, **illuminanza esterna** in lux. Il suo valore è determinato tramite la seguente equazione:

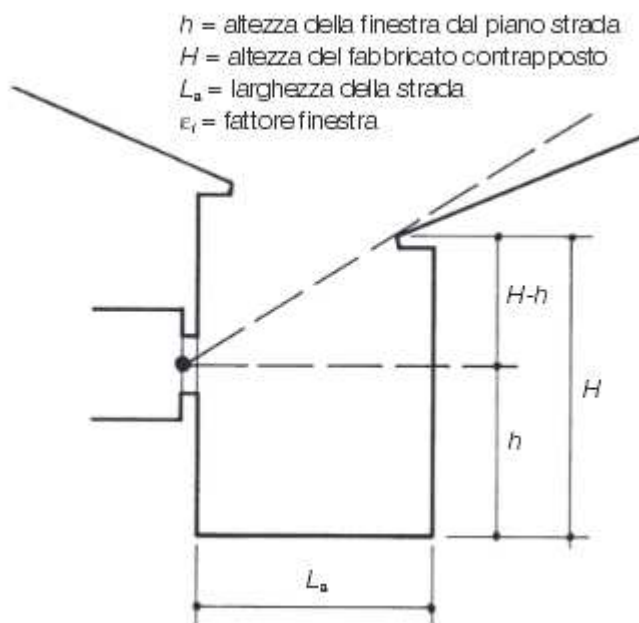
$$FLD_m = \frac{t \times A \times \epsilon \times \psi}{S \times (1 - r_m)}$$

Dove  $t$  è il coefficiente di trasparenza del vetro (fattore di trasmissione luminosa),  $A$  è l'area della superficie vetrata esposta,  $\epsilon$  è il fattore finestra,  $\psi$  è il coefficiente di riduzione del fattore finestra,  $S$  è l'area delle superfici interne dell'ambiente (compresa la superficie vetrata) e  $r_m$  è il coefficiente medio di rinvio. Di seguito si definiscono le singole grandezze per i campioni di prova analizzati: Come anticipato per i valori coefficiente di trasparenza del vetro vengono assunti i dati relativi al fattore di trasmissione luminosa  $\tau_v$ , rilevati in sede di campagna sperimentale:

$\tau_v$  REF= 77.31%

$\tau_v$  FC "Tens-H"= 45.82%

$\tau_v$  FC "Raleri" = 56.67%



L'area della superficie vetrata  $A$ , va considerata al netto dei montanti e delle traverse presenti nel serramento. Visto che i box di prova hanno tutti la stessa superficie vetrata e sono privi di montanti e traverse, il valore della superficie vetrata, è  $A = 0.25m \times 0.25m = 0.25 m^2$ . Il fattore finestra  $\epsilon$ , corrispondente al rapporto tra l'illuminamento della finestra e la radianza del cielo, tiene conto della posizione della finestra e delle ostruzioni. Il suo valore per finestre prive di ostruzioni, è individuato sull'asse delle ascisse del grafico in **fig. 19** in base al rapporto  $H-h/L_a$  (**fig. 18**).

Nel caso di specie, i box di prova sono stati orientati perpendicolarmente alla radiazione incidente, senza ostruzione alcuna, per cui, facendo riferimento allo schema a fianco, la distanza della strada  $L_a$ , risulta illimitata e la differenza tra il minuendo  $H$  e il sottraendo  $h$ , è nulla. Nullo è quindi il rapporto  $H-h/L_a$ .

Fig. 18 Cap. 5 - Schema per la determinazione del fattore finestra  $\epsilon$ . [13]

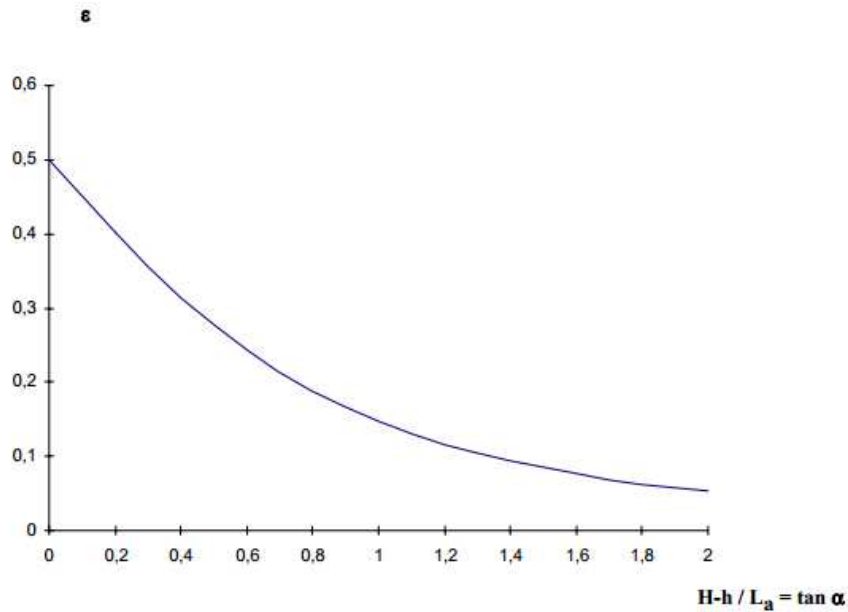


Fig. 19 Cap. 5 - Grafico del fattore finestra in funzione del rapporto  $(H-h/L_a)$  . [12]

Per un valore del rapporto  $(H-h/L_a)=0$ , si ottiene un fattore finestra  $\epsilon = 0.5$

In alternativa al metodo visto,  $\epsilon$  può essere calcolato con la seguente formula: 
$$\epsilon = \frac{1 - \sin \alpha}{2}$$

dove  $\alpha$  è l'angolo  $\alpha$  è quello riportato in figura 20. Considerato ancora una volta che non sono presenti ostruzioni prospicienti l'area vetrata dei box., l'angolo  $\alpha$ , nel caso di specie, risulta 0. Anche con questo metodo di calcolo, il coefficiente di riduzione del fattore finestra risulta nullo, infatti  $\epsilon=(1-0)/2=0.5$ .

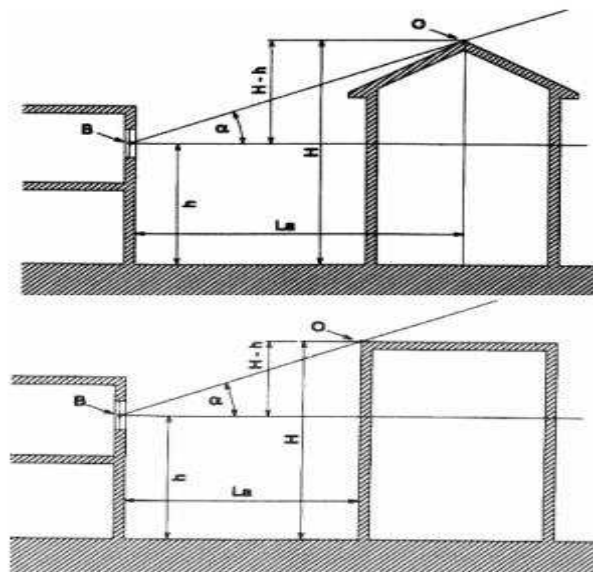


Fig. 20 Cap. 5 - Schema di determinazione angolo  $\alpha$

Per quanto riguarda il fattore di riduzione  $\psi$ , che tiene conto della posizione del piano della finestra rispetto al filo esterno della facciata, devono essere definiti preliminarmente i rapporti  $h/p$  e  $L/p$ , indicati in fig. 21 che variano da un **minimo** di **0.2** ad un **massimo** di **0.98**.

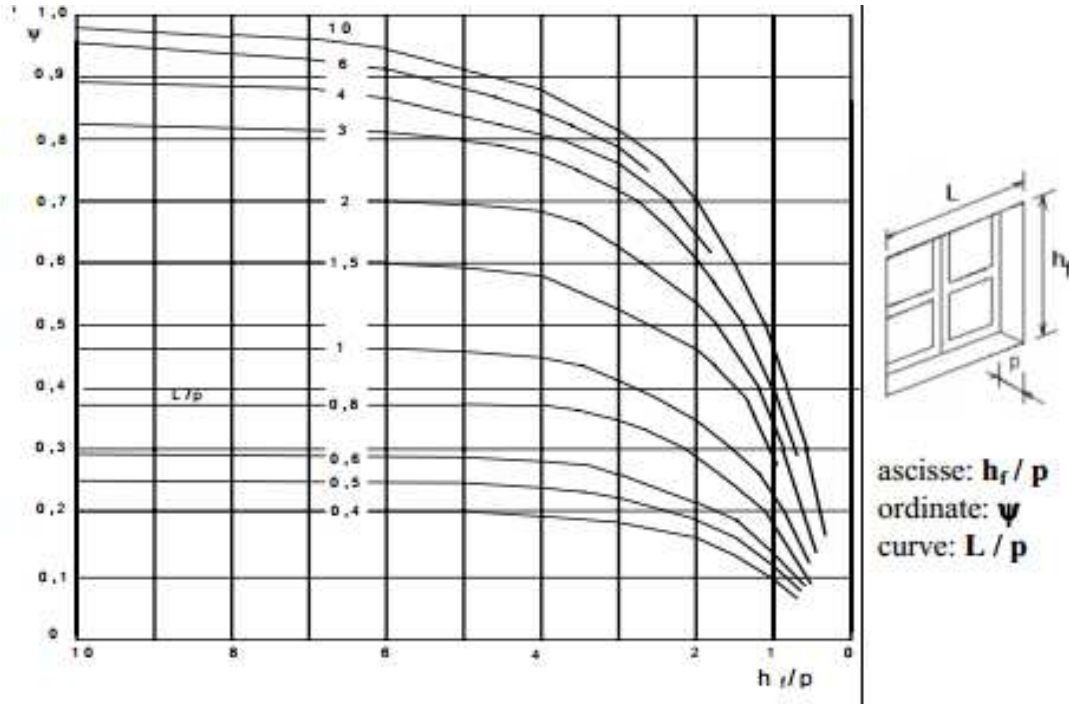


Fig. 21 Cap. 5 - Curve del fattore di riduzione  $\psi$  in funzione dei rapporti  $h_f/p$  e  $L/p$

Nel caso delle test-cells di prova la larghezza della finestra  $L=0.5\text{m}$  e l'altezza  $h_f=0.5\text{m}$  mentre la superficie vetrata è posta ad una distanza  $p=0.012\text{ m}$  dalla facciata. In definitiva le finestre sperimentali hanno un rapporto  $h_f/p=0.5/0.012= 41.6$  e un rapporto  $L/p=0.5/0.012=41.6$ . Per valori dei rapporti appena calcolati, superiori a 10, si considerano i valori a cui tendono delle curva  $L/p$ . Nel caso specifico si scelgono entrambi i rapporti di valore 10 per cui, come si può notare sul grafico, la curva tende al valore massimo del fattore di riduzione  $\psi =0.98$ . L'area delle superfici che delimitano l'ambiente interno  $S$  è la somma delle superfici interne al box, comprese le finestre. Nel caso specifico  $S= 0.25\text{ m}^2$  (vetro) +  $3.55\text{ m}^2$  (pareti opache)=  $3.80\text{ m}^2$ . L'ultimo

termine da rilevare è il coefficiente medio di rinvio o fattore medio di riflessione luminosa delle superfici interne  $r_m$ , che delimitano l'ambiente. Tale coefficiente varia da 0,8 per superfici bianche riflettenti a 0,1 per superfici molto scure. Il fattore viene calcolato come la media pesata dei fattori di riflessione luminosa delle singole superfici interne:

$$r_m = \frac{\sum_i S_i r_i}{\sum_i S_i} \quad (4)$$

Nel nostro studio il coefficiente medio di rinvio  $r_m$ , sarà dato dalla media ponderata del coefficiente di riflessione delle pareti interne dei box  $r_i$  (walls) per la relativa superficie interna e del coefficiente di riflessione  $r_i$  (glass) della finestra

per la sua superficie vetrata. Per la determinazione del coefficiente di riflessione  $R_i$  (walls), delle pareti in EPS si fa riferimento alle tabelle di seguito riportate:

colore	r	colore	r
bianco	0.90 ÷ 0.75	blu scuro	0.10 ÷ 0.05
avorio	0.85 ÷ 0.80	verde scuro	0.10 ÷ 0.05
crema	0.80 ÷ 0.70	marrone	0.15 ÷ 0.05
giallo chiaro	0.70 ÷ 0.60	rosso scuro	0.10 ÷ 0.05
rosa	0.60 ÷ 0.45	grigio chiaro	0.40 ÷ 0.15
arancio	0.60 ÷ 0.40	grigio scuro	0.15 ÷ 0.05
verde chiaro	0.50 ÷ 0.40	nero	0.04 ÷ 0.01
azzurro chiaro	0.45 ÷ 0.40		

Nella tabella a fianco, sono indicati i valori del fattore di riflessione luminosa in funzione dei colori delle superfici. Nel nostro caso le superfici interne dei box, sono in polistirene EPS bianco per cui si considera un valore  $R_i$  medio tra 0.9 e 0.75. Si sceglie  $R_{i \text{ walls } 1/2} = 0.82$ .

Tab. n.3 Cap. 5 - Valori coefficiente riflessione  $R_i$  in base ai colori [15]

Oltre alla tab. n.3, si considera il valore della riflessione luminosa  $R_i$ , riportato nella tabella a fianco. In questo caso il valore più prossimo alla superficie del polistirene bianco è quello dell'intonaco bianco  $R_{i \text{ walls } 2/2} = 0.80$ . Dei 2 valori ottenuti, si sceglie il valore medio:

$$R_{m \text{ (walls)}} = (0.82+0.80)/2=0.81$$

Materiale e natura della superficie	Fattore di riflessione luminosa
Intonaco comune bianco recente o carta	0,8
Intonaco comune o carta di colore molto chiaro (avorio, giallo, grigio)	0,7
Intonaco comune o carta di colore chiaro (avorio, rosa chiaro)	0,6 ÷ 0,5
Intonaco comune o carta di colore medio (verde chiaro, azzurro chiaro)	0,5 ÷ 0,3
Intonaco comune o carta di colore scuro (verde oliva, rosso)	0,3 ÷ 0,1
Mattone chiaro	0,4
Mattone scuro, cemento grezzo, legno scuro, pavimenti di tinta scura	0,2
Pavimenti di tinta chiara	0,6 ÷ 0,4
Alluminio	0,8 ÷ 0,9

Tab. n.4 Cap. 5 - Valori coefficiente riflessione  $R_i$  in base ai colori [15]

Per il coefficiente di riflessione delle superfici trasparenti  $R_i$  (glass), considerando che sulle parti interne di tutti i moduli sono applicati i vetri basso-emissivi, e che l'andamento dei valori della riflessione dei campioni è influenzato prevalentemente dalla lastra

esterna, anche se vi sono variazioni dell'andamento dovute alla presenza della lastra interna [14], si assume un coefficiente di riflessione della superficie vetrata, pari al valore fornito dalla scheda tecnica del vetro basso-emissivo:  $R_{i \text{ glass}} = 0.12$ .

Noti i coefficienti di riflessione degli elementi opachi e trasparenti, si procede al calcolo del coefficiente medio di rinvio  $r_m$ .

$$r_m = (0.25 \text{ m}^2 * 0.12 + 3.55 \text{ m}^2 * 0.81) / (0.25 + 3.55) \text{ m}^2 = 0.76$$

Definiti tutti i termini dell'equazione si procede con il calcolo dei fattori medio di lune diurna per ogni singolo box di prova:

$$\text{FLDm REF} = 0.77 * 0.25 \text{ m}^2 * 0.5 * 0.98 / 3.8 \text{ m}^2 * (1 - 0.76) = 0.1$$

$$\text{FLDm FC "Raleri"} = 0.57 * 0.25 \text{ m}^2 * 0.5 * 0.98 / 3.8 \text{ m}^2 * (1 - 0.76) = 0.08$$

$$\text{FLDm FC "Tens-H"} = 0.46 * 0.25 \text{ m}^2 * 0.5 * 0.98 / 3.8 \text{ m}^2 * (1 - 0.76) = 0.06$$

se si considera un fattore di correzione per condizioni di pulizia del vetro G, i dati subiscono una leggera variazione. Dalla tabella seguente, si ricava il fattore G.

Ubicazione dell'edificio	Giacitura della finestra	Attività	
		Non industriale o industriale pulito	Industriale sporco
Area non industriale	Verticale	0,9	0,8
"	Inclinata	0,8	0,7
"	Orizzontale	0,7	0,6
Area industriale	Verticale	0,8	0,7
"	Inclinata	0,7	0,6
"	Orizzontale	0,6	0,5

Tab. n.5 Cap. 5 - Valori del coefficiente di correzione per condizioni di pulizia [16]

Considerando le superfici vetrate dei moduli, inclinate e l'ubicazione dell'Università in zona "non industriale -pulita", si prende il valore  $G = 0.8$ . Si avranno quindi i seguenti dati:

$$\text{FLDm REF} = 0.1 * 0.8 = 0.08$$

$$\text{FLDm FC "Raleri"} = 0.08 * 0.8 = 0.064$$

$$\text{FLDm FC "Tens-H"} = 0.06 * 0.8 = 0.048$$

I valori del **FLDm** calcolati, sono valori medi rilevati con la superficie vetrata perpendicolare alla radiazione incidente, all'ora del mezzogiorno solare e considerato un campo luminoso perfettamente diffuso all'interno, ovvero uguale in tutti i punti. E' come se si trattasse di lucernari perfettamente perpendicolari alla radiazione.

In realtà se si considerano delle comuni finestre verticali, il fattore finestra  $\epsilon$ , deve essere corretto. Applicando la formula:  $\epsilon = (1 - \text{sen}\alpha)/2$ , la correzione dovuta, riguarda l'angolo  $\alpha$ , formato dalla posizione della volta celeste con l'asse baricentrico del vetro. Nel nostro caso viene considerato l'angolo zenitale o angolo di incidenza formato dalla radiazione solare incidente sulla finestra

verticale, nei giorni di test, al mezzogiorno solare. Quindi per il ricalcolo dei fattori  $\epsilon$  si devono verificare gli **angoli di incidenza  $\alpha$** . I rilievi del fattore di trasmissione luminosa dei moduli sono stati condotti l'**8 marzo 2017**, quando, al mezzogiorno solare si aveva una elevazione solare o angolo zenitale  $\alpha = 41.52^\circ$ .

Il fattore finestra  $\epsilon$ , dei moduli è:

$$\epsilon = (1 - \text{sen } 41.52)/2 = (1 - 0.66)/2 = 0.17.$$

I dati relativi al modulo FC "Tens-H" sono stati campionati il giorno 8 giugno 2017, quando si aveva un angolo zenitale  $\alpha = 69.24^\circ$ . Ricalcolando il fattore finestra, si

ottiene:  $\epsilon = (1 - \text{sen } 69.24)/2 = (1 - 0.93)/2 = 0.03$ .

Alla luce del nuovo fattore  $\epsilon$ , si ricavano i valori del **FLDm**:

$$\text{FLDm REF} = 0.77 * 0.25 \text{ m}^2 * 0.17 * 0.98 / 3.8 \text{ m}^2 * (1 - 0.76) = 0.035$$

$$\text{FLDm FC "Raleri"} = 0.57 * 0.25 \text{ m}^2 * 0.17 * 0.98 / 3.8 \text{ m}^2 * (1 - 0.76) = 0.026$$

$$\text{FLDm FC "Tens-H"} = 0.46 * 0.25 \text{ m}^2 * 0.17 * 0.98 / 3.8 \text{ m}^2 * (1 - 0.76) = 0.021$$

Se si confrontano i dati ottenuti, con i valori di riferimento della tab. n.2, risulta che tutti e **3 i moduli** rientrano nella classe degli ambienti con "**illuminazione discreta**", con **FLDm 2÷4**. Di seguito, in tabella 6 si riportano i valori di riferimento per l'edilizia scolastica indicati dalla norma **UNI 10840:2000**, e in tab. 7 i valori di riferimento generali. Nei casi in cui non viene raggiunto il

FLDm indicato dalla norma, si ricorre all'illuminazione artificiale. E' bene ricordare che i valori calcolati sono riferiti all'illuminazione media diffusa in modo ideale, uniforme all'interno dell'ambiente. In realtà nelle zone prossime alle superfici vetrate si avranno valori del FLD più alti rispetto alle zone via, via più distanti ove si avranno valori gradualmente decrescenti.

Tipo di ambiente, di compito visivo o di attività	$\eta_m$ (%)
<b>Asili nido e asili d'infanzia</b>	
Aule giochi	≥ 5
Nido	≥ 5
Aule lavori artigianali	≥ 3
<b>Edifici scolastici</b>	
Aule in scuole medie superiori	≥ 3
Aule in scuole serali e per adulti	-
Sale di lettura	≥ 3
Lavagna	-
Tavolo per dimostrazioni	-
Aule educazione artistica	≥ 3
Aule educazione artistica in scuole d'arte	≥ 3
Aule per disegno tecnico	≥ 3
Aule di educazione tecnica e laboratori	≥ 3
Aule lavori artigianali	≥ 3
Laboratori di insegnamento	≥ 3
Aule di musica	≥ 3
Laboratori di informatica	≥ 3
Laboratori linguistici	≥ 3
Aule di preparazione e officine	≥ 3
Ingressi	≥ 1
Aree di circolazione e corridoi	≥ 1
Scale	≥ 1
Aule comuni e Aula Magna	≥ 2
Sale professori	≥ 2
Biblioteca: scaffali	-
Biblioteca: area di lettura	≥ 3
Magazzini materiale didattico	≥ 1
Palazzetti, palestre e piscine	≥ 2
Mensa	≥ 2
Cucina	≥ 1
Bagni	≥ 1

Tab. 6 Cap. 5 - FLDm UNI 10840:2000 – D.M. 18/02/1975  
in ambienti scolastici

ambito	$F_{mld}$
locali di residenza	0,02
palestre, refettori	0,02
uffici, scale, servizi igienici, spogliatoi	0,01
aule, laboratori	0,03
ambienti di degenza	0,03
ambulatori, ambienti per la diagnostica	0,03

Tab. 7 Cap. 5 Valori di riferimento FLD [15]

Oltre ai valori FLDm generici riportati in tab. 7, in ambienti ospedalieri sono previsti i valori della tabella che segue, disposti con Circolare int. 13011 del 22/11/74.

<b>Ambienti ospedalieri (Circ. 13011 22/11/74)</b>
• Ambienti di degenza, diagnostica, laboratori: <b>3%</b>
• Palestre, refettori: <b>2%</b>
• Uffici, spazi per la distribuzione, scale: <b>1%</b>

Tab. 8 Cap. 5 FLD in ambienti ospedalieri[17]

Per l'edilizia residenziale è previsto secondo il D.M. 05/07/75, un fattore di luce diurna FLDm= 2 più un fattore di aero-illuminazione pari a 1/8. L'edilizia scolastica prevede i valori di FLDm riportati nella tabella a sinistra, definiti dalla norma UNI 10840:2000 e dal D.M. 18/02/75.

Per poter esaminare come sia distribuito il fattore di luminosità diurna FLD, all'interno di uno spazio abitato, si è ricorso all'uso di un **software di calcolo** in grado di restituire una **mappatura completa** dei valori **FLD**, punto per punto. Nel caso specifico ci si è serviti del VELUX Daylight Visualizer che è uno strumento professionale di simulazione dell'illuminazione e di analisi dell'illuminazione giornaliera degli edifici. Per semplificare il calcolo è stato scelto di valutare i fattori illuminotecnici in **4 periodi specifici** dell'anno: il 21 marzo (**equinozio di primavera**), il 21 giugno (**solstizio d'estate**), il 21 settembre (**equinozio d'autunno**) e il 21 dicembre (**solstizio d'inverno**).



Nell'ambito dei 4 giorno scelti, sono stati verificati i valori nell'arco dell'intera giornata. L'analisi, se confrontata con i valori normati, può dare indicazioni relativamente agli scompensi luminosi che si generano con l'istallazione dei prototipi FC, creando l'esigenza di ricorrere alla luce artificiale. L'ambiente di studio è stato scelto considerando una stanza "tipo" ad uso residenziale/commerciale, delle **dimensioni** di **4m x 4m x 4m** avente una **apertura** finestrata di **4 m<sup>2</sup>**, al fine di garantire un **rapporto aeroilluminante RI, doppio del minimo richiesto** dalla normativa (1/8). L'ambiente è lo sviluppo in scala dei box di prova e ha gli stessi componenti costruttivi. Quindi sono state considerate pareti con superfici esterne in legno "OSB" debitamente

impermeabilizzate con 2 strati di guaina a base acrilica, in dispersione acquosa e 1 strato di impregnante idropellente protettivo contro gli agenti biologici e strati interni composti da pannelli isolanti di polistirene espanso (EPS) - densità pari a 30 kg / m<sup>3</sup>. L'ambiente considerato ha una sola apertura, sede della finestra, in scala 4:1 rispetto alla cella di prova. La finestra, 2m x 2m, orientata a sud, è priva di montanti e di traverse ed all'esterno della superficie vetrata non sono presenti aggetti od ostruzioni alcune. Per il **vetro** sono stati adottati i valori sperimentali di **T<sub>v</sub>**:

$$\tau_v \text{ FC "Raleri" } = 56.67\%$$

$$\tau_v \text{ FC "Tens-H" } = 45.82\%$$

$$\tau_v \text{ REF} = 77.31\%$$

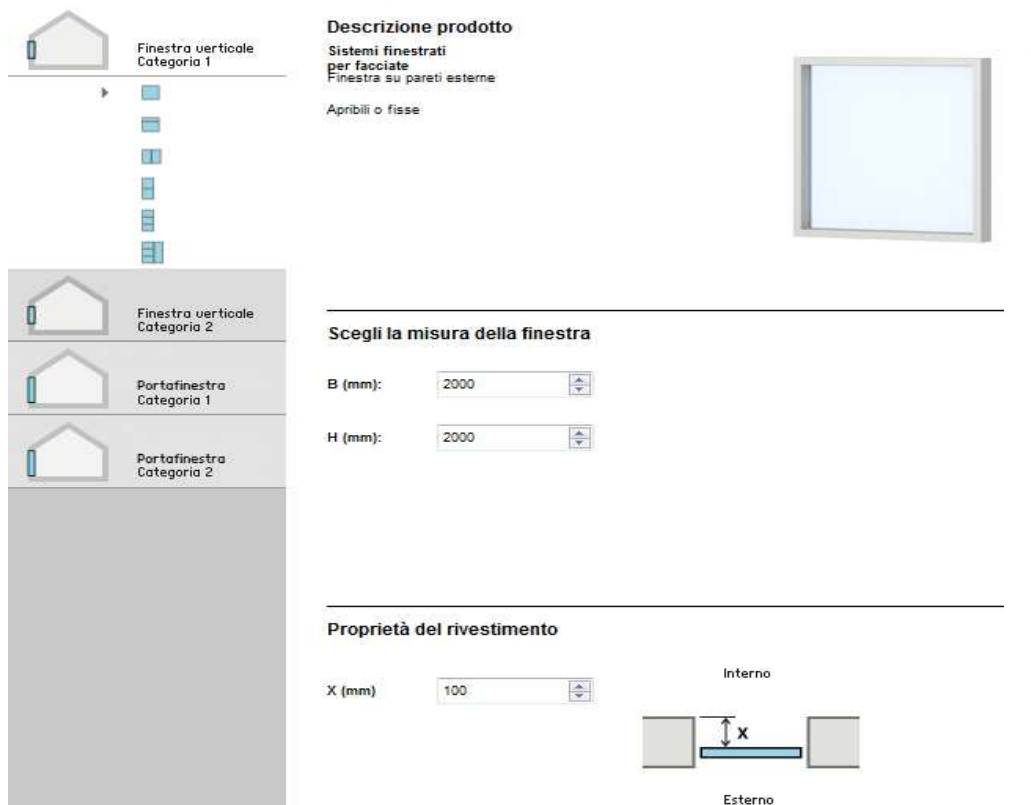


Fig. 22 Cap. 5 - Caratteristiche geometriche dell'apertura, sede della finestra

Come **fattore di riflessione luminosa delle pareti** delimitanti è stato usato lo stesso coefficiente trovato per il calcolo del FLDm: **rp = 0.81**. Il soffitto e il pavimento sono stati considerati alla stregua della pareti laterali

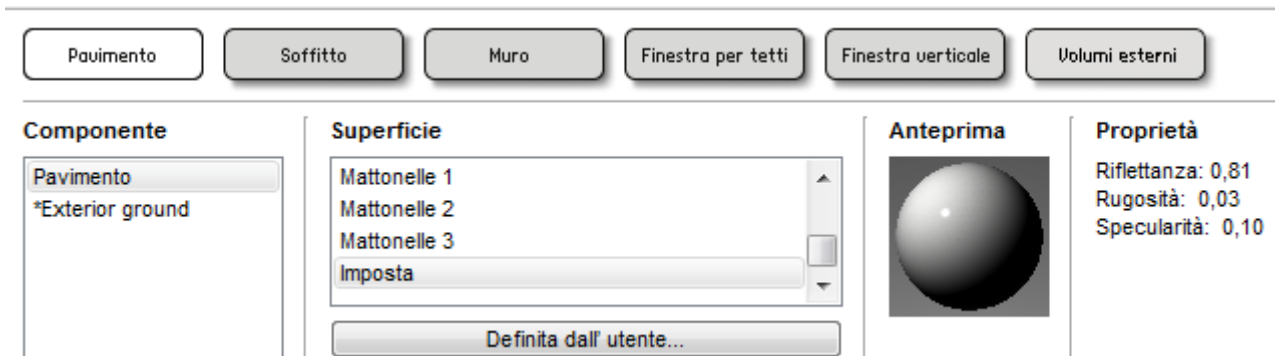


Fig. 23 Cap. 5 - Caratteristiche ottiche del pavimento

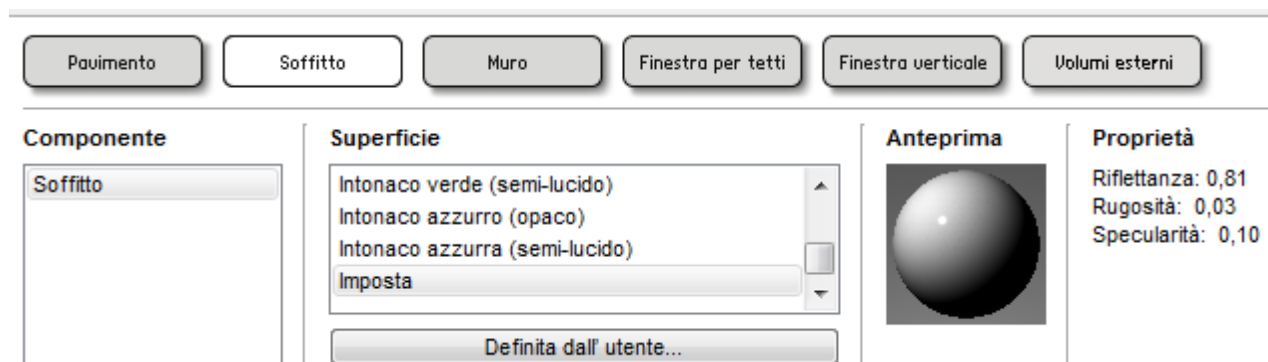


Fig. 24 Cap. 5 - Caratteristiche ottiche del soffitto

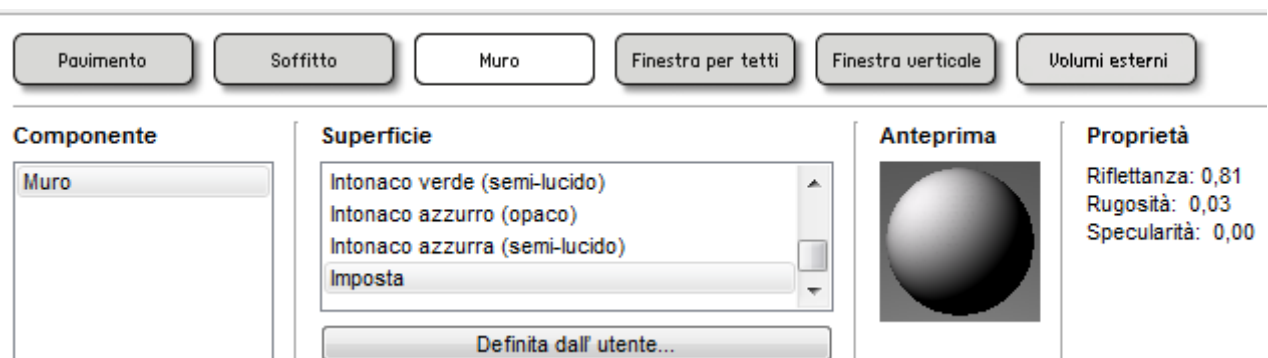


Fig. 25 Cap. 5 - Caratteristiche ottiche del soffitto

Per simulare la radiazione solare, è stata ruotata la sorgente luminosa a **90° (angolo azimutale)** rispetto alla superficie vetrata ed è stata inclinata (angolo zenitale) degli stesso gradi dell'elevazione solare ai 2 solstizi e ai 2 equinozi, nella zona di ancona. Per il calcolo dall'angolazione zenitale è

stato scelto il **simulatore "Sunearthtools"** [18]. A titolo esemplificativo si riporta l'impostazione relativa al mezzogiorno solare del **21 giugno**, nella zona di **Ancona**, quando l'**angolo zenitale** ovvero l'inclinazione della radiazione solare rispetto al piano orizzontale, è **69.76°**.

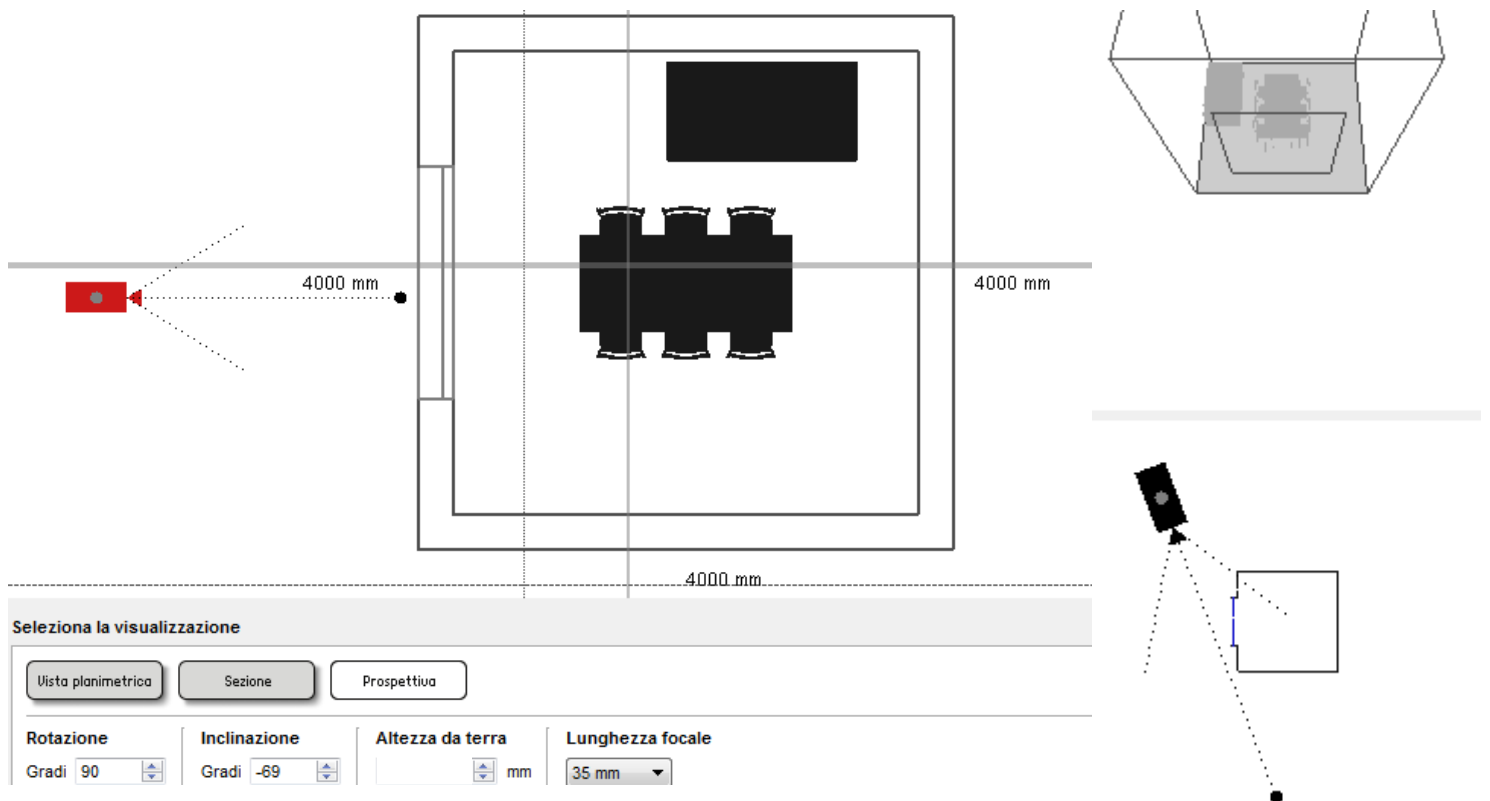
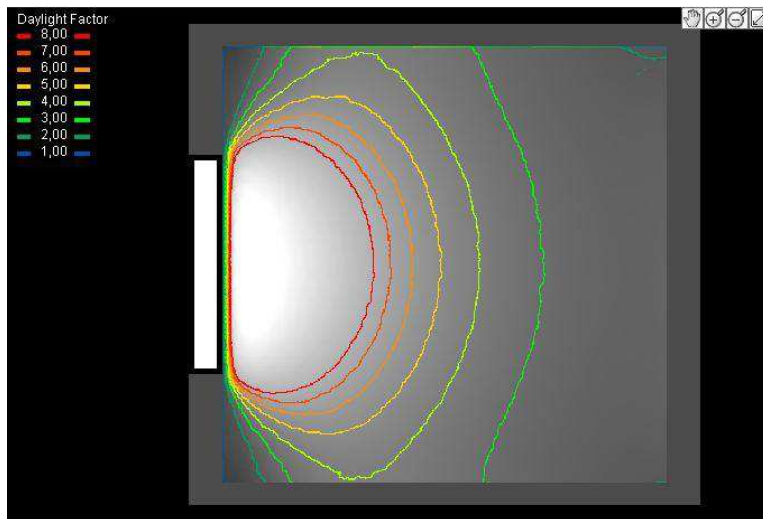


Fig. 26 Cap. 5 - Parametri angolari e arredamento ambiente di studio

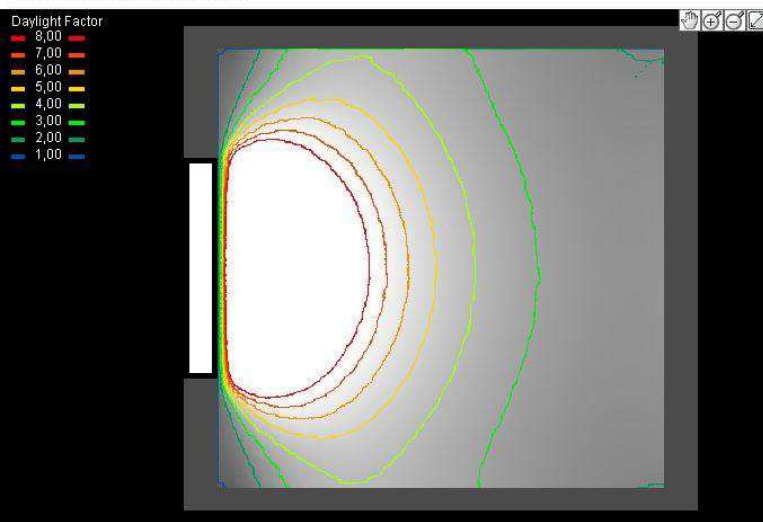
Come noto i **FLD**, in Europa **Daylight Autonomy** per il fatto che non contempla l'uso di luce artificiale, è il rapporto tra due illuminanze, una esterna ed una interna, motivo per cui il suo valore rimane costante nell'arco della giornata, indipendentemente dalle condizioni meteo. E' prassi misurarlo

nelle condizioni più sfavorevoli per impostare un valore standard minimo affidabile. Di seguito ci sono le mappature del FLD in diverse ore del giorno (ore 8:00 12:00 e 16:00ed) è comprensibile che il fattore rimane costante mentre varia l'illuminazione interna del locale.



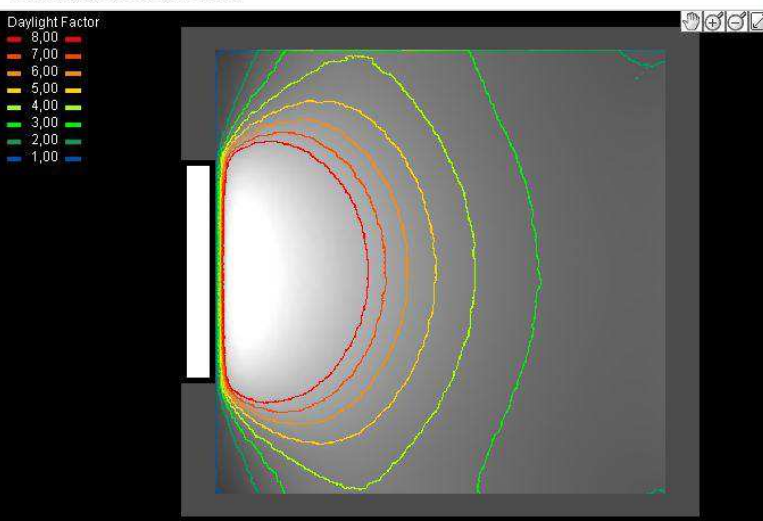
Camera Zones Sereno

Ubicazione Roma, Latitudine 41,5 N, Longitudine 12,3 E  
 Orario Marzo alle 08:00  
 Orientamento 180,0 CW  
 Condizioni del cielo CIE cielo coperto



Camera Zones Sereno

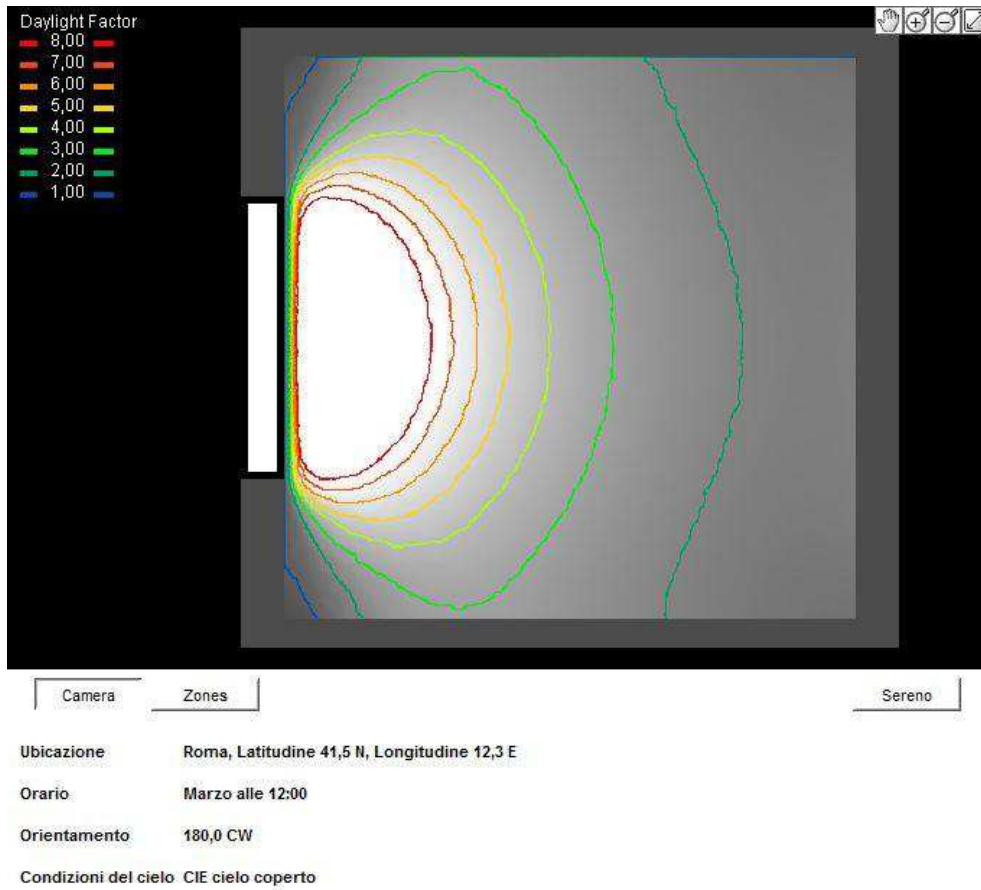
Ubicazione Roma, Latitudine 41,5 N, Longitudine 12,3 E  
 Orario Marzo alle 12:00  
 Orientamento 180,0 CW  
 Condizioni del cielo CIE cielo coperto



Camera Zones Sereno

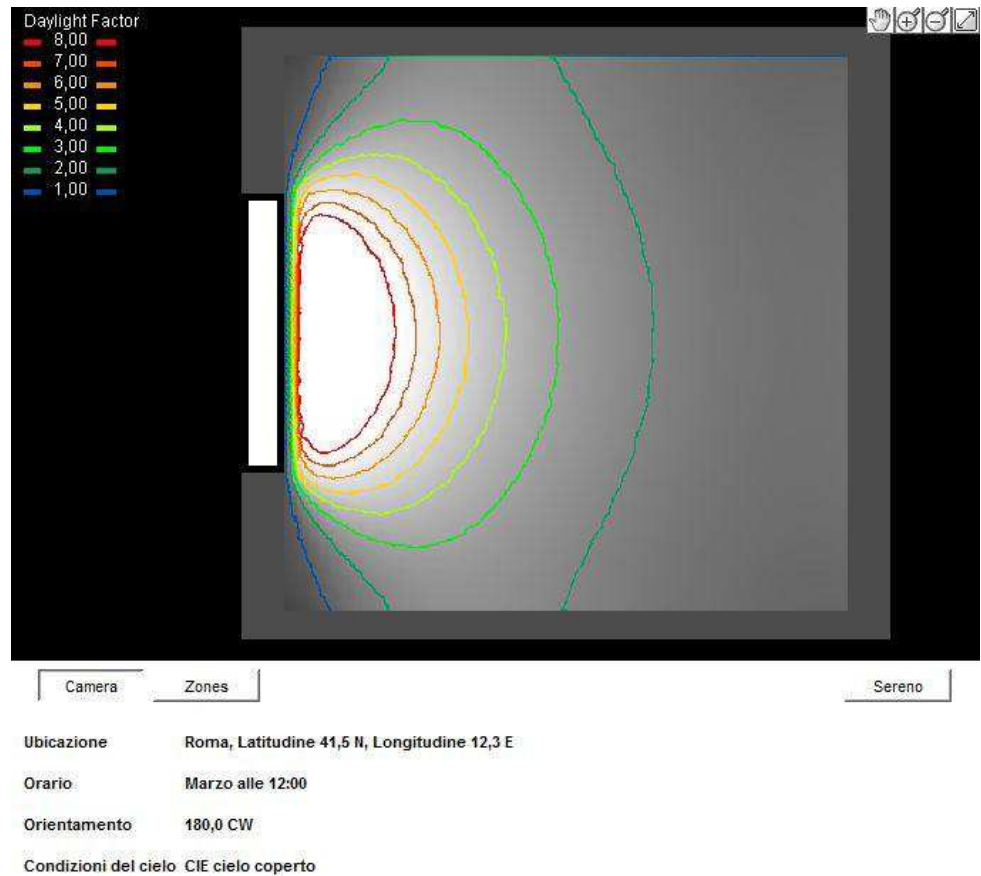
Ubicazione Roma, Latitudine 41,5 N, Longitudine 12,3 E  
 Orario Marzo alle 16:00  
 Orientamento 180,0 CW  
 Condizioni del cielo CIE cielo coperto

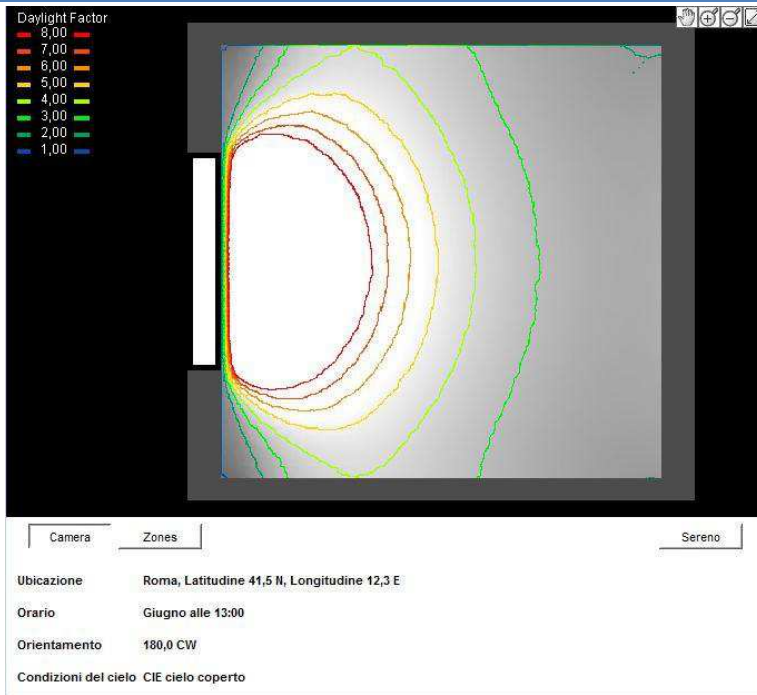
Le slide a fianco, rappresentano la mappatura ISO del FLD del modulo REF, in tre diversi momenti del giorno: alle 8:00, alle 12:00 e alle 16:00, campionati il 21 marzo. Si può notare, dalle isoipse che il coefficiente è costante nei tre periodi mentre varia è il fattore illuminamento. Infatti, il FLD da solo non è sufficiente a giustificare un adeguato livello di illuminamento di un ambiente, ma è un indice quantitativo della parte di luce naturale esterna, che si trasmette all'interno. Come visto, il fattore luce diurna medio del modulo REF è pari a **FLD<sub>m</sub> = 3.5**, quindi adatto ad ogni attività antropica, fatta esclusione degli asili nido e delle aule gioco bimbi. A conferma di quanto detto, è evidente, nelle immagini a fianco che **più della metà del volume ha un FLD ≥ 3**.



In questa sezione si riporta la mappature del modulo FC "Raleri" (a fianco) e del modulo FC "Tens-H" (sotto) all'equinozio di primavera. Si può notare che, per entrambi i moduli la maggior parte del volume confinato ha un **FLD**  $\geq 2$ . Il parametro è idoneo allo svolgimento della maggior parte

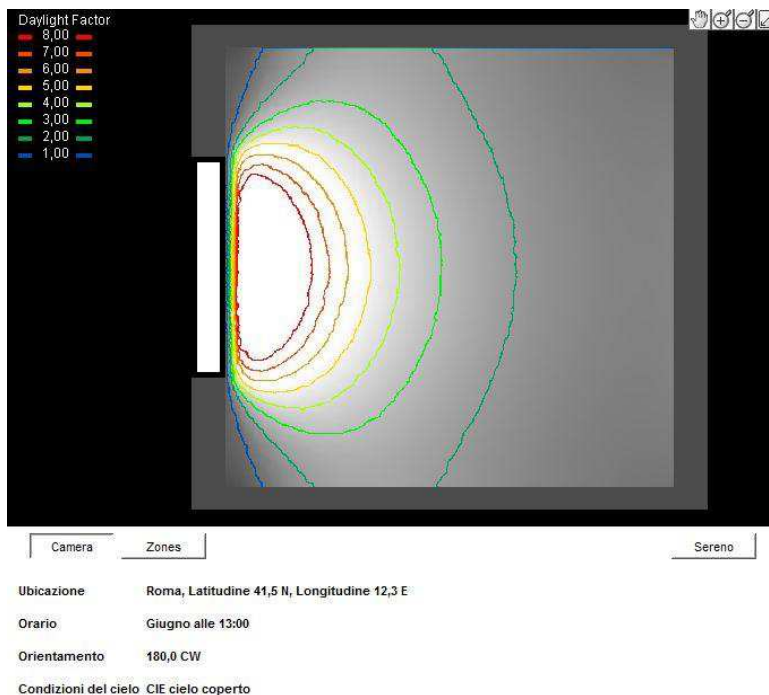
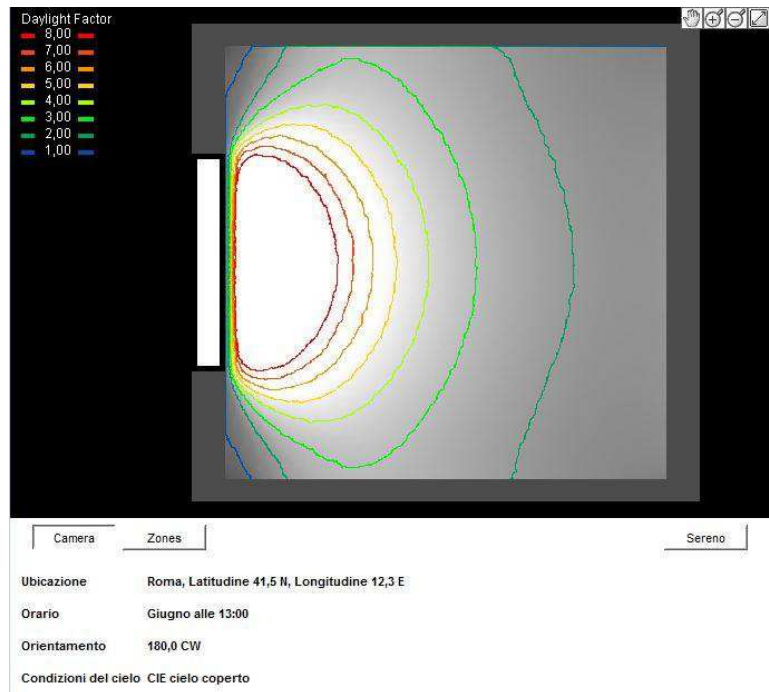
delle attività antropiche, tranne i laboratori scolastici, gli asili nido e le sale di degenza ospedaliera. Ovviamente il **FLD** del FC "Tens-H" è inferiore a quello del FC "Raleri" in quanto è minore il suo fattore di trasmissione luminosa Tv



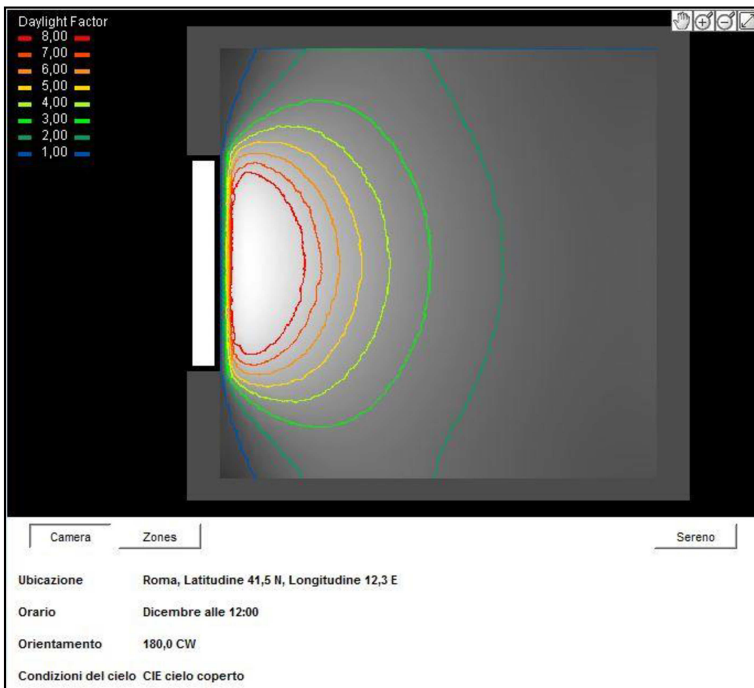
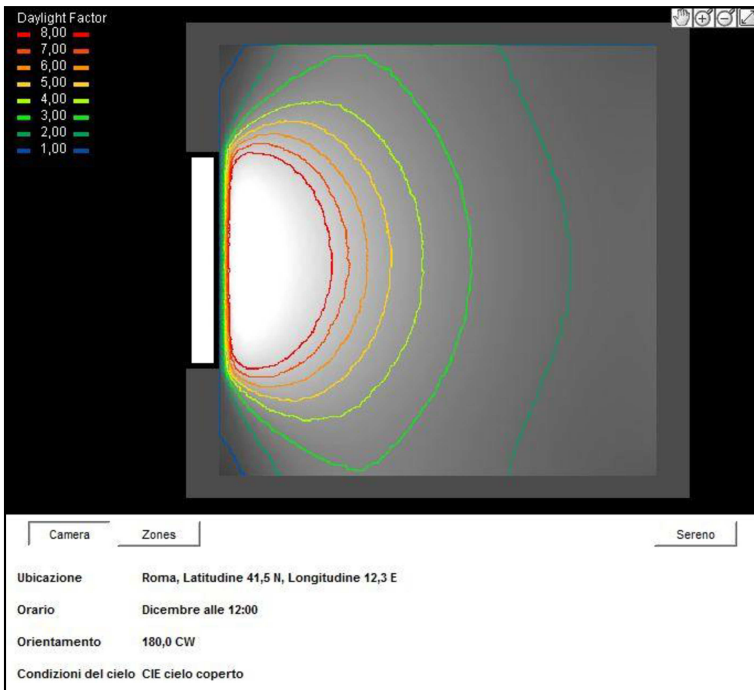
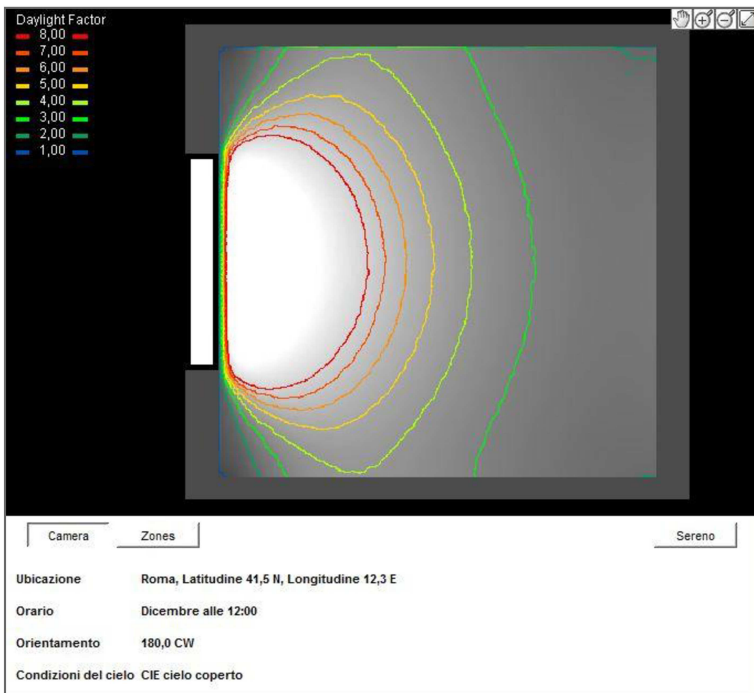


Per quanto riguarda il **solstizio d'estate**, nell'immagine in alto a sinistra si riporta la mappatura del FLD del modulo REF, a destra quella del FC "Raleri" e sotto quella del FC "Tens-H". Il modulo REF garantisce un fattore FLD  $FLD \geq 3$  nella maggior parte della stanza, quindi risulta adatto alla quasi totalità delle attività lavorativa.

Tra i moduli fotocromatici è evidente che il fattore del modulo "Tens-H" risulta inferiore all'omologo "Raleri" seppur in entrambi i box risulta per la maggior parte del volume di riferimento,  $FLD \geq 2$ .



Per quanto attiene l'equinozio d'autunno le mappature risultano molto simili a quelle dell'equinozio di primavera.



Il 21 dicembre, il modulo del campione di riferimento REF riesce ad assicurare, sulla la maggior parte dello spazio, un **FLD**  $\geq 3$  . Si può affermare che il campione di riferimento **REF**, in una stanza di **16 m<sup>2</sup>**, avente un rapporto aero-illuminante **RI=2** e un fattore medio di luce diurna **FLDm=3.5**, garantisce nella quasi totalità del volume, un **FLD** puntuale  $\geq 3$ .

Anche per questa ragione, il basso-emissivo di riferimento è il vetrocamera selettivo, attualmente più diffuso sul mercato. Per ciò che concerne i **prototipi fotocromatici** si può affermare che entrambi garantiscono un fattore medio **FLDm**  $\geq 2$ , quindi secondo il **D.M. 5 luglio 1975** (requisiti igienico sanitari principali dei locali di abitazione), rientrano nella categoria "**Buono**".

Inoltre, entrambi i moduli assicurano per la maggior parte del volume un **FLD** puntuale  $\geq 2$ . In sostanza per tutti i cluster residenziali, gli uffici, i negozi, le palestre, i refettori, gli spogliatoi e i servizi igienici, i prototipi sperimentali risultano applicabili.

## 5.7 Bibliografia cap. 5

- [1] [http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Fisica-Tecnica-Ambientale-2016/Dispense/06\\_Simonazzi\\_263537\\_Yabre\\_263533.pdf](http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Fisica-Tecnica-Ambientale-2016/Dispense/06_Simonazzi_263537_Yabre_263533.pdf)
- [2] Nigel A.S.Taylor, Michael J.Tipton, Glen P.Kennyc, Elsevier, *Journal of Thermal Biology, Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures*, Volume 46, December 2014, Pages 72-101;
- [4] MingFua, WenguoWeng , WeiwangChenb, Na Luo, *Review on modeling heat transfer and thermoregulatory responses in human body*,
- [9] Simone Canepa, Marco Vaudetti, *Architettura degli interni e progetto dell'abitazione - Nuove tendenze dell'abitare*, Wolters Kluwer Italia Srl, Milano 2015, ISBN 9788867501441;
- [10] Gianfranco Ceresini, *L'illuminazione dei luoghi di lavoro in interni –UNI EN 12464-1:2011*, [www.Voltirum.it](http://www.Voltirum.it) - 2012
- [11] Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Collana “*Cultura e sicurezza*”- *La sicurezza in ufficio - Quaderno informativo n.16*, Ufficio Speciale Prevenzione e Protezione, Roma 2014.
- [12] Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome, *Microclima, areazione e illuminazione nei luoghi di lavoro*, Giugno 2006;
- [14] Cinzia Buratti, Elisa Moretti, *MISURA DELLE PROPRIETA' ENERGETICHE E LUMINOSE DI SISTEMI VETRATI CON AEROGEL GRANULARE*, Università degli Studi Perugia 2007;
- [15] Alessandra Vivona, Fabio Peron, *Illuminazione naturale e fattore di luce diurna*, Università IUAV di Venezia, 2011;
- [16] Luca Rubini, *Bioedilizia, illuminazione naturale e fattore di luce diurna*, Hulrico Hoepli Editore S.p.a, 2014, ISBN 978-88-203-6077-1;
- [17] Simone Secchi, *Fondamenti di illuminotecnica Artificiale e naturale*, Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design "P. Spadolini", Università degli Studi di Firenze, 2017;
- [19] Gennaro spada, *Messa a punto di un videofotometro e suo impiego in ambienti confinati*, Dottorato di ricerca in ingegneria dei sistemi termomeccanici, Università degli Studi di Napoli "Federico II", 2003;



## 5.8 Sitografia cap. 5

- [3] [www.uniroma2.it/didattica/EvolEcolUm/deposito/Termoregolazione\\_caldo](http://www.uniroma2.it/didattica/EvolEcolUm/deposito/Termoregolazione_caldo).
- [3] <http://www.calcolodellatrasmissione.com/public/project/addlayer>
- [7] <http://sanpaoloimprese.com/portalImpn0/pdf/doss0805.pdf>
- [8] <http://www.focus.it/ambiente/animali/come-vedono-gli-animali>
- [13] [https://seieditrice.com/progettazione-costruzioni-impianti/files/calcolo\\_fattore\\_luce\\_diurna](https://seieditrice.com/progettazione-costruzioni-impianti/files/calcolo_fattore_luce_diurna).
- [18] [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=it](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=it)

## software di calcolo e simulatori capitolo 3

- [5] *Termok8Calc*
- [6] [www.arching.wordpress.com](http://www.arching.wordpress.com))
- [20] [www.zumtobel.com/PDB/teaser/IT/Lichthandbuch.pdf](http://www.zumtobel.com/PDB/teaser/IT/Lichthandbuch.pdf)
- [21] [www.luxemozione.com/2016/01/controllo-dellabbagliamento-ugr-unified.html](http://www.luxemozione.com/2016/01/controllo-dellabbagliamento-ugr-unified.html)
- [22] [www.unirc.it/documentazione/materiale\\_didattico/597\\_2007\\_48\\_765](http://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/597_2007_48_765)

## CAP. 6 TEST DI LABORATORIO IN CAMERA CLIMATICA

Prima di procedere all'istruzione di una campagna sperimentale esterna che riproducesse le normali condizioni di esercizio delle chiusure trasparenti, sono stati condotti dei test di laboratorio interni al fine di avere una conferma preventiva dei vantaggi offerti dai prototipi fotocromatici. È stata fatta la valutazione delle prestazioni offerte da un modulo sperimentale attraverso il confronto con le prestazioni di un vetro bassoemissivo di riferimento. Le prove sono state condotte all'interno del Laboratorio di "Ingegneria Industriale e Scienza Matematiche" dell'Università Politecnica delle Marche. Per i test sono stati usati due prototipi delle stesse caratteristiche fisiche e geometriche: un vetrocamera bassoemissivo standard usato come termine di comparazione e un modulo sperimentale simile, sul quale è stata applicato esternamente un pannello di acetato di cellulosa, fotocromatico. I moduli sono stati prodotti da un'azienda vetraia teramana, la "Italvetro S.r.l." la quale ha fornito anche la scheda tecnica del campione di riferimento. Considerando che le prove sono state eseguite con un'unica cella di prova, sostituendo di volta in volta i moduli vetrati, per ottenere dati affidabili, sono state garantite le stesse condizioni ambientali al contorno. La temperatura ambientale esterna è stata

garantita in quanto la cella di prova era sita all'interno di una camera climatica isolata (fig. n.1), mentre la temperatura ambientale interna è stata controllata attraverso un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC in fig.2), posto nel box di prova.



Fig. 1 Cap. 6 - Camera climatica del DIISM

I rilievi sono stati condotti in regime controllato, per valutare il dominio di efficienza e operatività del modulo sperimentale e valutarne il rendimento termico/energetico. Per la valutazione delle prestazioni del vetro fotocromatico sono stati confrontati determinati parametri, quali: le temperature ambientali interna ed esterna al box, le temperature superficiali interna ed esterna ai moduli vetrati, il flusso termico superficiale, la radiazione esterna e la radiazione direttamente trasmessa all'interno della cella di prova.

## 6.1 Materiali e metodi

### 6.1.1 Obiettivi principali dei test

I test di laboratorio sono stati impostati per stimare, in regime controllato, attraverso l'esposizione dei moduli a radiazione continua e costante, le prestazioni offerte dai vetri sperimentali fotocromatici e paragonarle con le prestazioni del modello di riferimento. Il confronto è stato eseguito installando di volta in volta, prima il modulo di riferimento e poi il prototipo sperimentale, mantenendo costanti le condizioni al contorno. I rilievi hanno

consentito di registrare direttamente le temperature superficiali dei vetri, le temperature dell'aria, il flusso termico superficiale e la radiazione direttamente trasmessa dai moduli. L'obiettivo è riscontrare i vantaggi offerti dal materiale fotocromatico in stato di attivazione (oscurato), offerti da un maggior coefficiente di riflessione della radiazione verso l'esterno.

### 6.1.2 Apparecchiature e moduli di prova

Per la definizione dei test di laboratorio, si è fatto uso di una cella cubica delle dimensioni esterne di 1 m × 1 m × 1 m, chiusa con pannelli in fibra di legno "OSB" spessi 0,012 m, con le pareti isolate da uno strato di isolante termoacustico costituito da polistirolo espanso dello spessore di 0.2 m. La radiazione

termica è stata ottenuta per mezzo di un pannello radiante composto da n. 16 lampade "Osram". L'ubicazione della Test-Cell all'interno di una stanza chiusa e il sistema di ventilazione meccanica controllata all'interno della Test-Cell, hanno garantito l'uniformità delle condizioni ambientali al contorno.

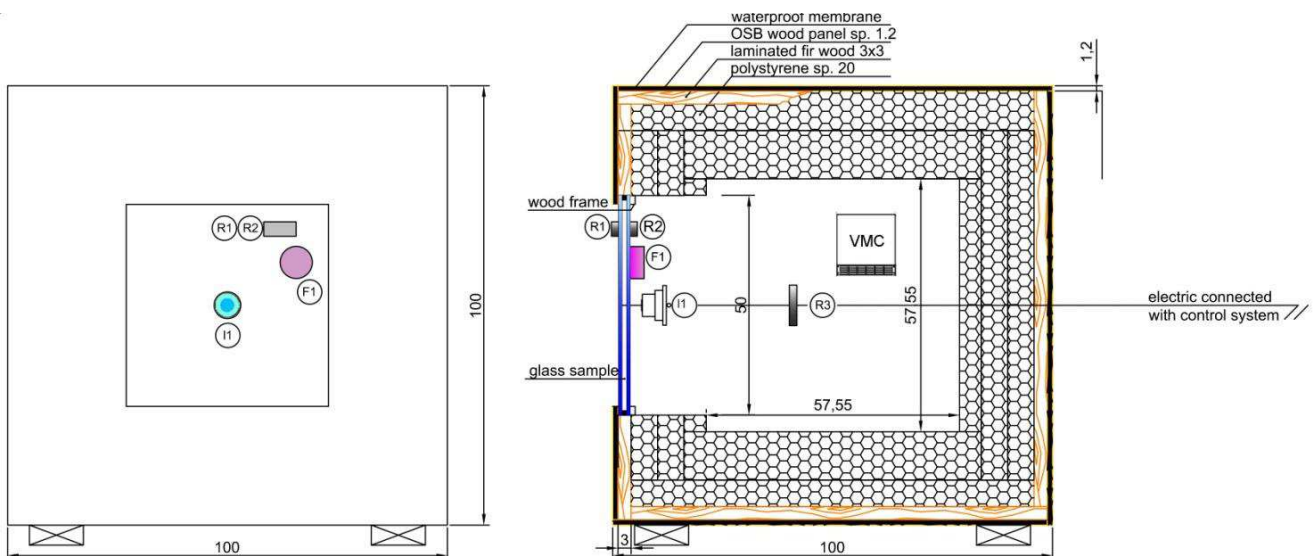


Fig. 2 Cap. 6 - Apparecchiatura e strumentazione di prova

I sistemi vetrati sono stati assemblati dalla ditta Ital-Vetro S.r.l. di Teramo. Si tratta di due moduli trasparenti, di cui uno standard basso-emissivo preso come termine di paragone e un modulo sperimentale fotocromatico. Il modulo di riferimento, con indicazione commerciale: "33.1 Stratobel 2x Planibel Clearlite - 12mm argon 90% - 33.1 stratobel iplus Top 1.1 on Clearlite + Planibel Clearlite Pos. 3" ha una stratificazione standard ed è tra i più performanti attualmente sul mercato. E' composto da: una lastra

**Composizione del campione di riferimento:**

**ESTERNO**

1. AGC Planibel Clearlite (3 mm)
  - Intercalare PVB (0.38 mm)
  - Planibel Clearlite (3 mm)
2. Intercapedine - Argon 90% (12 mm)
3. AGC Iplus Top 1.1 Low-e on Clearlite (3 mm)
  - Intercalare PVB (0.38 mm)
  - Planibel Clearlite (3 mm)

**INTERNO**

CARATTERISTICHE LUMINOSE (EN 410)	
Trasmissione luminosa - $\tau_v$ (%)	80
Riflessione luminosa - $\rho_v$ (%)	12
Riflessione interna - $\rho_{vi}$ (%)	12
Indice di resa dei colori - RD65 - Ra (%)	98

Resistenza ai proiettili	EN 1063 NPD
Resistenza attacchi manuali	EN 356 NPD
Resistenza urti (con pendolo)	EN 12600 282 / 282

ALTRE CARATTERISTICHE	
Resistenza al fuoco	EN 13501-2 NPD
Reazione al fuoco	EN 13501-1 NPD

stratificata esterna formata da due vetri "Planibel Clearlite" sp. 3 mm con intercalare dello sp. 0.38 mm in Pvb, un'intercapedine sp. 12 mm riempita di gas Argon al 90%, e un vetro stratificato interno formata da un vetro "Planibel Clearlite" sp. 3 mm con deposito Top basso-emissivo in faccia 3 (faccia rivolta verso l'intercapedine), un intercalare in Pvb sp. 0.38 e un vetro chiaro "Planibel Clearlite" sp. 3 mm. La stratigrafia e le caratteristiche del campione di riferimento sono le seguenti:

CARATTERISTICHE ENERGETICHE		
	EN 410	ISO 9050
Fattore solare - g (%)	59	56
Riflessione energetica - $\rho_e$ (%)	24	25
Trasm. energ. diretta - $\tau_e$ (%)	52	49
Assorb. energ. vetro 1 - $a_e$ (%)	17	20
Assorb. energ. vetro 2 - $a_e$ (%)	7	6
Assorb. energetico - $a_e$ (%)	24	26
Coefficiente di shading - SC	0.68	0.64
Trasmissione UV -UV (%)	0	
Selettività	1.36	1.43

PROPRIETA' TERMICHE (EN 673)	
Valore Ug - W/(m <sup>2</sup> .K)	1.3

SPESSORE E PESO	
Spessore nominale (mm)	26.38
Peso (kg/m <sup>2</sup> )	26

RIDUZIONE ACUSTICA	
Isolamento al rumore aereo diretto	
(Rw (C;Ctr) -EN 12758) - dB	35 (-1; -5) <sup>(1)</sup>

Il modulo sperimentale ha la stessa stratigrafia del campione di riferimento con la differenza che sulla lastra stratificata esterna è applicata una pellicola fotocromatica di acetato di cellulosa distribuita dalla ditta "Raleri" di Bologna. Si tratta di una pellicola usata nel settore "automotive" sulle visiere dei caschi, per abbattere gli improvvisi abbagliamenti dei piloti durante le gare agonistiche. Per la sua vocazione, il materiale

deve essere altamente performante e reagire immediatamente agli stimoli luminosi. Il posizionamento della pellicola nella stratificazione del modulo è stato studiato per ottenere il massimo oscuramento, esponendo direttamente il film alla radiazione termica e capire come un'esposizione "aggressiva" incida sul riscaldamento e sulle prestazioni del materiale. **Composizione del modulo sperimentale Low-e FC FogStop "Raleri":**

**ESTERNO**

1. **Raleri Film FC (0.5 mm)**
2. AGC Planibel Clearlite (3 mm)  
Intercalare PVB (0.38 mm)  
Planibel Clearlite (3 mm)
2. Intercapedine - Argon 90% (12 mm)
3. AGC Iplus Top 1.1 Low-e on Clearlite (3 mm)  
Intercalare PVB (0.38 mm)  
Planibel Clearlite (3 mm)

**INTERNO**

**6.1.3 Gli strumenti di misura**

Per la rilevazioni delle condizioni ambientali al contorno, è stata collocata una **sonda di temperatura (RTD)** con collegamento (HTF50) a 4 fili, al centro della camera climatica, debitamente protetta dall'irraggiamento diretto del pannello radiante per la rilevazione della temperatura ambientale esterna e una **sonda di temperatura RTD (R3)** in fig. 2) all'interno della Test-Cell, per la rilevazione della temperatura ambientale interna. Il sistema di

STRATIFICAZIONE DEL MODULO SPERIMENTALE LOW-E - FC FOGSTOP RALERI

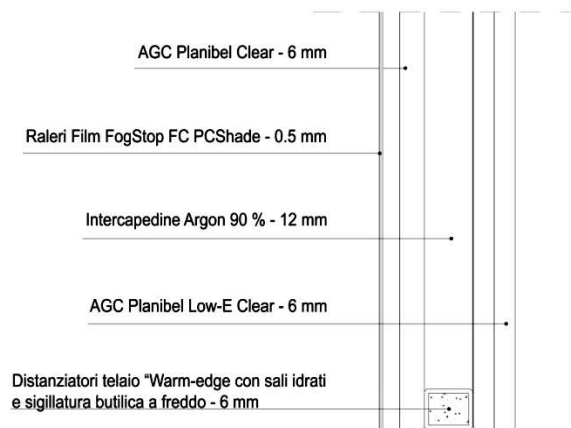


Fig. 3 Cap. 6 - Modulo sperimentale FC Raleri

rilevamento dati, mostrato in figura 2, è composto da due **Sensori di temperatura "Pyrocontrolle-Classe B platino (R1 e R2)** in fig. 2), applicati sulle pareti esterne dei moduli, per la rilevazione delle temperature superficiali interna ed esterna dei moduli vetrati, un **termoflussimetro Hukseflux HFP01 (F1)** in fig.2) dedicato al rilievo del flusso termico superficiale e due **piranometri Li-cor-2005z (I1)** in fig.2), per la rilevazione della radiazione incidente sui vetri e della

radiazione direttamente trasmessa all'interno della test-cell. Tutte le sonde sono state collegate ad un *datalogger* con la funzione di

elaborare i dati grezzi e trasmetterli ad un software di raffinazione.

### 6.1.4 Realizzazione dei prototipi sperimentali

La realizzazione dei prototipi sperimentali è stata affidata alla Ditta "Italvetro" di Teramo. Società che opera da anni nel settore vetrario per l'edilizia ed è in possesso delle tecnologie più sviluppate di taglio e assemblaggio dei vetri camera. Tutta la lavorazione è stata vigilata personalmente grazie al permesso dell'Azienda. Nella prima fase, tramite un sistema a taglio laser sono stati preparati i vetri stratificati esterni, composti ognuno da due lastre di vetro Planibel Clearlite da 3 mm con un intercalare in polivinilbutarrile da 0.38 mm. Per il lato interno sono stati tagliati 2 vetri stratificati simili con un rivestimento basso-emissivo sulla faccia che andrà rivolta verso l'intercapedine. I vetri sono stati lavati e preparati all'assemblaggio con una lavatrice/asciugatrice a getto d'aria calda di tipo automatico.

Congiuntamente sono stati preparati dei distanziatori " Warm edge" a bassa trasmittanza termica per la delimitazione dell'intercapedine dei moduli. Si tratta di profilati in alluminio rivestito di materiale sigillante su tre lati, uniti con tappi angolari in materiale a bassa conduttività termica. Nella cavità interna sono stati inseriti dei sali anticondensa che attraverso dei micro fori ricavati sul lato delimitante la camera dei moduli, assorbono l'umidità residua lasciando l'ambiente completamente essiccato.



Fig. 4 Cap. 6 Fase di lavaggio e asciugatura moduli



Fig. 5 Cap. 6 Assemblaggio dei componenti

I moduli sono stati assemblati secondo la stratificazione illustrata nel paragrafo 4.1.3. La lastra adesiva fotocromatica è stata applicata sulla superficie esterna del modulo sperimentale, che andrà direttamente esposta alla radiazione esterna. Terminata la fase di

preparazione, i moduli sono stati chiusi con una sigillatrice di tipo automatico. Questa fase prevede che siano lasciati due tappi ermetici sulla costa dei moduli per la successiva introduzione del gas sigillante. Per ridurre il

flusso termico convettivo all'interno dell'intercapedine tramite un apposito impianto è stato inserito nella camera dei moduli vetrati, gas Argon al 90%.

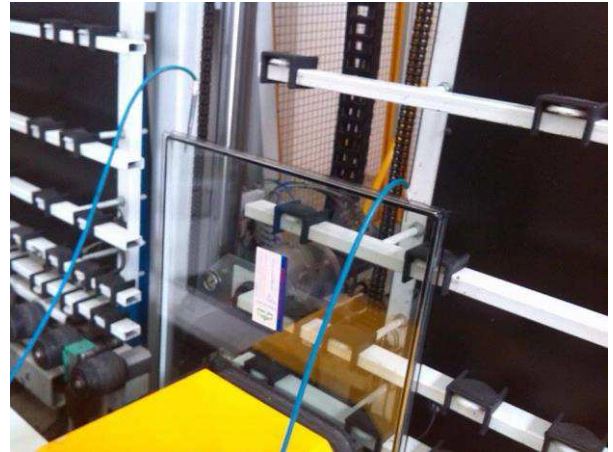
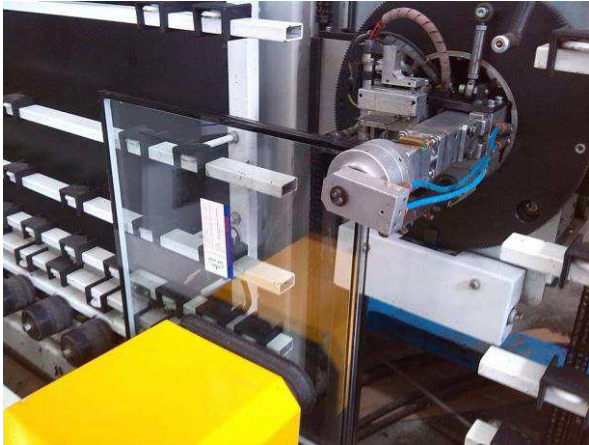


Fig. 6-7 Cap. 6 In alto a sinistra, la sigillatura dei vetri, a destra il riempimento dell'intercapedine con gas Argon al 90%

Terminata la fase di riempimento è stata attesa l'asciugatura del sigillante. Su ogni modulo è stata apposta una targhetta identificativa recante le principali caratteristiche energetiche e luminose dei vetri. A corredo della fornitura ci è stata fornita la scheda tecnica del modulo di riferimento basso\_emissivo. Di seguito si riporta l'immagine dei prototipi assemblati e pronti per la fase sperimentale.



Fig. 8 Cap. 6 I prototipi completati

## 6.2 Avvio della fase sperimentale

I test, come accennato sono stati condotti su un'unica cella di prova sostituendo di volta in volta i moduli vetrati. La cella ubicata al centro di una camera climatica è stata posta a 1.5 m dal pannello verticale radiante per avere un flusso incidente perpendicolare alla superficie esterna dei moduli vetrati. I moduli sono stati alloggiati su una delle facce laterali del box, avente con una apertura 0.5 m x 0.5 m. Il sistema di ventilazione meccanica controllata, posto all'interno della cella, è stato impostato per mantenere un intervallo di temperatura interna dell'aria compreso tra 26 e 28 gradi Celsius. Per quanto riguarda le temperature dell'aria dei moduli, è stata posta una sonda per la temperatura ambientale esterna sopra al box di prova, a ragionevole distanza dal pannello radiante; e una sonda per la temperatura ambientale interna, al centro della test-cell. Le temperature superficiali dei vetri, sono state rilevate con due sensori di temperatura a termocoppia, posti in aderenza con le pareti vetrate, esternamente protetti con nastro di alluminio al fine di riflettere gli apporti termici esterni. Allo stesso modo è stato schermato il termoflussimetro HFP01SC posto sulla superficie interna dei moduli per il rilievo del flusso termico superficiale che attraversa i moduli. Questo sensore, del tipo a termopila,

conforme alle norme ISO 9869, ASTM C1046 e ASTM 1155 ha una tolleranza di  $\pm 3\%$ , e una sensibilità di  $\pm 0,1 \text{ W / m}^2$ . Per la radiazione termica globale (diretta e diffusa) trasmessa all'interno del box, e la radiazione termica globale irradiata, è stato usato un piranometro "Li-cor-2005z, conforme alle norme ISO 9060 prima classe, del tipo a termopila, posto in prossimità, ma non a contatto della superficie dei moduli. La capacità di misura del solarimetro, interessa una gamma di lunghezza d'onda che va da 400 a 1100 nm. Al fine di ottenere dati più attendibili, i radiometri sono stati posizionati per mezzo di apposite staffe, sullo stesso asse orizzontale, perpendicolare al pannello radiante. Per la rilevazione e l'analisi dei dati ottenuti dai dispositivi applicati, sono state collegate tutte le sonde e gli strumenti ad una centralina di rilevazione costituita da un *datalogger* con la funzione di elaborare i dati grezzi e successivamente trasmetterli ad un software di raffinazione. Il sistema di monitoraggio è stato impostato per effettuare una rilevazione ogni 5 secondi. Per ogni modulo sono state condotte 2 prove a diversa intensità di propagazione termica. La variazione dell'intensità di radiazione è stata ottenuta limitando il numero di lampade Osram del pannello radiante.



### 6.3 Test energetici

La prima serie di prove è stata effettuata posizionando il pannello radiante, con 16 lampade Osram, ad una distanza di 1,5 metri dalla superficie dei moduli. Il prototipo sperimentale "Raleri" sotto effetto dell'irraggiamento, si attiva e oscurandosi aumenta il coefficiente di riflessione del flusso termico verso l'esterno, producendo variazioni della radiazione termica trasmessa. Limitando il flusso termico trasmesso,

all'interno del box di prova si produce una riduzione delle temperatura dell'aria e delle temperature medie radianti delle pareti. Probabilmente ci si aspetta anche una diminuzione del flusso termico superficiale legato alla trasmissione termica del vetro per convezione e conduzione in quanto il materiale fotocromatico applicato al prototipo sperimentale, seppur di minimo spessore, rappresenta una resistenza termica aggiuntiva.

#### 6.3.1 Radiazione termica trasmessa $E_e$ trasm.

La radiazione percentuale globale trasmessa dai moduli è data dal rapporto tra la radiazione globale rilevata all'interno e la radiazione termica esterna, incidente sul vetro. Confrontando tra loro le radiazioni

assolute trasmesse si ottiene il guadagno in termini di energia termica schermata, offerto dal modulo sperimentale rispetto al campione basso-emissivo di riferimento. Di seguito si riportano il grafico delle radiazioni rilevate:

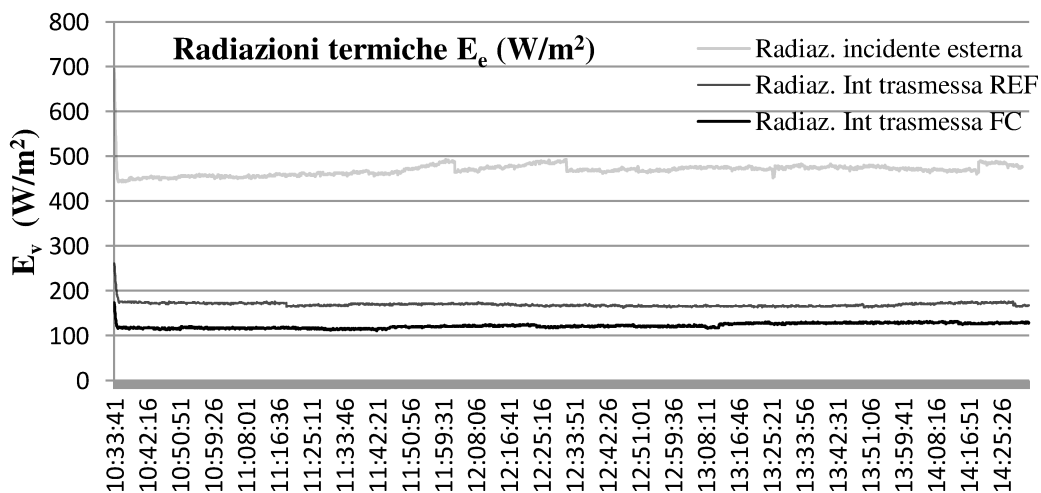


Fig. 9 Cap. 6 Le radiazioni rilevate

Il diagramma delle radiazioni trasmesse mostra che il prototipo fotocromatico risulta più vantaggioso rispetto al campione di riferimento. Infatti con una radiazione incidente media di  $466 \text{ W/m}^2$ , il campione di riferimento trasmette  $170 \text{ W/m}^2$  e il modulo

FC "Raleri",  $120 \text{ W/m}^2$ . Per definire il guadagno netto offerto dal modulo fotocromatico, si riporta di seguito il gradiente di radiazione termica trasmessa rispetto al campione basso-emissivo.

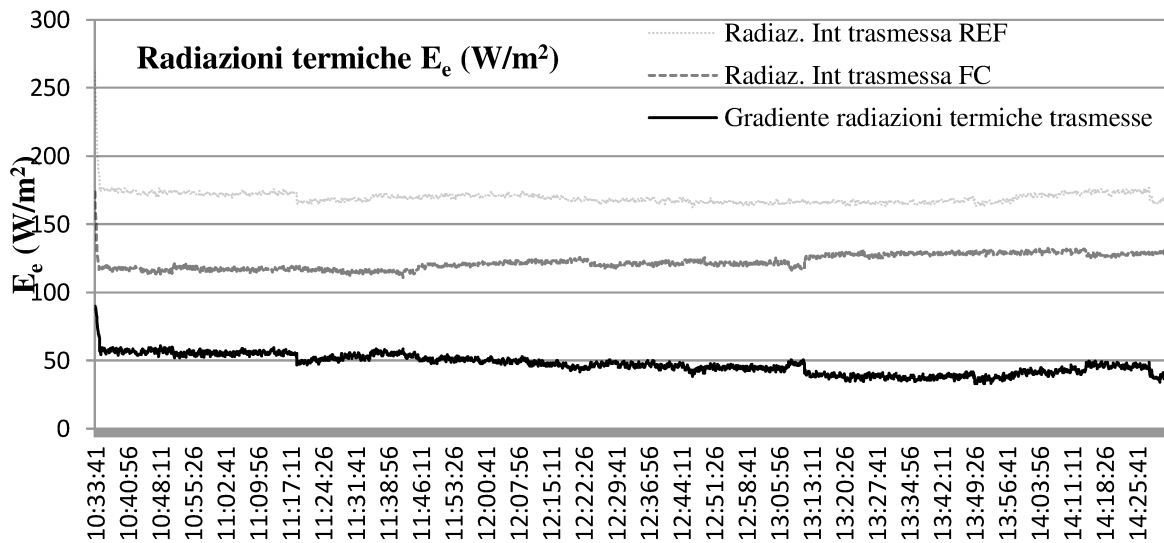


Fig. 10 Cap. 6 Gradiente delle radiazioni termiche trasmesse

Osservando il gradiente, si può notare che il prototipo FC riesce a schermare mediamente  $50 \text{ W/m}^2$  in più rispetto al campione preso a

confronto. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle radiazioni termiche medie, direttamente trasmesse.

Comparazione sperimentale  $E_{int}$  ( $\text{W/m}^2$ )

	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
$E_{int \max} (\theta=0)$	122,30	169,44	<b>47.14</b>

Tabella 1 Cap. 6 - Comparazione dei valori di radiazione termica direttamente trasmessa  $E_v$

### 6.3.2 Il fattore di trasmissione solare diretta $\tau_e$

Le misurazioni effettuate consentono di rilevare il coefficiente di trasmissione solare diretta  $\tau_e$ . Si tratta di uno dei parametri definiti dalla norma UNI EN 410 che caratterizza i sistemi vetrati. Esso riguarda il flusso termico direttamente trasmesso dai

moduli al netto degli apporti convettivi e conduttivi del vetro. Viene calcolato come il **rapporto** tra l'**irradianza trasmessa** e l'**irradianza incidente** esterna. Può essere considerato come la **capacità schermante** di un modulo trasparente.

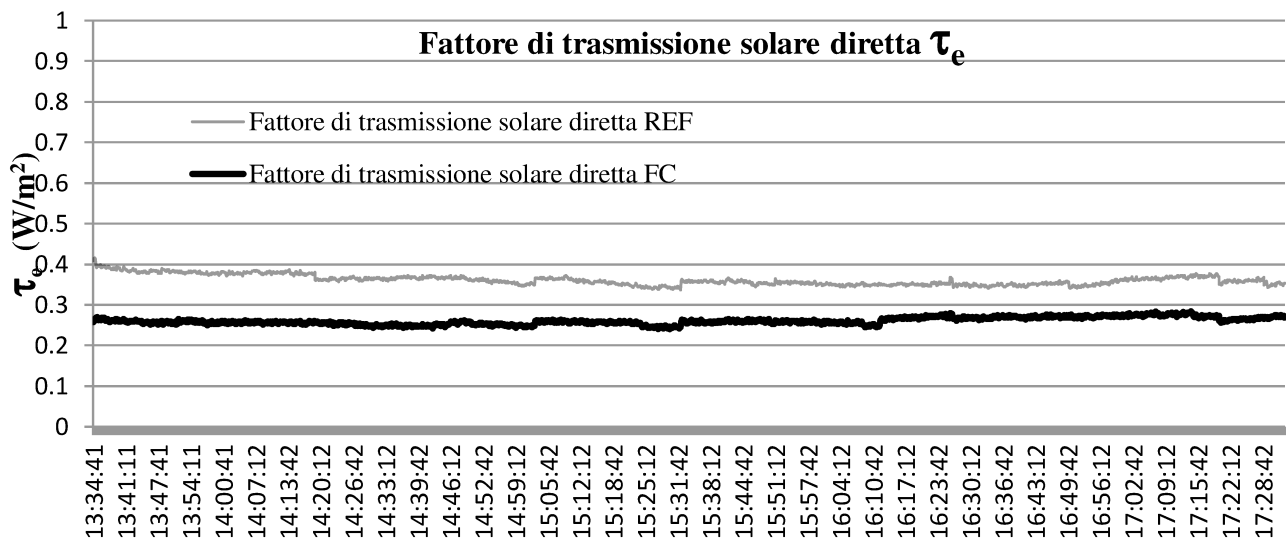


Fig. 11 Cap. 6 Fattore di trasmissione solare diretta  $\tau_e$

Considerando che le prove di laboratorio sono state condotte in regime statico, ad eccezione delle prime rilevazioni dove si osserva un calo netto della radiazione termica dovuto all'attivazione repentina del materiale fotocromatico, l'andamento della curva rimane costante. Ciò è giustificato dal fatto che il materiale, continuamente irradiato è sempre allo stato oscurato. Il vetro sperimentale FC "Raleri" si oscura

repentinamente e riesce a contenere per tutta la durata del test, il fattore di trasmissione solare diretta  $\tau_e$  inferiore al modulo basso emissivo. Per lo studio del trasmissione diretta in regime dinamico si rimanda alla campagna sperimentale successivamente condotta nella quale il fattore  $\tau_e$  viene rilevato in fase di esercizio reale. in ambiente reale.

Di seguito si riportano i valori medi del fattore di trasmissione termica diretta.

**Comparazione sperimentale  $\tau_e$**

	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
$\tau_e$	0.26	0.36	<b>0.10</b>

Tabella 2 Cap. 6 - Fattore di trasmissione solare direttamente trasmessa  $\tau_e$

**6.3.3 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria interna**

Le temperature dell'aria interna  $T_i$  e le temperature medie radianti che confinano l'ambiente  $T_s$  rappresentano le grandezze fisiche che determinano in modo diretto, lo stato di comfort termico ambientale dell'uomo. Queste grandezze sono state rilevate sia per l'aria interna ai box, sia per l'aria esterna al contorno e sia per le superfici

interne ed esterne dei vetri. Dai dati ottenuti è stata ricavata la curva del gradiente  $\Delta T$ , data dalla differenza tra la temperatura interna dell'aria del modulo campione e quella interna dell'aria del prototipo fotocromatico. Il gradiente indica il guadagno che si ottiene, in termini di benessere termico, con i moduli sperimentali fotocromatici.

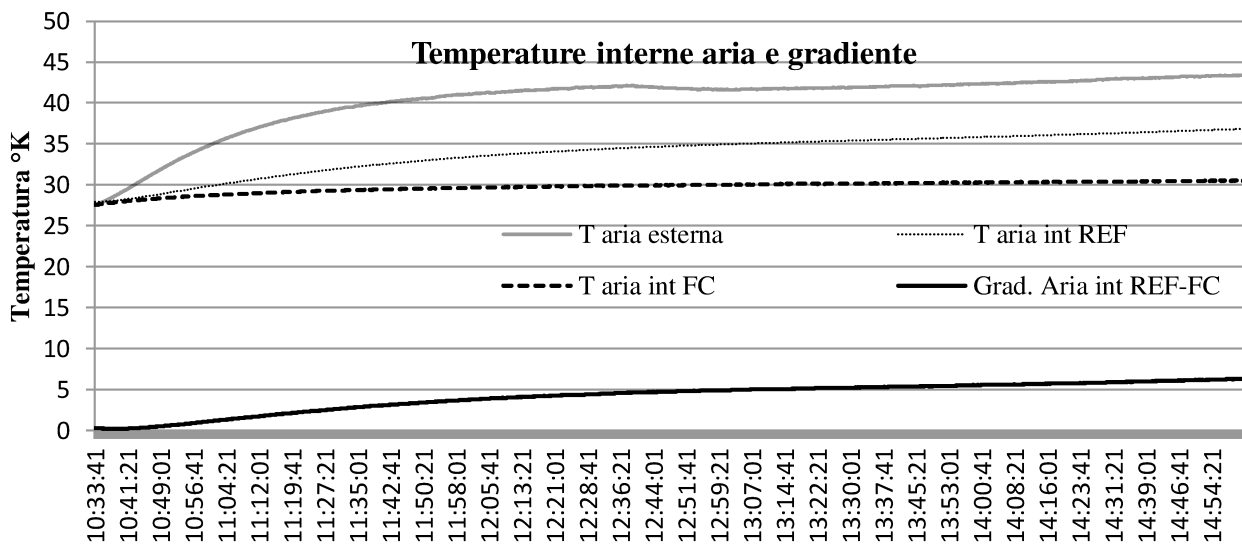


Fig. 12 Cap. 6 Diagramma delle temperature interne  $T_i$  e gradiente delle temperature interne dei moduli  $\Delta T$

L'andamento delle temperature interne dell'aria, mostra chiaramente che il modulo sperimentale FC contiene la temperatura

dell'aria a livelli inferiori rispetto al vetro basso-emissivo standard. La quantificazione è mostrata dal gradiente di temperatura.

Raggiunta la stabilizzazione dei livelli termici, il modulo fotocromatico mantiene la temperatura interna, inferiore di 6°K. Si può inoltre notare che il contenimento dei gradi di calore del modulo sperimentale è maggiore a

temperature inferiori a 38 gradi Celsius. Questa osservazione è spiegata dal fatto che l'aumento del livello termico incide seppur in modo contenuto, sulle prestazioni del materiale cromogenico.

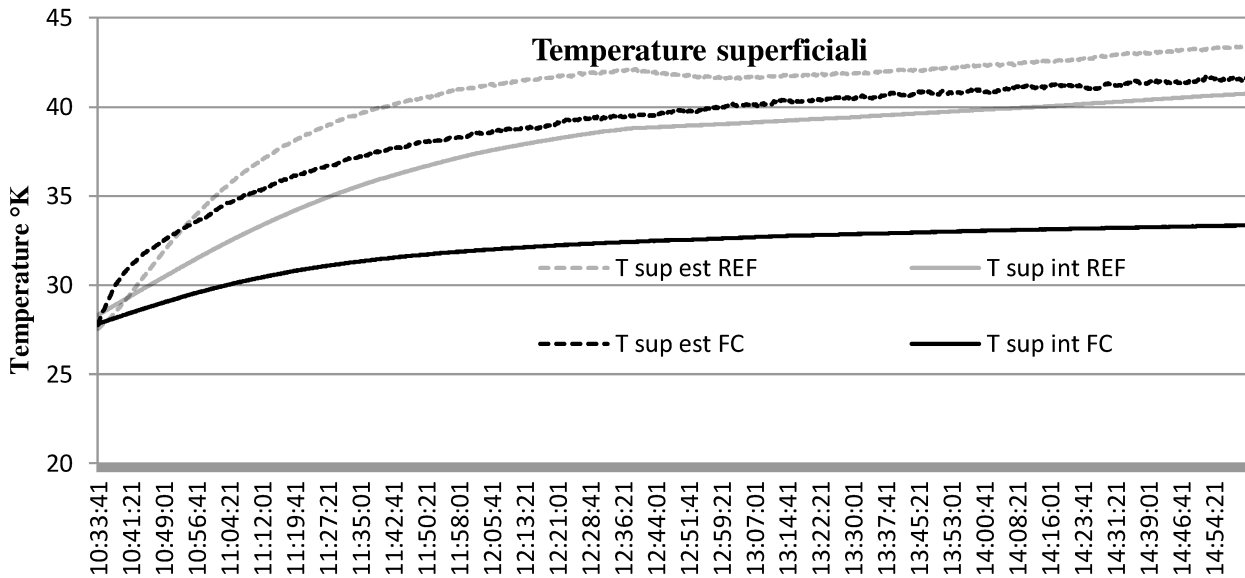


Fig. 13 Cap. 6 Temperature superficiali rilevate sui moduli vetrati,  $T_{Sup.int}$  e  $T_{Sup.est}$ .

Anche i livelli delle temperature superficiali del modulo sperimentale risultano inferiori. E' interessante notare i gradienti relativi alla

differenza di temperatura tra la superficie interna e quella esterna, di ogni modulo.

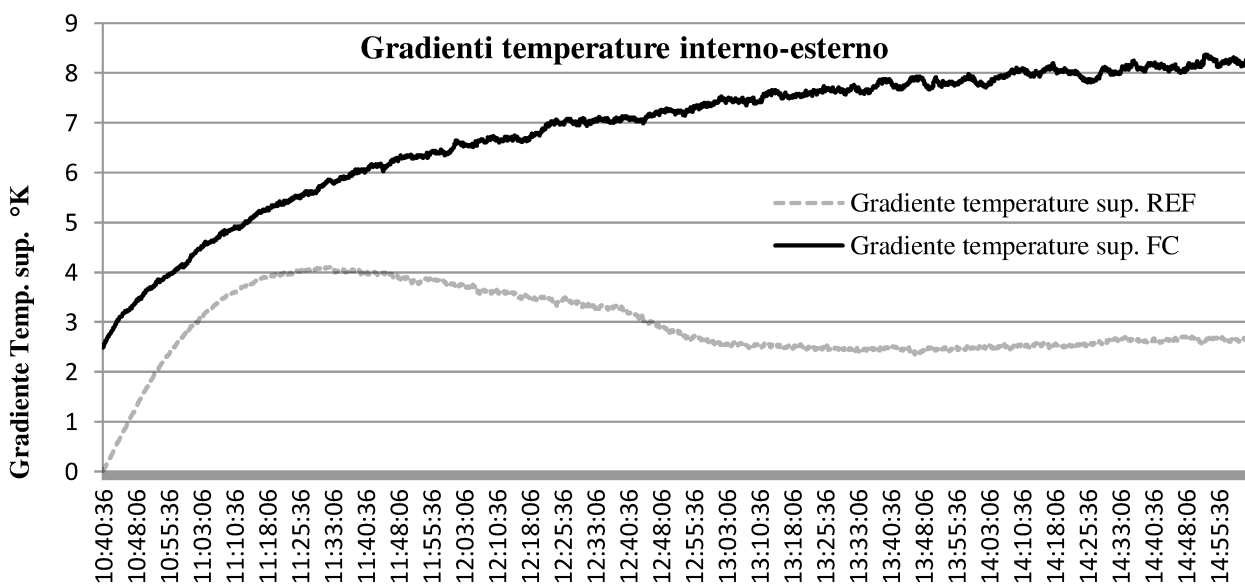


Fig. 14 Cap. 6 Gradienti delle temperature superficiali interno-esterno

Si può notare che dopo circa 2 ore di esposizione, il gradiente del modulo sperimentale si stabilizza intorno agli 8 °K rispetto al modulo di riferimento che lo fa intorno ai 2.8 °K. Ciò dimostra che l'effetto schermante del vetro fotocromatico è superiore a quello del basso-emissivo campione. Se si considera che le trasmittanze termiche dei moduli sono simili, si può

asserire che la gestione degli apporti termici esterni del modulo FC è dovuta all'effetto di riflessione del calore trasmesso per irraggiamento, quando il materiale è allo stato attivo. Nella tabella 3 si riportano i valori medi delle temperature dell'aria e delle temperature superficiali, e i gradienti delle temperature interne/esterne dei singoli moduli.

<b>Comparazione sperimentale <math>T_{aria\ int}</math> (°C)</b>			
	<b>FC "Tens-H"</b>	Low-E REF	Riduzione
<b><math>T_{aria\ int}</math></b>	25,75	29,89	<b>4.14</b>
<b><math>T_{sup.\ est}</math></b>	34,69	36,33	<b>1.64</b>
<b><math>T_{sup.\ int}</math></b>	28,02	33,49	<b>5.47</b>
<b><math>\Delta T_{sup.}</math></b>	6,81	2,93	<b>+3,88</b>

Tabella 3 Cap. 6 - Comparazione temperature aria interna - temperatura superficiali e gradienti di temperatura

### 6.3.4 Variazione del flusso termico superficiale $Q_{flux\ sup.}$ ( $W/m^2$ )

Il flusso termico superficiale rappresenta la potenza termica specifica Trasmessa dal vetro per conduzione e convezione termica. Rispetto al campione di riferimento, il vetro sperimentale presenta un'aggiunta dovuta al pannello polimerico fotocromatico. Tale

pannello, seppur rappresenta una resistenza termica aggiuntiva, considerando lo spessore minimo di 0.5 mm, non varia sostanzialmente il valore assoluto del flusso termico superficiale rispetto al campione di riferimento.

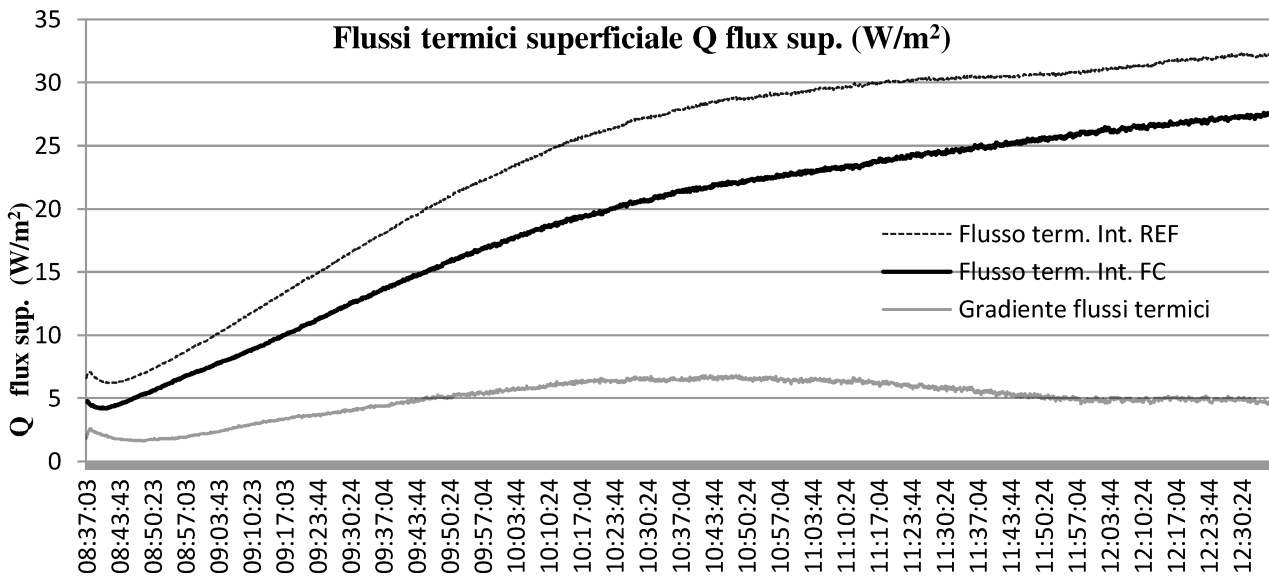


Fig. 15 Cap. 6 - Comparazione temperature aria interna - temperatura superficiali e gradienti di temperatura

L'intensità del flusso termico superficiale è dovuta alla differenza di temperatura tra la superficie esterna e la superficie interna dei moduli e al modulo della trasmittanza termica dei vetri. Dal grafico risulta comunque evidente un diminuzione del flusso termico

superficiale favorevole rispetto al prototipo sperimentale, dovuta alla resistenza termica del materiale fotocromatico e al maggior gradiente di temperatura tra l'esterno e l'interno del modulo.

Comparazione sperimentale  $Q_{flux\ sup}$  ( $W/m^2$ )

	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
$Q_{flux\ sup}$	18,94	23,92	<b>4.98</b>

Tabella 4 Cap.6 - Comparazione dei flussi termici superficiali HF

### 6.3.5 Flusso termico totale $Q_t$

Il flusso termico totale  $Q_t$  trasmesso dai moduli testati descrive la somma di tutti gli apporti termici trasmessi all'interno. E' dato dalla sommatoria della radiazione solare

direttamente trasmessa  $E_{int}$  e del flusso termico superficiale  $q_{fluxmeter}$ . Rappresenta l'energia termica totale trasmessa dai moduli vetrati, nell'unità di tempo e di superficie.

	Flusso termico totale $Q_{Tot}$		
	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
$E_{int}$ (W/m <sup>2</sup> )	122.30	169.44	47.14
$q_{fluxmeter}$ (W/m <sup>2</sup> )	18.94	23.92	4.98
$Q_t$ (W/m <sup>2</sup> )	141.24	193.36	<b>52.12</b>

Tabella 5 Cap. 6 - Comparazione dei valori di  $Q_{tot}$

Ragionando sul flusso termico totale trasmesso dai moduli esaminati emerge che il prototipo sperimentale fotocromatico riesce a

contenere maggiormente i flussi termici esterni riducendo la potenza termica specifica da 193.36 W/m<sup>2</sup> a 141.24 W/ m<sup>2</sup>.

## 6.4 Conclusioni

I test di laboratorio hanno ampiamente convalidato le considerazioni teoriche ipotizzate. Le prove hanno mostrato i vantaggi in termini di comfort termico, offerti dal modulo sperimentale fotocromatico. La stima dei vantaggi forniti dal vetro è stata convalidata attraverso il confronto delle proprietà energetiche con quelle di un vetro-camera basso-emissivo preso a campione che rappresenta già da solo uno dei prodotti più usati e performanti presenti sul mercato. Nella prove interne di laboratorio sono stati stimati i

parametri caratteristici dei moduli in regime statico, sottoponendo i vetri a radiazione continua e costante. Quindi non sono stati contemplati i vantaggi del vetro fotocromatico offerti in condizioni ambientali dinamiche. Per queste valutazioni e per la stima del fattore solare  $g$ , dell'indice di selettività  $IS$ , dell'energia di cooling e di altri parametri fotometrici, si rimanda alla campagna sperimentale esterna condotta successivamente. In laboratorio è stato possibile valutare le radiazioni termiche



direttamente trasmesse  $E_e$ , i fattori di trasmissione diretta dell'energia termica  $\tau_e$ , le temperature interne dell'aria e le temperature superficiali  $T_i$  e  $T_{sup}$ , i flussi termici superficiali  $q_{flux}$  e i flussi termici totali  $Q_t$ . I test hanno confermato che il modulo sperimentale fotocromatico riesce a contenere la trasmissione di energia termica più del modulo di riferimento. La potenza termica specifica, direttamente trasmessa si riduce di un quarto rispetto al campione basso emissivo e il flusso termico superficiale di circa tre quinti. In termini di flusso termico totale, infatti, si passa dai  $193 \text{ W/m}^2$  di un vetro comune bassoemissivo a  $141 \text{ W/m}^2$  del modulo sperimentale FC. Il beneficio in termini di comfort termico offerto è descritto ancor meglio dai rilievi delle temperature operative riscontrate all'interno dei moduli. Con il modulo fotocromatico è stata riscontrata una riduzione della temperatura media dell'aria interna di  $4.14 \text{ K}$  e un gradiente di temperatura tra la superficie interna e quella

esterna del modulo di  $6.81 \text{ K}$ . Ciò dimostra la validità del vetro sperimentale FC. Se si considerano le temperature operative riscontrate all'interno dei moduli un importante vantaggio aggiuntivo è dato dalla temperatura superficiale interna. Il sistema fotocromatico rispetto al vetro campione è riuscito a contenere la temperatura superficiale interna,  $5.47 \text{ K}$  più bassa. In virtù del fatto che anche piccole variazioni delle temperature operative dei locali concorrono ampiamente al miglioramento del comfort ambientale, il modulo sperimentale fotocromatico si è dimostrato altamente competitivo e performante. Oltre ai vantaggi descritti si aggiungono altri aspetti qualitativi, quali: la facilità costruttiva del modulo sperimentale, la reperibilità dei materiali di cui è composto, la possibilità di riciclaggio di tutti i componenti, la minima manutenzione richiesta in fase di esercizio e la possibilità di essere assemblato con le tecnologie attuali senza ricorrere a sistemi produttivi complessi.

## **CAP. 7 LA CAMPAGNA ESTERNA I TESTS FOTOMETRICI**

I test interni di laboratorio, condotti per validare i dati ottenuti dalle valutazioni teoriche, sono stati effettuati, in condizioni ambientali controllate, sottoponendo i vetri a radiazione continua e costante. Considerando che i parametri al contorno, controllati tramite un sistema di ventilazione meccanica, e la radiazione artificiale costante e continua, ottenuta con un pannello radiante, non riproducono le reali condizioni ambientali di esercizio; per studiare il comportamento reale dei moduli in ambiente esterno, è stato necessario istruire una campagna sperimentale esterna. Lo scopo di tale campagna è fornire una valutazione sperimentale dei moduli ad oscuramento dinamico in normali condizioni ambientali di esercizio e quantificare i vantaggi forniti in termini di riduzione del calore entrante trasmesso nei periodi estivi e la limitazione delle dispersione termiche nei periodi invernali. L'applicazione di sistemi fotocromatici a comportamento dinamico passivo, favorisce il controllo e la gestione dei carichi energetici degli edifici in funzione delle condizioni ambientali esterne. I moduli, infatti, si oscurano gradualmente in rapporto all'intensità della radiazione solare nello spettro dell'alto UV e nel campo del visibile. Questo tipo di finestre, non comporta alcuna complicazione produttiva, in quanto tutti i materiali, afferenti settori commerciali

diversi, sono facilmente reperibili e assemblabili con le attuali tecnologie vetrarie. Inoltre i moduli non richiedono alcuna manutenzione ulteriore rispetto alle attuali finestre. Questo fattore è di fondamentale importanza perché, a differenza di altri prodotti cromo-genici presenti sul mercato, i fotocromatici non richiedono costi tecnologici aggiuntivi, non richiedono costi di applicazione e manutenzione e i prezzi della materia prima sono ampiamente giustificati dai benefici economici prodotti. Le pellicole fotocromatiche possono essere accoppiate alla stregua delle normali lastre vetrate, ai vetro-camera di nuova produzione o applicate a tutti i tipi di serramenti esistenti. Altro compito della campagna sperimentale esterna è capire, attraverso misure fotometriche, se l'oscuramento dei moduli garantisce comunque una adeguata illuminazione interna dei locali tale da non pregiudicare i guadagni energetici ottenuti, con i consumi di energia elettrica per l'illuminazione artificiale. Inoltre, al fine di poter fare un bilancio energetico complessivo è stato necessario valutare la degradazione polimerica e la durabilità dei materiali fotocromatici analizzati. Dopo l'esposizione estiva alla radiazione solare, i materiali sono stati sottoposti a stress termico, esponendoli a radiazione artificiale continua all'interno del laboratorio per valutare il mantenimento delle prestazioni nel tempo. Una caratteristica fondamentale dei moduli dinamici è quella di poter invertire le

proprietà radiative e fotometriche in base ai periodi climatici. Essi si comportano come sistemi schermanti nei periodi caldi, limitando gli afflussi di calore negli ambienti interni e come isolanti nei periodi invernali, riducendo le dispersioni termiche e garantendo un adeguato guadagno solare. Le prove sono state condotte per un periodo esteso al fine di ottenere una mole di dati atti ad osservazioni più precise possibili. Si è comparato il comportamento di un modulo basso-emissivo preso come termine di riferimento con il comportamento di due moduli sperimentali fotocromatici. La campagna esterna è stata condotta nel periodo pre-estivo, da febbraio 2017 a fine maggio 2017. Le prove sono state condotte sul terrazzo esterno del Laboratorio di "Energetica" dell'Università Politecnica delle Marche. Per i test sono stati costruiti da un'azienda vetraia teramana, la "Italvetro S.r.l.", tre prototipi di stesse caratteristiche fisiche e geometriche. Un prototipo di riferimento costituito da un vetrocamera basso-emissivo di larga diffusione, un modulo basso-emissivo con pellicola fotocromatica in acetato di cellulosa estremamente reattivo e un prototipo con pellicola fotocromatica in policarbonato a lenta reazione. La campagna esterna è stata istruita principalmente per valutare specifici parametri fisici che sostanzino le osservazioni fin qui condotte e aprano la possibilità di estendere l'applicazione sperimentale all'impiego commerciale. Il criterio di funzionamento dei

moduli è volto a conferire benessere psicofisico in ogni periodo dell'anno, in modo automatico e passivo, operando nel rispetto dell'ambiente, grazie al fatto che i suoi componenti possono essere riciclati e garantendo considerevoli risparmi energetici.

## **7.1 Materiali e metodi**

### **7.1.1 Obiettivi principali dei test**

Come anticipato, la campagna sperimentale esterna è stata impostata per stimare, in ambiente reale, per mezzo di strutture che riproducono in scala uno spazio abitato, le prestazioni offerte dai moduli sperimentali fotocromatici e paragonarle con le prestazioni di un modulo basso-emissivo di larga diffusione commerciale, preso come campione di riferimento. Il confronto è stato eseguito installando il campione di riferimento e, uno alla volta, i prototipi sperimentali, su due cellule di prova identiche, orientate verso sud per creare condizioni ideali a captare la massima radiazione solare. Le misurazioni effettuate hanno consentito di valutare, tra gli altri, tre parametri specifici, fondamentali alla caratterizzazione delle schermature trasparenti: il fattore solare (G), il fattore di trasmissione luminosa e la trasmissione solare diretta valutati secondo l'angolo di incidenza della radiazione termica. Le Test-Cells

orientate verso sud con angolo zenitale nullo al mezzogiorno solare. L'ubicazione esterna dei box, in piena esposizione solare ha permesso di valutare l'intensità della radiazione e il periodo di attivazione e disattivazione dei moduli nonchè di stimare la riduzione dei carichi termici trasmessi è il livello di illuminazione garantito all'interno.

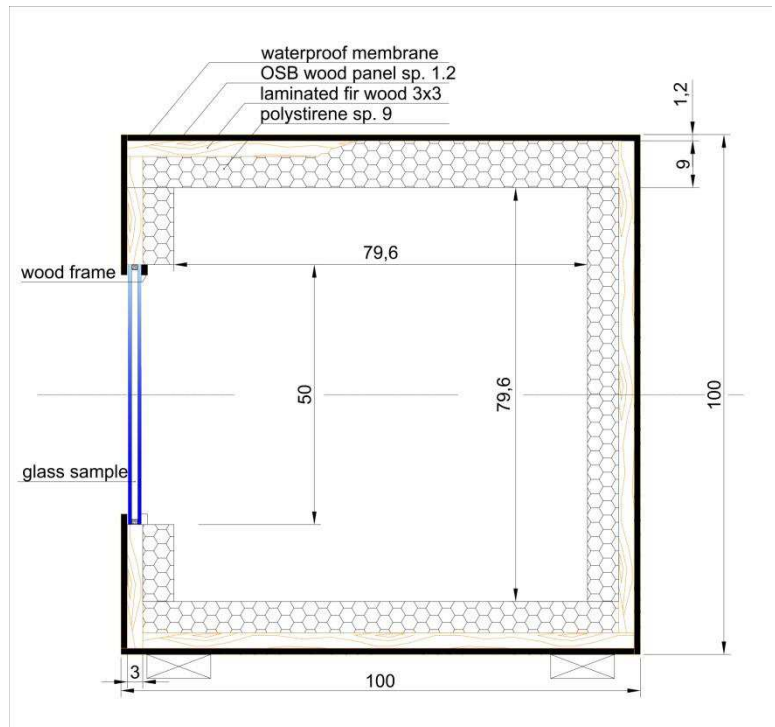
### 7.1.2 Apparecchiature di prova

Per la campagna esterna, sono state costruite due scatole cubiche aventi dimensioni esterne 1 m × 1 m × 1 m. Le celle di prova hanno le stesse caratteristiche fisiche e geometriche e rappresentano la riproduzione in scala di un edificio reale con una ampia superficie vetrata, tale da aumentare l'influenza delle finestre sulle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio. La struttura dei box è stata realizzata con un telaio di quadri in legno di abete 0.03x0.03 cm rinforzati con catene agli angoli, costituite da trapezi di legno compensato rimossi successivamente in fase di chiusura delle scatole.



Fig. 1 Cap. 7 - Realizzazione dei telai in legno

L'assemblaggio dei quadri in legno, è avvenuto esclusivamente a secco. I lati del box sono stati fissati testa a testa, con viti auto-foranti a testa svasata,  $\phi 5 \times 50$  mm. il volume interno dei box ha dimensioni 0.91m x0.91m x0.91 m. Di seguito si riporta una



sezione della struttura del box.

Fig. 2 Cap. 7 - Sezione delle celle di prova

Tutte le lavorazioni sono state eseguite all'interno dell'officina del Dipartimento di matematica e scienze ingegneristiche.



Fig. 3 Cap. 7 - Telai in legno completati

L'immagine sopra mostra il telaio completato. Per le pareti di chiusura sono stati fissati su ogni telaio, 6 pannelli in fibra di legno "OSB" dello spessore di 12 mm.



Fig. 4 Cap. 7 - Operazioni di chiusura delle scatole

Su uno di essi è stata ricavata una apertura di luce 0.25m x 0.25m con una sede interna atta ad ospitare i moduli vetrati. La parete che ospita l'apertura è removibile per consentire l'ispezione e la disposizione degli strumenti di misura.



Fig. 5 Cap. 7 - Operazioni di chiusura delle scatole

I pannelli di chiusura sono stati fissati al telaio per mezzo di viti auto-foranti lunghe 0,03m, in misura di 6 viti per ogni lato della faccia. Al di sopra della faccia finestrata è stato apposto un tettino leggermente sporgente per riparare le test-cells dagli eventi meteorici.



Fig. 6 Cap. 7 - La tettoia frontale apposta sui box

Una volta completata la fase di chiusura delle scatole si è passato alla coibentazione delle pareti. Per quest'ultima sono stati applicati dei pannelli di polistirene espanso (EPS) - densità pari a  $30 \text{ kg / m}^3$ , avente spessore di 9 cm. I pannelli sono stati uniti alle pareti con sigillante siliconico acetico.



Fig. 7 Cap. 7 - La fase di coibentazione

Ultimata la coibentazione interna si è proceduto ai trattamenti e agli accessori esterni. Sotto la base dei box, per tenerli isolati e rialzati dal pavimento, sono stati applicati 5 piedini di legno,  $0,03 \times 0,03 \times 0,03\text{m}$ .



Fig. 8 Cap. 7 - Fondo dei box con piedini

Per lo spostamento delle test-cells, sui fianchi laterali dei box sono state applicate apposite maniglie di alluminio.



Fig. 9 Cap. 7 - Maniglie di trasporto

Ultimata l'apposizione degli accessori esterni si è passati al trattamento esterno delle superfici è stata distesa una mano di vernice impregnante trasparente "Xylader" della ditta "Sikkens", per creare una barriera idrorepellente e protettiva contro gli agenti biologici come funghi e muffa. Atteso l'assorbimento dell'impregnante è stato applicato uno strato di guaina impermeabilizzante a base acrilica, in dispersione acquosa, "Sitol Aquatech" della ditta "Torggler". Successivamente, Ai vertici posteriori della base sono state applicate 2 mezzelune in legno lamellare per permettere

l'inclinazione dei box, con angolo normale alla radiazione solare incidente.



Fig. 10 Cap. 7 - mezzelune di orientamento

Su una delle pareti laterali è stato ricavato un foro  $\phi$  0.04 m, per i cablaggi degli strumenti.



Fig. 11 Cap. 7 - foro per il passaggio cavi

Al termine dell'asciugatura degli accessori in legno, è stato applicato un secondo strato di guaina acrilica impermeabilizzante.

Nell'immagine che segue sono mostrati i box di prova, completati.



Fig. 12 Cap. 7 - i box finiti

### 7.1.3 Assemblaggio dei moduli sperimentali

Per la campagna sperimentale sono stati assemblati dalla ditta Ital-Vetro S.r.l. di Teramo, tre moduli trasparenti, di cui uno standard basso-emissivo preso come termine di paragone e due moduli sperimentali con materiali fotocromatici. Il **modulo di riferimento**, con indicazione commerciale: **"33.1 Stratobel 2x Planibel Clearlite - 12mm argon 90% - 33.1 stratobel iplus Top 1.1 on clearlite + planibel Clearlite Pos. 3"** ha una stratificazione tra le più diffuse nel settore edilizio. si tratta di un vetro camera composto da: una lastra stratificata esterna formata da due vetri "Planibel Clearlite" sp. 3 mm con intercalare dello sp. 0.38 mm in Pvb, avente funzione antinfortunistica; in intercapedine sp. 12 mm riempita di gas Argon al 90%, e di una lastra stratificata interna formata da un vetro "Planibel Clearlite" sp. 3 mm con deposito Top basso-emissivo in faccia 3 (faccia rivolta verso l'intercapedine), un intercalare in Pvb sp. 0.38 e un vetro chiaro "Planibel Clearlite" sp. 3 mm. Il trattamento basso-emissivo formato dal deposito di ossidi metallici, presente in faccia tre, riflette la radiazioni nel campo dell'infrarosso, riducendo le dispersioni termiche invernali e gli apporti di energia solare nei periodi estivi. Di seguito viene riportata la stratigrafia del modulo di riferimento e la scheda tecnica del fornitore.

#### Composizione del campione di riferimento:

##### ESTERNO

1. AGC Planibel Clearlite (3 mm)  
     Intercalare PVB (0.38 mm)  
     Planibel Clearlite (3 mm)
2. Intercapedine - Argon 90% (12 mm)
3. AGC Iplus Top 1.1 Low-e on Clearlite (3 mm)  
     Intercalare PVB (0.38 mm)  
     Planibel Clearlite (3 mm)

##### INTERNO

Di seguito si riporta la scheda tecnica del materiale:

CARATTERISTICHE LUMINOSE (EN 410)	
Trasmissione luminosa - $\tau_v$ (%)	80
Riflessione luminosa - $\rho_v$ (%)	12
Riflessione interna - $\rho_{vi}$ (%)	12
Indice di resa dei colori - RD65 - Ra (%)	98

CARATTERISTICHE ENERGETICHE		
	EN 410	ISO 9050
Fattore solare - g (%)	59	56
Riflessione energetica - $\rho_e$ (%)	24	25
Trasm. energ. diretta - $\tau_e$ (%)	52	49
Assorb. energ. vetro 1 - $a_e$ (%)	17	20
Assorb. energ. vetro 2 - $a_e$ (%)	7	6
Assorb. energetico - $a_e$ (%)	24	26
Coefficiente di shading - SC	0.68	0.64
Trasmissione UV -UV (%)	0	
Selettività	1.36	1.43

PROPRIETÀ TERMICHE (EN 673)	
Valore Ug - W/(m <sup>2</sup> .K)	1.3

ALTRE CARATTERISTICHE	
<b>Resistenza al fuoco</b>	<b>EN 13501-2 NPD</b>
<b>Reazione al fuoco</b>	<b>EN 13501-1 NPD</b>
<b>Resistenza ai proiettili</b>	<b>EN 1063 NPD</b>
<b>Resistenza attacchi manuali</b>	<b>EN 356 NPD</b>
<b>Resistenza urti (con pendolo)</b>	<b>EN 12600 282 / 282</b>

RIDUZIONE ACUSTICA	
<b>Isolamento al rumore aereo diretto</b>	
<b>(Rw (C;Ctr) -EN 12758) - dB</b>	<b>35 (-1; -5)<sup>(1)</sup></b>

SPESSORE E PESO	
<b>Spessore nominale (mm)</b>	<b>26.38</b>
<b>Peso (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>26</b>

Il primo dei moduli sperimentali testato ha la stessa stratigrafia del campione di riferimento con la differenza che sulla lastra stratificata esterna è applicata una pellicola fotocromatica di acetato di cellulosa distribuita dalla ditta "Raleri" di Bologna. Si tratta di una pellicola usata nel settore "automotive" per le visiere dei caschi, al fine di abbattere gli improvvisi abbagliamenti durante le gare. Per la sua applicazione, il materiale deve essere estremamente performante e reagire immediatamente agli stimoli luminosi. Il posizionamento della pellicola nella stratificazione del modulo è stato studiato per evitare di esporre direttamente il film alla radiazione solare ed evitare quindi che una attivazione estremamente reattiva e un riscaldamento eccessivo potessero compromettere le prestazioni del materiale. A

tal fine la pellicola è stata fissata in faccia 2, rivolta verso l'intercapedine. Questa configurazione della pellicola ha effetti anche sulla trasmittanza termica in quanto grazie ad una bassissima emissività riduce la frazione di calore trasferito dall'intercapedine. Il restante effetto schermante è generato dall'oscuramento del materiale che provoca un maggior riflessione (verso l'esterno nei periodi più caldi quando lo scambio termico è diretto all'interno e viceversa quanto la temperatura interna è più alta dell'ambiente esterno).

### Composizione del modulo sperimentale Low-e - FC FogStop "Raleri":

#### ESTERNO

1. **AGC Planibel Clearlite** (3 mm)  
**Intercalare PVB** (0.38 mm)  
**Planibel Clearlite** (3 mm)  
**Raleri Film FC** (0.5 mm)
2. **Intercapedine - Argon 90%** (12 mm)
3. **AGC Iplus Top 1.1 Low-e on Clearlite** (3 mm)  
**Intercalare PVB** (0.38 mm)  
**Planibel Clearlite** (3 mm)

#### INTERNO

STRATIFICAZIONE DEL MODULO SPERIMENTALE LOW-E - FC FOGSTOP RALERI

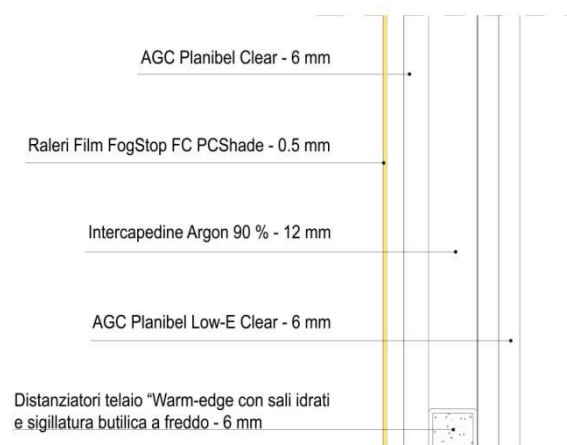


Fig. 13 Cap. 7 - Modulo sperimentale FC Raleri



Il secondo modulo sperimentale presenta una stratigrafia leggermente diversa rispetto al prototipo "Raleri" e il materiale fotocromatico è di altra natura. Si tratta comunque di un polimero termoplastico ma applicato su base di policarbonato di tipo "Lexan". Il policarbonato è largamente usato in campo ottico grazie alla sua particolare trasparenza, resistenza termica e meccanica, e alle sua durezza. Si tratta di una pellicola che reagisce lentamente agli stimoli luminosi; infatti nel settore ottico non interessa la velocità di oscuramento di un materiale ma interessano le proprietà meccaniche e ottiche. Per questo motivo il policarbonato fotocromatico si attiva con tempi assai più lunghi rispetto all'omologo "Raleri" e anche il suo passaggio dallo stato scuro allo stato chiaro richiede alcuni minuti. Per la nostra applicazione architettuale, è forse più interessante in quanto è più importante la stabilità del materiale e la conservazione delle proprietà rispetto alla reattività immediata. Trattandosi di un materiale più stabile ma meno reattivo e performante del fotocromatico in acetato "Raleri", è stato applicato in posizione più esterna e vicina alla radiazione incidente, in luogo dell'intercalare in pvb. In questo luogo, posto tra due lastre di vetro "Planibel Clearlite 3 mm, si garantisce l'attivazione del materiale e lo si posa comunque in posizione riparata dall'irraggiamento diretto del sole.

## Composizione del modulo sperimentale Low-e - FC Tens-H "Lexan":

### ESTERNO

1. **AGC Planibel Clearlite (3 mm)**  
**Intercalare PVB (0.38 mm)**  
**Planibel Clearlite (3 mm)**  
**Tens-H Film FC Policarbonato (1 mm)**
2. **Intercapedine - Argon 90% (12 mm)**
3. **AGC Iplus Top 1.1 Low-e on Clearlite (3 mm)**  
**Intercalare PVB (0.38 mm)**  
**Planibel Clearlite (3 mm)**

### INTERNO

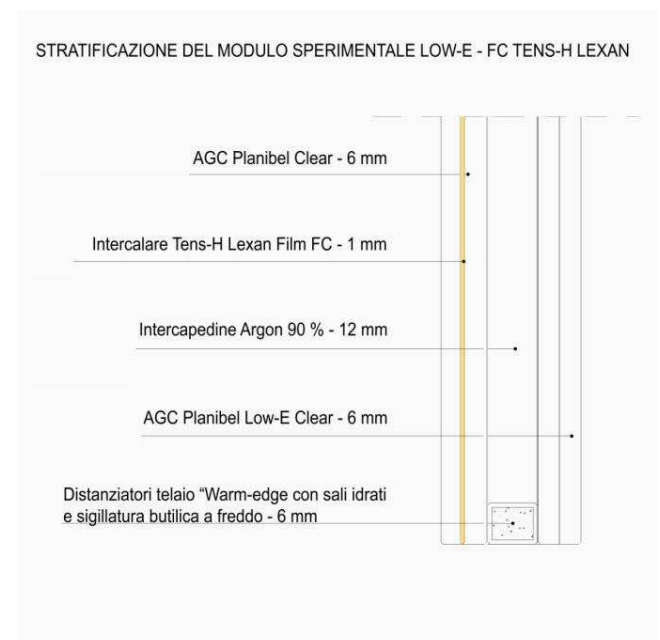


Fig. 14 Cap. 7 - Modulo sperimentale FC TensH Lexan

### 7.1.4 Gli strumenti di misura

Una volta equipaggiate le celle di prova con i relativi moduli sperimentali, si è proceduto all'installazione del sistema di monitoraggio. Tutte le sonde degli strumenti sono state collegate con un **datalogger** per l'acquisizione dei dati. La metodologia scelta per il rilievo delle caratteristiche dei sistemi sperimentali è basato sul confronto delle reciproche prestazioni in relazione alle stesse condizioni ambientali al contorno. Per avere dati simultanei dei parametri ambientali esterni e dei parametri ambientali interni ai box, gli strumenti di misura sono stati duplicati, all'interno e all'esterno dei box di prova. Per i rilievi delle temperature dell'aria interna ed esterna sono state usate delle **sonde di temperatura (RTD) con collegamento (HTF50) a 4 fili**. Esternamente la sonda è stata posizionata in prossimità delle celle mentre all'interno, per ottenere un valore medio attendibile, tramite appositi ganci, sono state collocate al centro del volume dei box.



Fig. 15 Cap. 7 - Sonde di temperatura (RTD) con collegamento (HTF50) a 4 fili

Per la misura delle temperature superficiali dei moduli sono stati applicati, alle superfici esterne dei vetri, dei **Sensori di temperatura “Pyrocontrolle-Classe B platino,**

debitamente schermati con nastro adesivo di alluminio al fine di schermare gli apporti termici esterni e dare una stima quanto più precisa della temperatura superficiale effettiva dei vetri.



Fig. 16 Cap. 7 Sensori di temperatura “Pyrocontrolle-Classe B platino

Il flusso di calore che passa attraverso il modulo trasparente è stato rilevato per mezzo di un **fluxmetro Hukseflux HFP01**. Questo sensore a termopila ha un diametro di 0,080 m e uno spessore di 0,005 m. Viene impiegato per le misurazioni della Resistenza termica (valore R) e della trasmittanza termica (valore U) degli involucri edilizi secondo le norme ISO 9869, ASTM C1046 e ASTM 1155. Lo strumento è stato calibrato in conformità della ISO 8302 e della ASTM C177. L'accuratezza prevista è  $\pm 3\%$ , con una sensibilità di  $\pm 0,1 \text{ W/m}^2$ .



Fig. 17 Cap. 7 - Flussimetro Hukseflux HFP01SC a termopila, diam. 0,080 m e sp. 0,005 m.

Per la rilevazione della radiazione solare globale (diretta e diffusa) ci si è serviti di **radiometri globali LSI - DPA153**, del tipo a

termopila, conformi alla ISO 9060 - prima classe. Tali radiometri hanno capacità di misura della radiazione da 300-3000 nm. Per la misura della radiazione solare globale esterna, corrispondente alla radiazione solare incidente sui vetri, il piranometro è stato posizionato, parallelamente ai moduli trasparenti, nella mezzeria dei box di prova. Per la stima della radiazione solare globale trasmessa dal vetro, il radiometro è stato messo in posizione parallela a quest'ultimo e ad una distanza da esso di 5 dalla superficie interna del modulo, per evitare fenomeni di ombreggiamento su di esso.



Fig. 18 Cap. 7 - radiometri globali LSI - DPA153

Gli strumenti fin qui definiti sono serviti per la misura delle caratteristiche termiche dei moduli sperimentali. Per la determinazione dei fattori fotometrici, relativi cioè alla luminosità, ci si è serviti di uno **spettrofotometro CL-500°**, Conformato alla norma DIN 5032 Parte 7 Classe B. Tale strumento, operativo nella gamma di lunghezze d'onda del visibile, ci ha fornito una stima diretta della trasmittanza luminosa e la stima indiretta del fattore di trasmissione luminosa.

Per le prove fotometriche, grazie ad un apposito cavalletto, è stato possibile posizionare lo spettrometro in tutte le posizioni necessarie.



Fig. 19 Cap. 7 - Spettrofotometro CL-500° in uso

## 7.2 Il sistema di rilevazione

La campagna sperimentale è stata condotta da febbraio a giugno 2018, sul terrazzo del Dipartimento di "Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche" dell'Università. Le celle di prova sono state posta a distanza tale, l'una dall'altra tale da evitare l'ombreggiamento reciproco durante le fasi sperimentali. Per assicurare risultati più attendibili possibile e intercettare il massimo della radiazione solare, le celle sono state esposte a sud ed orientate con angolo zenitale nullo rispetto al mezzogiorno solare.



Fig. 20 Cap. 7 - Disposizione dei box di prova  
I moduli sperimentali sono stati installati nelle relative sedi predisposte sui moduli e sigillati esternamente con silicone acetico. All'interno delle Test-Cells sono state predisposte delle staffe per la collocazione dei solarimetri interni e su una di esse è stato applicato un predellino per il sostegno del solarimetro esterno. Sulla superficie superiore è stato predisposto un gancio per il supporto delle sonde di temperatura interna.



Fig. 21 Cap. 7 - Posizionamento dei solarimetri  
Il resto della strumentazione è stata applicata direttamente sulla superficie dei moduli.

### 7.2.1 Le condizioni al contorno

Le prove sperimentali sono state condotte simultaneamente sulle due celle. Una sempre equipaggiata con il campione di riferimento e l'altra alternativamente con i moduli sperimentali. In questo modo sono state assicurate le medesime condizioni ambientali al contorno. Per i parametri ambientali esterni è stato predisposto un **solarimetro esterno** per la misura della radiazione solare incidente e una **sonda termica** per il rilievo della temperatura esterna. Sui vetri dei moduli è stato applicato un **sensore di temperatura**, schermato per il rilievo delle temperature superficiali esterne..



Fig. 22 Cap. 7 - Sistema di rilevazione

### 7.2.2 Sistema di rilevazione esterno

Il sistema di rilevazione esterno, mostrato in figura 17, è costituito da due **Test-Cells**,

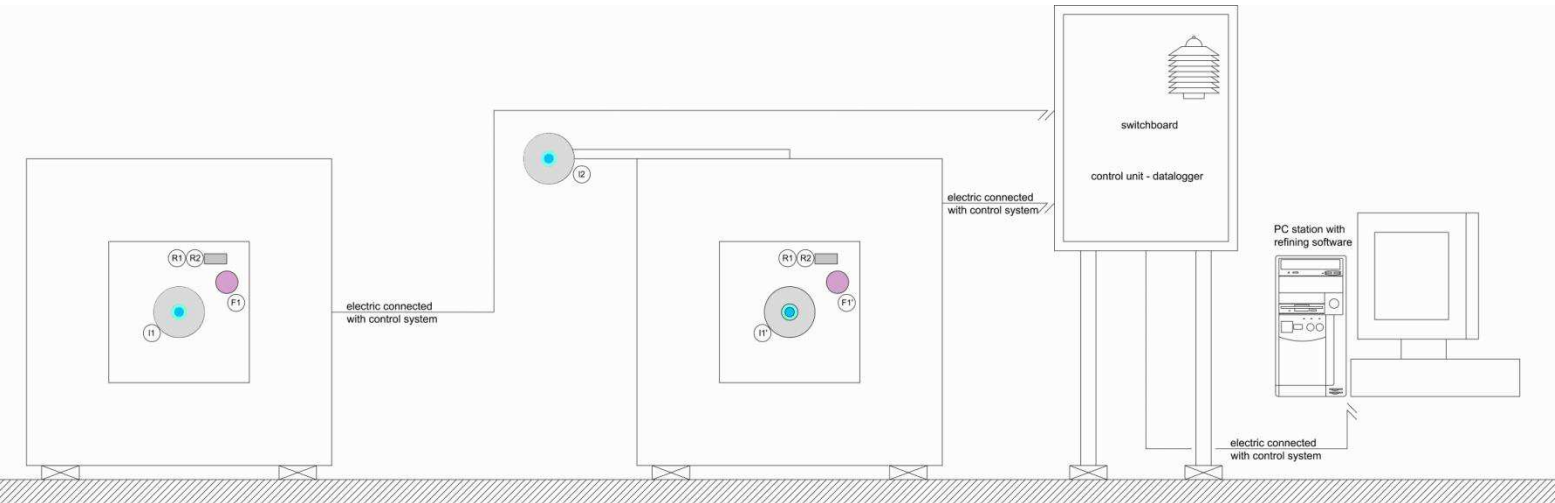


Fig. 23 Cap. 7 - Sistema di rilevazione esterno

sedi dei moduli sperimentali, che ospitano gli strumenti di rilevazione, da cui, passando per appositi fori, sono raccolti i **cavi elettrici** delle sonde e condotti ad un quadro elettrico che ospita una **centralina di acquisizione dati** (Datalogger). L'unità di controllo processa i dati grezzi grazie ad un **processore** programmabile dotato di **memoria**.

I dati analogici raccolti vengono poi digitalizzati attraverso un **convertitore ADC**. Dal convertitore analogico-digitale, i dati raffinati vengono inviati, tramite porte di rete, ad una **PC Station** la quale per mezzo di un software "LabVIEW", li elabora. La temperatura e l'irradianza solare esterne, sono rilevate dal una **stazione meteo..**

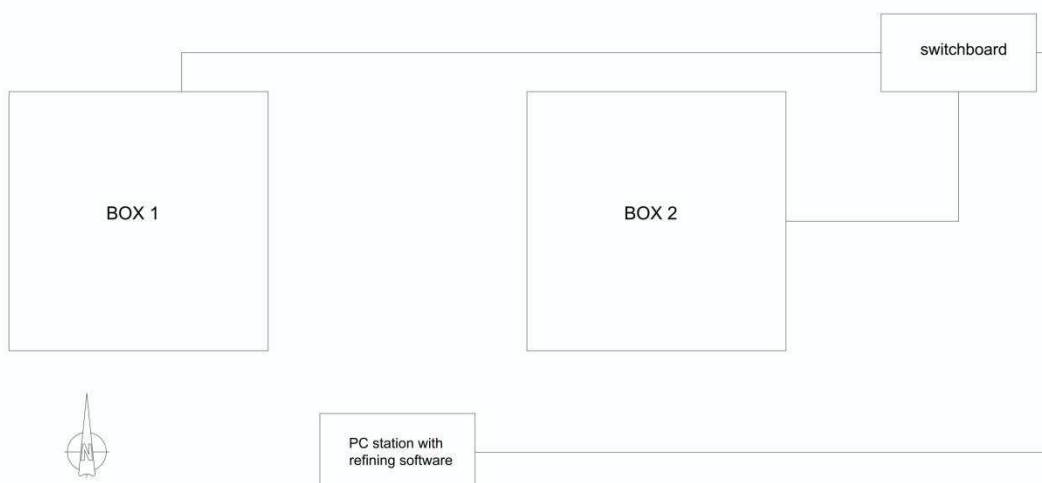


Fig. 24  
Cap. 7 -  
Planimetria  
sistema di  
rilevazione  
esterno

### 7.2.3 Sistema di rilevazione interno

Il sistema di rilevazione interno, illustrato in figura 25, è composto da una serie di strumenti appositamente disposti per il rilievo dei fattori caratterizzanti i moduli sperimentali. Come si vede per ogni modulo sono stati collocati due **sensori di temperatura superficiali (R1) e (R2)** in posizione specchiata, uno sulla lastra esterna e uno sulla lastra interna. Essi ci permettono di conoscere il gradiente di temperatura tra le superfici esterne e le superfici interne dei moduli e stimare il valore della trasmittanza termica ( $U_g$ ). La temperatura dell'aria interna ai box è rilevata per mezzo di una **sonda termica (R3)**, posta al centro dell'ingombro interno della cella. Per misurare la radiazione solare direttamente trasmessa dal vetro, all'interno di ogni cellula è stato installato, quasi a contatto della superficie vetrata interna,

un **solarimetro globale (I1)**. Il rapporto tra la parte di radiazione solare direttamente trasmessa e la radiazione solare incidente, rilevata con il solarimetro esterno, ci ha fornito il valore della trasmissione solare diretta ( $\tau_e$ ).

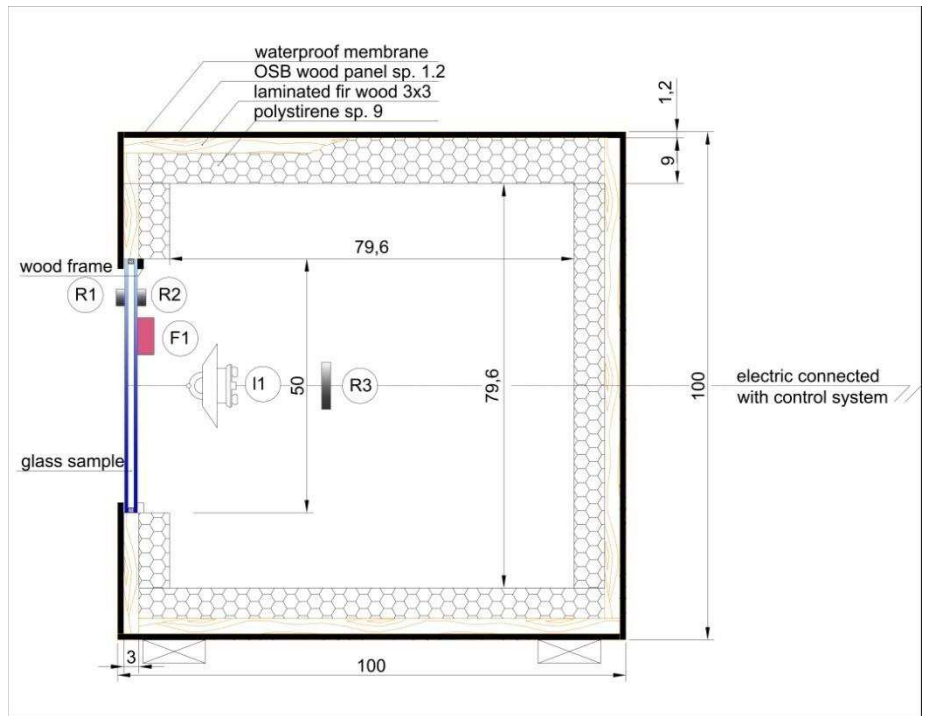


Fig. 25 Cap. 7 - Il sistema di rilevamento interno

Sotto al sensore di temperatura superficiale (R2), a distanza tale da non subire ombreggiamento, è stato posto un **termo-flussimetro (F1)** per misurare il flusso di calore che passa attraverso il modulo trasparente. Dalla sezione rappresentata in figura 25, è possibile vedere le caratteristiche geometriche della cellula e la composizione dei materiali usati.

### 7.3 I test fotometrici

#### 7.3.1 Configurazione ed avvio

L'avvio della campagna sperimentale è stato il 21 febbraio 2017 con la fase di set-up dei test fotometrici. Una volta posizionate le cellule sperimentali a distanza tale da evitare l'ombreggiamento reciproco, con la facciata

vetrata rivolte verso sud, si è proceduto con l'avvio dei test ottici, usando uno **spettrofotometro CL 500** con campo d'azione da **360 a 780 nm**.

#### 7.3.2 Errore strumentale

Per capire il margine di errore dello strumento usato, dopo aver proceduto alla calibrazione secondo la procedura indicata dal manuale tecnico del fornitore, è stato comparato il valore noto (da scheda tecnica), del fattore di trasmissione luminosa  $\tau_{vn}$  relativo ad un vetro Float chiaro da 3 mm preso a campione, con il valore del fattore di trasmissione luminosa  $\tau_{vs}$ , rilevato strumentalmente. Il fattore trasmittanza luminosa nota  $\tau_{vn}$ , di un vetro Float chiaro da 3 mm, secondo la scheda tecnica, è  $\tau_{vn} = 90.1\%$ . Il fattore di

trasmissione luminosa  $\tau_{vs}$ , calcolato strumentalmente, è il rapporto, espresso in termini percentuali, tra la trasmittanza luminosa in (Lux)  $E_{v1}$ , rilevata con interposizione del Float chiaro e la trasmittanza luminosa  $E_{v0}$ , rilevata a campo aperto, senza mezzo interposto. Per la prova è stato appoggiato lo strumento su un piano ed è stata fatta la misura prima senza vetro, poi appoggiando il vetro sul "receptor window" dello strumento. Di seguito, la tabella con i dati rilevati:

CALCOLO DELL'ERRORE STRUMENTALE				
Data /ora	$E_v (lx)$	$t_v (lx)$	interposizione Float 3mm spettrometro	<b>errore strumentale</b>  <b>2,44%</b>
21/02/2017 12:38:21	70035,86719	87,90%	NO	
21/02/2017 12:38:38	61561,52726		SI	
DATO DA SCHEDA TECNICA		90,10%		

Tabella 1 Cap. 7 - Tabella di calcolo errore di sistema

Dal rapporto tra la trasmittanza luminosa misurata dietro al vetro campione

$E_v=70035.8$  l e la trasmittanza rilevata senza interposizione dello stesso  $E_v=61561.5$  è

stato ricavato il valore del fattore di trasmissione luminosa sperimentale  $\tau_V = 87.9$  %. Considerando che il fattore di trasmissione

luminosa, da scheda tecnica risulta essere  $\tau_V = 90.1$  % si desume che l'**errore strumentale** è pari al **2.44** %.

### 7.3.3 Interferenza del box sul fattore di trasmissione luminosa $\tau_V$

Al fine di ottenere dati fotometrici attendibili e confrontabili, è stato necessario calcolare l'influenza del box sul fattore di trasmissione luminosa. Anche se la finestra di ricezione dello strumento è praticamente adesa alla superficie interna del vetro, le pareti del modulo schermano comunque la luce solare indiretta ai bordi dello spettrofotometro.



Fig. 26 Cap. 7 - spettrometro a bordo box

Questa frazione di luce schermata è valutabile misurando la trasmissione luminosa senza il pannello frontale del box, prima posizionando lo spettrometro proprio sul bordo della cellula poi ponendolo esternamente ad essa. I valori dell'illuminanza dentro e fuori da box, sono riportati nella tabella che segue. Per definire realmente l'interferenza del box sul fattore di trasmissione luminosa, al valore ottenuto dal rapporto tra la trasmittanza luminosa esterna e la luminanza luminosa interna, va aggiunto l'errore percentuale, calcolato al punto precedente, pari a 2,44%. Di seguito si riporta una tabella di calcolo dell'interferenza trattata.

CALCOLO INTERFERENZA BOX SU FATTORE DI TRASMISSIONE LUMINOSA					
Data /ora	$E_V (lx)$	Posizione spettrometro	$\tau_V (lx)$	$\tau_V (lx)$ CORRETTO	<b>INTERFERENZA BOX</b>
21/02/2017 12:38:21	70035,87	ESTERNO	91,38%	<b>93,82%</b>	
21/02/2017 12:38:38	63999,01	SU BORDO BOX			
ERRORE STRUMENTALE			2,44%		

Tabella 2 Cap. 7 - Tabella di calcolo interferenza box

L'interferenza del box sul fattore di trasmissione luminosa è del **6.18** %.



### 7.3.4 Le grandezze fotometriche con il prototipo FC "Raleri"

Le grandezze fisiche rilevate in sede di campagna sperimentale sono finalizzate alla caratterizzazione del punto di vista termico e ottico, dei moduli sperimentali. Dal punto di vista ottico tramite lo spettrofotometro è stata misurata l'**illuminanza E** trasmessa attraverso il vetro e l'illuminanza incidente. Il rapporto tra le due illuminanze ci ha fornito il valore del **flusso luminoso percentuale  $\phi$** . Il **fattore di trasmissione luminosa  $\tau_v$**  è stato

altresì misurato attraverso la misura della trasmittanza spettrale per ogni lunghezza d'onda, seguendo le disposizioni della norma UNI EN 410. Altre grandezze caratterizzanti i moduli, sono state definite attraverso un simulatore digitale "Daylight Visualizer" e si tratta del **fattore di luminosità diurna FLD**, della distribuzione dell'illuminanza E nello spazio e della **luminanza L**.

### 7.3.5 Il flusso luminoso trasmesso $\Phi_v$ - confronto REF - FC "Raleri"

Il flusso luminoso trasmesso  $\Phi_v$ , espresso in %, è stato calcolato facendo il rapporto tra i valori dell'illuminanza trasmessa  $E_{v \text{ int}}$  e i valori dell'illuminanza incidente  $E_{v \text{ est}}$ .

A loro volta, le 'illuminanze rilevate  $E_v$  (lux), sono il rapporto tra il flusso luminoso e la superficie illuminata dei moduli ( $m^2$ ). Avendo a disposizione un solo spettrofotometro, per la prova è stata usata la stessa cella, sostituendo di volta in volta la facciate vetrate. Per ogni rilievo sono state fatte tre misure di illuminanza: una senza pannello per la misura della illuminanza solare incidente, una con il modulo sperimentale FC e una con il modulo di riferimento Low-E. Nelle prove condotte successivamente sono state rilevate le trasmittanze spettrali  $\tau_{v\lambda}$ , per intervalli di

lunghezza d'onda, al fine di determinare i fattori di trasmissione luminosa  $\tau_v$  con il metodo indicato dalla norma UNI EN 410. La cellula di prova è stata disposta con la superficie vetrata verticale come una comune finestra. Il ricettore dello strumento è stato collocato parallelo al vetro interno, distante 7 cm dalla superficie del modulo per evitare fenomeni di interferenza e di ombreggiamento e ad una altezza centrale rispetto all'apertura.



Fig. 27 Cap. 7 - Rilievo della trasmittanza visiva

Sono state avviate le prove esponendo il modulo verso sud. L'umidità dell'aria era al 92% ed il cielo parzialmente coperto. I valori

ottenuti, riferiti al prototipo sperimentale, hanno riguardato il materiale fotocromatico allo stato attivo.

**Rilievo del giorno 22/02/2017**

$E_v$ esterno (lx)	$E_v$ low_e (lx)	$E_v$ fc (lx)	$\Phi_{vREF}$ %	$\Phi_{vFC}$ %	ora
92475,64	69169,3	42760,4	74,80%	46,24%	11:13:56
94661,64	72001,6	45318,3	76,06%	47,87%	11:28:15
97679,6	65733,2	45071,6	67,29%	46,14%	11:44:10
99095,55	73557,2	48877,6	74,23%	49,32%	12:00:08
99579,34	74670,5	45736,5	74,99%	45,93%	12:15:11
97559,17	73200,7	44191,8	75,03%	45,30%	12:29:48
96483,6	70733,3	44598,4	73,31%	46,22%	12:45:37
94899,52	69553,7	43252,6	73,29%	45,58%	13:00:02
95030,76	68981,5	42900,3	72,59%	45,14%	13:15:26
93576,12	67541,9	40542,9	72,18%	43,33%	13:30:04
89915,14	65559,1	39003,4	72,91%	43,38%	13:45:18
83419,7	59486,3	36240,8	71,31%	43,44%	14:00:53
82444,68	59886,7	35419,6	72,64%	42,96%	14:15:02
76549,19	55715,3	32453,9	72,78%	42,40%	14:31:13
73843,98	53069,6	32103,3	71,87%	43,47%	14:46:39
65288,26	44289,3	29492	67,84%	45,17%	15:15:11

Nella tabella a fianco, si riportano i valori rilevati il 22 febbraio 2017. Dai campionamenti, sono stati ottenuti i valori percentuali dei flussi luminosi trasmessi:

$$\Phi_{vREF} = 72.70\%$$

$$\Phi_{vFC} = 45.12\%$$

**Trasmittanza visiva media**

**72,70% 45,12%**

**Rilievi del giorno 24/02/2017**

$E_v$ esterno	$E_v$ low_e (lx)	$E_v$ fc (lx)	$\Phi_{vREF}$ %	$\Phi_{vFC}$ %	ora
1341,546	750,443	557,129	55,94%	41,53%	10:26:07
1319,955	814,838	630,937	61,73%	47,80%	10:44:12
3009,054	1876,35	1442,86	62,36%	47,95%	11:03:23
3812,494	2644,63	2107,22	69,37%	55,27%	11:18:28
13680,14	8358,45	5564,14	61,10%	40,67%	11:33:53
12021,41	7127,32	4668,06	59,29%	38,83%	11:49:18
5144,437	3182,51	2353,13	61,86%	45,74%	12:05:19
9970,774	6285,01	4445,91	63,03%	44,59%	12:17:43
4735,839	2970,66	2392,25	62,73%	50,51%	12:33:00
11572,81	6631,87	4307,16	57,31%	37,22%	12:47:54

Il 24 febbraio è stata ripetuta la prova in una giornata piovosa con umidità al 77%. Si è visto che il flusso luminoso del modulo REF basso-emissivo si è abbassato circa il 10% e quella del modulo FC è rimasta costante. Ciò ad indicare che nelle giornate di luce completamente diffusa il modulo FC si oscurato meno e ha consentito una maggior trasmissione di luce naturale. Di seguito i valori ottenuti:

$$\Phi_{vREF} = 61.47\%$$

$$\Phi_{vFC} = 45.01\%$$

**Trasmittanza visiva media**

**61,47% 45,01%**

Tabella 3 Cap. 7 -Illuminanze-flussi luminosi trasmessi

Anche il 1 marzo è stata ripetuta la prova, in una mattinata serena. Di seguito i dati rilevati..

**Rilievo del giorno 01/03/2017**

$E_v$ esterno	$E_v$ low_e (lx)	$E_v$ fc (lx)	$\Phi_{vREF}$ %	$\Phi_{vFC}$ %	ora
87944,51	66902,9	47721,7	76,07%	54,26%	11:12:56
89352,55	66783	40673,4	74,74%	45,52%	0,61823
91651,97	66339,1	44765,5	72,38%	48,84%	11:45:10
91702,25	68147,3	43694,2	74,31%	47,65%	12:00:08
90904,77	68546,9	47058,6	75,41%	51,77%	12:19:11
91851,23	69305,9	46934,3	75,45%	51,10%	12:31:48
92739,7	69221,8	43147,4	74,64%	46,53%	12:49:37
90865,63	66742,8	41510,9	73,45%	45,68%	13:18:26
86356,1	63134,4	42476,7	73,11%	49,19%	13:40:04
82974,66	60612,6	38814,1	73,05%	46,78%	13:56:04
78781,26	56105	35872	71,22%	45,53%	14:14:04
76237,74	54114,7	33211,2	70,98%	43,56%	0,87505
77820,71	52438,1	34279,3	67,38%	44,05%	14:36:04

In questa giornata di cielo sereno, i valori dei flussi luminosi, sono risultati leggermente superiori:

$$\Phi_{vREF} = 73.25 \%$$

$$\Phi_{vFC} = 47.25 \%$$

<b>Trasmittanza visiva media</b>	<b>73,25%</b>	<b>47,73%</b>
----------------------------------	---------------	---------------

Tabella 4 Cap. 7 - Illuminanze-flussi luminosi trasmessi

I rilievi ottenuti sono stati effettuati posizionando le pareti vetrate delle cellule in posizione verticale, sia perché i risultati si riferiscono ad una finestra di parete che è verticale, sia perché posizionando lo spettrofotometro in direzione normale alla radiazione solare si sarebbe andati oltre la

capacità di misura dello strumento (100000 lux). I dati dei flussi luminosi rilevati sono di seguito riassunti. Sono stati omessi i valori del giorno 24 febbraio in quanto la variabilità repentina delle condizioni meteo non ha concesso il tempo di effettuare rilievi alle stesse condizioni al contorno.

**Comparazione sperimentale  $\Phi_v\%$**

	FC "Raleri"	Low-E REF	Variazione
$\Phi_v\%$	45.12÷47.73	72.70÷73.25	25.5÷27.6

Tabella 5 Cap. 7 - Comparazione dei valori di flusso luminoso trasmesso  $\Phi_v$

### 7.3.6 Studio della variazione della trasmissione luminosa $E_v$ - 28/02/2017

Dopo aver rilevato sperimentalmente i valori dei flussi luminosi dei moduli, il 28 febbraio 2017 è stato fatto un rilievo delle illuminanze, fino al tramonto, alle ore 17:53. Lo studio ha fatto rivelare il valore di trasmittanza luminosa per la quale si disattiva la pellicola fotocromatica. Questo dato è fondamentale ai fini di una eventuale studio di economicità del progetto in quanto permette di valutare l'incidenza dell'oscuramento del materiale sui

consumi elettrici per l'eventuale compensazione del deficit luminoso con la luce artificiale. A tal fine, sono stati rilevati i valori di illuminanza trasmessa dai moduli, ad intervalli di 15', dalle ore 10:30 del mattino fino alle ore 18:00. Dai dati rilevati è stato ricavato il gradiente di luminosità tra il modulo di riferimento e il modulo sperimentale fotocromatico.

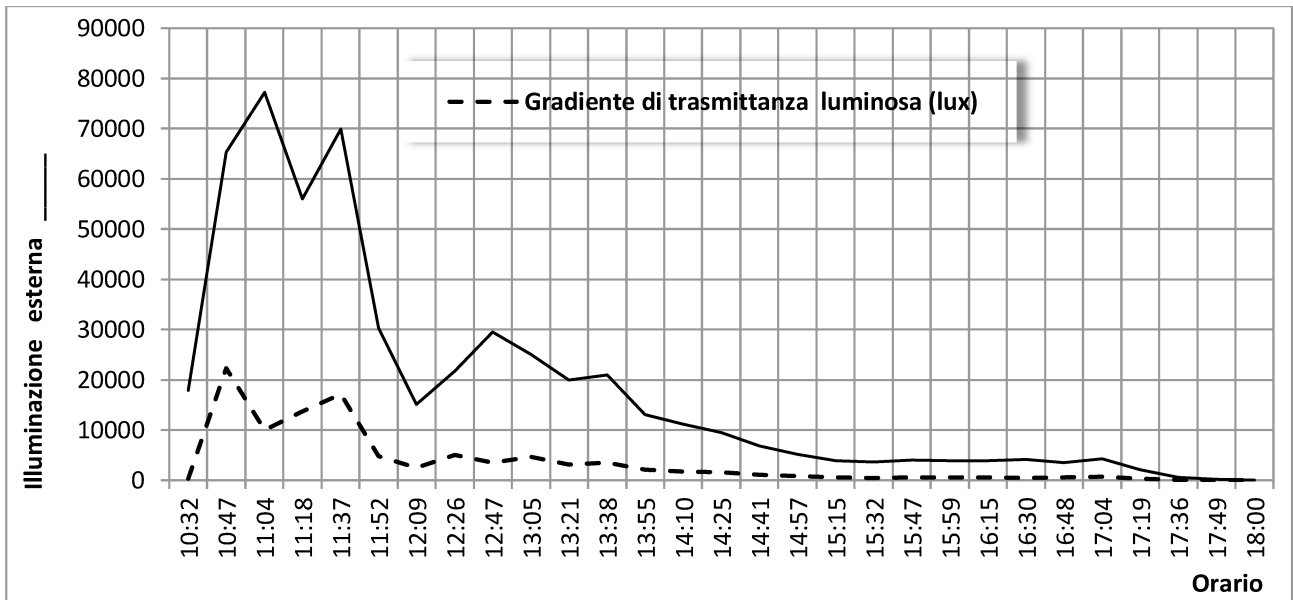


Fig. 28 Cap. 7 - Diagramma del gradiente di luminosità tra il modulo di riferimento e il modulo sperimentale

Dal grafico si evince chiaramente che il gradiente di luminosità assume valori più alti nelle ore di massima radiazione solare e si riduce fino ad azzerarsi con il calare della radiazione. In sostanza nelle ore di massima radiazione si ha il massimo oscuramento del materiale e nelle ore di illuminazione minore il materiale tende gradualmente a tornare trasparente. Il comportamento del

modulo sperimentale si è dimostrato dinamicamente funzionale agli scopi della ricerca. Agisce da elemento schermante nelle ore più calde del giorno, oscurandosi gradualmente e da elemento trasparente, lasciando filtrare luce naturale, nelle ore di minor intensità di solare.

Di seguito sono mostrate le curve di illuminanza dei moduli messi a confronto.

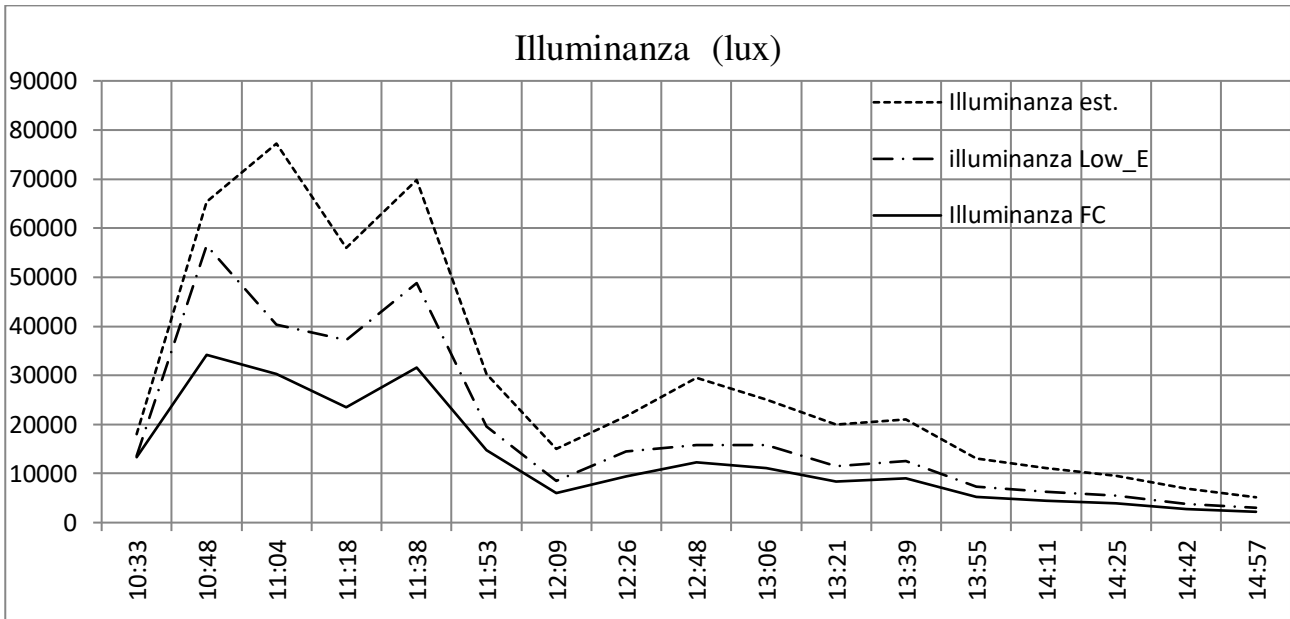


Fig. 29 Cap. 7 - Confronto delle curve di Illuminanza

Dal grafico si nota che l'attivazione del materiale contiene la trasmissione di luce naturale nelle ore di radiazione maggiore, poi

per radiazioni inferiori ai 40000 lux il materiale schiarisce e l'illuminazione tende a traggardare quella del modulo di riferimento.

### 7.3.7 Calcolo del fattore di trasmissione luminosa $\tau_v$ secondo la UNI EN 410

Per calcolare il fattore di trasmissione luminoso secondo la norma in epigrafe, è stato fatto il rilievo delle trasmittanze spettrali

ad ogni lunghezza d'onda, da **360 nm** a **780 nm**. Il fattore viene calcolato con la seguente formula:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda = 380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_{\lambda} \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda = 380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda}$$

Dove,  $D_{\lambda}$  è la **distribuzione spettrale** relativa dell'illuminante D65,  $V(\lambda)$  è il **fattore di visibilità** spettrale della visione fotopica che definisce l'osservatore normalizzato per la fotometria,  $\Delta\lambda$  è l'intervallo di lunghezze d'onda e  $\tau(\lambda)$  è il **fattore di trasmissione**

**spettrale** della vetrata rilevato in sede di test. I valori per intervalli di lunghezza d'onda di **10 nm**, del prodotto  $D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda$  sono tabellati e forniti dalla norma. Di seguito di riportano i valori normati della distribuzione spettrale per il fattore di visibilità spettrale e i valori di fattori di trasmissione spettrale del

modulo di riferimento e del modulo sperimentale "Raleri". Nella tabella che segue si riportano le trasmissioni visive calcolate con il metodo descritto e sotto si nota come la

semplice applicazione della pellicola fc riduce la trasmittanza spettrale del modulo nel campo del visibile.

03/08/2017 09:13	E <sub>v</sub> esterno	98511,33	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda$	
03/08/2017 09:13	E <sub>v</sub> REF Low-E	74985,67	$\tau(\lambda)_{\text{Low-e}}$	= 76,16257602 / 99,9999 = <b>76,16%</b>
03/08/2017 09:13	E <sub>v</sub> FC Raleri	51847,3	$\tau(\lambda)_{\text{FC}}$	= 52,79205961 / 99,9999 = <b>52,79%</b>
03/08/2017 15:50	E <sub>v</sub> esterno	99279,34	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda$	
03/08/2017 15:51	E <sub>v</sub> REF Low-E	76875,68	$\tau(\lambda)_{\text{Low-e}}$	= 77,49177368 / 99,9999 = <b>77,49%</b>
03/08/2017 15:52	E <sub>v</sub> FC Raleri	57557,2	$\tau(\lambda)_{\text{FC}}$	= 57,9863915 / 99,9999 = <b>57,99%</b>
03/08/2017 16:03	E <sub>v</sub> esterno	95812,73	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda$	
03/08/2017 16:03	E <sub>v</sub> REF Low-E	74678,19	$\tau(\lambda)_{\text{Low-e}}$	= 78,11735245 / 99,9999 = <b>78,12%</b>
03/08/2017 16:04	E <sub>v</sub> FC Raleri	55441,57	$\tau(\lambda)_{\text{FC}}$	= 57,91204061 / 99,9999 = <b>57,91%</b>
03/08/2017 16:19	E <sub>v</sub> esterno	88511,35	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V_{(\lambda)} \Delta\lambda$	
03/08/2017 16:20	E <sub>v</sub> REF Low-E	67396,69	$\tau(\lambda)_{\text{Low-e}}$	= 76,20490762 / 99,9999 = <b>77,49%</b>
03/08/2017 16:20	E <sub>v</sub> FC Raleri	53019,4	$\tau(\lambda)_{\text{FC}}$	= 59,87779604 / 99,9999 = <b>57,99%</b>

Tabella 6 Cap. 7 - Il fattore di trasmissione luminosa secondo la norma UNI EN 410

I valori medi rilevati con il metodo UNI EN 410 sono:  $\tau_{v \text{ Low-e}} = 77.31 \%$  -  $\tau_{v \text{ FC Raleri}} = 56.67 \%$

<b>Validazione campione di riferimento Low-E</b>			
	Valori sperimentali	Valori teorici di riferimento EN 410	Errore %
$\tau_v$	0.77	0.80	3.7
<b>Comparazione sperimentale <math>\tau_v</math></b>			
$\tau_v$	<b>FC "Raleri"</b> 0.57	Low-E REF 0.77	Riduzione <b>0.20</b>

Tabella 7 Cap. 7 - Comparazione dei valori di  $\tau_v$ .

## 7.4 I test fotometrici con il prototipo FC "Tens-H"

### 7.4.1 Il flusso luminoso trasmesso $\Phi_v$ - confronto REF - FC "Tens-H"

Gli stessi test fotometrici, condotti sul modulo sperimentale FC "Raleri", sono stati eseguiti sul prototipo FC "Tens-h". Il calcolo è stato

fatto facendo il rapporto dei flussi luminosi  $E_v$ , trasmessi dai singoli moduli e i flussi luminosi incidenti  $E_{v\ est.}$

Rilievo illuminanze del giorno 08/06/2017					
$E_v$ esterno	$E_v$ low_e	$E_v$ fc	$t_v$ low_e	$t_v$ fc	ora
97305,17	71588,23	41268,63	73,57%	42,41%	13:40:57
96744,98	72116,13	46655,94	74,53%	48,22%	13:48:46
95398,20	69881,46	43117,85	73,25%	45,19%	13:52:54
99528,76	73388,10	47433,94	73,73%	47,65%	14:30:28
Trasmittanza visiva media			<b>73,77%</b>	<b>45,86%</b>	

Tabella 8 Cap. 7 - Illuminanze e trasmittanze visive

Il prototipo sperimentale FC "Tens-H", allo stato attivo ha trasmesso un flusso luminoso del 45.86% rispetto al modulo di riferimento che ha fatto rilevare un flusso del 73.77%.

Si fa notare che l'energia luminosa trasmessa dal prototipo FC "Tens-H" è circa la stessa di quella trasmessa dal FC "Raleri".

Comparazione sperimentale $\Phi_v\%$			
	FC "Tens-H"	Low-E REF	Variazione
$\Phi_v\%$	45.86	73.77	27.91

Tabella 9 Cap. 7 - Comparazione dei valori di flusso luminoso trasmesso  $\Phi_v$

### 7.4.2 Calcolo del fattore di trasmissione luminosa $\tau_v$ secondo la UNI EN 410

Come indicato nella norma UNI EN 410, si procede al calcolo del fattore di trasmissione luminosa  $\tau_v$  secondo la formula:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda = 380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_{\lambda} \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda = 380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda}$$

La metodologia di calcolo, indicata al paragrafo "9.3.7" permette il calcolo del fattore di trasmissione luminosa secondo i valori normalizzati del **fattore di distribuzione spettrale  $D_{\lambda}$** , per il **fattore di visibilità relativa  $V(\lambda)$**  dell'illuminante D65, indicati dalla normativa.

06/08/2017 13:40	$E_v$ esterno	97305,17	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda$	
06/08/2017 13:41	$E_v$ REF Low-E	71588,23	$\tau(\lambda)$ Low-e =	73,62533361 / 99,9999 = <b>73,63%</b>
06/08/2017 13:42	$E_v$ FC Tens-H	41268,63	$\tau(\lambda)$ FC =	42,36533583 / 99,9999 = <b>42,37%</b>
06/08/2017 13:48	$E_v$ esterno	96744,98	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda$	
06/08/2017 13:49	$E_v$ REF Low-E	72116,13	$\tau(\lambda)$ Low-e =	74,60016576 / 99,9999 = <b>74,60%</b>
06/08/2017 13:48	$E_v$ FC Tens-H	46655,95	$\tau(\lambda)$ FC =	48,16088191 / 99,9999 = <b>48,16%</b>
06/08/2017 13:52	$E_v$ esterno	95398,2	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda$	
06/08/2017 13:53	$E_v$ REF Low-E	69881,47	$\tau(\lambda)$ Low-e =	73,30906549 / 99,9999 = <b>73,31%</b>
06/08/2017 13:54	$E_v$ FC Tens-H	43117,86	$\tau(\lambda)$ FC =	45,14379577 / 99,9999 = <b>45,14%</b>
06/08/2017 14:30	$E_v$ esterno	99528,77	$\sum \tau(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda / \sum D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda$	
06/08/2017 14:31	$E_v$ REF Low-E	73388,1	$\tau(\lambda)$ Low-e =	73,78044941 / 99,9999 = <b>73,78%</b>
06/08/2017 14:35	$E_v$ FC Tens-H	47433,95	$\tau(\lambda)$ FC =	47,59450354 / 99,9999 = <b>47,59%</b>

Tabella 10 Cap. 7 - Il fattore di trasmissione luminosa secondo la norma UNI EN 410

Dalle valutazioni fatte, secondo la UNI EN 410, risulta un valore del fattore di trasmissione luminosa del modulo fotocromatico  $\tau_{v \text{ Tens-H}} = 45.82\%$ . Rispetto al

modulo FC "Raleri" che ha un  $\tau_{v \text{ Raleri}} = 56.67\%$ , nel periodo di massimo oscuramento, si riscontra un decremento di 10 punti percentuali. In sostanza il fotocromatico



"Tens-H" ha un effetto oscurante maggiore rispetto al fotocromatico "Raleri" rispetto al quale ha un fattore di trasmissione luminosa dell' 11% inferiore. Confrontato invece con il campione di riferimento basso-emissivo, la riduzione del  $\tau_v$  è pari al 31%.

<b>Validazione campione di riferimento Low-E</b>			
	Valori sperimentali	Valori teorici di riferimento EN 410	Errore %
$\tau_v$	0.77	0.80	3.7
<b>Comparazione sperimentale <math>\tau_v</math></b>			
	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
$\tau_v$	0.46	0.77	0.31

Tabella 11 Cap. 7 - Comparazione dei valori di  $\tau_v$ .

## 7.5 Analisi spettrale

### 7.5.1 Analisi spettrale dei singoli materiali schermanti

In questo paragrafo viene fatta una analisi delle curve spettrali relative ai materiali fotocromatici e al vetro di riferimento basso-emissivo. Dall'osservazione delle curve spettrali è nata l'idea di comporre un modulo sperimentale con materiali che avessero uno spettro di assorbimento spettrale sostanzialmente diverso. Il concetto è stato quello di creare una finestra intelligente che reagisse dinamicamente in funzione della reazione solare. L'effetto oscurante dinamico viene fornito dai materiali fotocromatici che reagiscono alle radiazioni nel campo dei raggi Ultravioletti e del Visibile mentre il taglio delle radiazioni infrarosse, viene offerto dai normali vetri basso-emissivi. Il funzionamento dei prototipi fotocromatici si adatta alle condizioni ambientali esterne. Nei periodi più freddi dell'anno, l'illuminazione diurna ha una durata molto limitata e sulle finestre, la luce incidente, è principalmente di tipo diffuso. In questa situazione l'azione dei fotoni non è sufficiente ad attivare il materiale fotocromatico (se non nelle ore di massima illuminazione), e la luce penetra garantendo il guadagno solare e l'illuminazione interna. Il calore che, per il "secondo principio della termodinamica", tende a fluire verso l'ambiente esterno più freddo, viene

schermato dalle lastre basso-emissive che ne riflettono i raggi infrarossi verso l'interno abitato, e ne riducono le dispersioni termiche. Nei periodi caldi, quando le ore diurne e l'intensità della radiazione solare sono maggiori, il materiale sotto l'azione della luce incidente si attiva dinamicamente, oscurandosi e riflettendo parte della radiazione nel campo del visibile e del basso infrarosso. Inoltre la rimanente radiazione entrante viene ulteriormente schermata dalla lastra basso-emissiva. Nelle prime ore diurne e nelle ore serali i moduli non si attivano e lasciano filtrare luce naturale.

Di seguito vengono proposte le curve spettrali dei singoli materiali fotocromatici, rilevate sperimentalmente. L'area compresa tra la curva allo stato attivo e la curva allo stato inattivo di ogni grafico, rappresenta l'integrale del gradiente di trasmittanza ovvero la riduzione della radiazione termica trasmessa dal vetro. Si nota facilmente che il fotocromatico "Tens-H" scherma una quantità maggiore di radiazione solare. Mentre il materiale "Raleri" si oscura in maniera consistente tra lunghezze d'onda che vanno circa dai **500 ai 690 nm**, il "Tens-H" lo fa già dai **420 nm** sino ai **700 nm**.

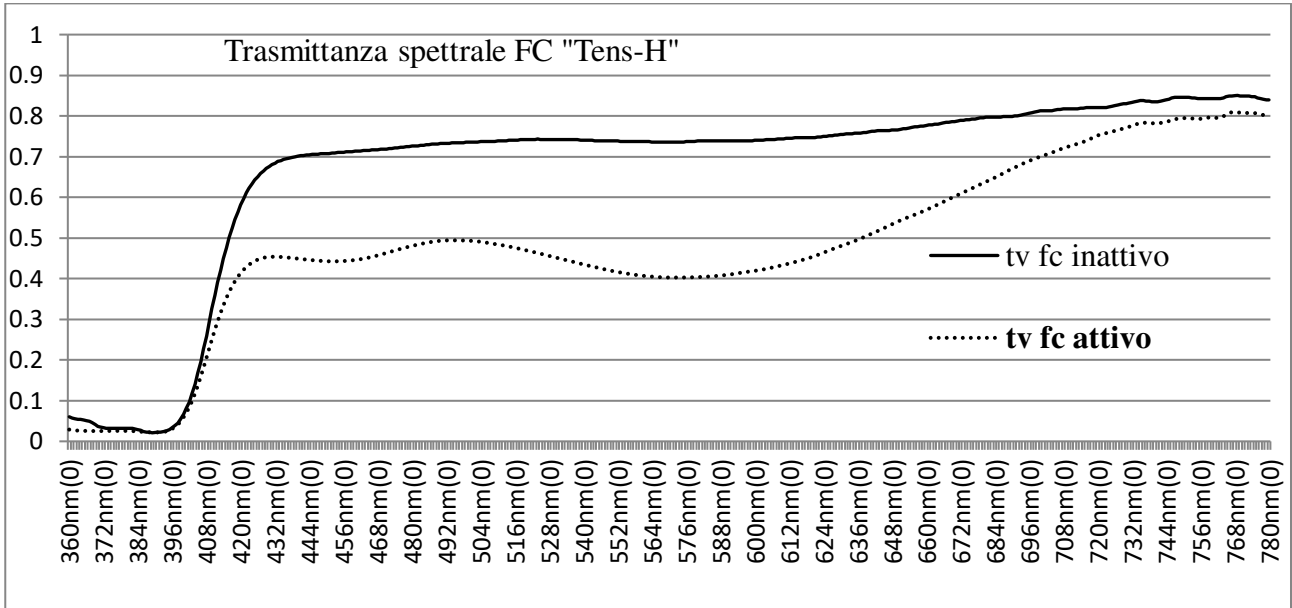


Fig. 30 Cap. 7 - Trasmittanza spettrale di una pellicola fotocromatica in Policarbonato FC "Tens-H"

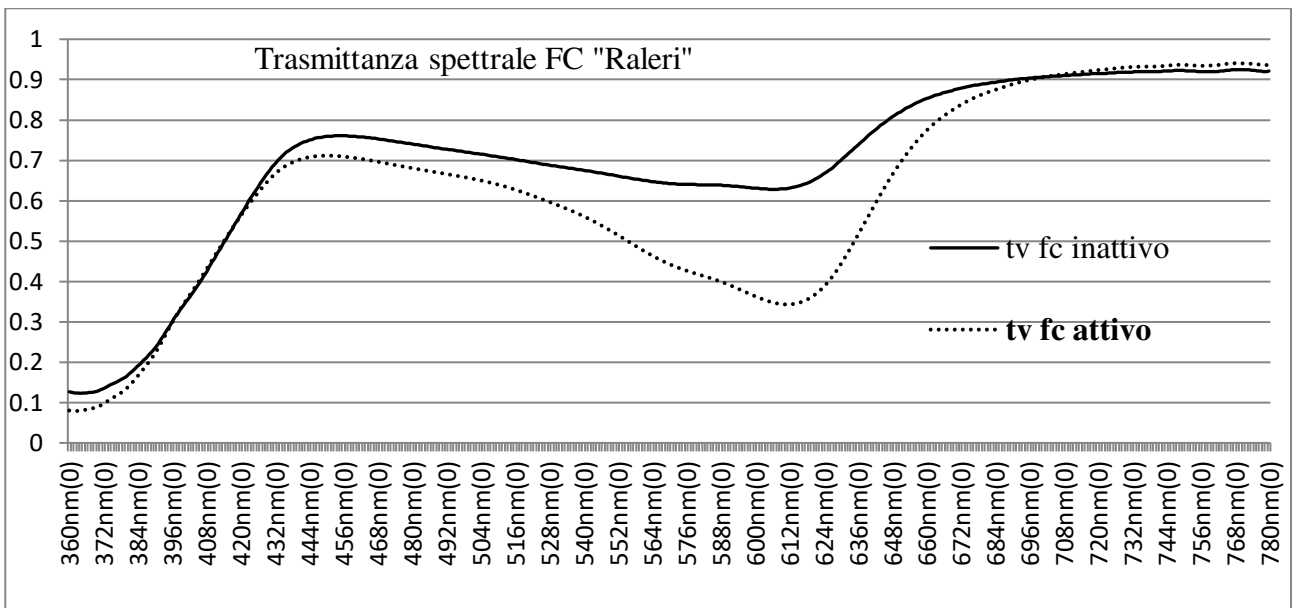


Fig. 31 Cap. 7 - Trasmittanza spettrale di una pellicola fotocromatica in acetato di cellulosa FC "Raleri"

Entrambi i materiali fotocromatici schermano tutta la radiazione **UV**. Il fotocromatico "**Raleri**" si attiva dai **432 nm** e raggiunge il massimo dell'attivazione a **612 nm**. l'effetto attivante termina intorno ai **690 nm**. Il cromogenico "**Tens-H**", si attiva in modo sostanziale intorno a **408 nm**. Conserva un elevato oscuramento quasi per tutto il campo d'azione, con picco intorno ai **576 nm**. Conserva l'effetto schermante fino al basso infrarosso **IR**.

La stratigrafia del modulo di riferimento è composta da un vetro stratificato 6/7 mm. accoppiato con un vetro stratificato 6/7 Low-E. Nel grafico sotto riportato sono riportate le trasmittanze spettrali dei singoli elementi che compongono il campione di riferimento. In nero è rappresentata la trasmittanza spettrale di un comune vetro stratificato 6/7mm, in blu è rappresentata la trasmittanza spettrale di un vetro stratificato 6/7 Low-E. Si può notare

come il vetro basso-emissivo, nel campo del visibile, fino a **700 nm**, ha una trasmittanza molto elevata; mentre nel campo dell'infrarosso scende repentinamente fino quasi ad annullarsi a **2500 nm**. Questo motiva ancora di più la scelta di accoppiare un vetro Low-E, schermante nel range dell'infrarosso con un vetro fotocromatico schermante nella radiazione visibile e ultravioletta.

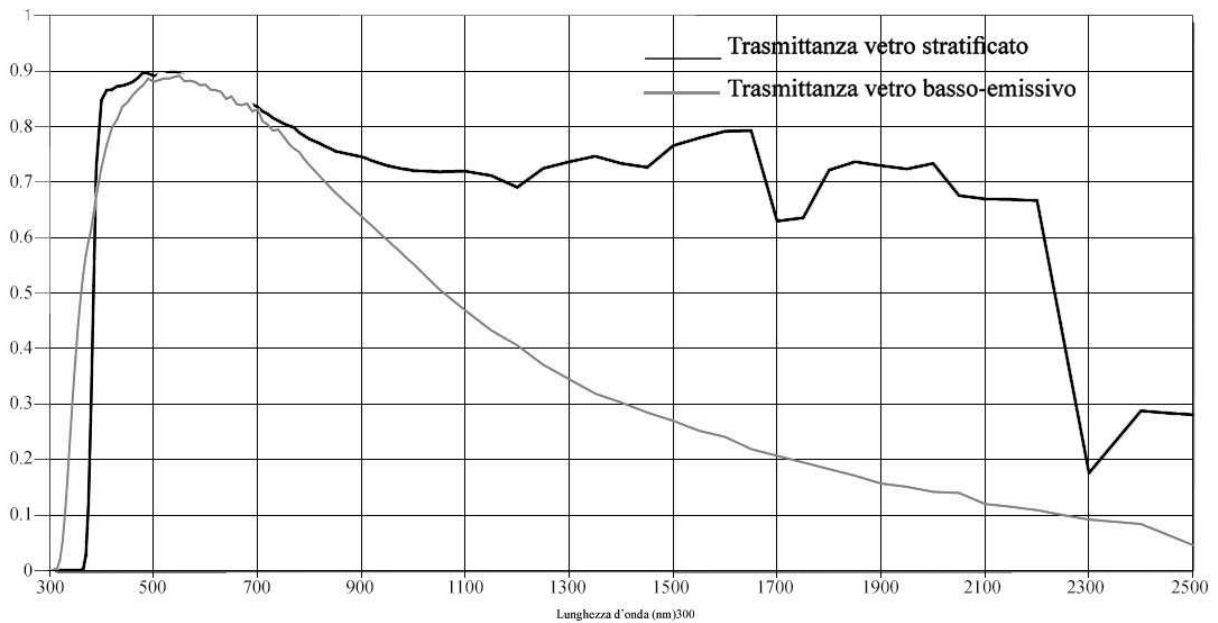


Fig. 32 Cap. 7 - Trasmittanze spettrali dei **singoli componenti** che costituiscono il modulo di riferimento REF Low-E

### 7.5.2 Analisi spettrale dei moduli assemblati

La stratigrafia dei singoli materiali, ci ha permesso di capire la potenzialità di comporre dei moduli sperimentali, accoppiando un vetro basso-emissivo, con un vetro fotocromatico. Infatti, è ormai cosa nota, che le lastre con rivestimento basso emissivo, riflettono le radiazioni nel campo

dell'infrarosso ma lasciano filtrare quelle nel campo del visibile che , occupa la fetta più importante della radiazione termica. Le lastre con rivestimento fotocromatico, allo stato attivo, riescono a schermare la radiazione nel campo dell'infrarosso. Accoppiando un vetro basso-emissivo con un vetro fotocromatico, si

ottiene un modulo sperimentale che agisce da  
 su quasi tutta la radiazione termica. di seguito  
 sono riportati i diagrammi della trasmittanza

elemento dinamico schermate  
 spettrale del modulo di riferimento REF Low-  
 E e dei due moduli sperimentali.

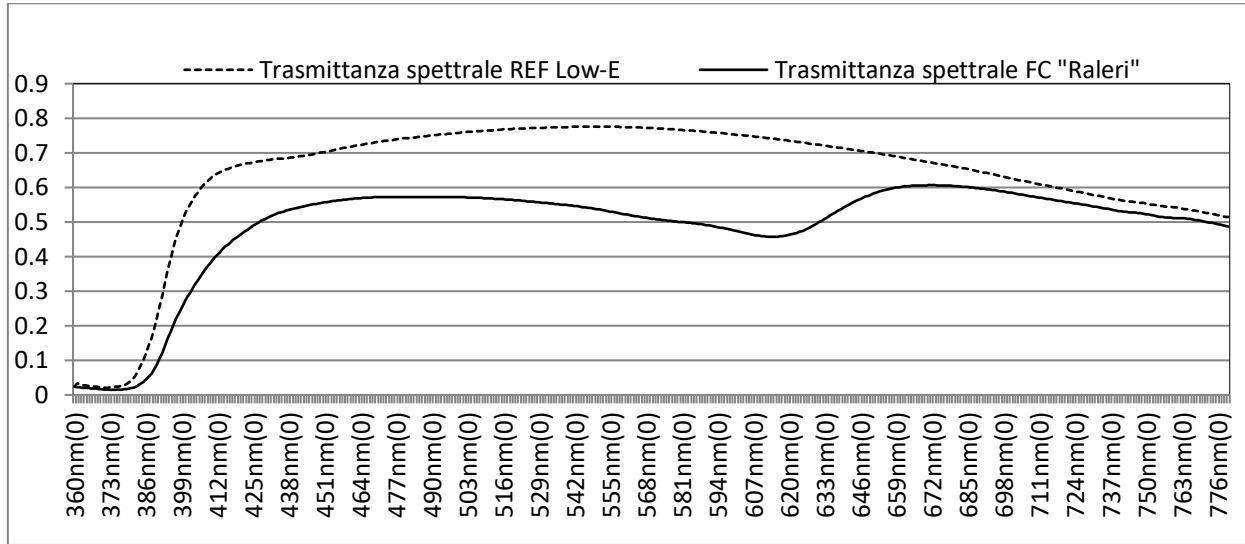


Fig. 33 Cap. 7 - Confronto della Trasmittanza spettrale del modulo REF Low-E con modulo sperimentale FC "Raleri"

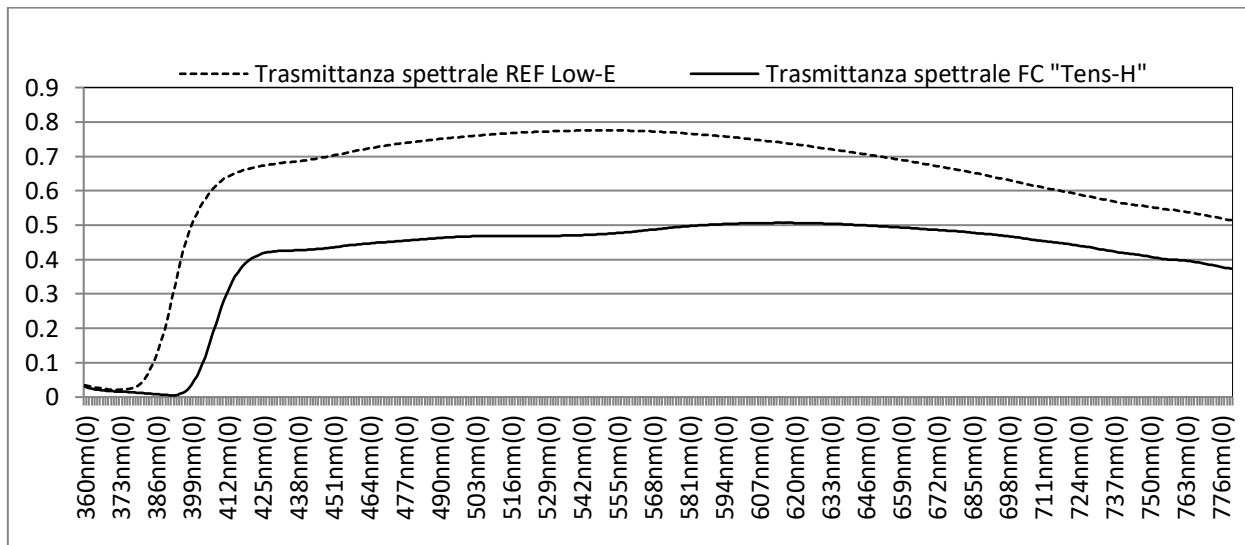


Fig. 34 Cap. 7 - Confronto della Trasmittanza spettrale del modulo REF Low-E con modulo sperimentale FC "Tens-H"

Le trasmissioni luminose rilevate sui moduli  
 sono il prodotto delle trasmissioni luminose degli  
 elementi che li compongono. Analizzando il  
 diagramma in figura 42, si osserva la riduzione  
 della trasmissione luminosa del modulo  
 sperimentale FC "Raleri" rispetto al modulo

basso-emissivo REF. Ciò mostra come la  
 pellicola fotocromatica nella fase di oscuramento  
 generi un aumento dell'energia riflessa verso  
 l'esterno con concomitante riduzione di quella  
 trasmessa. L'effetto schermante è visibile anche  
 sul modulo FC "Tens-H". In questo caso,

l'abbassamento della trasmissione luminosa è più uniforme e si estende su un campo di

lunghezze d'onda maggiore, procurando i suoi effetti anche nel basso infrarosso.

## 7.6 Conclusioni sulle caratteristiche luminose

Partendo dalla premessa che come campione di riferimento è stato usato un vetrocamera basso-emissivo "AGC" altamente performante, attualmente tra i più diffusi ed efficienti vetro-camera basso-emissivi presenti sul mercato, è stato possibile studiare Valutare la bontà dei prototipi sperimentali fotocromatici sia in termini di prestazioni che in termini di comportamento dinamico reversibile rispetto all'energia solare incidente. L'analisi delle **trasmissionze spettrali** dei singoli materiali ha dato spunto alla composizione di prototipi sperimentali composti da lastre di vetro, riflettenti nello spettro dell'infrarosso (basso-emissivi) con lastre di tecnopolimeri fotocromatici, riflettenti alle radiazioni del visibile. L'intenzione è stata quella di formare dei sistemi trasparenti capaci di contenere il flusso termico nei periodi di massimo irraggiamento solare, intervenendo lungo tutto l'intervallo della radiazione termica. L'obiettivo è stato confermato in sede di campagna sperimentale attraverso la rilevazione delle trasmissionze spettrali dei moduli, i quali hanno contenuto l'apporto energetico, dalle radiazioni infrarosse a quelle ultraviolette. Già a margine dello spettro visibile (370 nm), entrambi i vetri FC si sono

attivati, iniziando a diminuire gradualmente la trasmittanza spettrale trasmessa rispetto al campione di riferimento. Tale riduzione ha mostrato, per il modulo Tens-H, valori massimi proprio in prossimità delle lunghezze d'onda di massima intensità della radiazione solare (dai 500 nm) e per il modulo Raleri, a lunghezze d'onda leggermente maggiori, intorno ai 620 nm. I moduli offrono la prestazione termica migliore nei periodi di massima radiazione, riducendo notevolmente la radiazione solare trasmessa e garantiscono un adeguato illuminamento naturale nelle ore di minor luminosità. E' stato rilevato che all'ora del tramonto e nelle prime ore del giorno, il **gradiente di luminosità** o **illuminanza** tra il modulo di riferimento e i moduli sperimentali si riduce quasi completamente (solo 5 lux), lasciando filtrare circa la stessa luce naturale. Tra le grandezze luminose che caratterizzano i sistemi vetrati, è stato valutato è Il **fattore di trasmissione luminosa  $\tau_v$** , secondo la Norma UNI EN 410. Tale fattore, per i moduli sperimentali, è stato valutato allo stato attivo dei materiali fotocromatici. I test hanno mostrato una riduzione del fattore  $\tau_v$ , dal **77.31%** del modulo campione al **56.67%** nel prototipo FC"Raleri". Per quanto riguarda il modulo FC

"Tens-H", si è passati dal 77.31% al **45.82 %**.  
 La rilevazione del fattore di trasmissione luminosa, ha permesso la valutazione di altre grandezze illuminotecniche delle quali si parlerà nel capitolo riguardante il comfort luminoso. Si tratta del fattore medio di luce

diurna, calcolato secondo il metodo indicato dalle NTR Emilia Romagna 1984 e dalla Circolare del Ministero LL. PP. del 22/05/1967, n° 3151. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei valori rilevati in sede di Test fotometrici outdoor.

Modulo	$\Phi_v$	$T_v$
	Flusso luminoso trasmesso %	Fattore di trasmissione luminosa UNI EN 410 %
Sistema Low-e REF	72.70 ÷ 73.25	77.31
Sistema Low-e FC Raleri	45.12 ÷ 47.73	56.67
Sistema Low-e FC Tens-H	45.86	45.82

Tabella 12 Cap. 7 - Tabella riassuntiva

## CAP. 8 LA CAMPAGNA ESTERNA

### I TESTS ENERGETICI

I test fotometrici hanno fornito un primo parametro ( $\tau_v$ ) utile alla definizione del comfort visivo prodotto dai moduli sperimentali. Per ciò che riguarda l'aspetto termico si fa invece riferimento a parametri energetici. I materiali fotocromatici, allo stato eccitato aumentano il coefficiente di riflessione della radiazione solare verso l'esterno, producendo variazioni sia in ambito fotometrico che radiometrico. Comprimeando lo spettro di radiazione termica trasmessa, i prototipi agiscono da elementi schermanti, limitando gli apporti di calore trasmesso. Tra le grandezze rilevate connesse al benessere termico inteso come soddisfazione della persona alla sensazione termica, vi è la riduzione della temperatura ambientale interna  $T_i$  e la riduzione della Temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente  $T_{sup,int}$ . Per gli elementi trasparenti, le norme tecniche definiscono delle caratteristiche energetiche specifiche, necessarie alla loro caratterizzazione. Tali caratteristiche sono il **fattore di trasmissione solare diretta  $\tau_e$**  e il **fattore dell'energia solare totale,  $g$** . Altre grandezze caratterizzanti sono il **fattore di riflessione energetica  $\rho$** , il **fattore di assorbimento energetico  $\alpha$** , il **fattore di trasmissione**

**UV(%)**, il **coefficiente di shading SC** (derivato del fattore solare  $g$ ) e l'**indice di selettività IS**. Le prove, sono state condotte all'esterno del terrazzo del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche, usando i sistemi descritti ai capp. 9.2.1 e 9.2.2. Dal 21 al 30 marzo sono stati condotti i test, confrontando il modulo campione con il prototipo sperimentale FC "Raleri" già usato per i test di laboratorio interno; dal 4 aprile al 19 aprile confrontando un modulo FC "Raleri" nuovo, al fine di capire la misura del decadimento della pellicola cromo-genica, e dal 11 al 29 maggio confrontando il prototipo FC "Tens-H". Le prove condotte sul modulo FC "Raleri" fino al 29 marzo, sono state eseguite tenendo le cellule in posizione verticale, esposte verso sud. I dati rilevati fino al 20 marzo non sono stati oggetto di analisi a causa delle condizioni meteo estremamente variabili e per le interruzioni tecniche nelle fasi di allestimento. Nella presente trattazione sono stati considerati validi i campionamenti fatti dal 4 aprile, esponendo le cellule verso sud, con inclinazione delle superfici vetrate, perpendicolare rispetto alla radiazione solare incidente, quindi con angolo di incidenza della radiazione nullo al mezzogiorno solare.



## 8.1 Calibrazione dei Test

Come per i test fotometrici precedenti, anche per le prove energetiche, vi è stata una fase di **set-up**, necessaria a **convalidare i sistemi di rilevamento**, il metodo e gli **strumenti** usati nei rilievi sperimentali. Per le prove energetiche sono stati usati **3 radiometri globali LSI - DPA153**, (2 interni ai box e uno esterno per la rilevazione della radiazione incidente), **4 sonde di temperatura, (RTD)** poste sulle superfici interne ed esterne dei moduli vetrati, **3 Sensori di temperatura (Pyrocontrolle-Classe B platino)** di cui 2 per la rilevazione delle temperature dell'aria interna ai box e una per l'aria esterna e **2 fluxmetri Hukseflux HFP01** per la stima del flusso termico superficiale. I 3 radiometri globali sono stati comparati con una misurazione simultanea della radiazione solare esterna con angolo di incidenza nullo. I valori  $\tau_{e-inc}$  di comparazione ottenuti, di seguito riportati, hanno confermato la stessa taratura strumentale dei solarimetri.

CONFRONTO $\tau_{e-inc}$ RADIOMETRI		
W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
822,553	822,908	822,293

Ottenuti valori medesimi, è stato **rilevato il valore sperimentale  $\tau_{eREF}$**  della radiazione

solare trasmessa dal campione di riferimento basso-emissivo, con il **valore** fornito dalla **scheda tecnica** del produttore, come esposto al paragrafo seguente. La stessa comparazione è stata eseguita per i 4 sensori di temperatura superficiale e per i 2 termo-flussimetri. I dati rilevati dalle sonde di temperatura dell'aria esterna e dell'aria interna ai moduli sono stati confrontati con la Temperatura Media Storica rilevata dalla stazione meteorologica di Ancona il giorno 4 aprile 2017 (<https://www.accuweather.com/it/it/ancona/214189/april-weather/214189>). Il valore della **Temperatura Media Storica della Stazione Meteo** è stato **T = 16°** e il valore medio sperimentale rilevato dalle sonde dei test è stato **T = 15.9045°**. Le grandezze rilevate dalle sonde sono state verificate e sono risultate attendibili.

## 8.2 Validazione Fattore di trasmissione solare diretta $\tau_e$ del modulo REF

Per poter convalidare il metodo di misura del fattore di trasmissione solare diretta, è stato confrontato il valore sperimentale rilevato ottenuto con il valore nominale riportato sulla

scheda tecnica del materiale. Di seguito si riporta il grafico del fattore solare diretto rilevato in fase di test.

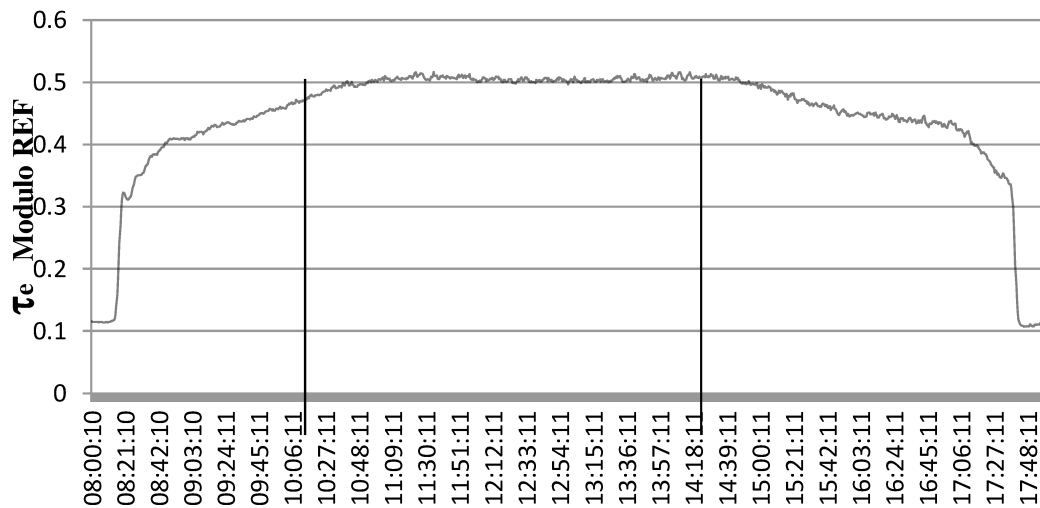


Fig. 1 Cap. 8 - Rilievo del fattore solare diretto  $\tau_e$  del modulo REF basso-emissivo - 27 maggio 2017

Il rilievo del fattore di trasmissione diretta del campione di riferimento è stato effettuato esponendo la **cellula di prova a sud** e al fine di ottenere una radiazione solare incidente, perpendicolare alla superficie vetrata, inoltre la cella è stata **inclinata** di circa **56.28°** rispetto all'orizzonte. Per la determinazione del valore sono stati ritenuti validi i **dati** campionati **dalle ore 11:00** alle ore **14:00**, relativamente al tratto di **curva confinato in figura 36**. Di seguito si riporta la tabella relativa alla validazione in oggetto.

Validazione campione di riferimento Low-E

	Valori sperimentali	Valori teorici di riferimento	Errore %
	$\tau_e$	$\tau_e$ EN 410	
$\tau_e$	0.51	0.52	1.9

Tabella 1 Cap. 8 - Comparazione della temperatura dell'aria interna e della temperatura superficiale interna

Il **valore sperimentale** del fattore di trasmissione diretta,  **$\tau_e = 0.51$** , **confrontato** con il **valore nominale** riportato sulla scheda

tecnica del materiale,  **$\tau_e = 0.52$**  ha dato un errore percentuale dell'**1.9 %**, per cui, il **metodo di stima**, è stato **considerato valido**.

### 8.3 Test del 04-05/04/2017 - Moduli REF - Modulo FC "Raleri"

#### 8.3.1 Le radiazioni solari $E_v$

I test radiometrici considerati validi, hanno avuto inizio il 04 aprile 2017, posizionando le cellule con le superfici vetrate perpendicolari alla radiazione incidente nell'ora del mezzogiorno solare, ed esposizione a sud.

La rilevazione è durata fino alle 20:20 del 05 aprile 2017. A fianco un'immagine delle fasi di prova.



Fig. 2 Cap. 8 - La fase di avvio dei test - 04/04/17

La misura delle radiazioni solari è stata fatta con tre radiometri globali LSI - DPA153. Uno posto esternamente per rilevare la radiazione solare incidente sulla superficie dei vetri e due posti all'interno dei box, per misurare la radiazione solare trasmessa. Il rapporto tra la

radiazione trasmessa e la radiazione incidente, ha fornito il fattore di trasmissione diretta dell'energia solare  $\tau_e$ .

Di seguito si riporta il grafico delle radiazioni rilevate.

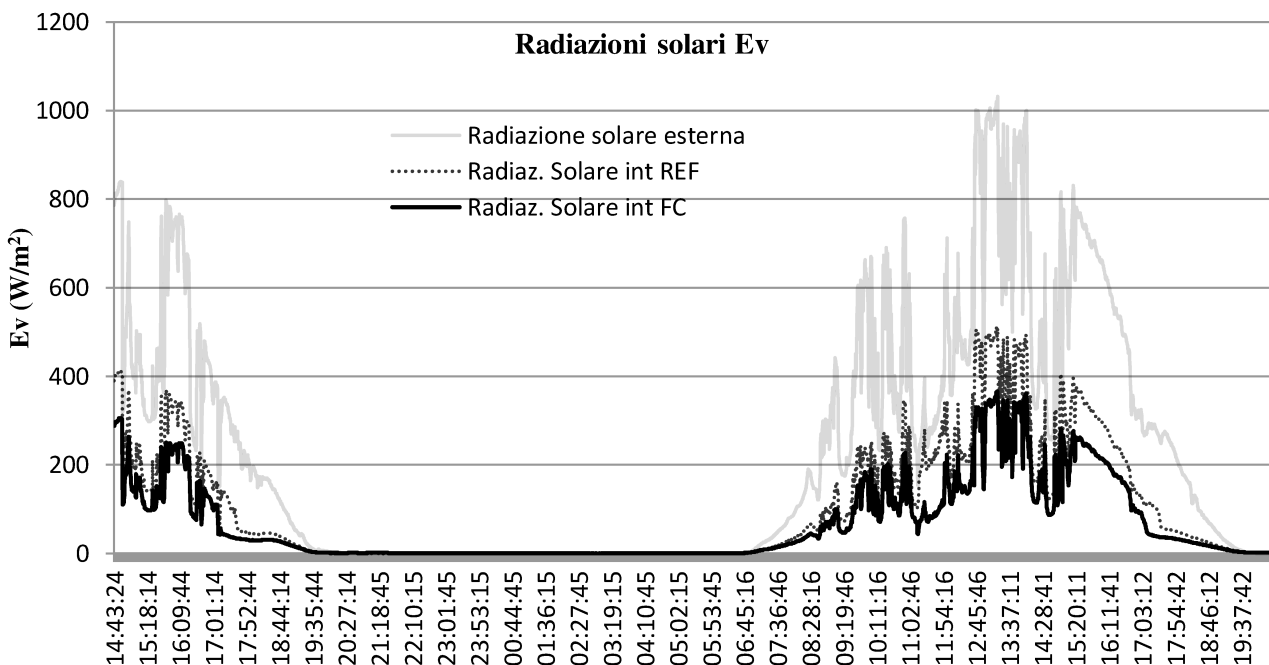


Fig. 3 Cap. 8 - Test 04-05 aprile 2017 - Diagramma delle radiazioni solari

I test del 04 e 05 aprile hanno restituito un diagramma delle radiazioni molto fluttuante a

causa delle condizioni di copertura del cielo, variabili. Si può notare che nelle ore di

massima radiazione termica, tra le 12:00 e le 14:00, con picchi di irraggiamento solare intorno ai 1000 W/m<sup>2</sup>, l'irradianza interna favorisce il modulo sperimentale. Infatti, il

campione basso-emissivo trasmette all'interno una radiazione di circa 500 W/m<sup>2</sup>, rispetto ai 350 W/m<sup>2</sup> del prototipo FC "Raleri".

### 8.3.2 Variazione della radiazione solare trasmessa $E_v$ - cellule verticali

Per mostrare i vantaggi apportati dalla pellicola FC, di seguito è riportato il grafico del gradiente di radiazione termica trasmessa tra i due moduli. Il valore del gradiente è l'eccedenza di energia termica schermata dal sistema sperimentale rispetto al modulo campione.

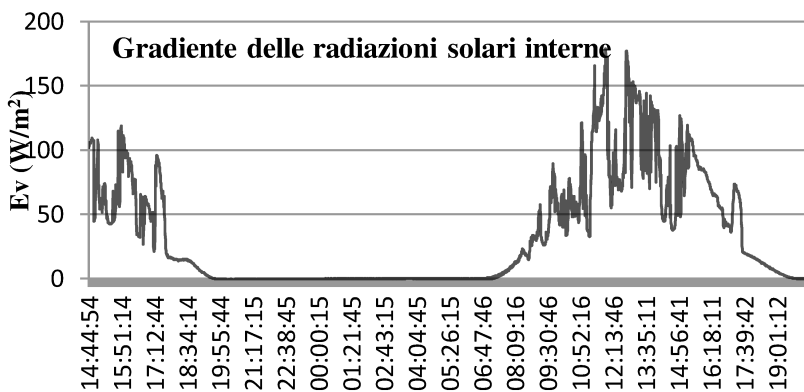


Fig. 4 Cap. 8 - Gradiente delle radiazioni solari - 4 e 5 aprile 2017

Si tratta della differenza delle irradianze tra il modulo campione e il modulo sperimentale. Dall'analisi del diagramma si può notare che i valori massimi del gradiente si hanno tra le 12:00 e le 14:00, in concomitanza con le massime radiazioni solari incidenti. Questo parametro indica che il sistema sperimentale ha la sua massima efficacia proprio nelle ore di massima intensità della radiazione, comportandosi come un elemento

schermante dinamico che annulla quasi per intero il suo effetto nelle ore di minor intensità solare. E' infatti vero che dalle ore serali intorno alle 19:00 fino alle ore mattutine intorno alle 07:00, tra il modulo FC "Raleri" e il modulo REF basso-emissivo, non vi è sostanziale differenza di irradianza trasmessa. Il gradiente minimo delle ore buie è dovuto essenzialmente alla resistenza termica offerta dalla pellicola fotocromatica. Nei tratti di gradiente negativo si ha l'inversione della direzione del flusso radiativo.

### 8.3.3 Il fattore di trasmissione solare diretta $T_e$ - cellule inclinate

Il coefficiente di trasmissione solare diretta  $T_e$ , è un parametro della norma UNI EN 410 che identifica i sistemi vetrati. Si tratta di uno scalare puro che assume valori tra 0 e 1 ed individua il **rapporto** tra l'**irradianza trasmessa** e l'**irradianza incidente** esterna.

Tale valore misura la **capacità schermante** di un modulo trasparente. Nelle prove del 4 e 5 aprile le cellule, esposte a sud, sono state inclinate di circa 52 gradi rispetto al pavimento, per avere un angolo di incidenza nullo rispetto alla radiazione incidente, al mezzogiorno solare.

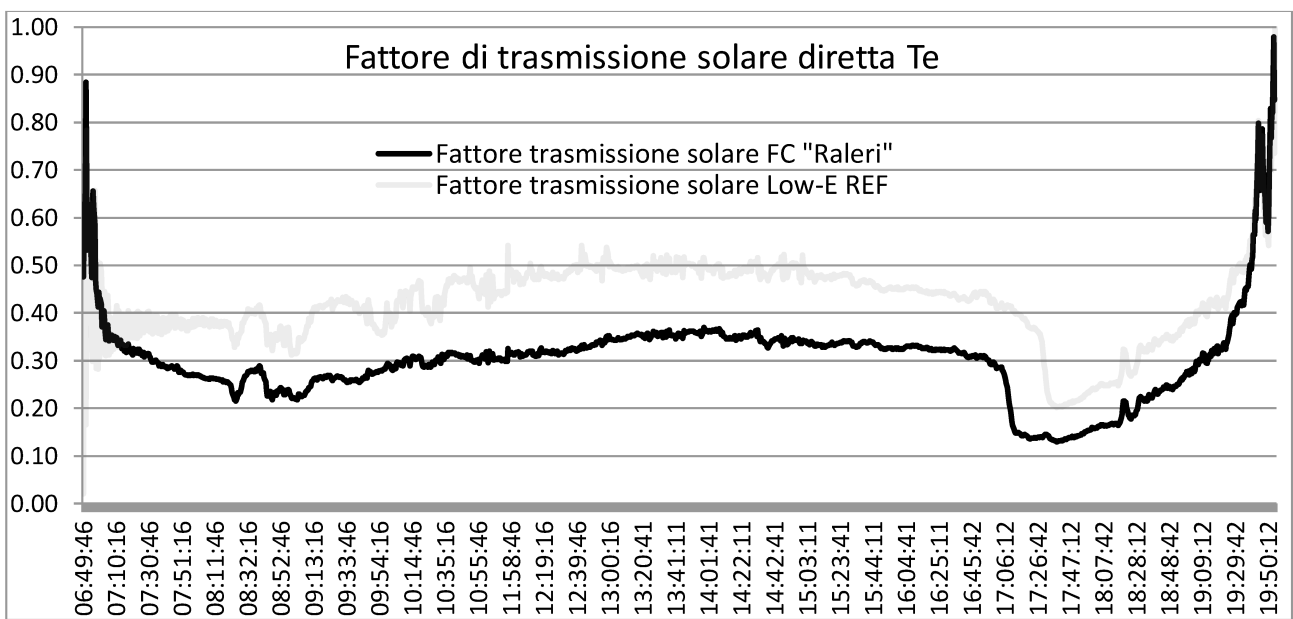


Fig. 5 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna  $T_e$

Dal diagramma si nota che il modulo sperimentale **FC "Raleri"** inizia ad **oscurarsi**, riducendo la trasmissione solare, intorno alle **07:10** e arriva al punto di **massima attivazione** intorno alle **08:30**. Lo stato di attivazione perdura tutto il giorno fino alle 18:00 circa. Dalle ore **19:00** alle ore **20:00**, il materiale **torna gradualmente trasparente** lasciando filtrare la radiazione luminosa. Si consideri che il diagramma è

relativo al giorno **5 aprile** quando il **sole è sorto** alle **06:47** ed è **tramontato** alle **19:47**. In sostanza al crepuscolo mattutino e al crepuscolo serale, il prototipo ha lasciato filtrare la stessa luce naturale del campione basso-emissivo. Intorno alle ore 17:00 vi è stata un copertura del cielo infatti i livelli di radiazione solare sono scesi sia all'interno del modulo campione che nel modulo FC.

### 8.3.4 Attivazione e disattivazione del modulo FC "Raleri"

Per definire meglio le fasi di attivazione e disattivazione del prototipo FC, è stata rappresentata, per mezzo di grafici interpolati, la relazione di proporzionalità inversa tra la radiazione termica incidente  $E_v$  e il fattore di trasmissione diretta dell'energia solare  $\tau_e$ . Nella fase di attivazione il fotocromatico si oscura gradualmente con l'aumentare della radiazione esterna  $E_v$ , riducendo il fattore di trasmissione solare diretta  $\tau_e$ , mentre nella fase di disattivazione, al diminuire della radiazione termica esterna  $E_v$ , il materiale torna gradualmente trasparente e aumenta il proprio fattore di trasmissione  $\tau_e$ . Va premesso che le fasi di attivazione e disattivazione della reazione cromo-genica, avvengono in tempi brevi, e a radiazioni

molto basse, in prossimità di alba e tramonto solare. Tali fasi, quindi, avvengono con angoli di incidenza azimutali, rispetto alla superficie vetrata, molto bassi ( $2.39^\circ \div 4.40^\circ$ ). Questa angolazione può essere causa di significativi errori di rilievo per cui le elaborazioni hanno carattere indicativo. Al fine di contenere il margine d'errore, i dati considerati, sono stati limitati agli intervalli di tempo prossimi alla reazione fotocromatica e sono stati comparati contemporaneamente, con il modulo di riferimento. Oltre alla relazione di proporzionalità inversa tra l'irradianza incidente  $E_v$  e il potere schermante del prototipo FC è importante definire le radiazioni solari che attivano e disattivano la reazione fotocromatica.

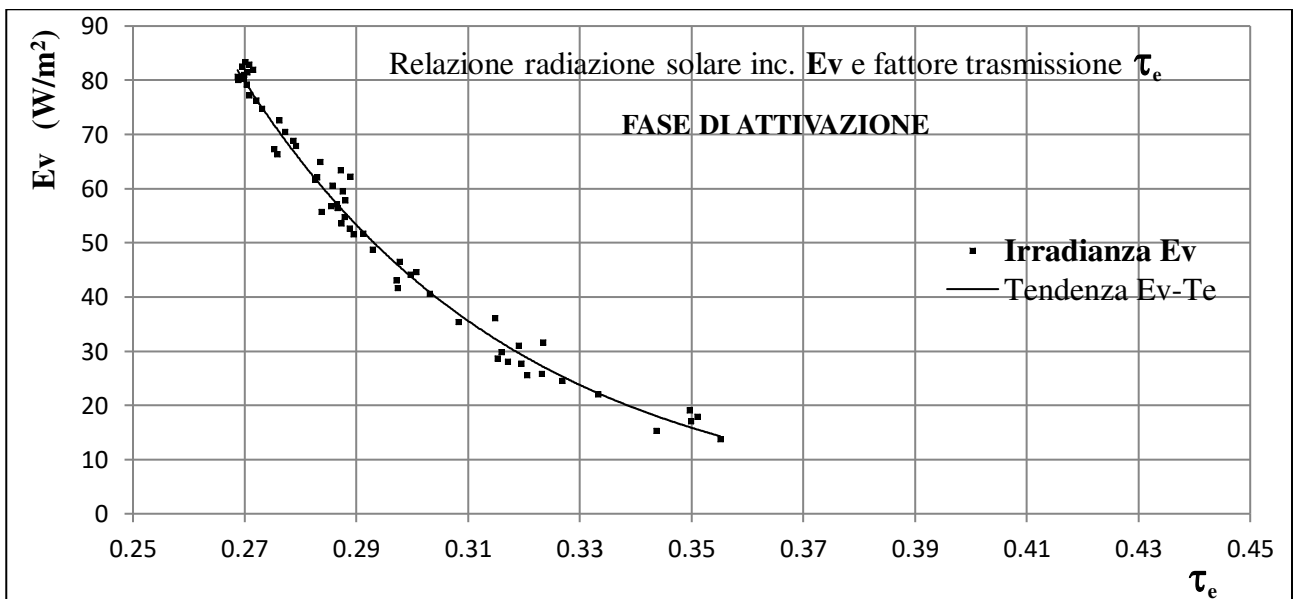


Fig. 6 Cap. 8 - Diadramma di interpolazione  $E_v$  -  $\tau_e$  - FASE DI ATTIVAZIONE

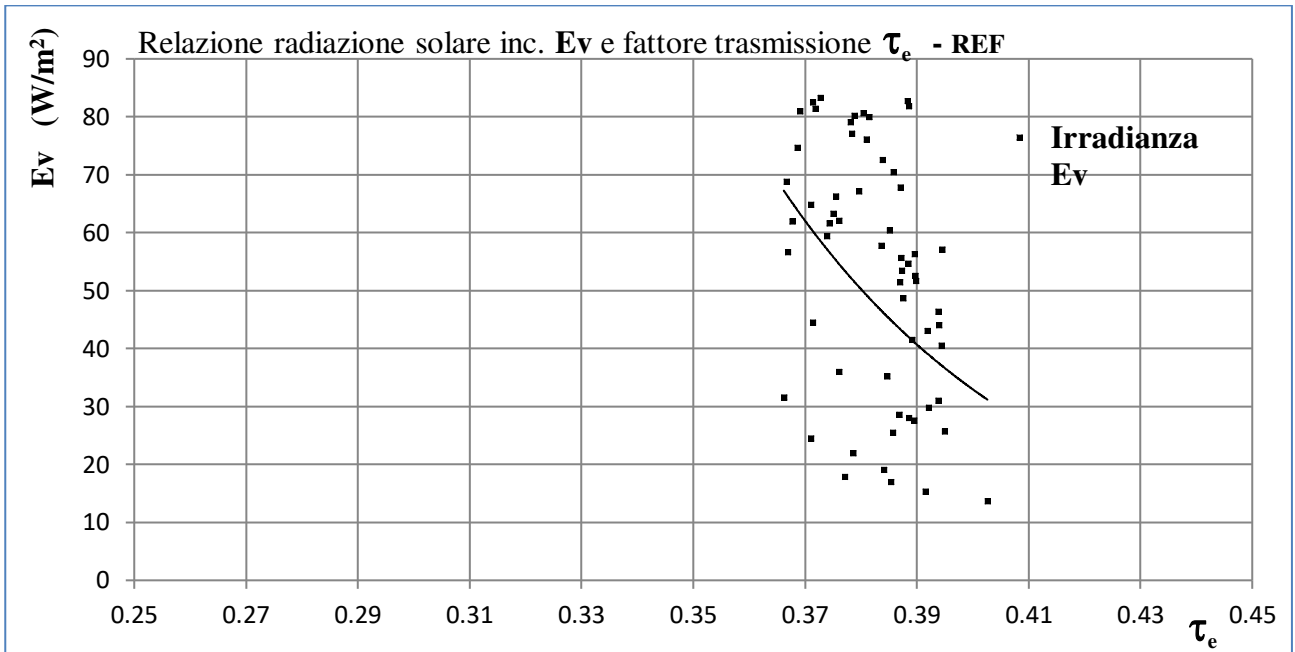


Fig. 7 Cap. 8 - Diadramma di interpolazione Ev - Te - **MODULO REF**

Dalla linea di tendenza del diadramma di interpolazione in fig. 41, si evince che la relazione tra la radiazione solare e il fattore di trasmissione diretta del modulo FC "Raleri", è inversamente proporzionale. In tale fase, mentre il  $\tau_e$  del **campione di riferimento**, (fig. 42) con una radiazione solare esterna da

**15 W/m<sup>2</sup>** a **85 W/m<sup>2</sup>** tende a rimanere confinato tra il **37%** e il **40%**, il **prototipo fotocromatico** si attiva e, oscurandosi, riduce il fattore di trasmissione energetica  $\tau_e$  dal **35%** al **27%**. Per la fase di disattivazione si fa riferimento ai grafici di interpolazione sotto esposti.

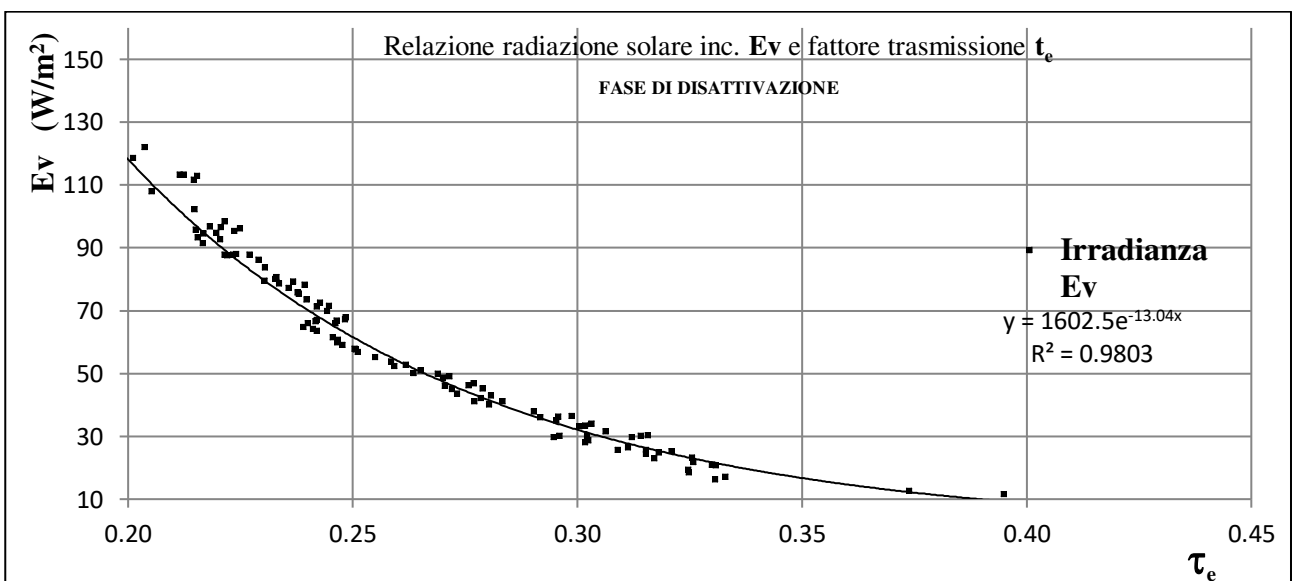
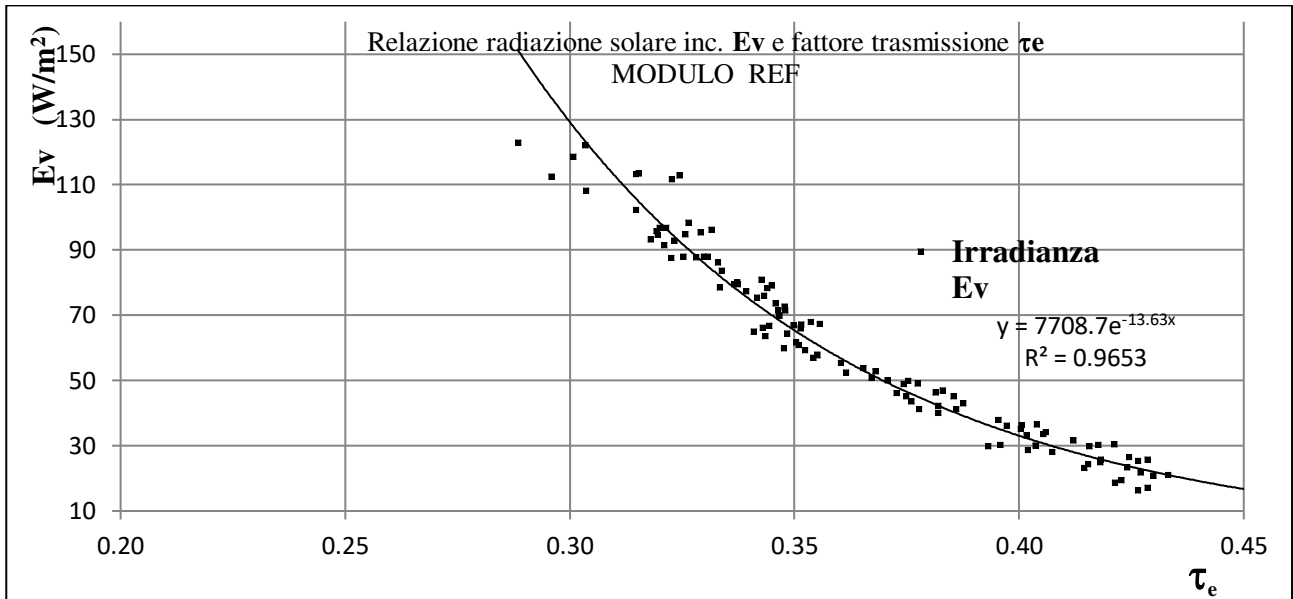


Fig. 8 Cap. 8 - Diadramma di interpolazione Ev - Te - **FASE DI DISATTIVAZIONE**


 Fig. 9 Cap. 8 - Diagramma di interpolazione  $E_v$  -  $\tau_e$  - **MODULO REF**

La pendenza della curva relativa all'intervallo di disattivazione, (fig. 43), conferma il rapporto di proporzionalità inversa tra la radiazione termica incidente e il fattore di trasmissione solare diretta, anche se tale relazione, emerge in forma molto più ridotta, per il campione di riferimento (fig. 44). In questo caso, è molto probabile che gli angoli azimutali della radiazione solare incidente, da  $4.32^\circ$  a  $2.39^\circ$ , abbiano dato luogo a errori di rilievo strumentale. Si può comunque notare che, il fotocromatico, con il diminuire della radiazione solare, torna allo stato trasparente, aumentando il proprio fattore di trasmissione diretta  $\tau_e$ , dal **20%** al **40%**. Per quanto riguarda le potenze termiche di attivazione e disattivazione, è stato rilevato che intorno ai **20 W/m<sup>2</sup>**, il modulo sperimentale "Raleri" inizia ad oscurarsi ed **avvia progressivamente** la sua reazione fotocromatica (fig. 41), **riducendo il fattore**

**di trasmissione solare diretta da 0.37 a 0.33.**

Fino a radiazioni di **50 W/m<sup>2</sup>**, l'oscuramento del materiale, aumenta gradualmente, e il  $\tau_e$  passa da **0.33** a **0.26**. Il materiale FC "Raleri" si è mostrato estremamente reattivo già alle basse radiazioni come del resto era previsto, viste le sue applicazioni nel settore automobilistico sportivo ove i polimeri devono attivarsi molto velocemente per ridurre l'effetto di abbagliamento sulle visiere dei caschi durante le gare agonistiche. **La fase di disattivazione** (fig. 44), ha inizio intorno a radiazioni di **110 W/m<sup>2</sup>**. L'andamento della curva di disattivazione, risulta molto meno netto e più simile a quello del modulo di riferimento. La causa risiede nel fatto che, mentre il processo di attivazione è più repentino e definito, la fase di disattivazione avviene in tempi più lunghi ed in maniera meno graduale.



### 8.3.5 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria al contorno

Le grandezze ambientali che determinano lo stato di "comfort" termico della persona, sono la temperatura dell'aria interna  $T_i$  e la temperatura media radiante delle pareti che confinano l'ambiente  $T_s$ . Queste grandezze sono state rilevate sia per l'aria interna ai box, sia per l'aria esterna al contorno e sia per le superfici interne ed esterne dei vetri. Dai dati

ottenuti è stata ricavata la curva del gradiente  $\Delta T$ , data dalla differenza tra la temperatura interna dell'aria del modulo campione e quella interna dell'aria del prototipo fotocromatico. Il gradiente, da un'idea immediata del guadagno che si ottiene, in termini di benessere termico, con i moduli sperimentali fotocromatici.

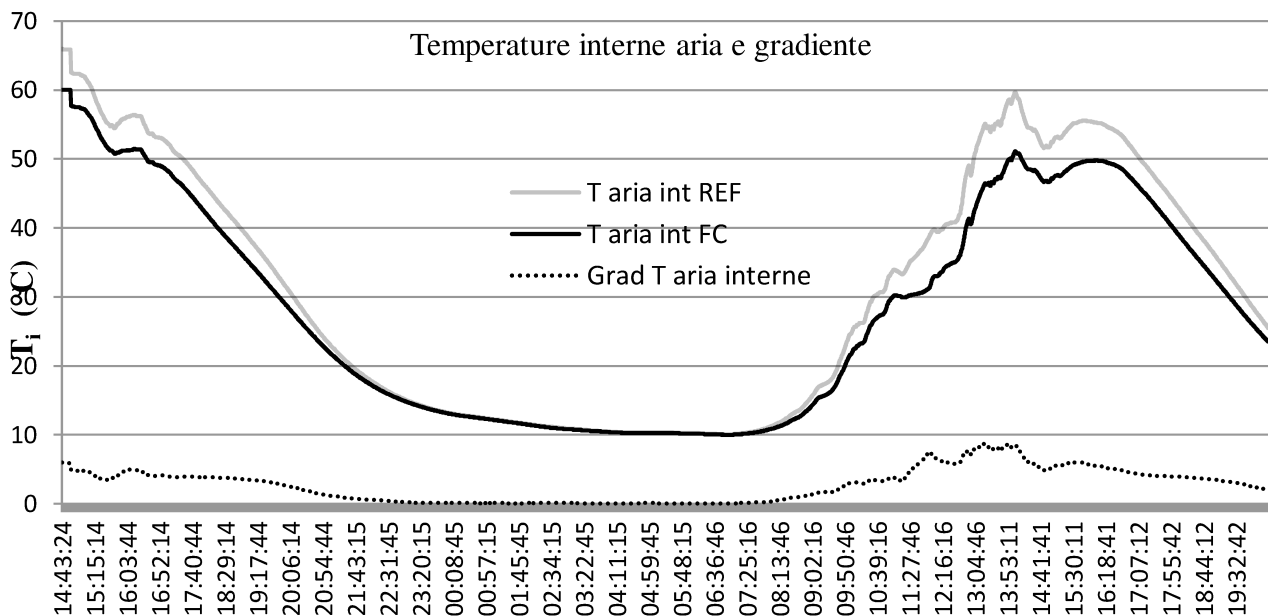


Fig. 10 Cap. 8 - Diagramma delle temperature interne  $T_i$  e gradiente delle temperature interne dei moduli  $\Delta T$

Il comportamento dinamico del materiale è evidenziato dalla curva del gradiente che Si può notare che nelle ore notturne il gradiente di temperatura è nullo in quanto il prototipo sperimentale disattivato resta trasparente e l'irradianza trasmessa è la stessa del modulo sperimentale. Le temperatura restano uguali fino 7:30 del mattino quando la superficie irradiata del materiale fotocromatico inizia gradualmente ad

mostra i livelli massimi nelle ore di massima intensità di radiazione solare. oscurarsi e riflettere la radiazione solare. il gradiente assume i valori massimi dalle ore **12:00** alle ore **14:00** proprio in concomitanza con le ore di **massima intensità termica** della radiazione solare. In queste ore la **temperatura interna dell'aria** nel box con il modulo sperimentale FC risulta **inferiore di 7 °C ÷ 9 °C**, rispetto a quella interna al box con

il modulo campione. Dalle prime ore pomeridiane con l'attenuarsi della radiazione solare, il gradiente di temperatura inizia a scendere fino alle ore 21:00 circa quanto la temperatura dell'aria del box campione traguarda la temperatura del box campione. Al fine di capire meglio come il modulo sperimentale FC si comporti selettivamente

rispetto alla radiazione solare incidente, oscurandosi progressivamente, riducendo gli apporti termici esterni, è utile osservare il diagramma sottostante, che mette in relazione l'irradianza solare incidente con le temperature dell'aria interna ai box e dell'aria esterna al contorno.

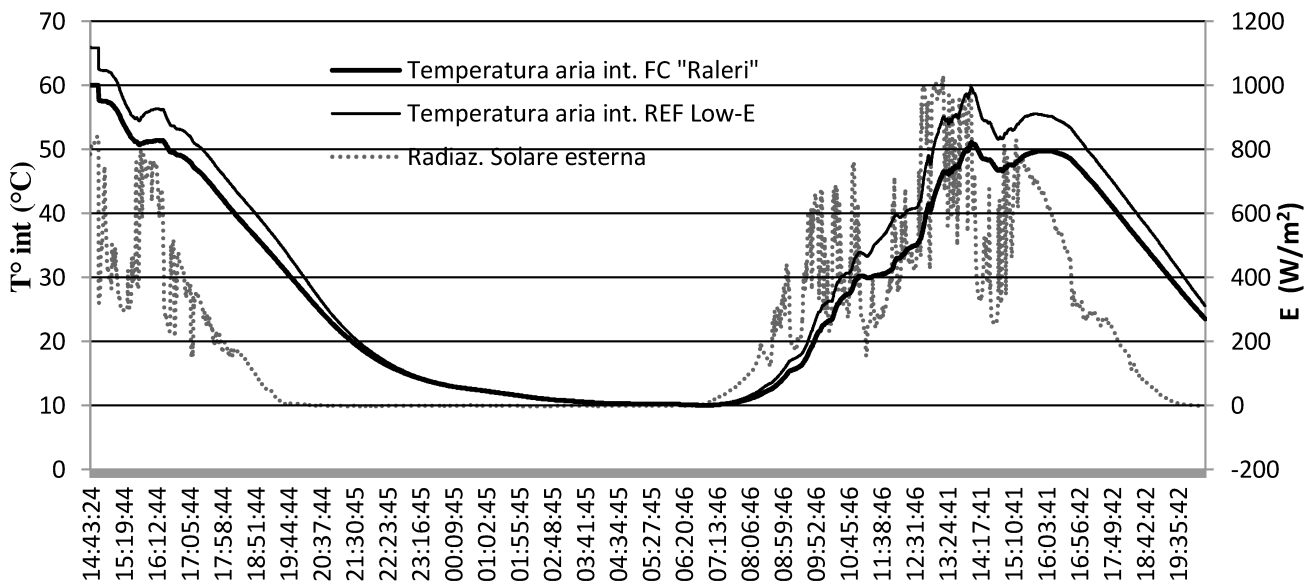


Fig. 11 Cap. 8 - Relazione tra le temperature interne  $T_i$  ai box e la radiazione solare incidente esterna  $E_v$

Il diagramma in figura 50, mostra la corrispondenza tra la radiazione solare esterna e le temperature dell'aria, interna ai box. Si nota che al graduale aumento della radiazione solare, dalle 07:30 circa fino alle 12:00 circa, radiazione, dalle 14:00 alle 19:30 circa, corrisponde una graduale diminuzione della differenza di temperatura interna alle cellule di prova. Nelle ore di massima radiazione incidente, il modulo sperimentale FC si oscura e riduce gli apporti termici esterni mantenendo una temperatura interna dell'aria, fino a 10 °C inferiore, rispetto al box che

corrisponde un graduale aumento del gradiente di temperatura tra l'aria interna al box con il modulo di riferimento REF e l'aria interna al box che ospita il modello sperimentale FC. Poi, al diminuire della radiazione, il box che ospita il sistema basso-emissivo di riferimento si riscalda. A determinare lo stato di comfort termico, intervengono anche le temperature medie radianti delle pareti che circondano l'ambiente abitato. Le pareti delle cellule di prova sono delle stesse caratteristiche fisiche e geometriche tranne le superfici vetrate. Per questo motivo, le

temperature superficiale dei vetri hanno un peso rilevante sulla determinazione del benessere abitativo.

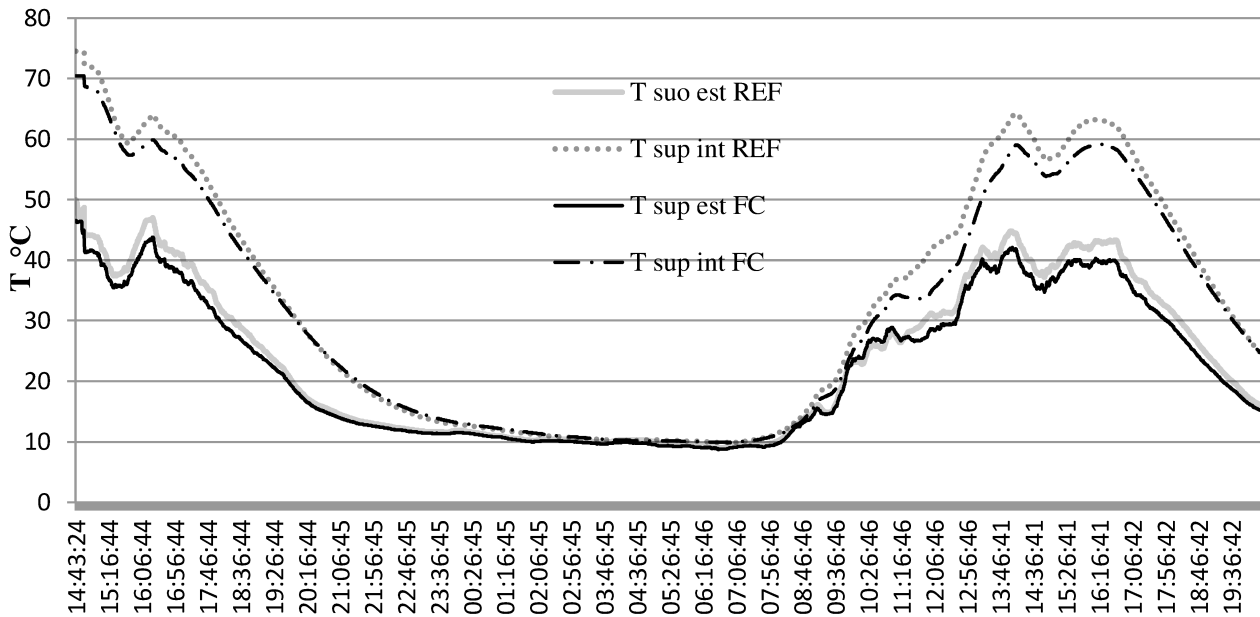


Fig. 12 Cap. 8 - Temperature superficiali rilevate sui moduli vetrati,  $T_{Sup.int}$  e  $T_{Sup.est}$ .

Dai rilievi fatti, emerge subito che le temperature superficiali del prototipo sperimentale si mantengono inferiori rispetto al campione di riferimento basso-emissivo. Le temperature superficiali esterne ai due moduli, hanno valori simili seppur il fotocromatico anche in questo caso mantiene temperature più basse. Maggiore invece è la differenza tra le temperature superficiali interne nelle ore di massima radiazione.

Intorno a mezzogiorno si ha il massimo gradiente di temperatura superficiale interna. In termini di comfort termico il fotocromatico è risultato vantaggioso sia riguardo alla temperatura interna dell'aria, sia riguardo alla temperatura radiante della superficie vetrata. Di seguito si riportano le temperature massime interne ai moduli, la temperatura media dell'aria interna tra le 10:00 e le 14:00 e la temperatura superficiale media.

Comparazione sperimentale  $T_{aria\ int}$  (°C)

	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
$T_{aria\ int\ max}$	65,73	75,39	<b>9.66</b>
$T_{aria\ int\ (10:00-14:00)}$	52,26	59,45	<b>7.19</b>
$T_{sup\ int\ (10:00-14:00)}$	60,42	64,27	<b>3.85</b>

Tabella 2 Cap. 8 - Comparazione della temperatura dell'aria interna e della temperatura superficiale interna

### 8.3.6 Variazione del flusso termico superficiale HF o $Q_s$ ( $W/m^2$ )

Il **flusso termico superficiale**, come noto, rappresenta l'apporto di calore trasmesso dal modulo vetrato ed è dato dalla **somma del calore** assorbito e **riemesso** dal vetro verso l'interno per convezione ed irraggiamento  $q_i$  e dal **calore trasmesso per trasmittanza termica** a causa della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno della lastra. La rilevazione del flusso termico superficiale è stata fatta posizionando dei **Termoflussimetri HFP01** del tipo a

termopila, sulla superficie interna dei moduli vetrati. Gli strumenti sono stati debitamente schermati da eventuali apporti radiativi interni con nastro riflettente di alluminio. Considerando che i test sono stati condotti in ambiente esterno e che all'interno delle cellule non sono stati usati sistemi di ventilazione meccanica, né sistemi di accumulo latente, le curve relative ai flussi superficiali, mostrano un andamento simile.

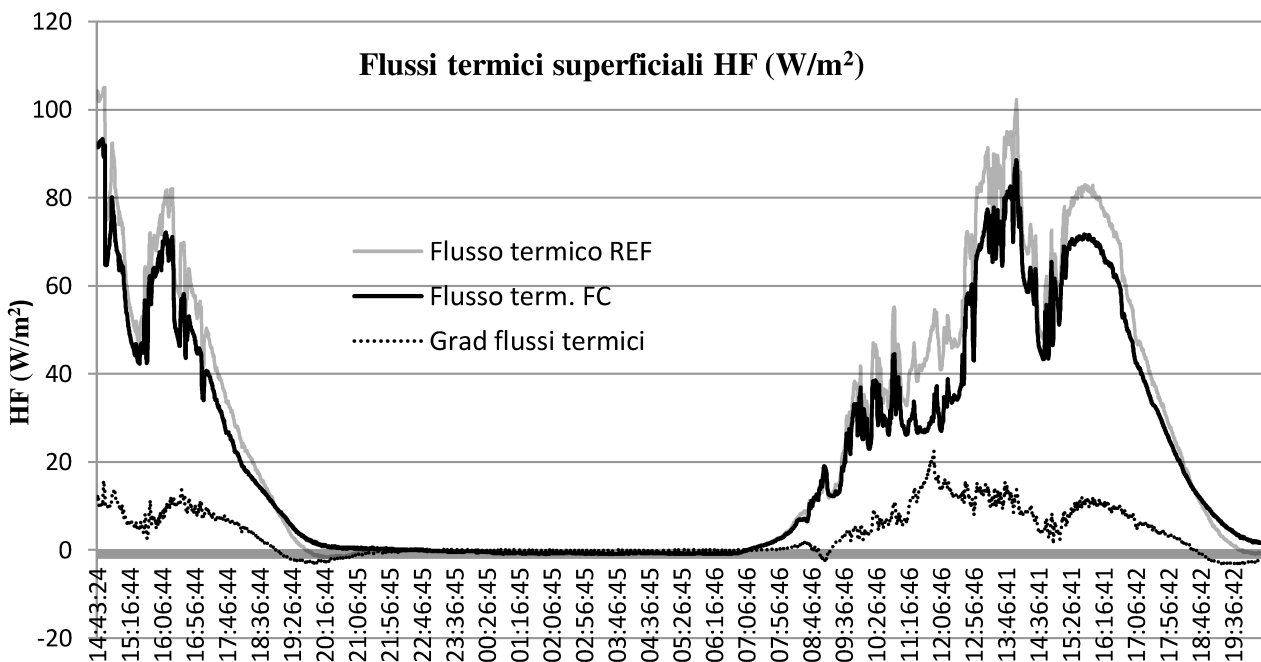


Fig. 13 Cap. 8 - Flussi termici superficiali **HF** ( $W/m^2$ )

I diagrammi del flusso termico seguono l'andamento della radiazioni solari interne e delle temperature interne. Il gradiente risulta maggiore nelle ore di massima radiazione esterna per poi annullarsi nelle ore serali e notturne. La **riduzione massima** del **flusso termico** trasmesso dal modulo sperimentale si

ha intorno alle **ore 12:00**, quando è stata registrata una differenza di flusso termico trasmesso **tra il prototipo FC e il campione REF** di circa **20  $W/m^2$** . Di seguito viene mostrata la variazione del flusso termico superficiale HF dalle ore 10:00 alle ore

14:00, e il gradiente massimo del flusso termico trasmesso. E' inoltre riportato il flusso termico medio nell'arco di 12 ore di radiazione solare, dalle 08:00 del mattino, alle 20 della sera.

Comparazione sperimentale $HF_{sup}$ ( $W/m^2$ )			
	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
$HF_{sup\ max}$	112,32	112,88	<b>0.56</b>
$HF_{sup\ (10:00-14:00)}$	88,68	90,46	<b>1.78</b>
$HF_{sup(h12\ 7:30-19:30)}$	62,99	63,12	<b>0.13</b>

Tabella 3 Cap. 8 - Comparazione dei valori dei flussi termici superficiali HF

### 8.3.7 Test dal 7 al 19 aprile 2017

#### Le radiazioni solari $E_v$

Dai test condotti dal 7 al 19 aprile è stato possibile ottenere una serie di dati da considerare validi in quanto si sono susseguite giornate di cielo sereno. L'analisi dei dati è stata concentrata ai consecutivi rilievi fatti dal giorno 8 al giorno 10 aprile grazie a condizioni meteo stabili. Il giorno 7 e dal giorno 11 al 19 aprile le condizioni del cielo sono risultate variabili e non adatte a restituire

dati attendibili. L'inclinazione delle apparecchiature di prova, è stata portata da circa 53 gradi a circa 55 gradi al fine di collocare le superfici vetrate dei box, in posizione perpendicolare alla radiazione termica, al mezzogiorno solare. L'esposizione dei box è rimasta verso sud. Di seguito si riporta il diagramma delle radiazioni solari rilevate.

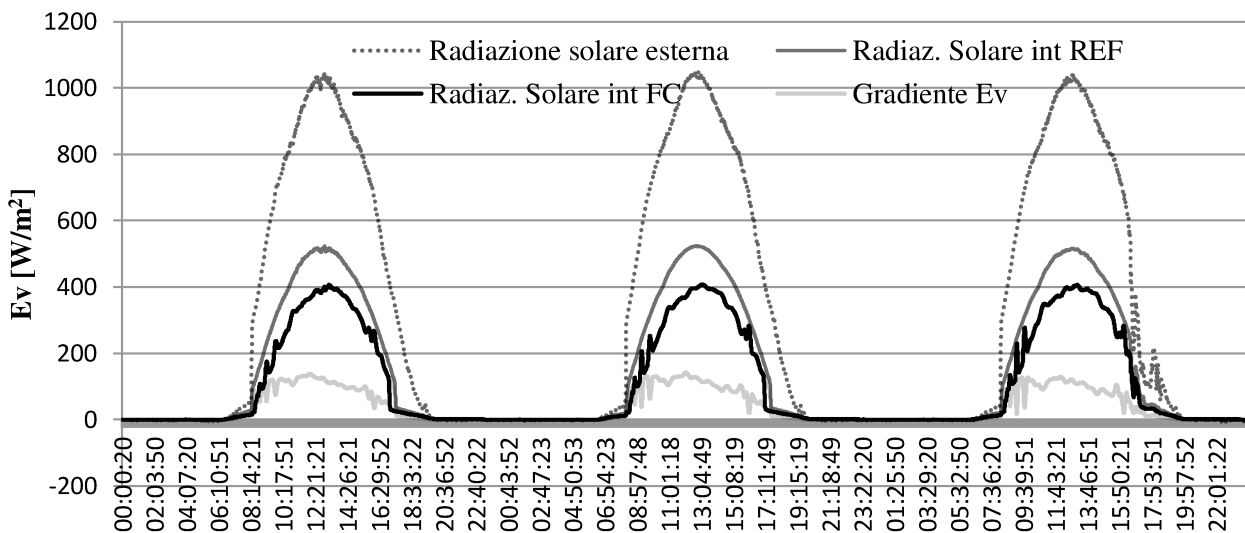


Fig. 14 Cap. 8 - Radiazioni solari (W/m2) - test 8-9-10 aprile 2017

A differenza dei test del 04 e 05 aprile, fatti in condizioni di cielo variabili, le curve relative alle radiazioni solari dei test successivi, hanno mostrato un andamento più lineare, grazie alle condizioni ambientali al contorno, stabili. Dal 8 al 10 aprile l'angolo di incidenza della radiazione solare incidente è stata di circa  $55^\circ$  e l'intensità della stessa, al mezzogiorno solare, è stata per tutti e tre i giorni, di circa

1030 W/m<sup>2</sup>. Il sole è sorto alle 6:35 il giorno 8, alle 06:33 il 9 e alle 6:32 il 10 aprile, mentre è tramontato alle 19:41 il giorno 8, alle 19:42 il 9 e alle 19:43 il 10 aprile. Il guadagno in termini di apporti termici trasmessi, e il comportamento dinamico del prototipo sperimentale FC, sono rilevabili dalla curva del gradiente in figura 53. Il fotocromatico si attiva in funzione dello

stimolo termico esterno e ciò è dimostrato dal campione basso-emissivo e il modulo FC che, rimane nullo fino alle ore 6:41 circa, quando la lastra fotocromatica inizia ad oscurarsi e riflettere parte della radiazione incidente. Il massimo della schermatura del prototipo avviene al mezzogiorno solare, proprio in concomitanza con la massima intensità della radiazione termica. nelle ore pomeridiane il prototipo FC tende gradualmente a tornare trasparente ed il gradiente di radiazione solare

valore dal gradiente di radiazione tra il inizia a scendere fino ad annullarsi poco prima del tramonto, intorno alle 19:25 circa. Nella tabella sotto riportata, riferita al giorno 8 aprile 2017, si confrontano i valori delle **radiazioni solari interne massime**, con angolo di incidenza solare  $\theta$  nullo, le **radiazioni solari medie** nell'intervallo di tempo **10:00-14:00** e le **radiazioni solari interne** medie nell'intervallo di **12 ore** di irraggiamento solare, dalle **07:30** alle **19:30**.

	Comparazione sperimentale $E_{int}$ (W/m <sup>2</sup> )		
	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
$E_{int \max} (\theta=0)$	400,10	523,25	<b>123.15</b>
$E_{int} (10:00-14:00)$	347,40	467,77	<b>120.37</b>
$E_{int} (h12 7:30-19:30)$	208,96	287,00	<b>78.04</b>

Tabella 4 Cap. 8 - Comparazione dei valori di radiazione solare interna  $E_v$

La tabella 9 mostra come la massima riduzione della radiazione trasmessa si ha proprio in corrispondenza dei valori massimi di radiazione solare. Nell'intervallo tra le ore 10 e le 14, ovvero nelle ore più calde, si ha la massima schermatura del prototipo FC. Il

gradiente radiativo tende poi a diminuire in quanto il modulo FC torna gradualmente trasparente. Infatti la differenza di radiazione solare media trasmessa, in 12 ore, è inferiore alla differenza calcolata in 4 ore.

### 8.3.8 Il guadagno in termini di isolamento termico, del prototipo FC "Raleri"

Il gradiente delle radiazioni solari trasmesse, rappresenta la differenza di potenza termica scambiata dai due moduli all'interno delle cellule. Si può quindi considerare come il guadagno energetico ottenuto in termini di riduzione degli apporti termici entranti, offerto dal modulo sperimentale rispetto al vetro di riferimento. L'integrazione della curva del gradiente, rappresenta il

guadagno energetico totale ottenuto. Tale stima è stata fatta su base della radianza giornaliera. Per tutto il ciclo di attivazione del prototipo, che dura da poco dopo l'alba fino a poco prima del tramonto, è stata calcolato il guadagno in termini di potenza termica trasmessa e di energia termica totale schermata.

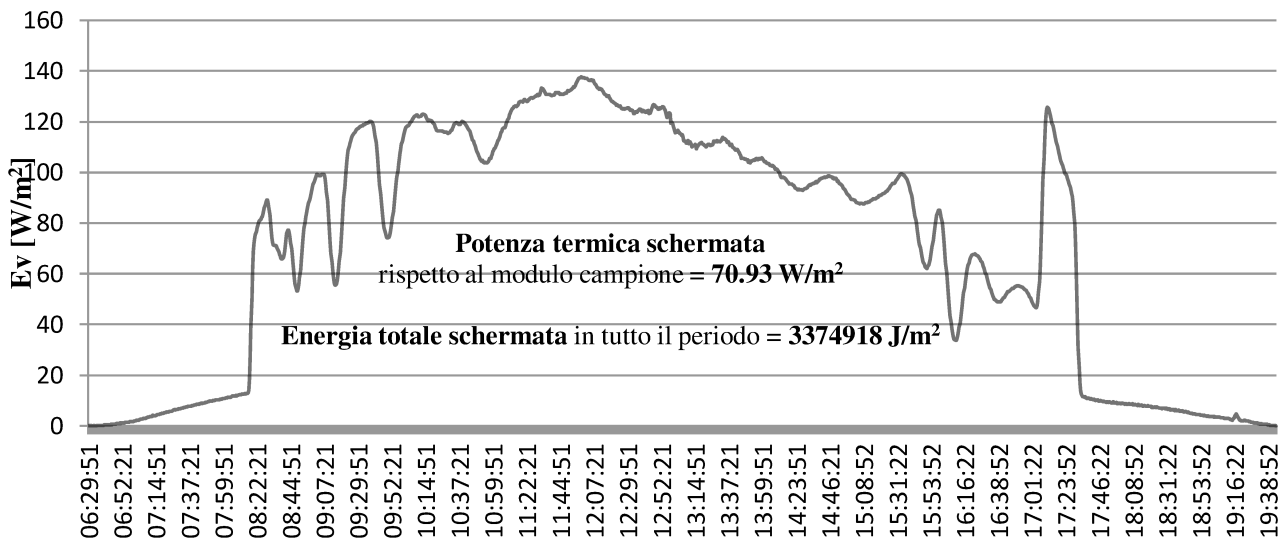


Fig. 15 Cap. 8 - Energia termica totale e potenza termica schermata rispetto al modulo REF - Giorno 8 aprile 2017

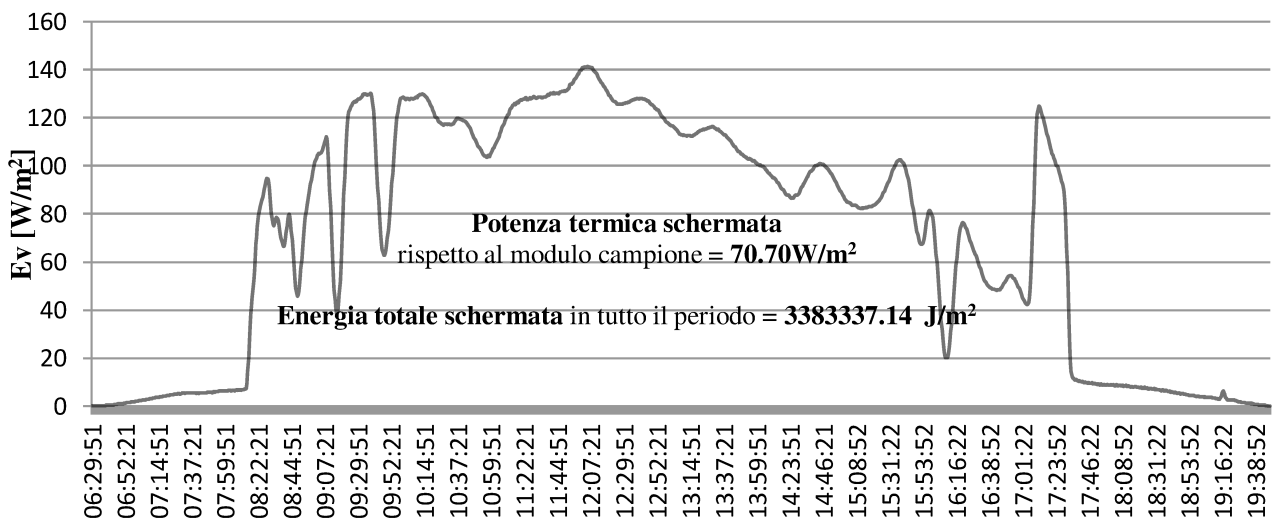


Fig. 16 Cap. 8 - Energia termica totale e potenza termica schermata rispetto al modulo REF - Giorno 9 aprile 2017



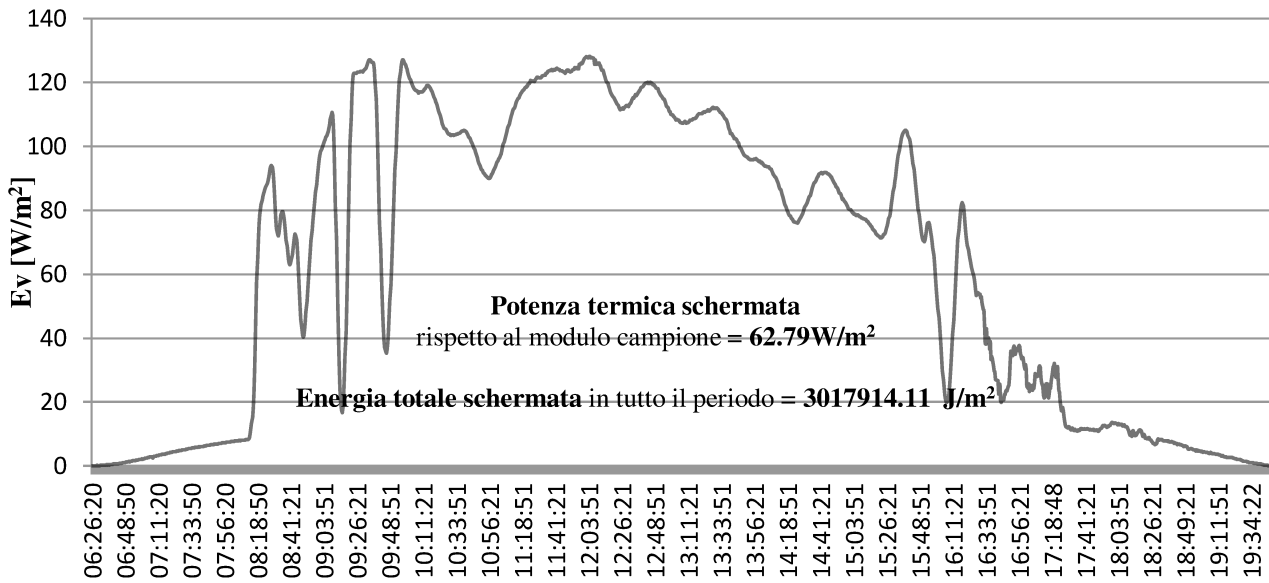


Fig. 17 Cap. 8 - Energia termica totale e potenza termica schermata rispetto al modulo REF- Giorno10 aprile 2017

Dagli integrali dei gradienti di radiazione solare interna sono stati ottenuti valori simili per tutti e tre i giorni di prova considerati. E' stata stimata una **riduzione** media della

**potenza termica giornaliera trasmessa** pari a **68.14 W/m<sup>2</sup>** e una **riduzione del calore trasmesso giornaliero** di **3258723 J** =  $3258723 * 0,239006 = 778.85 \text{ Kcal}$

### 8.3.9 Il fattore di trasmissione solare diretta $T_e$ - Angolo incidenza nullo

Come proceduto per i precedenti test dal **rapporto** dei dati relativi alle **radiazioni solari interne** e alla **radiazione solare esterna**, sono stati ricavati i valori del **coefficiente di trasmissione solare diretta  $T_e$** . Si ravvisa che il fattore di trasmissione energetica  $T_e$ , relativamente al prototipo FC assume valori incostanti per il fatto che il modulo si attiva e disattiva dinamicamente a

seconda dello stimolo radiativo esterno. Il suo comportamento dinamico influisce sul grado di opacità aumentando o riducendo la parte di radiazione solare riflessa verso l'esterno e quindi variando il fattore di trasmissione solare diretta  $T_e$ . Per questo motivo, il dato considerato valido è quello relativo al punto di massima attivazione che si ha intorno al mezzogiorno solare.

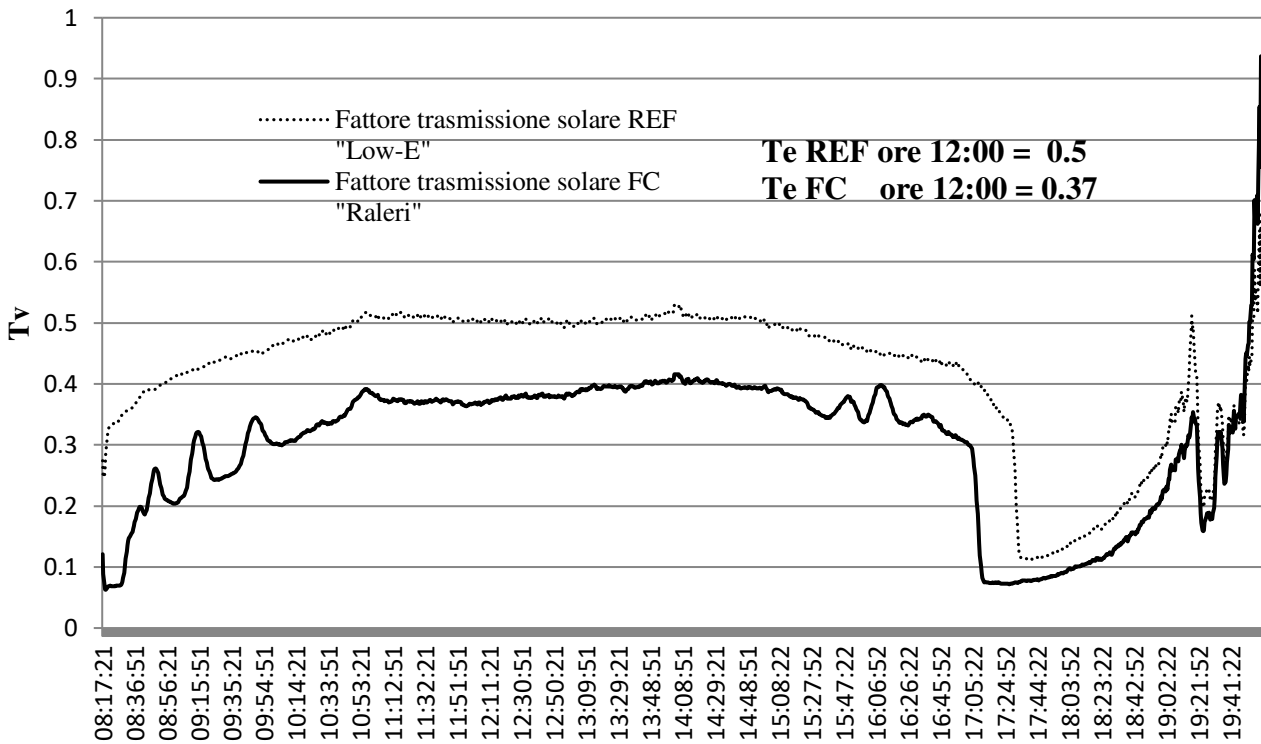


Fig. 18 Cap. 8 - Diagramma del fattore di trasmissione solare interno - Giorno 8 aprile 2017

Dal diagramma si nota che il modulo sperimentale **FC "Raleri"** inizia ad **oscurarsi**, riducendo la trasmissione solare, intorno alle **08:40** e arriva al punto di **massima attivazione** intorno alle **10:00**.

Dalle ore **08:37** alle **09:59**, la curva presenta 3 punti di massimo, corrispondenti a **tre stati di attivazione**. Lo stesso fenomeno si ripete anche il 9 e il 10 aprile, come si vede dalle figure 68 e 69.

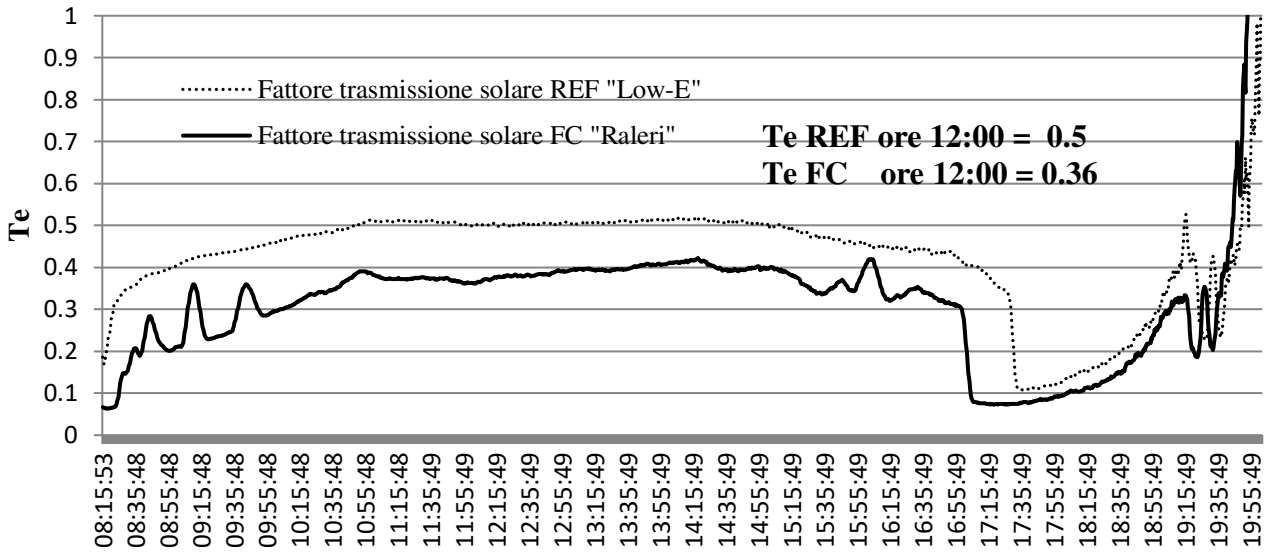


Fig. 19 Cap. 8 - Diagramma del fattore di trasmissione solare interno - Giorno 9 aprile 2017

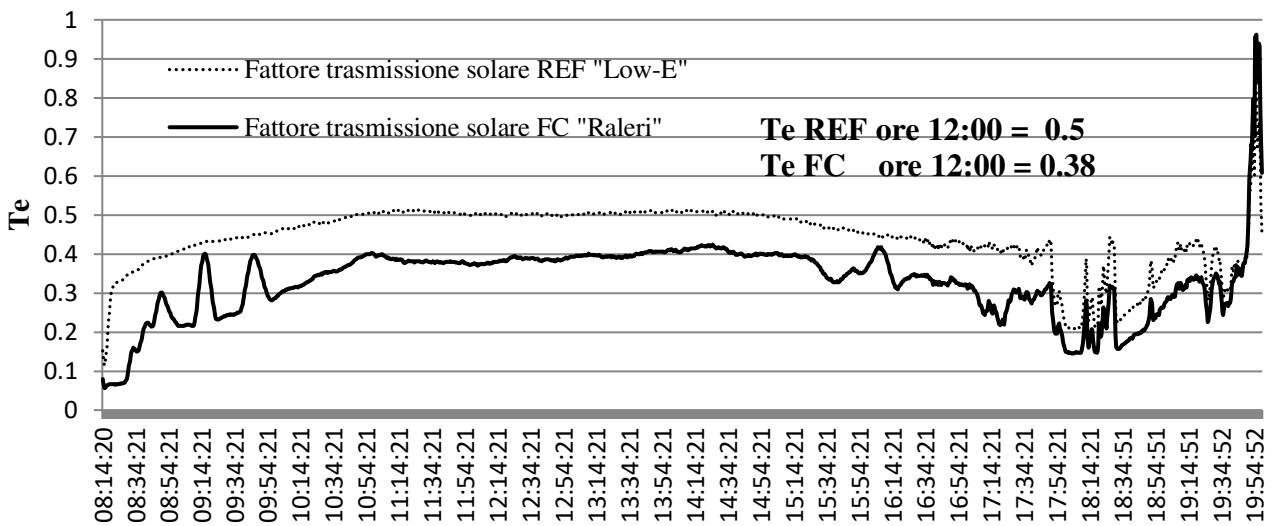


Fig. 20 Cap. 8 - Diagramma del fattore di trasmissione solare interno - Giorno 10 aprile 2017

Il fotocromatico rimane attivo per tutti i giorni fino alle ore del tramonto avvenuto intorno alle **18:45** circa. Dal crepuscolo, attorno alle ore **19:00**, fino alle ore **20:00**, il materiale **torna gradualmente trasparente**, assumendo in questa fase di transito,

un andamento poco lineare. Il fotocromatico si **disattiva completamente**, intorno alle ore **19:40**, quando il suo fattore di trasmissione solare riguarda quello del modello campione.

### 8.3.10 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria al contorno

Come per i test fatti ai primi di aprile, il rilievo delle temperature ambientali interne  $T_i$  e superficiali ai moduli  $T_s$ , è stato finalizzato quantificare i vantaggi che i vetri sperimentali possono offrire in termini di comfort. Lo studio del gradiente  $\Delta T$ , tra la temperatura interna del campione di riferimento e la

temperatura interna dell'aria del prototipo fotocromatico, oltre a definire il guadagno inteso come riduzione degli apporti termici estivi e isolamento termico invernale, è utile in questo caso a comprendere se vi riduzione delle prestazioni del modulo sperimentale, rispetto ai test condotti in precedenza.

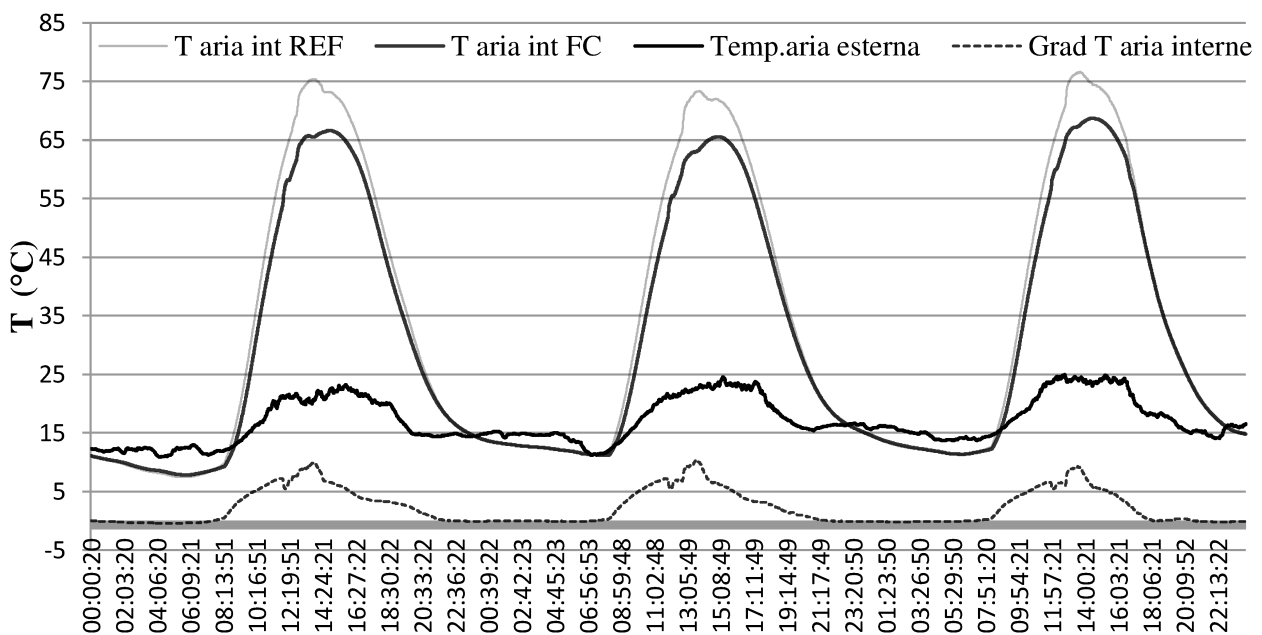


Fig. 21 Cap. 8 - Temperature interne - 8 9 10 aprile 2017

Come già rilevato nei precedenti test, il prototipo FC offre la massima schermatura alle radiazioni termiche intorno al mezzogiorno solare. La differenza di temperatura interna tra il modulo REF e il prototipo sperimentale rimane nulla fino alle ore 08:00 circa e diventa massima intorno alle 12:00 per poi decrescere e tornare nulla verso le ore 22:00. Nelle ore non irradiate, dalle 21:50 circa fino alle 08:50 del mattino, il gradiente assume valore negativo poiché il

prototipo FC inverte la propria funzione. Non si comporta più da elemento schermante per gli apporti termici giornalieri ma si comporta come isolante termico, riducendo le dispersioni di calore verso l'esterno nelle ore serali e notturne. Il grafico in figura 60 mostra che dalle ore 23:15 circa fino alle ore 07:07 circa, si ha il fenomeno dell'inversione termica. In questo periodo il flusso di calore si trasmette dall'interno delle test-cells a temperatura più alta, verso l'esterno a

temperatura inferiore. Al fine di studiare il decadimento del materiale è stato studiato il grafico del gradiente per un periodo di test

continui fatti da 7 al 19 aprile 2017, in relazione alla temperatura dell'aria esterna.

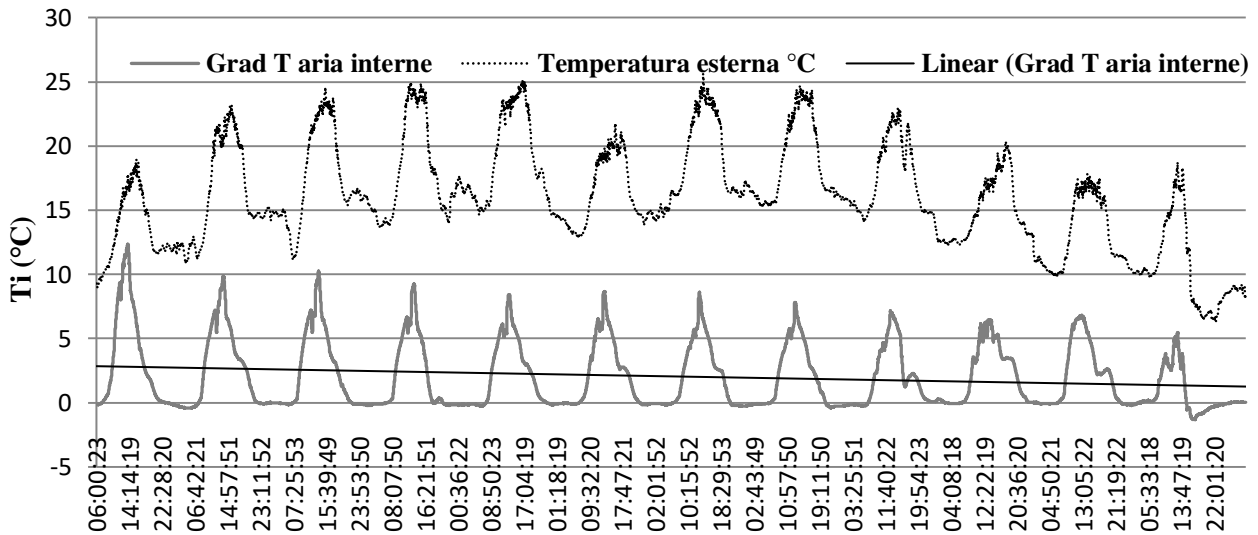


Fig. 22 Cap. 8 - Gradiente temperature interne in relazione alla temperatura ambientale esterna - 8 9 10 aprile 2017

Guardando la linea di tendenza del gradiente, si evidenzia che la differenza di temperatura tra l'interno dei due moduli tende a diminuire. Ciò si evince anche dai valori dei massimi rilevati giornalmente e dal confronto fatto sui valori dei massimi rilevati il primo e l'ultimo giorno di test, grazie a condizioni di temperatura esterna molto simili, 18.77° e 17.70 °. Il valore del massimo della curva del gradiente, rilevato il giorno 8 aprile, è stato di

12.17 ° e quello riscontrato il 18 aprile di 6.518°. In sostanza dal primo all'ultimo giorno di test, la differenza di temperatura tra i due moduli a confronto, si è ridotta del 53.5%. La riduzione del gradiente è stata attribuita ad un decadimento prestazionale del materiale fotocromatico, motivo per cui al termine dei test sono state condotte prove di durabilità sui polimeri fotocromatici oggetto della ricerca.

Per studiare la relazione tra la radiazione solare incidente e il suo effetto sulle temperature dell'aria interna ai moduli, è stato costruito il grafico sottostante interpolando i dati rilevati. Si nota come le grandezze in esame siano legate da un fattore di

proporzionalità diretta tra la curva della radiazione solare e le curve delle temperature interne, vi è un ritardo di circa **1 h e 10 minuti**, dovuto allo **sfasamento termico** delle cellule.

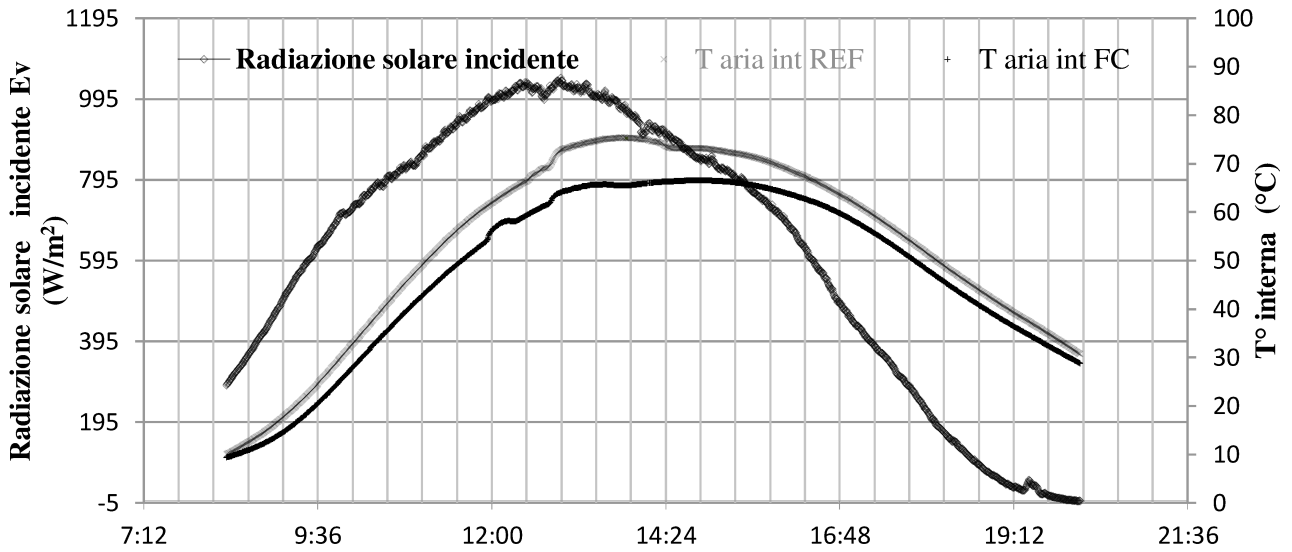


Fig. 23 Cap. 8 - Grafico di relazione tra la radiazione solare e le temperature interne - 8 9 10 aprile 2017

## 8.4 Test dal 09 al 29/05/2017 - Modulo REF - Modulo FC "Tens-H"

La campagna sperimentale esterna è ripresa l'11 maggio 2017 con i test sul prototipo sperimentale FC "Tens-H". Le cellule di prova sempre esposte a sud, sono state **inclinate** di circa **63 gradi**, per rendere l'angolo di incidenza della radiazione, perpendicolare alla superficie vetrata, al mezzogiorno solare. Il prototipo "Tens-H" come già esposto in questa trattazione, si

differenzia dal prototipo FC "Raleri" solo per la pellicola fotocromatica applicata. Nel "Tens-H" la pellicola, di spessore 0.001 m, è un polimero fotocromatico di policarbonato. La stratigrafia e le caratteristiche fisiche del prototipo sperimentale rimangono le stesse. Per le prove radiometriche è stato usato lo stesso **radiometro globale LSI - DPA153**, usato per i test precedenti.

### 8.4.1 Le radiazioni solari $E_v$

Come per i test radiometrici sul FC "Raleri", sono stati usati tre radiometri globali LSI - DPA153: uno esterno per rilevare la

radiazione solare incidente e due posti all'interno dei box, per la radiazione solare trasmessa.

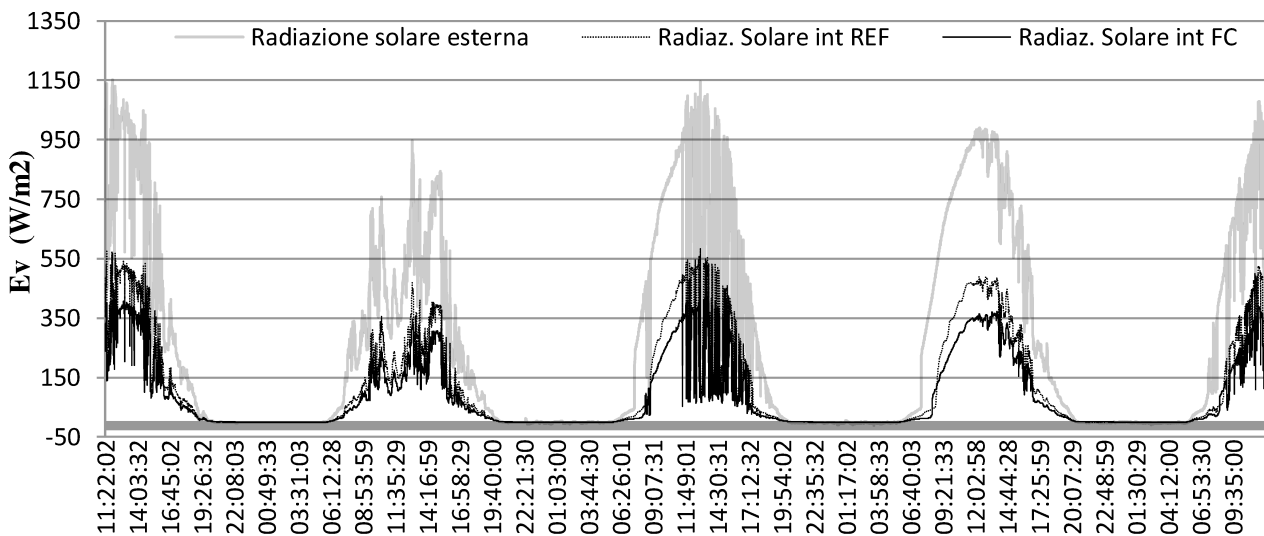


Fig. 24 Cap. 8 - Test 11-15 maggio 2017 - Diagramma delle radiazioni solari

I dati delle radiazioni solari dall'11 al 15 maggio mostrano che il modulo FC "Tens-H" offre un effetto schermante maggiore rispetto al campione basso-emissivo. Purtroppo solo

il giorno 14 le condizioni di cielo stabile hanno fornito valori fruibili per determinare le caratteristiche del modulo.

I test successivi sono stati fatti dal 15 al 19 maggio e a differenza del periodo precedente, si sono avute 3 giornate di condizioni meteo stabili, con cielo sereno ed i dati ottenuti sono

stati ritenuti attendibili e impiegabili agli scopi di ricerca. Di seguito si riporta il grafico delle radiazioni solari rilevate il 16, il 17 e il 18 maggio.

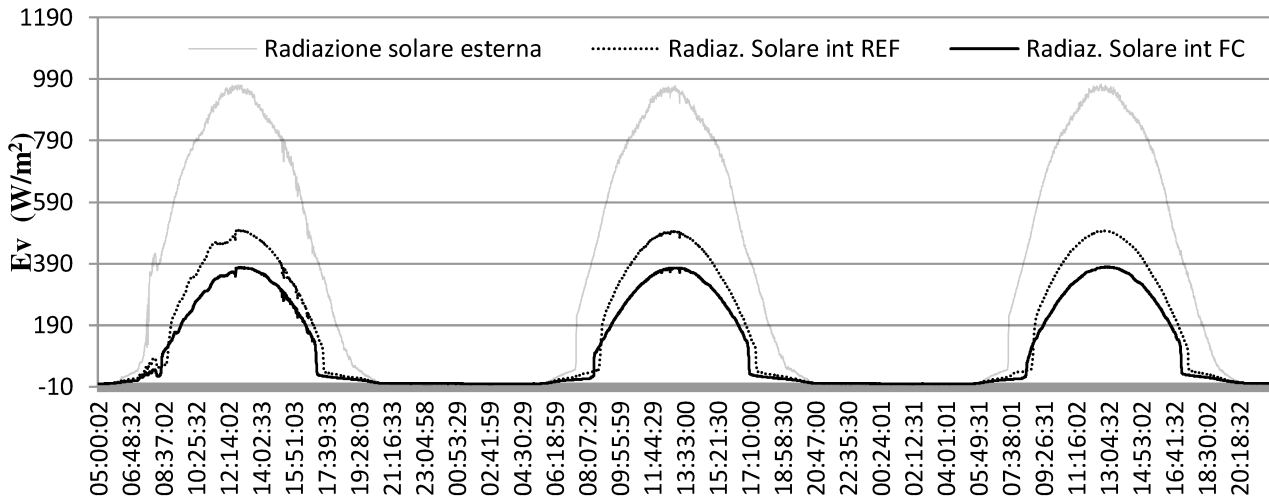


Fig. 25 Cap. 8 - Test 16-18 maggio 2017 - Diagramma delle radiazioni solari

In realtà le prove sul modulo FC in policarbonato sono state condotte con soluzione di continuità, dal 11 al 30 maggio, interrompendole, per ragioni tecniche, solo nei giorni festivi. Per problemi legati alla grande quantità di dati rilevati è stato

necessario dividerli ed analizzarli in gruppi separati. Dal 23 al 29 maggio i rilievi ritenuti fruibili riguardano i giorni 26, 27, 28 e 29. di seguito si riportano i grafici delle radiazioni ottenute.

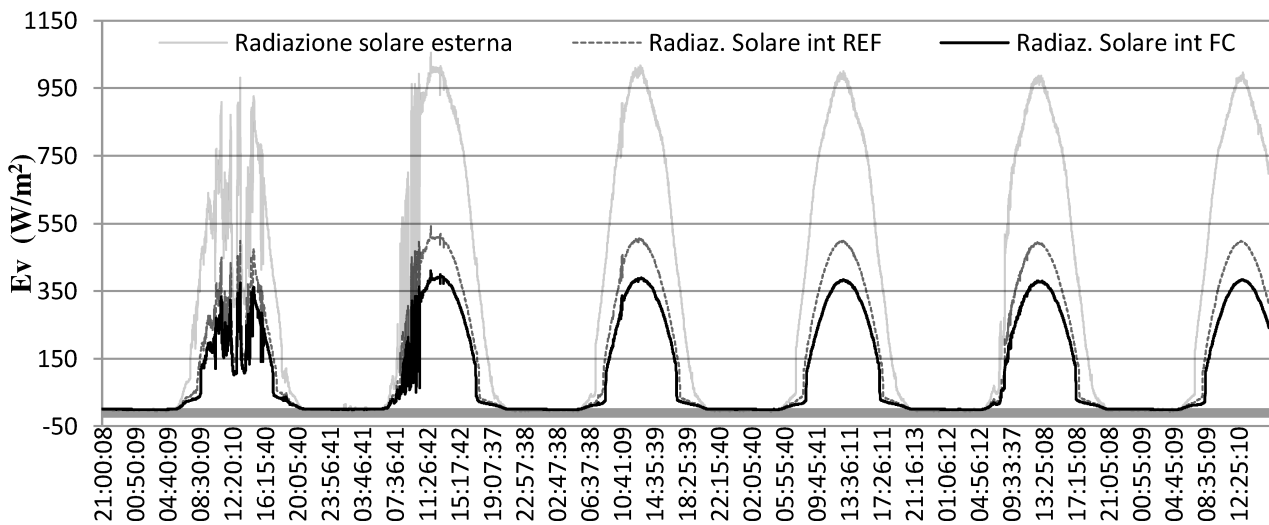


Fig. 26 Cap. 8 - Test 24-29 maggio 2017 - Diagramma delle radiazioni solari

In questa parte di prove, la radiazione termica ha raggiunto punti di massimo da 1000 a 1100

W/m<sup>2</sup>. Le ore di massima irradianza, intorno al mezzogiorno solare hanno mostrato come il



modulo sperimentale FC sia più performante dal punto di vista termico, del basso-emissivo standard. Su potenze incidenti intorno ai 1000

W/m<sup>2</sup>, il modulo REF trasmette all'interno della cellula, intorno a 500 W/m<sup>2</sup>, rispetto al FC "Tens-H", che trasmette circa 380 W/m<sup>2</sup>.

### 8.4.2 Variazione della radiazione solare trasmessa E<sub>v</sub>

Per quantificare i vantaggi offerti dal prototipo FC "Tens-H" è stato ricavato il diagramma del gradiente di radiazione solare, tra i moduli comparati. Tale valore rappresenta la differenza delle irradianze

trasmesse tra il modulo campione e il modulo sperimentale. La variazione di irradianza misura direttamente il guadagno termico offerto dal vetro fotocromatico "Tens-H".

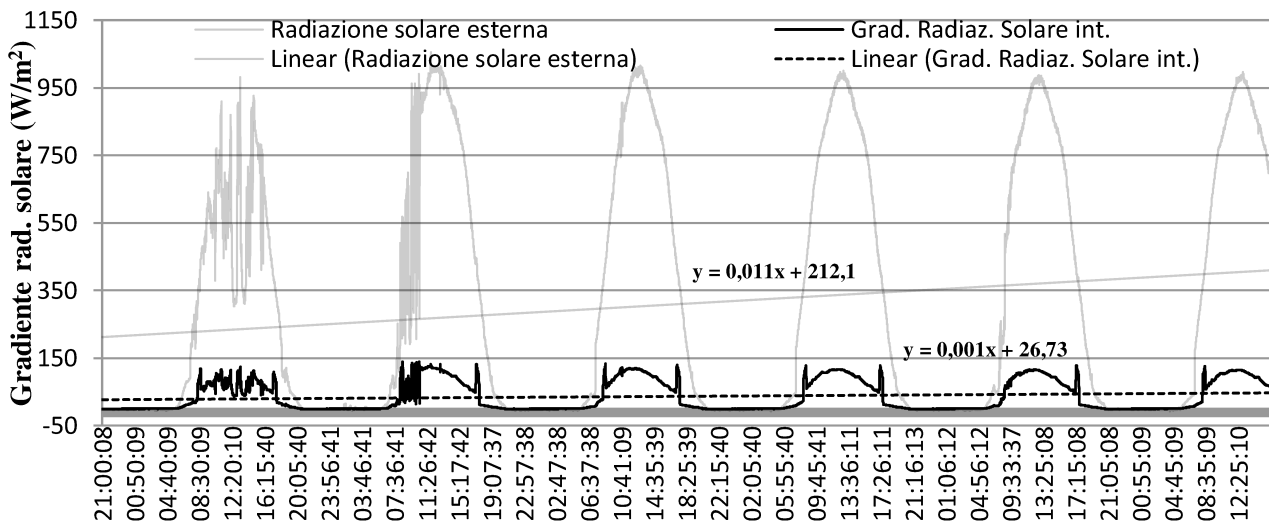


Fig. 27 Cap. 8 - Test 24-29 maggio 2017 - Gradiente radiazioni solari interne in relazione alla radiazione incidente

I valori di "massimo" del gradiente, intorno ai 115 W/m<sup>2</sup>, si hanno tra le 11:00 e le 14:00, in questo arco temporale, il prototipo FC offre l'effetto schermante più alto, in proporzione alle massime radiazioni solari esterne. Il prototipo inizia la fase di schiarimento verso le 14:00 e torna alla massima trasparenza quanto i valori del gradiente si annullano, alle 20:00 circa. Durante la notte avviene l'inversione termica e il gradiente torna a valori positivi verso le ore 05:30 del mattino.

Considerando che nei giorni di prova il sole sorgeva intorno alle 05:35 e tramontava intorno alle 20:49, ne deriva che l'innesco del processo fotocromatico inizia con le prime ore diurne e procede molto gradualmente raggiungendo la massima oscurazione sincronamente con la radiazione incidente più elevata. La curva "a campana" del gradiente radiativo testimonia la proporzionalità tra la radiazione incidente e la radiazione trasmessa. Al grafico in figura 66,

sono state aggiunte 2 linee di tendenza, una per la radiazione esterna e una per il gradiente radiativo. E' interessante notare che all'aumentare della radiazione solare esterna corrisponde un aumento del gradiente

radiativo interno. Inoltre il grafico mostra che non vi è una caduta prestazionale nel corso del tempo. A conferma si riportano le curve del gradiente rilevate il primo e l'ultimo giorno di cielo sereno in fase di test

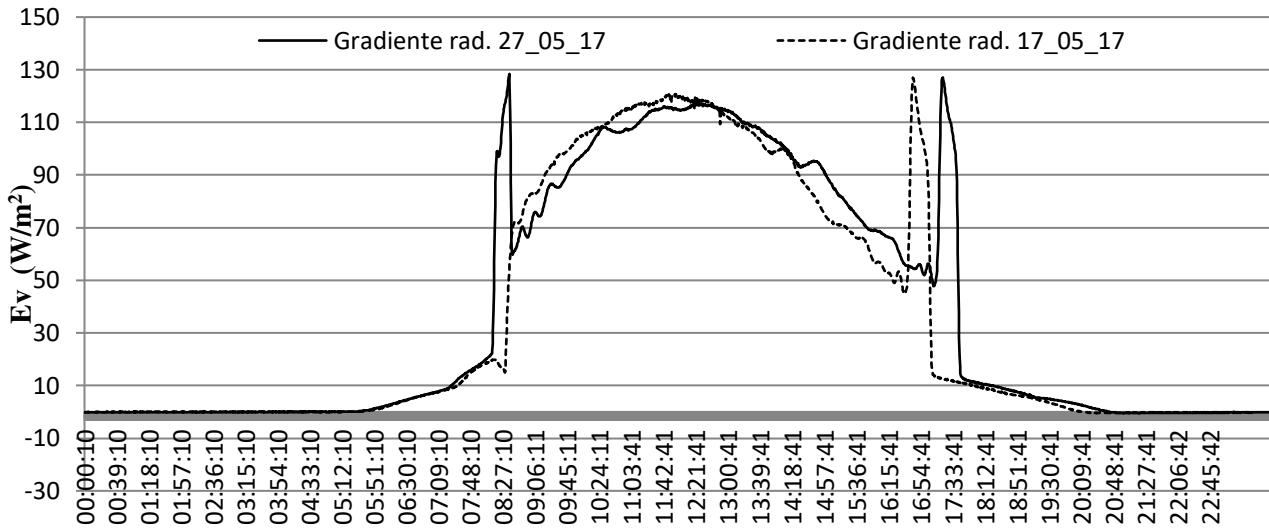


Fig. 28 Cap. 8 - Test 17 & 27 maggio 2017 - Confronto dei gradienti solari interni

La figura 67 mostra i gradienti delle radiazioni solari interne, rilevati a distanza di 10 giorni. E' possibile notare che le curve sono sovrapponibili. Questo dimostra che il prototipo FC "Tens-H" riesce a mantenere le proprie performance nel tempo. A conferma della conservazione delle prestazioni è stata condotta successivamente una prova di

durabilità in laboratorio, esponendo il prototipo a "stress termico" con radiazione continua nel tempo. Lo sfasamento dei gradienti sull'asse orizzontale è dovuto alla variazione dell'orbita solare. Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva relativa all'irradianza solare trasmessa all'interno dai moduli di prova, il giorno 28 maggio 2017.

Comparazione sperimentale  $E_{int}$  (W/m<sup>2</sup>)

	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
$E_{int \max} (\theta=0)$	377,25	490,43	<b>113.18</b>
$E_{int} (10:00-14:00)$	342,03	450,70	<b>108.67</b>
$E_{int} (h12 7:30-19:30)$	219,47	292,79	<b>73.32</b>

Tabella 5 Cap. 8 - Comparazione dei valori di radiazione solare interna  $E_{int}$

### 8.4.3 Il fattore di trasmissione solare diretta $T_e$ - Prototipo FC "Tens-H"

Il coefficiente di trasmissione solare diretta  $T_e$ , del modulo "Tens-H" rilevato nei test condotti dal 23 al 29 maggio, con le cellule esposte a sud e inclinate di circa  $57.96^\circ$  rispetto al pavimento, per avere le superfici vetrate perpendicolari alla radiazione incidente, ha mostrato andamento e prestazioni simili al prototipo fotocromatico

"Raleri". I valori del coefficiente sono stati rilevati dalle 5:30 alle 20:30 circa, in corrispondenza con gli orari di alba e tramonto del periodo. I grafici sottostanti mostrano che la principale riduzione dell'irraggiamento solare avviene intorno alle ore di massima intensità della radiazione.

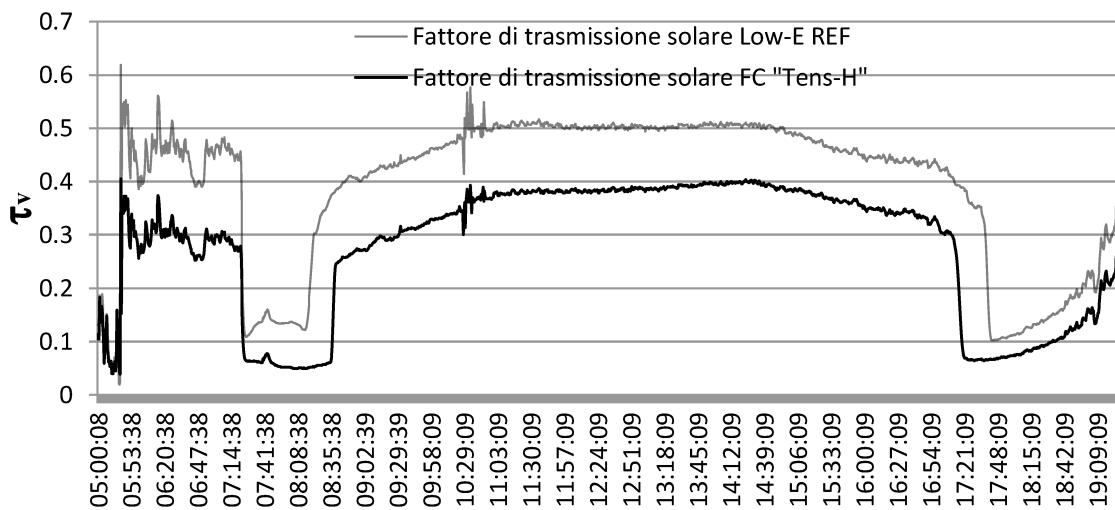


Fig. 29 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna  $T_e$  - 26-05-2017

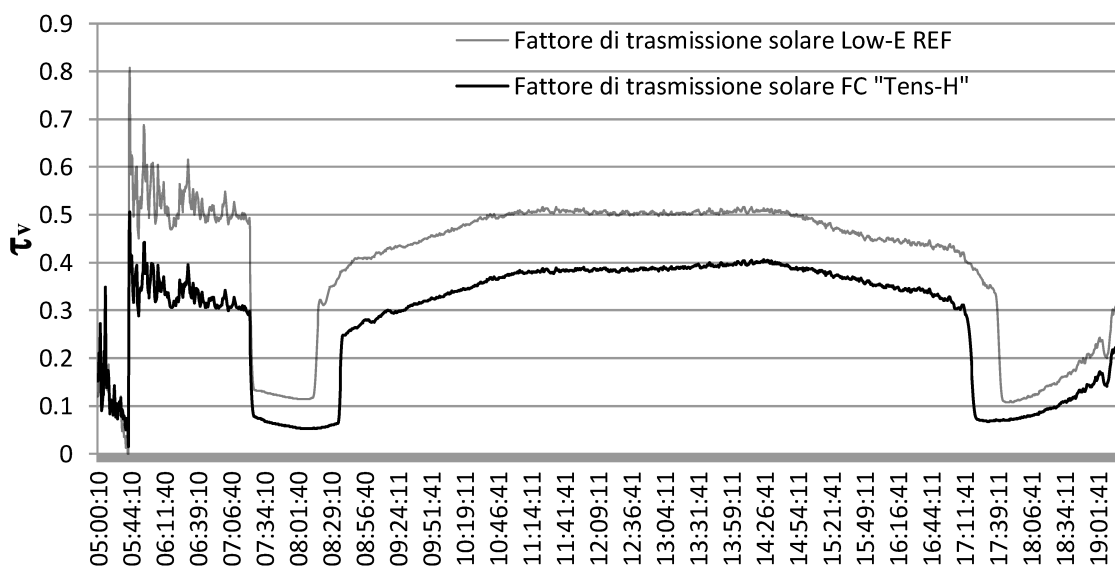
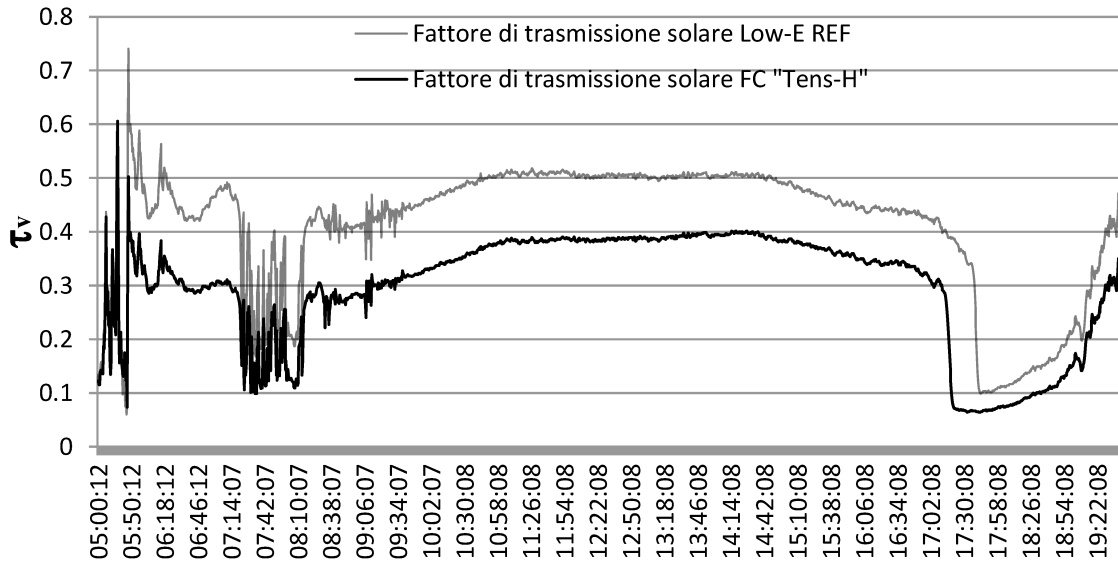


Fig. 30 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna  $T_e$  - 27-05-2017


 Fig. 31 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna  $T_e$  - 28-05-2017

Il modulo FC "Tens-H", riesce a schermare circa il 12% più del modulo di riferimento, intorno al mezzogiorno solare. Le fluttuazioni principali del coefficiente solare diretto avvengono nei periodi di attivazione e disattivazione del modulo sperimentale FC. A differenza del prototipo "Raleri", il fotocromatico "Tens-H" un un processo di attivazione e disattivazione con tempi molto più lunghi. L'attivazione del materiale avviene dalle 07:15 circa alle 08:00. Il fattore

solare diretto tende a rimanere confinato tra valori di 0.3 e 0.4 fino alla fase di disattivazione che si genera intorno alle 17:30. E' importante notare che il prototipo pur avendo un fattore di trasmissione solare molto basso, ha mostrato nelle prove fotometriche un coefficiente di trasmissione luminosa del 45.8% circa. Il materiale dunque pur comportandosi da elemento schermante, non limita eccessivamente il passaggio della luce naturale, all'interno delle cellule.

### 8.4.4 Il guadagno in termini di isolamento termico, del prototipo FC "Tens-H"

Il gradiente delle radiazioni solari trasmesse, descrive la differenza del flusso termico trasmesso tra il prototipo sperimentale FC e il modulo di riferimento REF. L'integrale sotteso alla curva del gradiente fornisce il guadagno energetico totale (al netto del guadagno per trasmittanza termica specifica

dei moduli), del prototipo sperimentale, ottenuto con la riduzione degli apporti termici esterni. Per ogni giorno di test, fatta esclusione dei periodi di tempo perturbato o variabile, è stato rilevato il guadagno termico ottenuto.

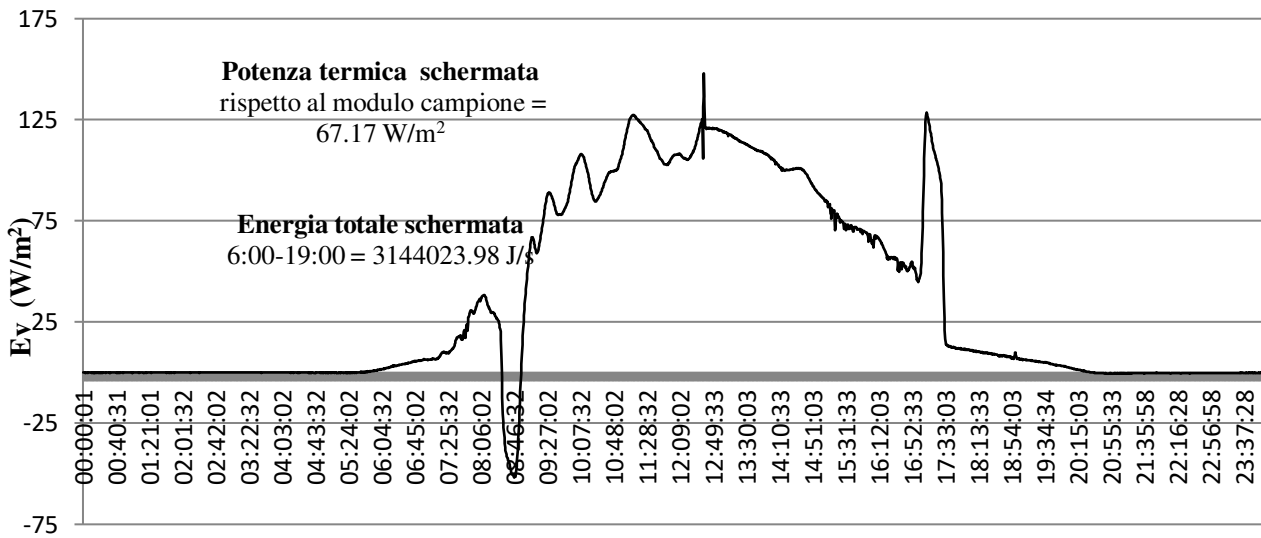


Fig. 32 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna  $T_e$  - 16-05-2017

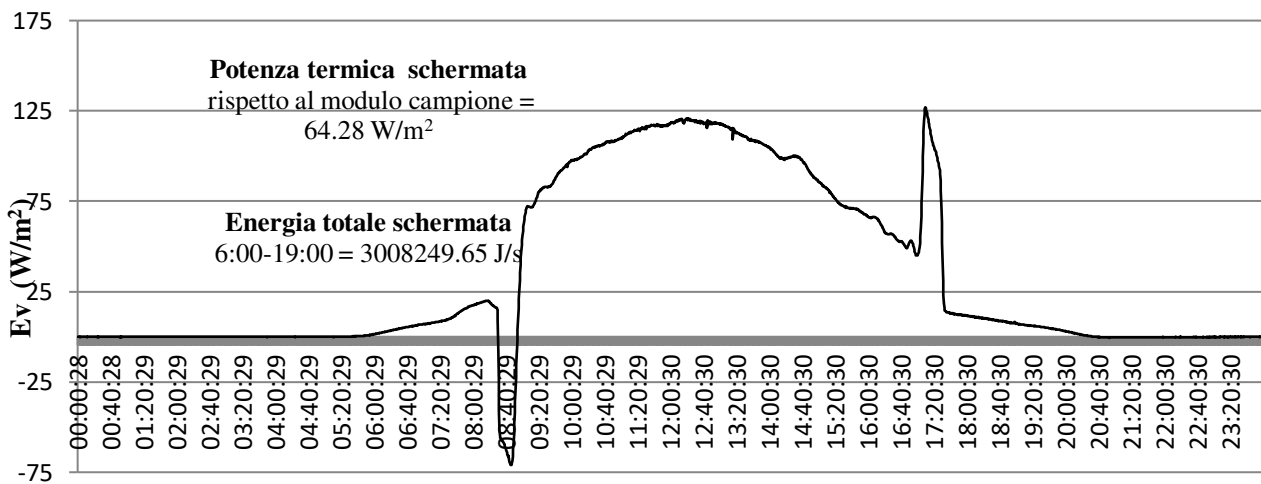


Fig. 33 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna  $T_e$  - 17-05-2017

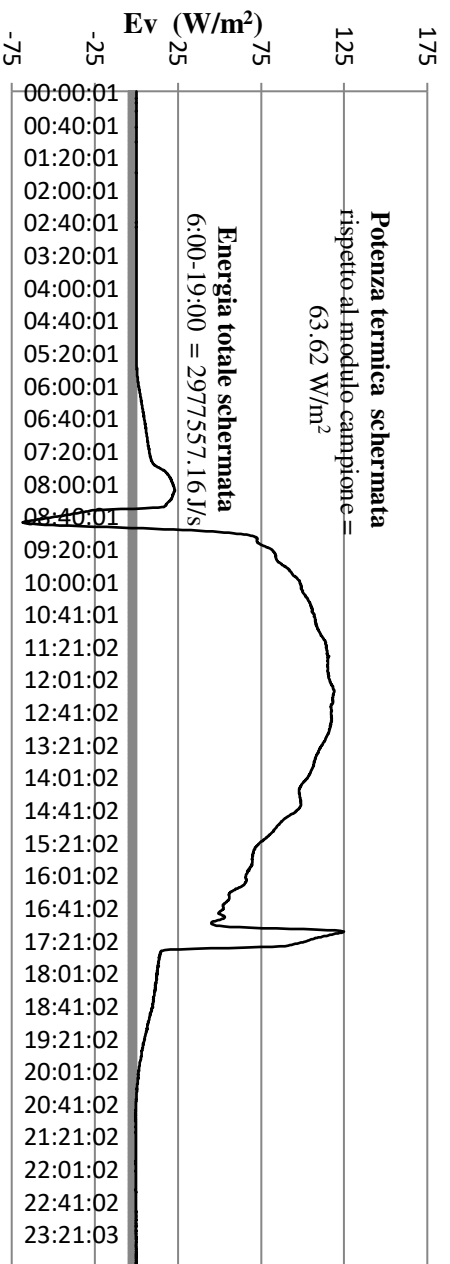


Fig. 34 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna Te - 18-05-2017

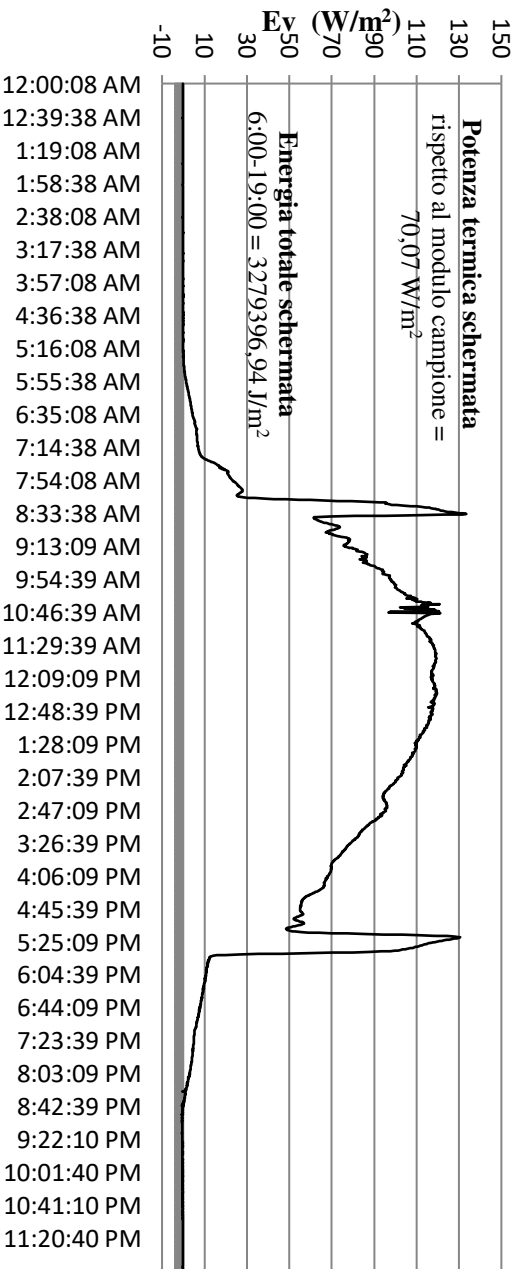


Fig. 35 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna Te - 26-05-2017

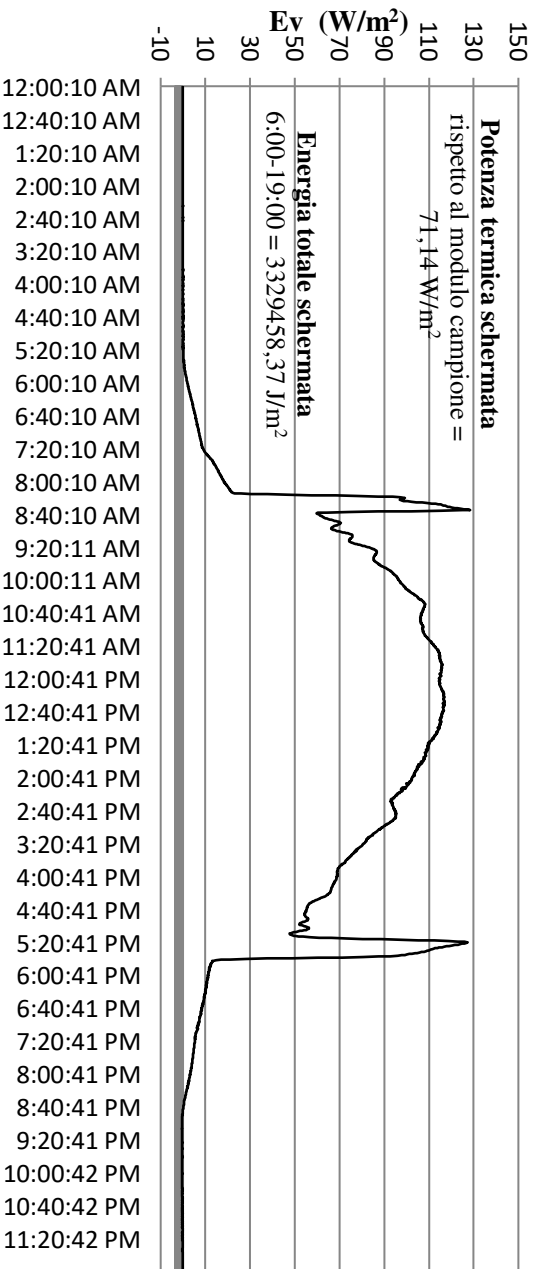


Fig. 36 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna Te - 27-05-2017

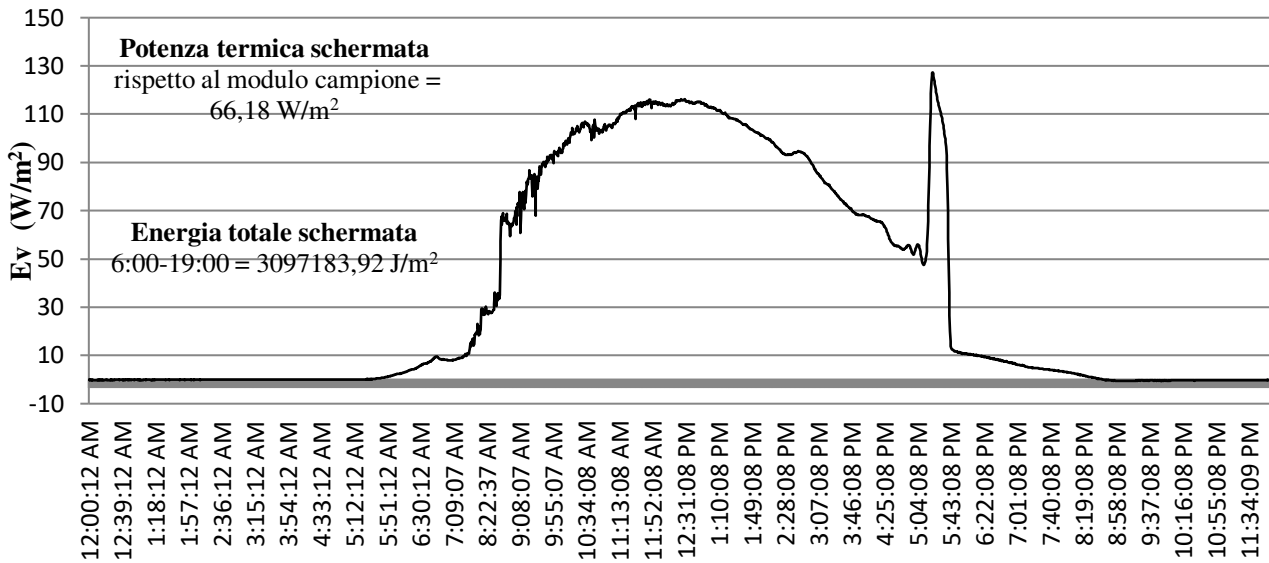


Fig. 37 Cap. 8 - I fattori di trasmissione solare interna  $T_e$  - 28-05-2017

Al fine di quantificare i vantaggi in comfort termico giornaliero, ottenuti dal modulo sperimentale, è stato calcolato l'integrale del gradiente di radiazione solare trasmessa, dalle 06:00 del mattino alle 19:00 della sera. Tale sommatoria fornisce la differenza di energia termica trasmessa dai due moduli. Dai dati

ottenuti, in 6 giorni di tempo sereno e stabile, è stata stimata una **riduzione** media della **potenza termica giornaliera trasmessa** pari a  $67.07 \text{ W/m}^2$  e una riduzione del **calore trasmesso** giornaliero di  $3139311.5 \text{ J/m}^2 = 3139311.5 * 0,239006 = 750.31 \text{ Kcal}$ .

### 8.4.5 La radiazione di attivazione e disattivazione del modulo FC

Come proceduto con il modulo FC "Raleri", mettendo in relazione la radiazione solare incidente  $E_v$  con il fattore di trasmissione solare diretta  $\tau_{eFC}$ , è possibile definire un rapporto di **proporzionalità inversa** e conoscere le **radiazioni solari  $E_v$**  che innescano il processo di oscuramento del materiale fotocromatico. Le fasi di

attivazione e disattivazione del FC "Tens-H" sono molto più lente e gradual; inoltre non sono ben distinguibili perche i valori del **fattore di trasmissione diretta  $\tau_e$**  risultano fluttuanti. Si è cercato comunque di individuare il cambiamento fotocromatico limitatamente ai periodi e alle radiazioni di attivazione e disattivazione

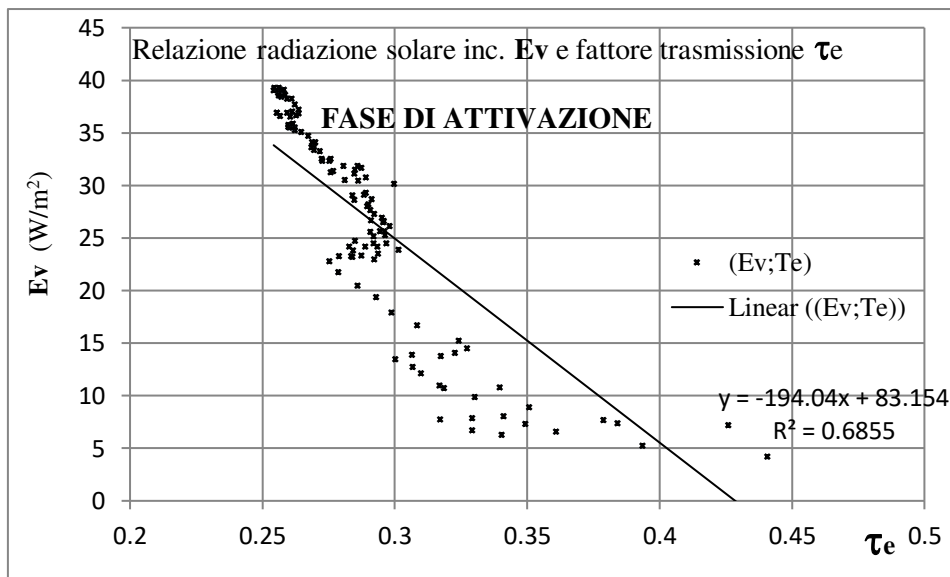


Fig. 38 Cap. 8 - Diagramma di interpolazione  $E_v - \tau_e$  - FASE DI ATTIVAZIONE

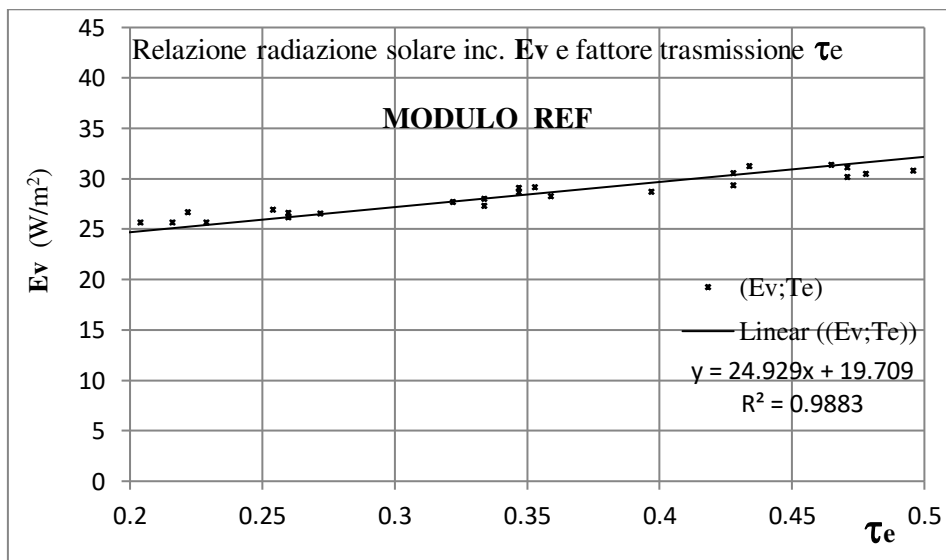


Fig. 39 Cap. 8 - Diagramma di interpolazione  $E_v - \tau_e$  - MODULO REF



La **linea di tendenza** del diagramma di **interpolazione** in fig. 77, mostra la relazione di **proporzionalità inversa** tra l'intensità delle radiazioni solari e il fattore di trasmissione solare del prototipo FC "Tens-H". Al crescere della radiazione incidente, diminuisce la radiazione trasmessa all'interno del modulo. Ciò, come noto, è dovuto al fatto che il modulo sperimentale FC si oscura gradualmente al crescere dell'irraggiamento, riflettendo una quota maggiore di energia solare verso l'esterno. Diversamente nel box ospitante il campione basso-emissivo di riferimento, vige una relazione di proporzionalità (fig. 78), ove all'aumentare della radiazione esterna, aumenta il fattore di

trasmissione diretta dell'energia. Va sottolineato, analogamente a quanto fatto per il prototipo FC "Raleri" che la fase di attivazione e disattivazione del materiale avvengono ad angoli di incidenza azimutali molto alti per cui non è facile evitare errori strumentali di rilievo. Le funzioni delle **rette di interpolazione** nelle figure 77 e 78, visto il valore alto del coefficiente di determinazione "**R**", (**R=0.685 "Tens-H"** e **R=0.988 REF**) sono state ritenute adeguate a sostenere la relazione tra i dati delle grandezze rilevate. Per ciò che attiene la **fase di attivazione** del prototipo, il diagramma in figura 77, mostra che l'**oscuramento** si innesca con radiazioni incidenti intorno ai **40 W/m<sup>2</sup>**.

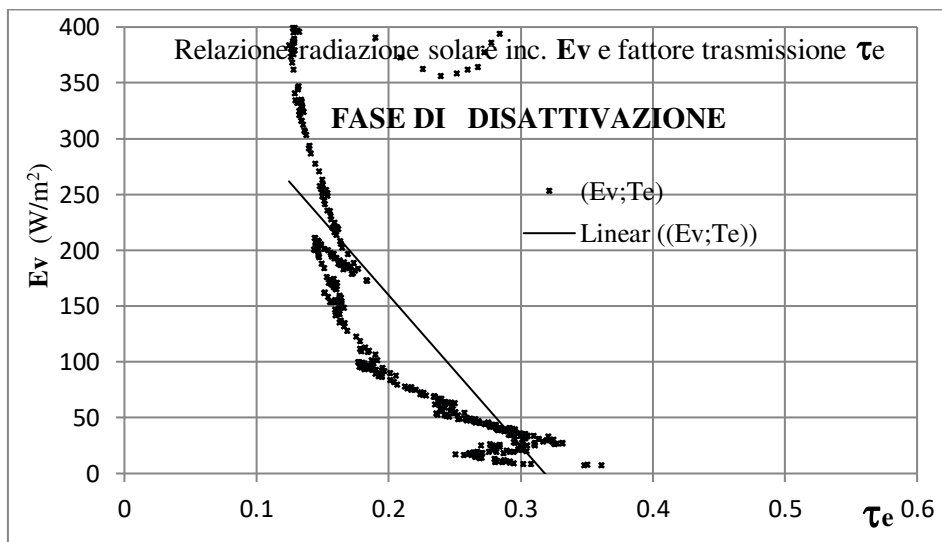


Fig. 40 Cap. 8 - Diagramma di interpolazione Ev - Te - **FASE DI DISATTIVAZIONE**

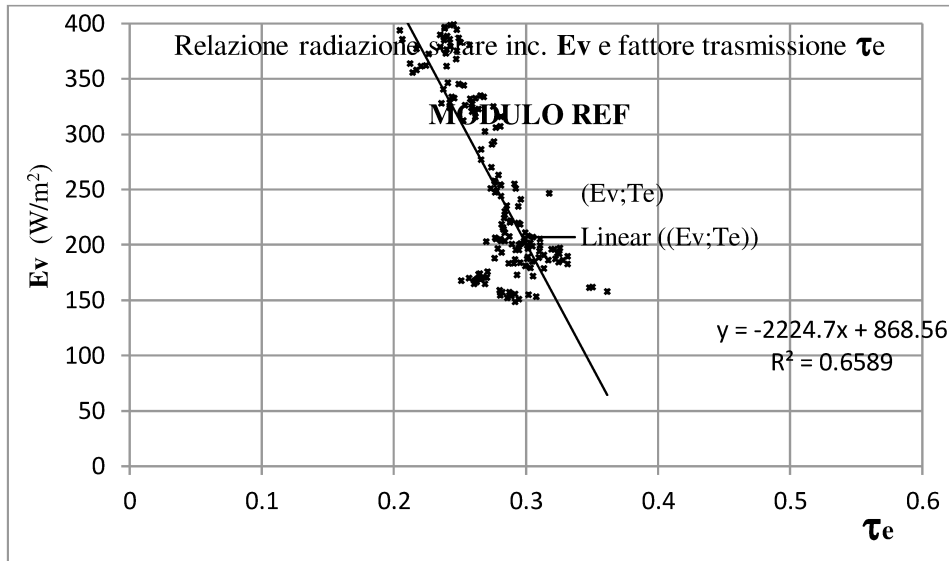


Fig. 41 Cap. 8 - Diagramma di interpolazione Ev - Te - **MODULO REF**

La **fase di disattivazione** del modulo FC conserva la relazione di proporzionalità inversa tra la radiazione solare e il fattore di trasmissione diretta,  $\tau_e$ . Si **innesca** quando la radiazione solare esterna scende intorno ai **400 W/m<sup>2</sup>**. Il Prototipo torna lentamente allo stato di trasparenza fino allo **schiarimento completo** che avviene intorno ai **40 W/m<sup>2</sup>**. I valori di  $\tau_e$  mostrati alla fine della fase di oscuramento subiscono una piccola variazione. Al momento della disattivazione, anche il campione di riferimento mostra un andamento inversamente proporzionale anche se i valori di  $\tau_e$  rimangono confinati tra il **33%** e il **22%**. Per definire meglio i **processi attivanti** e capire i periodi di reazione fotocromatica del prodotto, è stato relazionato, su un grafico a **tre assi**, il **coefficiente di trasmissione diretta  $\tau_{eFC}$** , con la **radiazione solare incidente Ev**, per il tempo **T**.

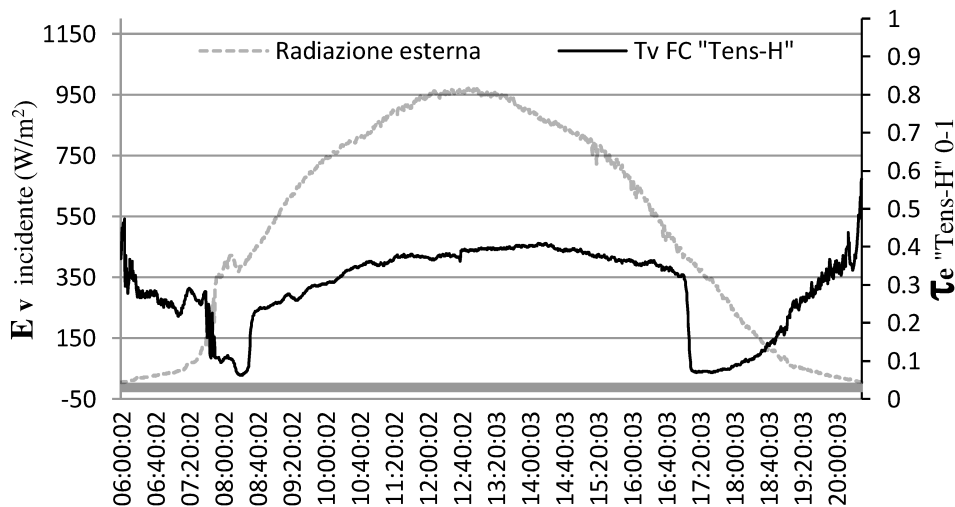


Fig. 42 Cap. 8 - Grafico di relazione **Ev -  $\tau_e$**  nel tempo

Si è osservato in figura 79, che l'**oscuramento** del modulo **inizia** intorno alle **06:21**, circa 40' dopo l'alba, avvenuta alle 05:41, e **termina** intorno alle **08:29**. La curva del coefficiente  $\tau_{eFC}$ , mostra che il materiale non conserva tutto lo **stato di oscuramento** prodotto dall'attivazione ma **risale** a valori di  $\tau_{eFC}$  del **23%** per poi subire un graduale **incremento del 17%** dovuto all'intensificarsi della radiazione solare incidente. Al **mezzogiorno solare** il valore di  $\tau_{eFC}$  arriva a valori di **0.4**.

La **fase di disattivazione** ha **inizio** intorno alle ore **17:20** e **termina** alle **20:20** circa, in coincidenza con l'ora del tramonto avvenuto alle 20:24. Si può notare che la fase di schiarimento del modulo è anticipata da un oscuramento istantaneo seguito da un progressivo ritorno alla trasparenza. Questo fenomeno è speculare a quello in fase di attivazione quando il materiale, al termine della fase di attivazione, ha incrementato il proprio fattore solare  $\tau_{eFC}$  del **23%**.

### 8.4.6 Le temperature superficiali e le temperature dell'aria al contorno

I vantaggi sul comfort termico, ottenuti con prototipo sperimentale sono determinati dalla differenza di temperatura dell'aria interna  $T_i$  ai moduli. I sistemi e il metodo di rilevamento sono gli stessi definiti per il modulo sperimentale "Raleri". La differenza di temperatura dell'aria interna  $\Delta T$ , tra il

campione di riferimento e il prototipo fotocromatico è una misura diretta del guadagno che si ottiene, in termini di benessere termico. Di seguito si riportano le temperature interne ai moduli in relazione alla temperatura dell'aria esterna ad essi unitamente al gradiente  $\Delta T$ .

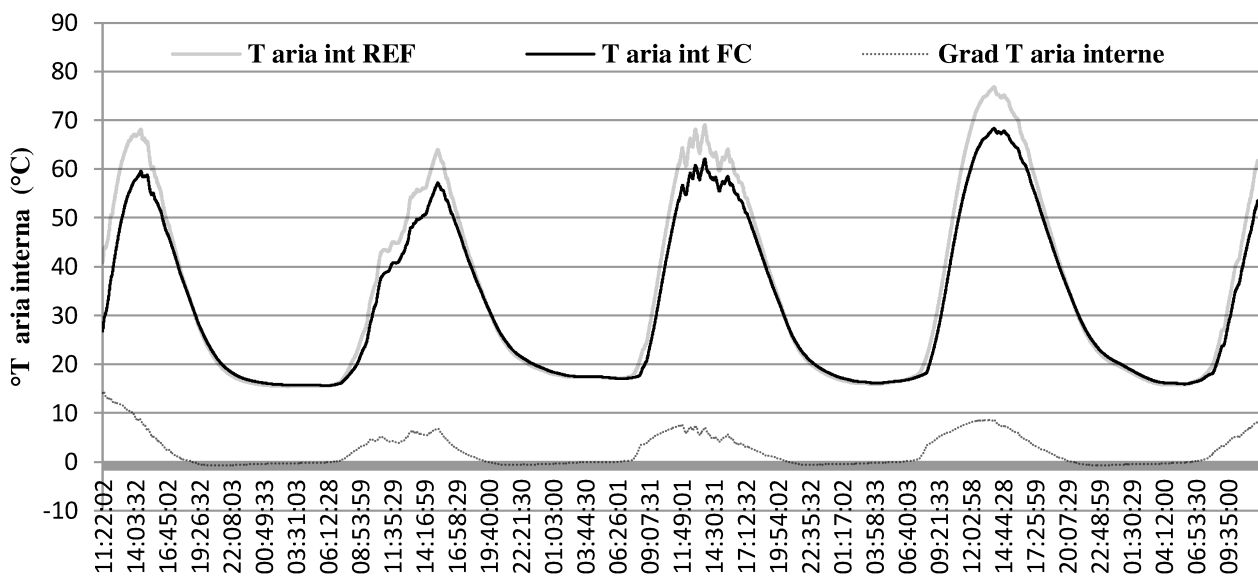


Fig. 43 Cap. 8 - Temperature interne aria  $T_i$  e gradiente  $\Delta T$  - Test 11-15 maggio 2017

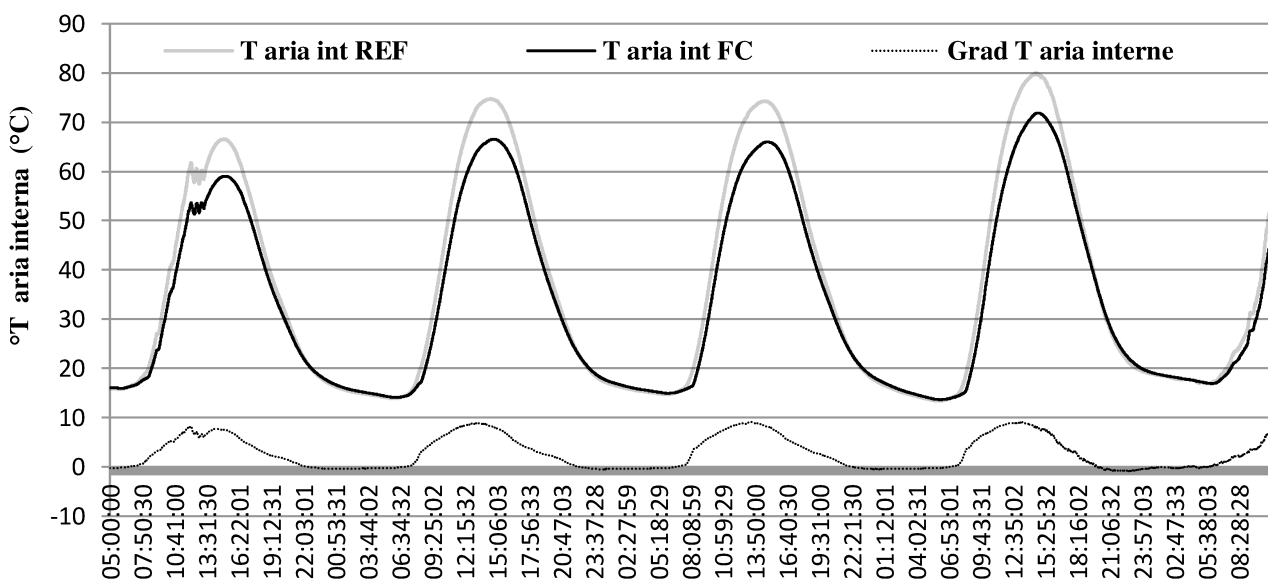


Fig.44 Cap. 8 - Temperature interne aria  $T_i$  e gradiente  $\Delta T$  - Test 16-19 maggio 2017

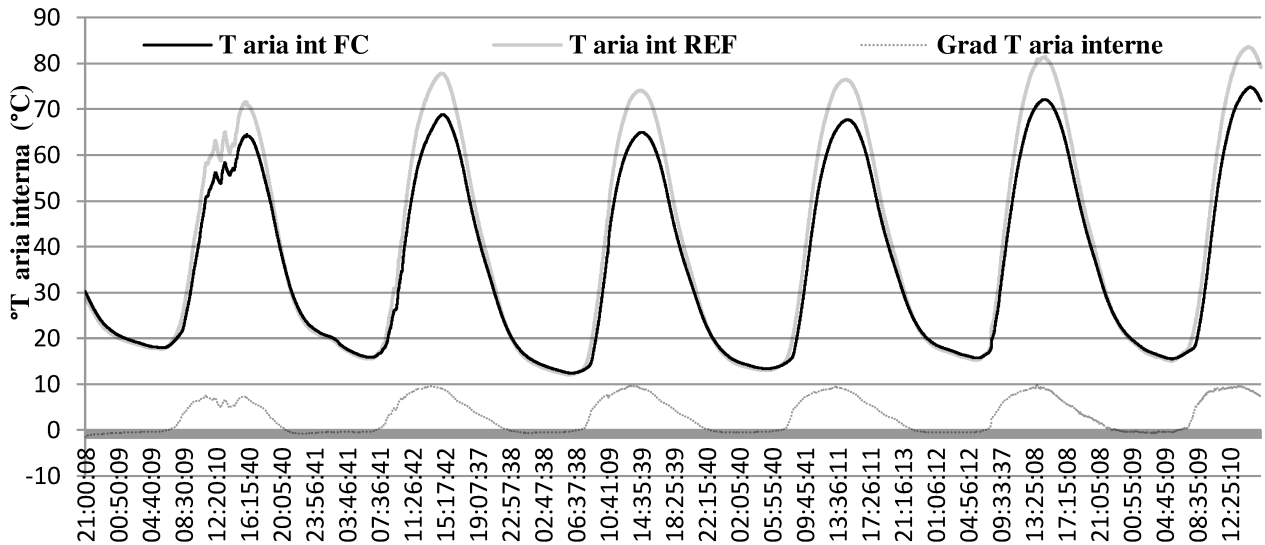


Fig. 45 Cap. 8 - Temperature interne aria  $T_i$  e gradiente  $\Delta T$  - Test 24-28 maggio 2017

Il vetro-camera FC, si comporta in modo selettivo, come risaltato dalla curva del gradiente  $\Delta T$ . La massima escursione termica dell'aria interna ai due box, si verifica nelle ore di massima intensità di radiazione solare.. Le figure 80, 81 e 82, mostrano che nelle ore notturne non vi è differenza di temperatura tra l'aria interna al box di riferimento e quella interna al prototipo sperimentale FC. Questo perché in assenza di radiazione solare esterna, il modulo fotocromatico rimane allo stato passivo trasparente trasmettendo circa la stessa energia termica del basso-emissivo di riferimento. l'attivazione del prototipo FC, attiva l'oscuramento del modulo intorno alle 7:30, quando l'irraggiamento solare inizia ad intensificarsi. Il materiale FC inizia

gradualmente ad oscurarsi e riflettere la radiazione solare facendo innalzare il gradiente  $\Delta T$  fino ai valori massimi che si riscontrano tra le ore **12:00** alle ore **14:00**, in corrispondenza con le ore di **massima intensità termica**. In queste ore la **temperatura interna dell'aria** nel box con il **modulo sperimentale FC** risulta mediamente **inferiore di 9 °C÷10 °C**, rispetto a quella interna al box con il **campione di riferimento**. Con l'attenuarsi dell'irraggiamento termico esterno, il prototipo FC inizia a disattivarsi e il gradiente di temperatura gradualmente scende fino ad annullarsi mediamente intorno alle ore 21:00. Per mostrare la selettività del fotocromatico è stato costruito il grafico sottostante.

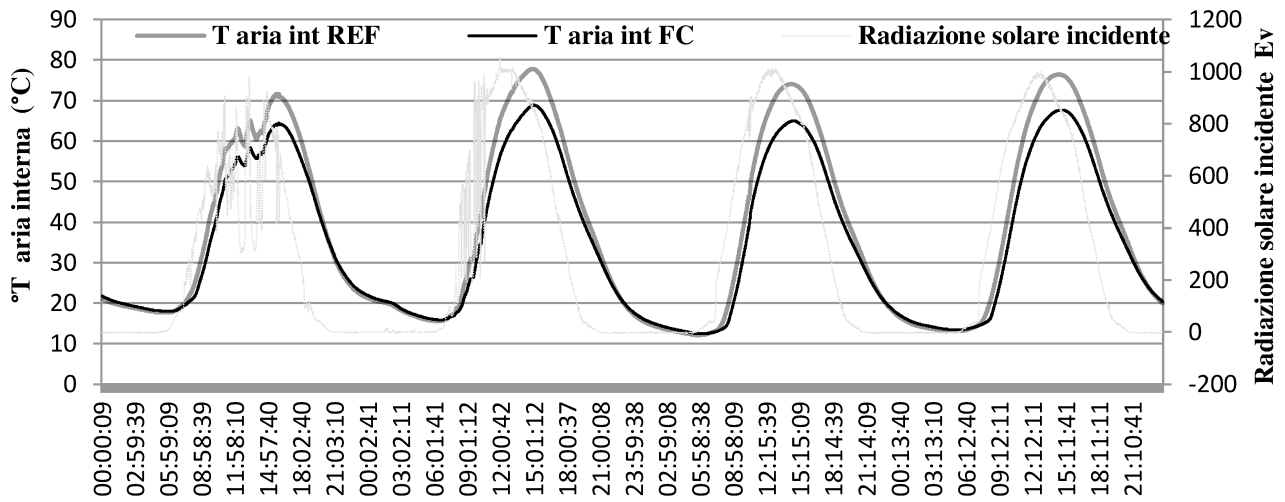


Fig. 46 Cap. 8 - Relazione tra le temperature interne  $T_i$  ai box e la radiazione solare incidente esterna  $E_v$

La figura 46 mostra la corrispondenza di proporzionalità tra la radiazione solare e le temperature in terne alle test-cells. Si può notare, lo sfasamento termico dei moduli rispetto alla radiazione solare. La curva gaussiana del fotocromatico, più stretta e più bassa della curva di riferimento, rappresenta che il modulo Fc ha un'inerzia termica superiore e un integrale della temperatura interna inferiore rispetto al basso-emissivo. Nell'insieme, il prototipo FC offre una

schermatura termica maggiore limitando l'innalzamento delle temperature ambientali interne. Un ulteriore contributo al benessere termico proviene dalle **temperature medie radianti** delle pareti che circondano l'ambiente. Le pareti del box di prova sono del tutto equivalenti fatta eccezione per la faccia vetrata. Seppur in misura ridotta, le **temperature superficiali interne** dei moduli trasparenti danno un **contributo** alla definizione del **comfort termico**.

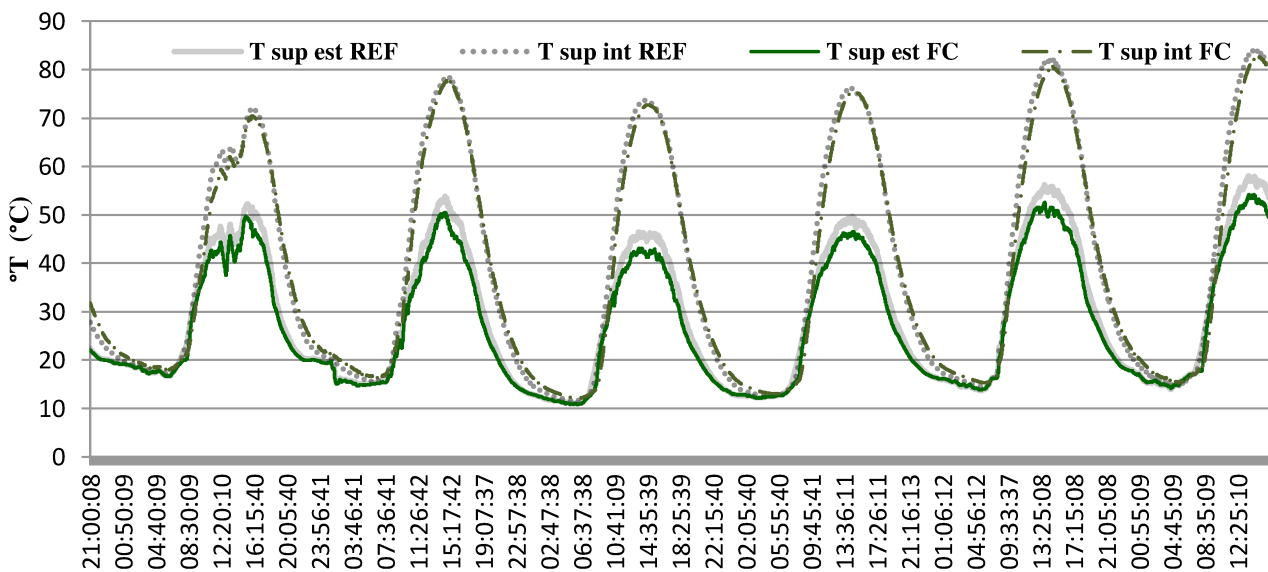


Fig. 47 Cap. 8 - Temperature superficiali rilevate sui moduli vetrati,  $T_{Sup.int}$  e  $T_{Sup.est}$  - Test 24-28 maggio 2017

Dal grafico n. 47 emerge subito che le temperature superficiali del modulo FC si restano inferiori rispetto al vetro basso-emissivo. Le temperature superficiali dei prototipi, tendono a truardarsi mentre i valori superficiali interni mostrano un certo gradiente di temperatura. Intorno al

mezzogiorno solare il gradiente di temperatura superficiale interna mostra massimi di 5 °C circa. In tema di benessere termico, il fotocromatico è risultato vantaggioso sia rispetto alla temperatura dell'ambiente interno, sia alla temperatura radiante della faccia vetrata dei box.

	Comparazione sperimentale $T_{aria\ int}$ (°C)		
	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
$T_{aria\ int\ max}$	72,12	81,44	<b>9.32</b>
$T_{aria\ int\ (10:00-14:00)}$	58,48	66,71	<b>8.23</b>
$T_{sup\ int\ (10:00-14:00)}$	62,78	67,38	<b>4.6</b>

Tabella 6 Cap. 8 - Comparazione della temperatura dell'aria interna e della temperatura superficiale interna

### 8.4.7 Variazione del flusso termico superficiale HF o $Q_s$ ( $W/m^2$ )

Il gradiente di temperatura superficiale, visto al paragrafo precedente influisce sull'apporto di **calore trasmesso per trasmittanza termica**. Il **flusso termico superficiale**, è la somma del **calore assorbito e riemesso** dal vetro verso l'interno per convezione ed irraggiamento  $q_i$ , e del **calore trasmesso per differenza di temperatura** tra la superficie interna e quella esterna della lastra. Per mezzo

di 2 **Termoflussimetri HFP01** debitamente calibrati, è stata fatta la rilevazione dei **flussi termici superficiali HF** e il calcolo del **gradiente di flusso superficiale  $\Delta HF$**  posizionando i **Termoflussimetri HFP01**, adesi al vetro interno dei moduli. Gli strumenti sono stati schermati con nastro riflettente di alluminio per evitare apporti radiativi interni.

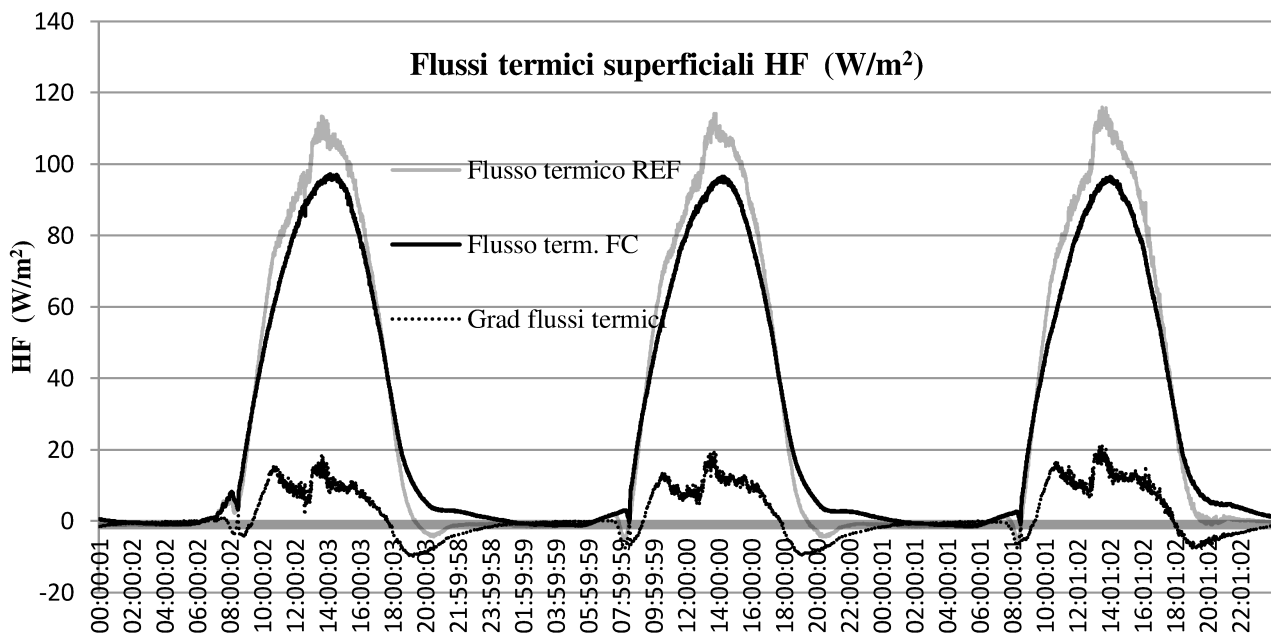


Fig. 48 Cap. 8 - Flussi termici superficiali **HF** ( $W/m^2$ )

Come si può notare in figura 48, il flusso termico del prototipo FC risulta inferiore a quello del campione di riferimento. Il **gradiente del flusso HF**, si **annulla** per le **ore giornaliere non irradiate** e aumenta gradualmente dalle prime ore del mattino con

l'intensificazione della radiazione termica esterna. La **curva Hf** mostra **due punti di massimo**, alle **10:30** e alle **13:40** dovuti ad un incremento del flusso termico superficiale del campione basso-emissivo. La curva del flusso fotocromatico infatti, segue un andamento più



regolare. Il **massimo gradiente**, relativo trasmesso, si riscontra intorno alle ore **riduzione massima** del **flusso** termico **13:30** con valori di **21.122 W/m<sup>2</sup>**.

	Comparazione sperimentale $HF_{sup}$ (W/m <sup>2</sup> )		
	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
<b><math>HF_{sup\ max}</math></b>	95,61	115,64	<b>20.03</b>
<b><math>HF_{sup\ (10:00-14:00)}</math></b>	76,27	89,29	<b>13.02</b>
<b><math>HF_{sup(h12\ 7:30-19:30)}</math></b>	54,89	61,42	<b>6.53</b>

Tabella 7 Cap. 8 - Comparazione dei valori di radiazione solare interna Ev

### 8.5 Stima del fattore solare "g" del del fattore di trasmissione solare diretta $\tau_e$

Per la stima del fattore solare "G" ci si è attenuti alla norma UNI EN 410 e sono stati considerati utili solo i dati campionati in giornate serene e senza interposizione di ostacoli alla radiazione solare. Le cellule, esposte a sud, sono state inclinate per formare un angolo di incidenza della radiazione solare  $\alpha$  normale ( $\alpha = 0^\circ$ ). Dei test effettuati, sono stati scelti per la misura di g, il giorno 8 aprile 2017, relativamente al prototipo fotocromatico "Raleri" e il giorno 27 maggio 2017 per il prototipo fotocromatico "Tens-H". Il fattore solare g è la quota di radiazione solare direttamente trasmessa  $\tau_e$  più la quota di energia termica assorbita dalla vetrata e riemessa all'interno per convezione e per irraggiamento nel lontano IR,  $q_i$ .

$$g = \tau_e + q_i \quad (1)$$

Per determinare il fattore solare g si fa riferimento al flusso termico totale che attraversa la finestra, **Q**. Tale **flusso termico totale** è la somma dell'energia termica incidente  $gI_v^{out}$  (con  $I_v^{out}$  radiazione termica). Quindi, eguagliando l'Eq. (5) e l'Eq. (2) si ottiene la formula del fattore solare g:

$$g = \frac{\tau I_v^{out} + q_{fluxmeter} - U(T_a^{out} - T_a^{in})}{I_v^{out}} \quad (6)$$

Tutti i termini dell'Eq. (6) sono stati misurati direttamente in fase di test tranne la

incidente), del contributo dovuto alla trasmittanza termica del vetro  $U_g$  e alla differenza di temperatura  $\Delta T$  tra l'aria esterna e l'aria interna al vetro:

$$Q = gI_v^{out} + U(T_a^{out} - T_a^{in}) \quad (2)$$

Sostituendo l'Eq. (1), in Eq. (2) si ottiene:

$$Q = \tau I_v^{out} + q_i I_v^{out} + U(T_a^{out} - T_a^{in}) \quad (3)$$

L'energia termica assorbita e riemessa all'interno dal vetro  $q_i I_v^{out}$  insieme all'energia termica diffusa per trasmittanza termica specifica del vetro  $U(T_a^{out} - T_a^{in})$ , formano il **flusso termico superficiale**  $q_{fluxmeter}$  rilasciato dalla superficie interna del vetro:

$$q_{fluxmeter} = q_i I_v^{out} + U(T_a^{out} - T_a^{in}) \quad (4)$$

Sostituendo l'Eq. (4) in Eq. (3), il flusso termico totale Q sarà:

$$Q = \tau I_v^{out} + q_{fluxmeter} \quad (5)$$

trasmittanza termica del vetro  $U$ . Per il campione di riferimento basso-emissivo si è fatto riferimento al valore di  $U$  fornito dalla scheda tecnica, mentre per i moduli fotocromatici sono stati usati i valori teorici stimati secondo la norma UNI EN 673: 2011.

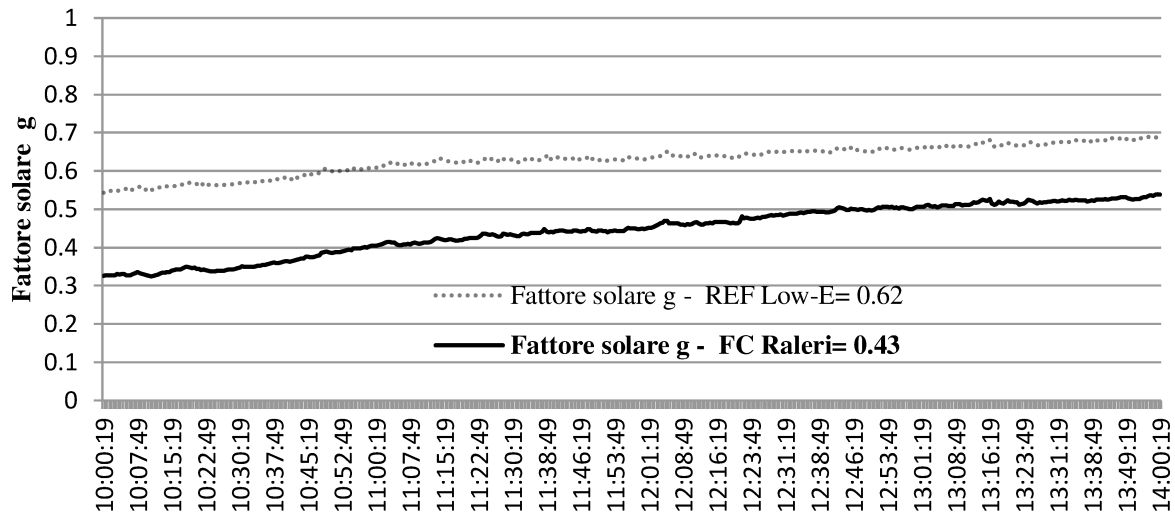


Fig. 49 Cap. 8 - Fattore solare  $g$  - modulo REF e modulo FC "Raleri"

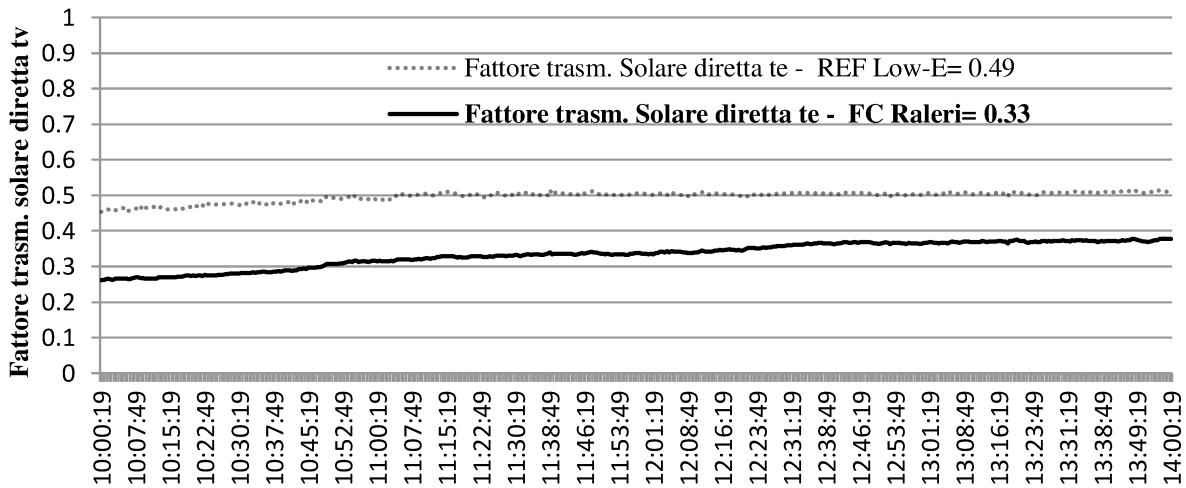


Fig. 50 Cap. 8 - Fattore di trasmissione solare diretta  $-t_e$  modulo REF e modulo FC "Raleri"

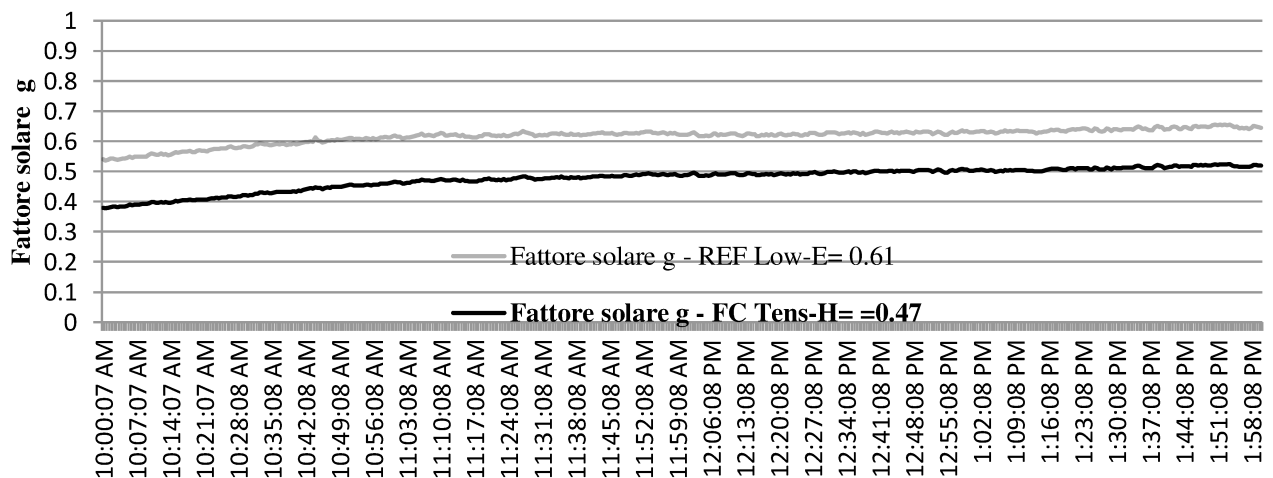


Fig. 51 Cap. 8 - Fattore solare  $g$  - modulo REF e modulo FC "Raleri"

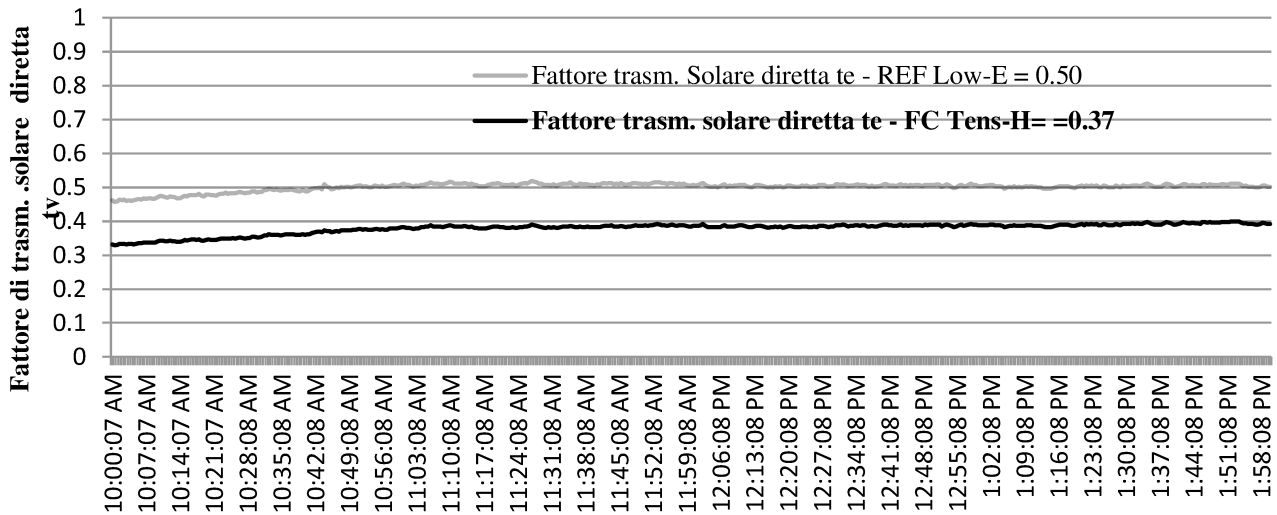


Fig. 52 Cap. 8 - Fattore di trasmissione solare diretta  $\tau_e$  - modulo REF e modulo FC "Tens-H"

Dall'analisi dei dati rilevati risulta che i moduli sperimentali FC nelle ore di maggior irraggiamento solare, raggiungono lo stato di massima attivazione. Il **modulo FC "Raleri" riduce** il fattore solare  $g$  del **19%**, e il fattore di trasmissione diretta  $\tau_e$  del **16%**. Il modulo

FC "Tens-H" abbassa il fattore solare  $g$  del **14%** e il fattore di trasmissione solare diretta del **13%**. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle caratteristiche energetiche:  $g$  e  $\tau_e$  e del fattore di trasmissione luminosa  $\tau_v$ .

**Validazione campione di riferimento Low-E**

	Valori sperimentali	Valori teorici di riferimento EN 410	Errore %
<b>g</b>	0.61	0.59	3.3
<b><math>\tau_e</math></b>	0.51	0.52	1.9
<b><math>\tau_v</math></b>	0.77	0.80	3.7

**Comparazione sperimentale g,  $\tau_e$ ,  $\tau_v$**

	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
<b>g</b>	0.43	0.61	<b>0.18</b>
<b><math>\tau_e</math></b>	0.33	0.51	<b>0.18</b>
<b><math>\tau_v</math></b>	0.57	0.77	<b>0.20</b>
	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
<b>g</b>	0.47	0.61	<b>0.14</b>
<b><math>\tau_e</math></b>	0.37	0.51	<b>0.14</b>
<b><math>\tau_v</math></b>	0.46	0.77	<b>0.31</b>

Tabella 8 Cap. 8 - Comparazione dei valori di g,  $\tau_e$ ,  $\tau_v$ .

### 8.6 Flusso termico totale $Q_t$

Il flusso termico totale  $Q_t$  è dato dalla somma di tutti gli apporti termici trasmessi all'interno dei moduli. E' stato rilevato sommando la radiazione solare direttamente trasmessa  $E_{int}$  al flusso termico superficiale  $q_{fluxmeter}$ . Il flusso termico  $Q_t$ , indica la quantità totale di energia termica che viene trasmessa all'interno dei moduli, nell'unità di tempo e di superficie.

Flusso termico totale $Q_{Tot}$			
	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
$E_{int}$ (W/m <sup>2</sup> )	400.10	523.25	123.15
$q_{fluxmeter}$ (W/m <sup>2</sup> )	112.32	112.88	0.56
<b><math>Q_t</math> (W/m<sup>2</sup>)</b>	512.42	636.13	<b>123.71</b>
Flusso termico totale $Q_{Tot}$			
	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
$E_{int}$ (W/m <sup>2</sup> )	377.25	490.43	113.18
$q_{fluxmeter}$ (W/m <sup>2</sup> )	95.61	115.64	20.03
<b><math>Q_t</math> (W/m<sup>2</sup>)</b>	472.86	606.07	<b>133.21</b>

Tabella 9 Cap. 8 - Comparazione dei valori di Q tot

### Cap. 8.7 Il coefficiente di Shading (SHGC)

In Paesi non europei, in particolare negli Stati Uniti d'America non si considera direttamente il fattore solare  $g$  ma una grandezza ad esso derivat: il **coefficiente di shading SH**. E' una grandezza adimensionale pari al rapporto fra il fattore  $g$  del **vetro analizzato** e il fattore  $g$  di un **float chiaro spesso 3 mm con fattore solare pari a 0,87**, preso come

riferimento. Ad un basso valore del coefficiente di shading, corrisponde una bassa radiazione solare trasmessa e quindi una buona schermatura. I valori sperimentali **SH** rilevati sono:

$$SH_{Low-E REF} = 0.61/0.87 = \mathbf{0.7};$$

$$SH_{FC "Raleri"} = 0.43/0.87 = \mathbf{0.49};$$

$$SH_{FC "Tens-H"} = 0.47/0.87 = \mathbf{0.54};$$

Validazione campione di riferimento Low-E			
	Valori sperimentali	Valori teorici di riferimento	Errore %
	SH	SH EN 410	
<b>SH</b>	0.70	0.68	2.9
Comparazione sperimentale SH			
	FC "Raleri"	Low-E REF	Riduzione
<b>SH</b>	0.49	0.70	<b>0.21</b>
	FC "Tens-H"	Low-E REF	Riduzione
<b>SH</b>	0.54	0.70	<b>0.16</b>

Tabella 10 Cap. 8 - Comparazione dei valori di Shading SH.

### 8.8 Indice di selettività (IS)

Pur non trattandosi di una grandezza tecnica sostanziale per i vetri, è largamente diffuso nel gergo commerciale, l'**indice di selettività IS**. Tale indice mette in relazione la trasmittanza luminosa **T<sub>v</sub>** col fattore solare **g**. Tanto più il **rapporto IS/g** è **elevato**, **maggiore** è la selettività del vetro. I materiali

che hanno un alto indice di selettività sono caratterizzati da alta trasparenza alla luce visibile e bassa propensione alla trasmissione di calore. Dai test risultano i seguenti **IS**:

$$IS_{Low-E REF} = 0.77/0.61 = \mathbf{1.27};$$

$$IS_{FC "Raleri"} = 0.57/0.43 = \mathbf{1.33};$$

$$IS_{FC "Tens-H"} = 0.46/0.47 = \mathbf{0.98};$$

**Validazione campione di riferimento Low-E**

	Valori sperimentali IS	Valori teorici di riferimento IS EN 410	Errore %
<b>IS</b>	1.27	1.35	6.61
<b>Comparazione sperimentale IS</b>			
	FC "Raleri"	Low-E REF	Variazione
<b>IS</b>	1.33	1.27	<b>0.02</b>
	FC "Tens-H"	Low-E REF	
<b>IS</b>	0.98	1.27	<b>- 0.29</b>

Tabella 11 Cap. 8 - Comparazione dei valori di Selettività IS

I fattori IS rilevati mostrano come il prototipo sperimentale si comporti in modo più selettivo rispetto al campione di riferimento, aumentando l'indice di selettività di 0.02. Il modulo FC "Tens-H" con un fattore IS

inferiore di 0.29 rispetto al campione basso-emissivo, riesce a schermare gli stessi apporti termici del FC "Raleri" ma, allo stato attivo, risulta meno trasparente di quest'ultimo.

### 8.9 Trasmissione dei raggi ultravioletti UV %

Altra caratteristica importante per il benessere fisico è la schermatura che un vetro offre alle radiazioni UV. Al diminuire della lunghezza d'onda, i raggi UV, al diventano più penetranti aumentando l'indice di "pericolosità". Delle problematiche legate alle radiazioni è stato accennato al capitolo 7. Il **fattore di trasmissione UV** viene ricavato, secondo la

norma UNI EN 410, dalle trasmittanze spettrali del materiale alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto. Si omette in questa trattazione, la determinazione di tale coefficiente, considerando che già il **campione di riferimento** basso-emissivo ha **fattore di trasmissione UV = 0**. Quindi anche i **moduli sperimentali**, che

comprendono nel "Wafer" di assemblamento una lastra con trattamento basso-emissivo del tutto simile a quella di riferimento, non possono che avere **fattore di trasmissione**

**UV, nullo.** Il valore nullo del fattore UV si può dedurre anche dalle curve di trasmittanza spettrale dei moduli, riportate al paragrafo 9.5.1.

### 8.10 Energia di Cooling

E' l'apporto energetico su base oraria, che deve essere erogato dagli impianti per il raffrescamento estivo. In definitiva è l'energia di raffreddamento che deve essere erogata in una giornata tipo. Ad esempio, considerando un orario estivo, dalle 8:00 alle 20:00. L'energia di Cooling è data dall'integrale del flusso termico totale  $Q_t$  nell'intervallo di tempo considerato (esempio 12 ore). Nel

nostro caso è stato considerato il periodo di ore diurne maggiormente significativo, dall'8:00 alle 20:00. Il flusso termico totale  $Q_t$ , a sua volta è dato dalla sommatoria dell'irradianza trasmessa dai moduli vetriati  $E_{int}$  e dal flusso termico superficiale  $q_{fluxmeter}$ , estesa alle 12 ore diurne. Di seguito si riporta il grafico flusso termico totale  $Q_t$ .

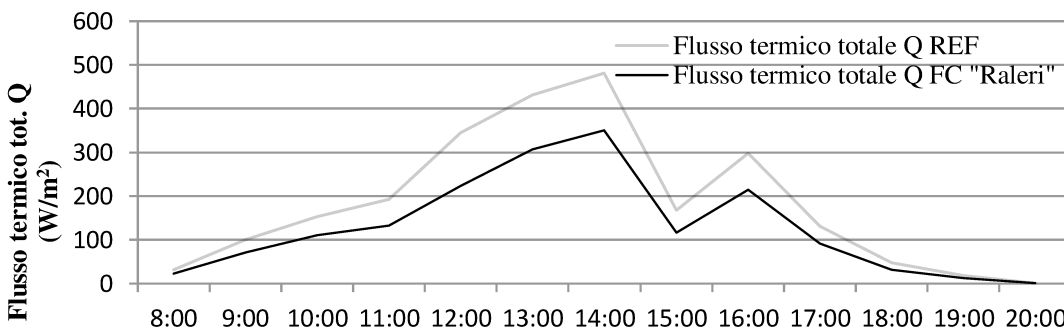


Fig. 53 Cap. 8 - Flusso termico totale  $Q$  tot.

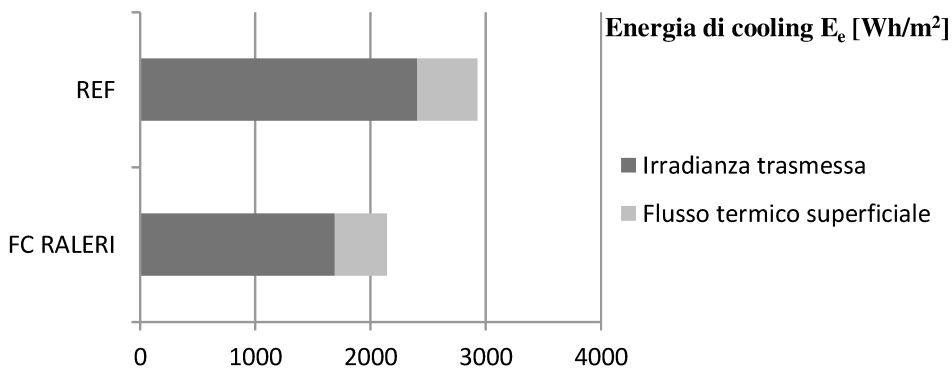


Fig. 54 Cap. 8 - Energia di cooling  $E_c$  - Modulo REF e modulo FC "Raleri"

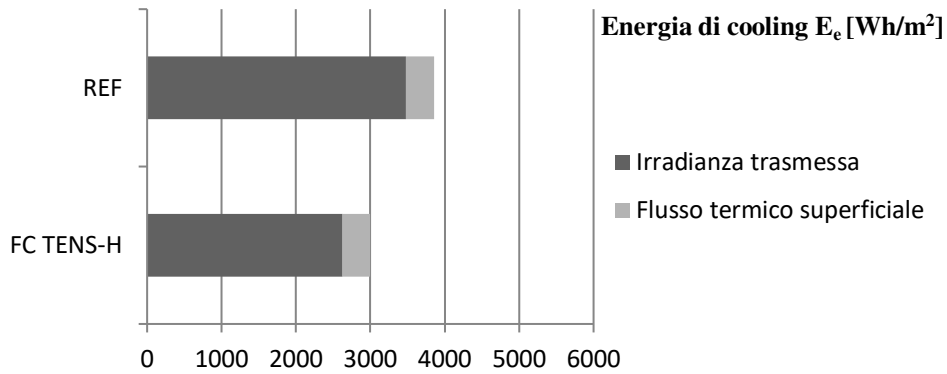


Fig. 55 Cap. 8 - Energia di cooling  $E_c$  - Modulo REF e modulo FC "Tens-H"

Come previsto, i grafici relativi all'energia di cooling, mostrano che i prototipi fotocromatici richiedono un'energia di raffreddamento inferiore rispetto al modulo preso a campione. I risparmi energetici si ottengono prevalentemente grazie alle irradianze trasmesse inferiori; il prototipo **FC "Raleri"** trasmette circa **1700 W/m<sup>2</sup>** rispetto

ai **2400 W/m<sup>2</sup>** del modulo **REF** e il prototipo **FC "Tens-H"** trasmette circa **2600 W/m<sup>2</sup>** confronto ai **3400 W/m<sup>2</sup>** del campione **REF**. Anche per la parte di energia di raffreddamento, relativa al flusso termico superficiale, i prototipi sperimentali risultano più vantaggiosi seppur la differenza con il modulo di riferimento è inferiore.



## 8.11 Conclusioni sulle caratteristiche energetiche

La campagna sperimentale ha convalidato le considerazioni teoriche, in condizioni di esercizio reale. La validità dei vetro-camera sperimentali con rivestimenti fotocromatici polimerici, è stata confermata attraverso il confronto con le proprietà energetiche e ottiche di un vetro-camera basso-emissivo standard. Per la caratterizzazione dei prototipi sono stati determinati i parametri chiave che identificano le chiusure trasparenti: il fattore di trasmissione diretta dell'energia solare  $\tau_e$  e il fattore solare  $g$  per quanto concerne le prestazioni energetiche e il parametro  $\tau_e$  per ciò che riguarda le caratteristiche ottiche. Oltre ai suddetti parametri sono stati definiti altri parametri identificativi e commerciali i quali hanno ulteriormente confermato la validità dei moduli fotocromatici. Le prove sono state condotte in un periodo temperato, dove si sono alternate giornate di sereno e giornate di tempo variabile. Per tutta la fase di test, le celle sono state orientate verso sud per captare la maggior intensità delle radiazioni solari. Alcune misurazioni, sono state fatte tenendo i moduli vetrati in posizione verticale ed altre inclinando le celle sino a formare un angolo di incidenza nullo con il flusso solare. I risultati delle prove hanno mostrato che entrambi i moduli sperimentali fotocromatici trasmettono meno energia termica del modulo di riferimento, sia in termini di energia totale che attraversa il modulo vetrato, sia in termini

di flusso termico superficiale e sia in termini di radiazione direttamente trasmessa. La determinazione dei parametri è stata condotta secondo le disposizioni della Norma **UNI EN 410** per ciò che riguarda la determinazione del fattore solare  $g$ ,  $\tau_v$ ,  $\tau_e$ . La trasmittanza termica  $U_g$  è stata valutata con il metodo descritto dalla Norma **UNI EN 673**. Al fine di ottenere misurazioni più precise e realistiche sono stati fatti un gran numero di rilievi. Per confermare la validità dei test sono stati confrontati i valori tecnici teorici EN 410, del modulo campione, con i valori sperimentali misurati. La stima del fattore di trasmissione solare  $\tau_e$  ha evidenziato i notevoli vantaggi dei prototipi sperimentali, rispetto al vetro di riferimento. Vantaggi confermati dalle stime del fattore solare  $g$ . I vetri sperimentali hanno mostrato un controllo superiore degli apporti termici estivi, rispetto ad altre soluzioni attualmente disponibili sul mercato. La riduzione delle temperature dell'aria interna, prossima ai 10 °C, è il valore più significativo del guadagno in termini di comfort ambientale, offerto dai prototipi fotocromatici; specie se si pensa che una variazione anche minima della temperatura ambientale, può generare una sensazione di discomfort all'essere umano.. Il cambiamento di trasparenza consente ai moduli fotocromatici di adattarsi dinamicamente agli stimoli ambientali esterni, sicché anche lo

scambio termico invernale risulta vantaggioso in quanto riescono a contenere le dispersioni termiche più dei comuni sistemi commerciali. I moduli rimangono trasparenti alle basse radiazioni incidenti, garantendo il guadagno solare e si oscurano gradualmente con l'aumentare della radiazione solare, limitando la trasmissione di calore nei momenti più caldi. Dallo studio di durabilità è emerso che il modulo FC "Raleri" con lastra fotocromatica esterna, direttamente esposta alla radiazione incidente, è più reattivo del modulo FC "Tens-H" ma subisce un decadimento prestazionale già dopo alcuni giorni. Il prototipo "Tens-H", con il rivestimento cromo-genico inserito a posto dell'intercalare, sul vetro stratificato esterno, seppur meno reattivo, non ha mostrato decadimento prestazionale. In termini impiantistici, il modulo FC "Raleri" e il modulo FC "Tens-H", hanno presentato rispettivamente, una riduzione di un terzo e di un quarto del carico energetico necessario per la climatizzazione ambientale, rispetto al vetro basso-emissivo di riferimento. Non

vanno dimenticati altri aspetti positivi dei prototipi, quali: la facilità costruttiva, la reperibilità, la reversibilità, la possibilità di riciclaggio e la minima manutenzione richiesta. Lo studio di cui si è trattato vuole essere una base di lavoro per lo sviluppo di finestre dinamiche innovative a comportamento passivo. I trattamenti fotocromatici potrebbero essere ottimizzati nella loro composizione chimica al fine di garantire capacità di reazione molto prolungata e performante. Visto che uno spessore minimo di questi materiali garantisce riduzioni importanti dei carichi energetici trasmessi, si suggeriscono ulteriori approfondimenti su pannelli con rivestimenti fotocromatici più spessi. Inoltre tali prodotti potrebbero trovare altre applicazioni o essere integrati con altre tecnologie innovative. Infine, lo sviluppo e l'industrializzazione di tali moduli porterebbe ad una riduzione dei costi di produzione che li renderebbero economicamente competitivi con gli attuali sistemi trasparenti commerciali.

## 9. PROGETTO IMPRENDITORIALE (BUSINESS PLAN)

L'idea di business è la formazione di una nuova attività imprenditoriale basata sulla ricerca, sviluppo e commercializzazione di sistemi trasparenti dinamici, "DPS" (dynamic photochromic system), per il miglioramento delle condizioni di comfort abitativo e per la riqualificazione energetica degli edifici, nell'ottica della sostenibilità ambientale e dell'economia circolare. Si tratta di moduli a trasparenza variabile, capaci di gestire dinamicamente gli apporti termici esterni garantendo una adeguata introspezione di luce naturale. I sistemi vetrati DPS, composti da materiali totalmente riciclabili, garantiscono la riqualificazione del parco edilizio, in modo semplice, veloce e alla portata delle fasce meno abbienti, specie in un contesto come quello nazionale ove risultano installati circa 300 milioni di metri quadri di superfici vetrate, responsabili del 32% dei consumi energetici nazionali e del 25% delle emissioni di CO<sub>2</sub> (stime ENEA). L'investimento, può essere ammortizzato attraverso la riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio, nel giro di un paio d'anni. I DPS sono frutto dello studio della trasmissione spettrale di diversi materiali trasparenti. Sono composti dall'assemblaggio di vetri minerali basso emissivi capaci di schermare le radiazioni infrarosse con elementi polimerici che si attivano nel campo

dell'ultravioletto e del visibile, gradualmente e in funzione dell'intensità della radiazione termica raggiungendo il massimo oscuramento nelle ore di massima intensità solare e tornando trasparenti nelle ore meno irradiate. I polimeri fotosensibili sono compatibili con le attuali tecnologie produttive dei vetri stratificati. Oltre al campo d'azione, è determinante la posizione dei materiali fotosensibili nei wafer trasparenti. I vetrocamera DPS, sono costituiti da un vetro stratificato esterno ove l'intercalare in PVB (polivinilbutarrile) è sostituito dai materiali fotocromatici termoplastici e da un vetro stratificato interno con trattamento superficiale basso-emissivo nella faccia rivolta verso l'intercapedine, riempita di aria secca o gas Argon al 90%. Le caratteristiche luminose ed energetiche e la durabilità dei sistemi DPS sono state rilevate, secondo le Norme UNI EN 673 e UNI EN 410, nell'ambito del dottorato di ricerca svolto c/o l'Università Politecnica delle Marche. L'Azienda, di natura commerciale e di ricerca e sviluppo, si colloca nel settore delle vetrate per l'edilizia residenziale, commerciale e industriale. L'ambizione del progetto è la ricerca continua e lo sviluppo di vetri dinamici innovativi con investimenti concorrenziali.

## 9.1 Il mercato ed il contesto competitivo

La realtà in cui si andrà ad operare ha una grandissima rete di potenziali clienti. Il prodotto del business rientra tra le vetrate altamente prestazionali. facendo un paragone con altri prodotti commerciali, i moduli DPS offrono prestazioni superiori ai più diffusi standard basso-emissivi presenti sul mercato. Allo stato attivo i prototipi riescono a garantire performance assimilabili a quelle di alcuni componenti opachi o traslucidi come i "VIP", gli "Aerogel" o i "TIM"; seppur ad un prezzo di vendita dimezzato. Il prodotto è di interesse di più categorie. I clienti finali, come anticipato, sono persone comuni che vogliono riqualificare in modo conveniente e semplice la propria casa, riducendo i consumi energetici e aumentando il comfort abitativo. Oltre loro, tutto il mondo dell'edilizia, dalle vetrerie ai serramentisti. E' infatti vero che abbinando un telaio a taglio termico con un vetro dinamico schermante, è possibile ottenere serramenti ad altissime prestazioni energetiche. Il prodotto è inoltre rivolto a tutti i professionisti del mondo delle costruzioni, dagli ingegneri, agli architetti, ai geometri, ai

periti ecc. Sulla scorta di precedenti esperienze lavorative nel settore dei vetri per edilizia e dei serramenti, sia come dipendente che come imprenditore, nonché sentiti diversi produttori del settore, alcuni dei quali scelti come eventuali "partner" nell'attività di impresa, è stato ipotizzato un volume di richiesta del prodotto che va da 1000 m<sup>2</sup> del primo anno di attività ai 4000 mq al terzo anno. E' noto che nel primo trimestre dell'anno, i volumi siano ridotti, rispetto al terzo e quarto trimestri ove notoriamente il mercato è più virtuoso. Negli ultimi anni i prodotti più venduti sono stati i vetrocamera bassoemissivi. Dei moduli di questo tipo sono stati presi per la comparazione nei test con i prototipi sperimentali. L'obiettivo dell'azienda è sviluppare, attraverso la ricerca continua, nuovi sistemi trasparenti composti da materiali dinamici di matrice polimerica, integrati con materiali di altra natura. Vi sono molte categorie di tecnopolimeri interessanti sia dal punto di vista ottico che energetico, alcune delle quali già in fase di studio.

## 9.2 Il prodotto, il processo o l'invenzione: l'offerta di valore

L'idea d'impresa è di sviluppare , non semplici prodotti ma "sistemi" di chiusure per involucri edilizi trasparenti. Tali sistemi, denominati DPS sono moduli dinamici in grado di gestire gli input climatici esterni variando le proprie caratteristiche funzionali. I prototipi DPS sono stati realizzati e testati nell'ambito del dottorato di ricerca condotto dall'aspirante Mauro Reali e dal Tutor prof. Paolo Principi, per essere sottoposti ad una serie di test outdoor i quali hanno permesso di valutarne le caratteristiche ottiche ed energetiche. Sono stati valutati i vantaggi ottenuti in termini di comfort termico offerto rispetto ad un comune modulo standard basso-emissivo. Per la produzione dei moduli non sono richieste nuove tecnologie. Un classico impianto di laminazione permette di ottenere le lastre

stratificate fotodinamiche esterne che verranno poi assemblate in vetrocamera con gli stratificati basso-emissivi mediante una comune sigillatrice automatica. L'offerta di valore dei DPS ha tenuto conto dei livelli prestazionali e dei prezzi di mercato dei prodotti commerciali simili. Rispetto ad un comune vetrocamera bassoemissivo (Low-e), considerato uno dei prodotti più performanti e diffusi del mercato, che ha un costo al metro quadro che varia tra i 75 e i 120 €, i moduli DPS residenziali avranno un costo al metro quadro di 115 € e i moduli DPS commerciali di 125 €. Le caratteristiche prestazionali dei sistemi DPS si avvicinano alle performance di vetri altamente tecnologici che hanno costi superiori ai 350 € al metro quadro.

### 9.3 Il piano di marketing

La strategia di marketing sarà fondata su 4 canali strategici. Un canale di divulgazione rappresentato dalle pubblicazioni su riviste scientifiche e magazine, un canale legato alle comunicazioni informatiche, uno filone destinato alla pubblicità classica e uno legato ai seminari e ai convegni che vengono organizzati nell'ambito della formazione specifica prevista dagli ordini professionali per il conseguimento dei crediti formativi obbligatori. Nello schema sottostante vengono riassunte le forme di marketing previste.



Fig. 1 Cap. 9 - Piano di marketing

La determinazione del prezzo grezzo dei moduli DPS è stata fatta in base ai costi industriali diretti delle materie prime e delle lavorazioni, in funzione dei costi di distribuzione ed in relazione al confronto con i prezzi dei prodotti commerciali simili. Per ciò che attiene i costi industriali diretti sono stati distinti due prodotti principali, uno per il settore residenziale (DPS residenziale) e uno per il settore commerciale (DPS commerciale). Di seguito si riporta una tabella riassuntiva di tali costi per ogni trimestre di pianificazione:

Modulo D.P.S. Residenziale	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
Materie prime, semilavorati, componenti	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Prodotti complementari												
Lavorazioni esterne	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Altri consumi e costi diretti												
Altre prestazioni esterne												
<b>Costo unitario industriale diretto</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>	<b>70,00</b>

Modulo D.P.S. Commerciale	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
Materie prime, semilavorati, componenti	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Prodotti complementari												
Lavorazioni esterne	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
Altri consumi e costi diretti												
Altre prestazioni esterne												
<b>Costo unitario industriale diretto</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>	<b>77,00</b>

Fig. 2 Cap. 9 - Costi grezzi di produzione trimestrali, sviluppati su 3 anni

Ai valori unitari diretti vanno poi aggiunti i costi di distribuzione che assommano al 7%. Nello specifico, il 5% riguarda le provvigioni di vendita e il 2% riguarda i costi di spedizione. Fatte salve eventuali differenze di margine rispetto al conto economico, dovute alle variazioni delle scorte di prodotti finiti, i margini di contribuzione, divisi per prodotto, sono riassunti nella tabella seguente:

Modulo D.P.S. Residenziale	Anno 1				Anno 2				Anno 3			
	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot
Prezzo di vendita	115	115	115	110.400	115	115	115	193.200	115	115	115	276.000
Costi industriali diretti	70	70	70	67.200	70	70	70	117.600	70	70	70	168.000
<b>Valore aggiunto industriale</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>43.200</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>75.600</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>108.000</b>
Provvigioni	6	6	6	5.520	6	6	6	9.660	6	6	6	13.800
Spese di trasporto	2	2	2	2.208	2	2	2	3.864	2	2	2	5.520
<b>Margine di contribuzione</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>35.472</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>62.076</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>88.680</b>
<b>Tasso di contribuzione</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>	<b>32,13%</b>
<b>Margine di contribuzione totale</b>	<b>35.472</b>	<b>0</b>	<b>35.472</b>	<b>62.076</b>	<b>0</b>	<b>62.076</b>	<b>88.680</b>	<b>0</b>	<b>88.680</b>	<b>0</b>	<b>88.680</b>	<b>88.680</b>

Fig. 3 Cap. 9 - Costi di produzione e margini di contribuzione trimestrali, sviluppati su 3 anni (modulo residenziale)

Modulo D.P.S. Commerciale	Anno 1				Anno 2				Anno 3			
	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot
Prezzo di vendita	125	125	125	50.000	125	125	125	150.000	125	125	125	200.000
Costi industriali diretti	77	77	77	30.800	77	77	77	92.400	77	77	77	123.200
<b>Valore aggiunto industriale</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>19.200</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>57.600</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>76.800</b>
Provvigioni	6	6	6	2.500	6	6	6	7.500	6	6	6	10.000
Spese di trasporto	3	3	3	1.000	3	3	3	3.000	3	3	3	4.000
<b>Margine di contribuzione</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>15.700</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>47.100</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>62.800</b>
<b>Tasso di contribuzione</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>	<b>31,40%</b>
<b>Margine di contribuzione totale</b>	<b>15.700</b>	<b>0</b>	<b>15.700</b>	<b>47.100</b>	<b>0</b>	<b>47.100</b>	<b>62.800</b>	<b>0</b>	<b>62.800</b>	<b>0</b>	<b>62.800</b>	<b>62.800</b>

Fig. 4 Cap. 9 - Costi di produzione e margini di contribuzione trimestrali, sviluppati su 3 anni (modulo commerciale)

## 9.4 . Il piano operativo

La struttura operativa necessita di un'area sperimentale con 2 camere climatiche di prova ove verranno effettuati i test. Occorrono inizialmente 5 unità operative HW e SW, e i seguenti strumenti di rilievo: 4 sonde termiche ambientali, 4 sensori di temperatura superficiale, 2 termo-flussimetri, 3 radiometri globali e 2 datalogger di raffinazione dati. La struttura deve essere corredata da uno spazio espositivo e un'area interna di stoccaggio per le scorte. L'idea di business prevede di costituire un magazzino estremamente limitato nell'ottica dell'esercizio "Just in time". L'area di ricerca e sviluppo e l'area gestionale dell'impresa saranno interne all'organigramma aziendale mentre tutta la parte produttiva e l'area vendite sarà affidata a partner terzi e agenti plurimandatari.

L'approvvigionamento delle materia prima sarà così organizzato: le lastre di polimero fotosensibile saranno fornite da una ditta del settore "automotive" che provvederà anche alla loro consegna presso gli impianti di laminazione. La stratificazione dei vetri e l'assemblaggio dei moduli, ci si avverrà in vetrerie specializzate. La capacità produttiva dell'azienda è stimata per il primo anno di esercizio in 1360 m<sup>2</sup>, per il secondo anno in 2880 m<sup>2</sup>, e per il terzo anno in 4000 m<sup>2</sup>. Tutti i test, i rilievi, le sperimentazioni e i collaudi saranno a cura dell'area ricerca e sviluppo dell'impresa. Per i moduli DPS sarà avviata istanza di deposito di brevetto, secondo la normativa vigente c/o l'ufficio brevetti di Ancona, subito dopo la dissertazione finale.



## 9.5 Il piano economico e finanziario

### 9.5.1. Il piano economico-finanziario

Considerato che tutta la produzione dei moduli è delegata a terzi, e gli stessi sono prodotti con le tecnologie esistenti, non sono richiesti grossi investimenti in beni strumentali. Di seguito è riportata una tabella dettagliata degli investimenti.

Investimenti materiali	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
Fabbricati e terreni												
Macchinari, impianti, attrezzature produttive	5.344				2.000				2.000			
Hardware e apparati di comunicazione	2.500								1.000			
Mobili e arredi	2.000											
Automezzi	20.000											
<b>Totale investimenti materiali</b>	<b>29.844</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Investimenti immateriali	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
Spese di costituzione	2.000											
Brevetti, marchi, disegni	1.500				1.500				1.500			
Software	500								500			
Progettazione organizzativa	1.000											
Piano di comunicazione e marketing	2.000											
Design, progettazione, ricerca												
<b>Totale investimenti immateriali</b>	<b>7.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.500</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Totale investimenti</b>	<b>36.844</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3.500</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fig. 5 Cap. 9 - Piano degli investimenti trimestrali, sviluppati su 3 anni

### 9.5.2 Prospetto di determinazione del margine di contribuzione

Tenuto conto dei prezzi dei prodotti concorrenti e della convenienza del cliente finale ad installare i moduli sperimentali, è stato definito prezzo finale del prodotto totale che il margine di contribuzione a regime, permettesse la copertura dei costi di struttura, e la remunerazione del capitale sociale.

Totale	Anno 1				Anno 2				Anno 3			
	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot	Merc. Int.	Export	Media P.	Tot
Fatturato	160.400	0	160.400	160.400	343.200	0	343.200	343.200	476.000	0	476.000	476.000
Costi industriali diretti	98.000	0	98.000	98.000	210.000	0	210.000	210.000	291.200	0	291.200	291.200
<b>Valore aggiunto industriale</b>	<b>62.400</b>	<b>0</b>	<b>62.400</b>	<b>62.400</b>	<b>133.200</b>	<b>0</b>	<b>133.200</b>	<b>133.200</b>	<b>184.800</b>	<b>0</b>	<b>184.800</b>	<b>184.800</b>
Provvigioni	8.020	0	8.020	8.020	17.160	0	17.160	17.160	23.800	0	23.800	23.800
Spese di trasporto	3.208	0	3.087	3.208	6.864	0	6.774	6.864	9.520	0	9.456	9.520
<b>Margine di contribuzione</b>	<b>51.172</b>	<b>0</b>	<b>51.293</b>	<b>51.172</b>	<b>109.176</b>	<b>0</b>	<b>109.266</b>	<b>109.176</b>	<b>151.480</b>	<b>0</b>	<b>151.544</b>	<b>151.480</b>
<b>Tasso di contribuzione</b>	<b>31,90%</b>	<b>31,75%</b>	<b>31,98%</b>	<b>31,90%</b>	<b>31,81%</b>	<b>31,75%</b>	<b>31,84%</b>	<b>31,81%</b>	<b>31,82%</b>	<b>31,75%</b>	<b>31,84%</b>	<b>31,82%</b>

Fig. 6 Cap. 9 - Margini e tassi di contribuzione trimestrali, sviluppati su 3 anni

Di seguito si riporta la tabella relativa al computo del conto economico previsionale riferita ad un periodo di 3 anni.

Conto economico	Anno1	%	Anno2	%	Anno3	%
<b>Ricavi</b>	<b>160.400</b>	<b>96,24%</b>	<b>343.200</b>	<b>98,69%</b>	<b>476.000</b>	<b>99,33%</b>
Variazione scorte PF	6.272	3,76%	4.557	1,31%	3.213	0,67%
<b>Valore della Produzione</b>	<b>166.672</b>	<b>100,00%</b>	<b>347.757</b>	<b>100,00%</b>	<b>479.213</b>	<b>100,00%</b>
Rimanenze iniziali MP e prodotti complementari		0,00%	7.028	2,02%	12.042	2,51%
Acquisti MP e prodotti complementari	64.908	38,94%	122.654	35,27%	165.320	34,50%
Rimanenze finali MP e prodotti complementari	7.028	4,22%	12.042	3,46%	15.562	3,25%
<b>Costo MP e prodotti complementari</b>	<b>57.880</b>	<b>34,73%</b>	<b>117.640</b>	<b>33,83%</b>	<b>161.800</b>	<b>33,76%</b>
Lavorazioni esterne	46.392	27,83%	96.917	27,87%	132.613	27,67%
Altri consumi e costi diretti	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Altre prestazioni esterne	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
<b>Totale costi industriali variabili</b>	<b>104.272</b>	<b>62,56%</b>	<b>214.557</b>	<b>61,70%</b>	<b>294.413</b>	<b>61,44%</b>
<b>Valore Aggiunto industriale</b>	<b>62.400</b>	<b>37,44%</b>	<b>133.200</b>	<b>38,30%</b>	<b>184.800</b>	<b>38,56%</b>
Provvigioni	8.020	4,81%	17.160	4,93%	23.800	4,97%
Trasporti	3.208	1,92%	6.864	1,97%	9.520	1,99%
<b>Costi commerciali variabili</b>	<b>11.228</b>	<b>6,74%</b>	<b>24.024</b>	<b>6,91%</b>	<b>33.320</b>	<b>6,95%</b>
<b>Margine di contribuzione</b>	<b>51.172</b>	<b>30,70%</b>	<b>109.176</b>	<b>31,39%</b>	<b>151.480</b>	<b>31,61%</b>
Costi di gestione area tecnico produttiva	16.000	9,60%	17.200	4,95%	22.000	4,59%
Costi di gestione area amministrativa	6.560	3,94%	6.680	1,92%	6.800	1,42%
Costidi gestione area marketing	14.300	8,58%	12.000	3,45%	13.200	2,75%
Costo del Personale	46.000	27,60%	66.750	19,19%	90.000	18,78%
<b>Totale costi di gestione</b>	<b>82.860</b>	<b>49,71%</b>	<b>102.630</b>	<b>29,51%</b>	<b>132.000</b>	<b>27,55%</b>
<b>EBITDA (MOL)</b>	<b>-31.688</b>	<b>-19,01%</b>	<b>6.546</b>	<b>1,88%</b>	<b>19.480</b>	<b>4,06%</b>
Ammortamenti materiali	2.909	1,75%	6.019	1,73%	6.519	1,36%
Ammortamenti immateriali	1.400	0,84%	1.700	0,49%	2.100	0,44%
<b>EBIT</b>	<b>-35.997</b>	<b>-21,60%</b>	<b>-1.173</b>	<b>-0,34%</b>	<b>10.861</b>	<b>2,27%</b>
Interessi passivi su finanziamenti a b/t	-525	-0,31%	-600	-0,17%	-600	-0,13%
Interessi passivi su anticipi s.b.f.	-201	-0,12%	-1.030	-0,30%	-1.785	-0,37%
Interessi passivi su mutui	-3.353	-2,01%	-2.679	-0,77%	-1.978	-0,41%
<b>Saldo finanziario</b>	<b>-4.079</b>	<b>-2,45%</b>	<b>-4.309</b>	<b>-1,24%</b>	<b>-4.363</b>	<b>-0,91%</b>
<b>Reddito ante imposte</b>	<b>-40.076</b>	<b>-24,04%</b>	<b>-5.482</b>	<b>-1,58%</b>	<b>6.498</b>	<b>1,36%</b>

Fig. 7 Cap. 9 - Conto economico previsionale, sviluppato su 3 anni

A seguire viene mostrato un computo previsionale dello stato patrimoniale.

Attività	Anno1	%	Anno2	%	Anno3	%
Cassa e banche	2.426	2,34%	10.538	7,13%	20.929	11,19%
<b>Liquidità immediata</b>	<b>2.426</b>	<b>2,34%</b>	<b>10.538</b>	<b>7,13%</b>	<b>20.929</b>	<b>11,19%</b>
Crediti verso clienti Mercato Interno	49.167	47,51%	85.990	58,21%	111.779	59,77%
Crediti verso clienti Export	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Iva a credito	6.064	5,86%	0	0,00%	0	0,00%
<b>Liquidità differita</b>	<b>55.231</b>	<b>53,37%</b>	<b>85.990</b>	<b>58,21%</b>	<b>111.779</b>	<b>59,77%</b>
<b>Rimanenze finali di MP e PF</b>	<b>13.300</b>	<b>12,85%</b>	<b>22.871</b>	<b>15,48%</b>	<b>29.604</b>	<b>15,83%</b>
<b>Attivo corrente</b>	<b>70.957</b>	<b>68,56%</b>	<b>119.399</b>	<b>80,83%</b>	<b>162.312</b>	<b>86,79%</b>
Immobilizzazioni tecniche lorde	29.844	28,84%	31.844	21,56%	34.844	18,63%
- Fondi ammortamento	-2.909	-2,81%	-8.928	-6,04%	-15.447	-8,26%
<b>Immobilizzazioni tecniche nette</b>	<b>26.935</b>	<b>26,03%</b>	<b>22.916</b>	<b>15,51%</b>	<b>19.397</b>	<b>10,37%</b>
<b>Immobilizzazioni immateriali nette</b>	<b>5.600</b>	<b>5,41%</b>	<b>5.400</b>	<b>3,66%</b>	<b>5.300</b>	<b>2,83%</b>
<b>Attivo fisso netto</b>	<b>32.535</b>	<b>31,44%</b>	<b>28.316</b>	<b>19,17%</b>	<b>24.697</b>	<b>13,21%</b>
<b>Totale attività nette</b>	<b>103.491</b>	<b>100,00%</b>	<b>147.715</b>	<b>100,00%</b>	<b>187.009</b>	<b>100,00%</b>

Passività	Anno1	%	Anno2	%	Anno3	%
Finanziamenti bancari a breve	10.000	9,66%	10.000	6,77%	10.000	5,35%
Banche c/anticipi crediti	12.292	11,88%	51.594	34,93%	83.835	44,83%
Fornitori di MP e LE	31.199	30,15%	54.320	36,77%	69.742	37,29%
Debiti v/agenti trasportatori	3.442	3,33%	6.019	4,07%	7.825	4,18%
Debiti v/ fornitori vari	3.331	3,22%	3.580	2,42%	4.202	2,25%
Iva a debito	0	0,00%	1.726	1,17%	2.404	1,29%
<b>Passivo corrente</b>	<b>60.264</b>	<b>58,23%</b>	<b>127.240</b>	<b>86,14%</b>	<b>178.007</b>	<b>95,19%</b>
Finanziamenti a m/l termine	73.404	70,93%	56.133	38,00%	38.162	20,41%
<b>Passivo consolidato</b>	<b>73.404</b>	<b>70,93%</b>	<b>56.133</b>	<b>38,00%</b>	<b>38.162</b>	<b>20,41%</b>
Capitale sociale	9.900	9,57%	9.900	6,70%	9.900	5,29%
Finanziamenti Soci in c/capitale	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Utile d'esercizio	-40.076	-38,72%	-5.482	-3,71%	6.498	3,47%
Fondi di riserva		0,00%	-40.076	-27,13%	-45.558	-24,36%
<b>Capitale netto</b>	<b>-30.176</b>	<b>-29,16%</b>	<b>-35.658</b>	<b>-24,14%</b>	<b>-29.159</b>	<b>-15,59%</b>
<b>Passivo + Netto</b>	<b>103.491</b>	<b>100,00%</b>	<b>147.715</b>	<b>100,00%</b>	<b>187.009</b>	<b>100,00%</b>

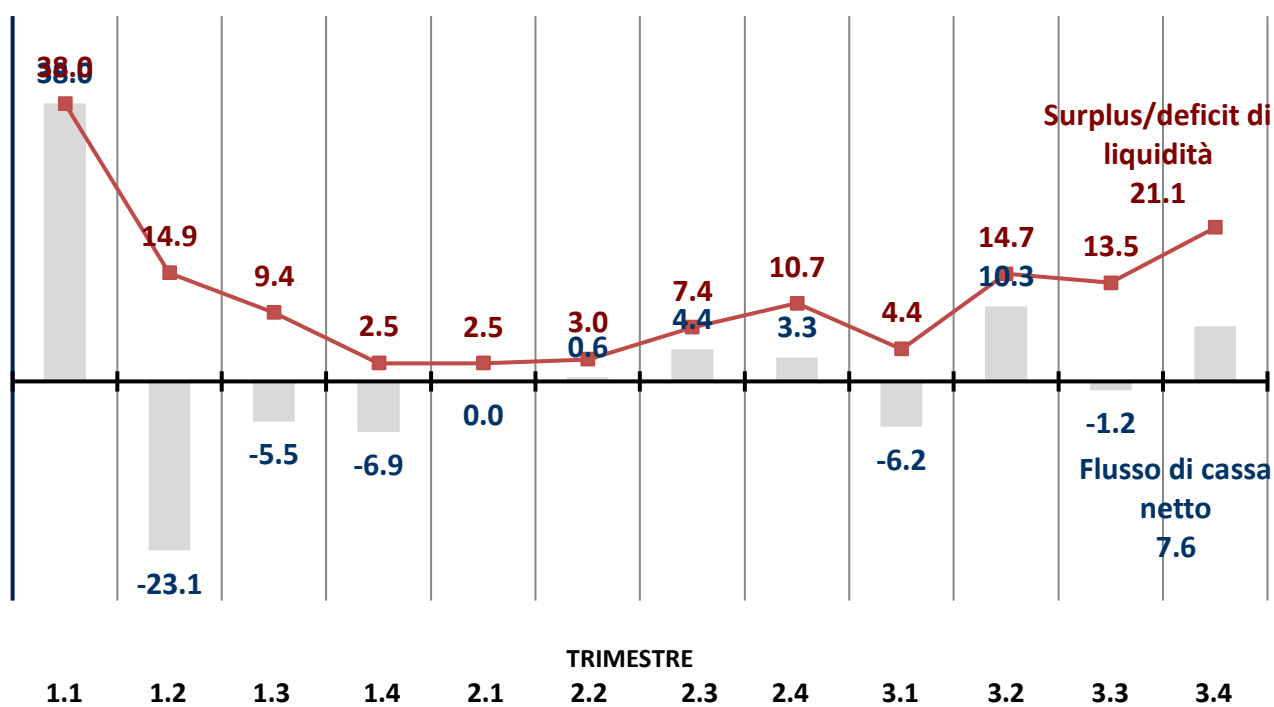
Fig. 8 Cap. 9 - Stato patrimoniale previsionale, sviluppato su 3 anni

L'ultima tabella riporta i flussi di cassa previsionali e il surplus di liquidità al termine del terzo anno di pianificazione.

Cash flow	Anno1	Anno2	Anno3
Reddito operativo	-35.997	-1.173	10.861
Ammortamenti	4.309	7.719	8.619
<b>Autofinanziamento economico</b>	<b>-31.688</b>	<b>6.546</b>	<b>19.480</b>
Variazione crediti Mercato Interno	-49.167	-36.824	-25.789
Variazione crediti Export	-0	0	0
Variazione Iva a credito	-6.064	6.064	0
Variazione scorte	-13.300	-9.571	-6.733
Variazione debiti v/fornitori MP e LE	31.199	23.121	15.421
Variazione debiti v/agenti trasportatori	3.442	2.578	1.805
Variazione debiti v/ fornitori vari	3.331	249	622
Variazione iva a debito	0	1.726	678
Variazione debiti v/ personale	0	0	0
<b>Variazione capitale circolante netto</b>	<b>-30.559</b>	<b>-12.657</b>	<b>-13.995</b>
<b>Flusso della gestione operativa</b>	<b>-62.247</b>	<b>-6.111</b>	<b>5.485</b>
Investimenti immobilizzazioni tecniche	-29.844	-2.000	-3.000
Investimenti immobilizzazioni immateriali	-7.000	-1.500	-2.000
<b>Investimenti</b>	<b>-36.844</b>	<b>-3.500</b>	<b>-5.000</b>
<b>Saldo operativo</b>	<b>-99.091</b>	<b>-9.611</b>	<b>485</b>
Finanziamenti bancari a breve	10.000	0	0
Smobilizzo crediti s.b.f.	12.292	39.303	32.240
Finanziamenti a m/l termine	73.404	-17.270	-17.972
Oneri finanziari	-4.079	-4.309	-4.363
<b>Saldo finanziario</b>	<b>91.617</b>	<b>17.724</b>	<b>9.906</b>
<b>Flusso disponibile</b>	<b>-7.474</b>	<b>8.112</b>	<b>10.391</b>
Apporti/rimborsi capitale sociale	9.900	0	0
<b>Flusso di cassa netto</b>	<b>2.426</b>	<b>8.112</b>	<b>10.391</b>
<b>Surplus/deficit di liquidità</b>	<b>2.426</b>	<b>10.538</b>	<b>20.929</b>

Fig. 9 Cap. 9 - Flussi di cassa previsionali, sviluppato su 3 anni

Di seguito si riporta il grafico dei flussi di cassa previsionali riferiti ai 12 trimestri di pianificazione, espressi in migliaia di euro.



## CAP. 10 – CONCLUSIONI

La vocazione della ricerca è quella di concentrare l'attenzione sull'importanza del ruolo svolto dall'involucro edilizio trasparente in un'epoca ove il tema della conservazione dell'ambiente e della gestione consapevole delle sue risorse, è un "obbligo" morale dei progettisti. Lo studio suggerisce soluzioni progettuali innovative in osmosi con il rispetto dell'ambientale, il risparmio energetico e il comfort abitativo che riducano l'impronta ecologica del comparto edilizio, responsabile del 32% dei consumi energetici nazionali e del 25% delle emissioni di CO<sub>2</sub>. L'arduo compito delle chiusure trasparenti, vero e proprio tallone d'Achille degli involucri edilizi, è garantire un'adeguata illuminazione naturale e contemporaneamente gestire gli apporti termici esterni. Aspetti spesso contrastanti e inflessibili che trovano soluzione solo in un involucro trasparente dinamico, in grado di adeguarsi e gestire gli stimoli ambientali esterni variando le proprie prestazioni, in funzione degli stimoli stessi. Dopo una attenta analisi delle soluzioni innovative, proposte in tema di superfici trasparenti, l'attenzione è stata rivolta ai materiali a comportamento dinamico passivo. Nella fattispecie sono stati scelti i materiali fotocromatici termoplastici in grado di variare le proprie caratteristiche luminose ed energetiche in funzione degli stimoli esterni e garantire un effetto di oscuramento uniforme e graduale anche su

lastre di grandi dimensioni. Anche se si trattava di materiali a matrice minerale, l'uso di materiali cromogenici per la realizzazione di sistemi vetrati dinamici è già stato oggetto di studio dei ricercatori del "Lawrence Berkeley National Laboratory" che, nell'ambito di un progetto condotto per la "View Dynamic Glass" hanno installato dei prototipi fotocromatici minerali su alcuni importanti edifici americani. Il progetto è stato sospeso perché non è risultato competitivo a causa degli elevati costi di produzione a fronte di scarse prestazioni riscontrate in fase di esercizio. Ci sono stati problemi tecnici per la realizzazione di lastre di grandi dimensioni e la reazione fotocromatica superficiale non è apparsa omogenea. Viste le difficoltà tecniche ed economiche riscontrate, i ricercatori hanno rivolto l'attenzione sui vetri cromogenici di tipo attivo. Sulla base di questo studio, è nata l'idea di riproporre l'uso dei materiali fotocromatici passivi spostando però l'attenzione sui materiali cromogenici organici, dominio del settore ottico e automobilistico. Le prime considerazioni teoriche hanno evidenziato la possibilità di creare sistemi vetrati dinamici assemblando elementi minerali con trattamenti basso-emissivi in grado di riflettere le radiazioni nell'intervallo di lunghezze d'onda dello spettro infrarosso con polimeri fotosensibili capaci di schermare le radiazioni elettromagnetiche dal campo

dell'ultravioletto allo spettro del visibile. L'ideazione dei prototipi si è sviluppata dopo una attenta valutazione delle caratteristiche dei polimeri fotosensibili scelti per l'assemblaggio dei moduli sperimentali. Si tratta di materiali leggeri e auto-attivanti, che non necessitano impulsi di attivazione esterni e sono facilmente reperibili sul mercato sia in forma di lastre che di film. Questi polimeri hanno una elevata versatilità e possono essere applicati anche su superfici esistenti sia piane che ricurve; inoltre permettono una variazione graduale e reversibile delle proprie caratteristiche prestazionali, offrendo un oscuramento uniforme anche su lastre di grandi dimensioni. Di per se, i polimeri sono infrangibili e possono ampliare le caratteristiche di sicurezza passiva già possedute dai vetri stratificati a bassa emissività ai quali andrebbero assemblati. Altro aspetto positivo è legato alla natura termoplastica che li rende riciclabili come materia prima secondaria nella trafilatura produttiva. Alle valutazioni teoriche è seguita la fase di realizzazione dei prototipi. Come campione di riferimento è stato assemblato un vetro-camera della ditta "AGC", composto da due lastre stratificate con intercalare in PVB, di cui una con rivestimento basso-emissivo rivolto verso l'intercapedine di 12mm riempita al 90% con gas Argon e due campioni sperimentali della stessa stratificazione, con l'aggiunta, in un caso, di un polimero

fotocromatico miscelato in pasta di acetato di cellulosa e applicato sulla superficie esterna, del modulo, direttamente esponibile alla radiazione solare e in un altro caso di un rivestimento fotocromatico applicato su un supporto di policarbonato e introdotto come intercalare, sul vetro stratificato esterno, protetto dall'azione diretta degli agenti attivanti. Per convalidare le considerazioni teoriche ed avere una prima conferma dei vantaggi offerti dai moduli, sono state condotte delle prove sperimentali all'interno del Laboratorio di "Ingegneria Industriale e Scienza Matematiche" dell'Università. Le prestazioni sono state convalidate attraverso il confronto con le performance energetiche del modulo bassoemissivo preso a campione che, di per se, rappresenta uno dei prodotti più diffusi e performanti del mercato. I test di laboratorio hanno convalidato le proprietà teoriche ipotizzate, evidenziando i vantaggi in termini gestione del flusso termico e luminoso dei sistemi ideati. Per i rilievi è stata usata una apposita cella coibentata, introdotta all'interno di una camera climatica. Le prove sono state condotte in regime statico, controllato, sottoponendo i moduli a radiazione continua e costante attraverso un pannello radiante con apposite lampade Osram. Le condizioni al contorno sono state garantite con un sistema di ventilazione meccanica controllata. I test hanno mostrato che il modulo fotocromatico riesce a contenere il flusso termico meglio del

campione di riferimento, riducendo del 25% circa, la potenza termica trasmessa all'interno del box. Il prototipo ha gestito meglio anche il flusso termico superficiale risultando vantaggioso, in termini di comfort termico, rispetto al campione di riferimento, grazie alla riduzione della temperatura media operativa sviluppatasi all'interno della cella. Assunto che le prove in regime statico non riproducono le reali condizioni di esercizio, è stato necessario istituire una campagna sperimentale esterna usando due celle di prova delle stesse caratteristiche fisiche e geometriche realizzate all'interno dell'officina dell'università. Anche per la campagna "outdoor" le proprietà dei moduli sperimentali sono state valutate mediante il confronto con quelle di un doppio vetro stratificato basso-emissivo, preso come sistema di riferimento. I Test esterni hanno consentito la stima dei parametri chiave in grado di descrivere il comportamento della soluzione fotocromatica innovativa in condizioni operative realistiche. Per captare la massima intensità della radiazione solare incidente e rilevare i parametri caratteristici secondo le specifiche tecniche, le celle di prova sono state orientate a sud, per tutta la durata dei test e sono state inclinate rispetto al piano orizzontale in modo da formare un angolo di incidenza nullo con la radiazione incidente, al mezzogiorno solare. Le prove hanno confermato la validità di entrambi i moduli sperimentali che sono stati capaci di

contenere gli apporti termici esterni più del modulo basso-emissivo standard. Essi hanno mostrato un fattore di trasmissione dell'energia totale "g", e un fattore di trasmissione diretta dell'energia solare " $\tau_e$ ", inferiori rispetto a quelli del campione di riferimento. I valori sono stati stimati secondo la procedura convalidata dalla Norma UNI EN 410. Entrambi i vetri fotocromatici, hanno confermato in condizioni di esercizio reali, un comportamento dinamico reversibile, attivando la fase fotocromatica in modo progressivo dalle prime ore diurne fino al raggiungimento del massimo oscuramento in concomitanza del mezzogiorno solare e poi tornando gradualmente allo stato trasparente col diminuire della radiazione incidente. Fatta esclusione per le ore di massima intensità solare, i vetri hanno garantito un'adeguata introspezione di luce naturale, confermata sia dai rilievi del flusso luminoso " $\phi$ " trasmesso durante il giorno, sia dalla misura del fattore di trasmissione luminosa " $\tau_l$ " UNI EN 410 e sia dalla stima del fattore medio di luce diurna "FLDm". Oltre a detti parametri, per valutare le condizioni di visibilità e nitidezza garantite dai prototipi, attraverso software di calcolo, è stata fatta una mappatura del fattore di luce diurna "FLD" puntuale. Per entrambi i moduli fotocromatici sono risultate ampiamente garantite le condizioni di comfort visivo indicate dalla normativa vigente. Una importante considerazione va fatta in merito



alle temperature operative riscontrate all'interno delle celle di prova, risultate inferiori e più vicine alle condizioni di comfort ottimale di quelle riscontrate nel box con il vetro di riferimento. Considerando che minime variazioni di temperatura generano grandi variazioni percettive dello stato di benessere abitativo, la riduzione della temperatura dell'aria interna e delle temperature superficiali, è la dimostrazione che i vetri sperimentali siano più vantaggiosi dei comuni vetri a bassa emissività. Nell'ottica dello sviluppo e dell'industrializzazione dei prodotti ideati, è stato necessario condurre una prova di durabilità per studiare il ciclo di vita e la capacità di conservazione delle caratteristiche funzionali dei materiali. Le prove sono state condotte in laboratorio, sottoponendo i polimeri fotocromatici, a radiazione continua e costante. Dal test è emerso che il sistema cromogenico con il film in acetato di cellulosa applicato sulla faccia esterna del modulo, è estremamente performante e reattivo ma subisce un decadimento prestazionale già dopo alcuni giorni. Il decadimento era già stato previsto in quanto il prodotto FC "Raleri" è un dispositivo del settore sportivo agonistico e richiede prestazioni estremamente elevate a scapito del ciclo di vita del materiale che, in tali applicazioni non ha alcuna rilevanza. Diversamente, Il prototipo "Tens-H", nel quale il foglio di policarbonato con rivestimento fotocromatico è inserito in luogo

dell'intercalare sul vetro stratificato esterno, è risultato molto meno rapido all'oscuramento, ma ugualmente performante e durevole. Dopo circa 100 ore di irraggiamento continuo e costante in camera climatica, non ha mostrato alcun decadimento prestazionale apprezzabile. Non vanno dimenticati altri aspetti vantaggiosi dei vetri sperimentali. L'assemblaggio dei moduli può essere effettuato con le attuali tecnologie di taglio, laminazione e sigillatura dei vetri stratificati commerciali. I materiali plastici possono essere applicati anche alle vetrate esistenti è apportare un miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici senza dover ricorrere ad interventi lunghi e dispendiosi. I polimeri sono reperibili e l'industrializzazione dei moduli produrrebbe una consistente riduzione del costo unitario. Tutti i componenti dei prototipi sono riciclabili e versatili, non richiedono alcuna manutenzione in fase di esercizio e non interferiscono sulle caratteristiche strutturali dei serramenti. Oltre a voler concentrare l'attenzione sulle grandi potenzialità che i tecnopolimeri fotosensibili possono avere nell'ambito di applicazioni nell'edilizia, la ricerca ha voluto fornire uno scenario di sviluppo dei prototipi, proponendo un progetto imprenditoriale sulla base di una indagine economica e uno studio di fattibilità. E' stato sviluppato un piano di business su tre anni per un'Attività basata sulla ricerca continua e sullo sviluppo di moduli vetrati dinamici innovativi.

L'Azienda andrebbe a collocarsi nei settori dell'edilizia residenziale, commerciale e industriale con una grande potenziale rete di clienti. Grazie a pregresse esperienze lavorative dello scrivente, come imprenditore del mondo dei serramenti, è stato possibile tessere una valutazione dei presunti costi di produzione, diretti e indiretti. Dall'analisi è emersa un'offerta di valore (Value Proposition) dei prototipi sperimentali ha tenuto conto degli elevati livelli prestazionali testati nelle fasi di ricerca e del confronto con i prezzi di mercato di prodotti commerciali simili. E' emerso che rispetto ad un comune vetro basso-emissivo (come il campione di riferimento della campagna sperimentale) delle stesse caratteristiche geometriche che ha un costo al metro quadrato che varia da € 75 a € 120, i prototipi sperimentali possono avere un prezzo intorno a € 115/m<sup>2</sup>. Va sottolineato che le prestazioni dei moduli fotocromatici si avvicinano a quelle di vetri altamente tecnologici aventi costi superiori ai 350 €/m<sup>2</sup>. Il progetto imprenditoriale ha restituito al termine di 3 anni di attività un Margine Operativo Lordo (MOL) o EBITDA (reddito basato sulla sola gestione operativa dell'Azienda, al netto delle imposte, degli interessi e degli ammortamenti) pari al 4.06%, un margine operativo al netto degli ammortamenti (MON) o EBIT, del 2.27% e un reddito netto d'Azienda, ante-imposte, del 1.36%. Lo studio esposto, rappresenta una

base di lavoro per lo sviluppo di vetri innovativi. La prospettiva è quella di affinare le prestazioni dei moduli nell'ottica di un impiego multisetoriale, dall'edilizia al mondo dei trasporti, agli impianti di trasformazione dell'energia solare fino ad arrivare a tutti quei settori ove siano richiesti sistemi trasparenti a comportamento dinamico reversibile. E' auspicabile che lo sviluppo dei sistemi innovativi sia condotto secondo un approccio integrato mirato ad affinare le potenzialità e le sinergie di tutti i componenti dei sistemi innovativi. In particolare, sarebbe interessante lavorare sulla reazione chimica dei polimeri, massimizzando i cicli di vita e spostando l'intervallo di attivazione fotocromatica, verso le lunghezze d'onda maggiori dello spettro visibile. Inoltre lavorando sulla struttura elettronica dei materiali si potrebbe aumentare l'intensità della radiazione solare attivante e concentrare l'oscuramento del materiale nelle ore di massima radiazione termica garantendo l'introspezione di luce naturale nei restanti periodi del giorno. Il progetto elaborato è rivolto ad un'ampia gamma di utenti. Interessa i settori di ricerca e sviluppo, i professionisti del settore edile, le amministrazioni pubbliche e tutti quegli utenti che intendono migliorare le prestazioni energetiche dei propri immobili e garantire condizioni di comfort abitativo, in modo semplice, veloce ed economico.

*Un ringraziamento particolare alla mia compagna Monia,  
che nei momenti di intenso lavoro, preso dallo scoraggiamento,  
ha sempre avuto una parola di conforto ...*







Università Politecnica delle Marche

Dottorato di Ricerca in Scienze della Vita e dell'Ambiente

Curriculum in Protezione Civile ed Ambientale

Ciclo XXX A.A. 2014- 2017

Università Politecnica delle Marche

*Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente*

Via Brecce Bianche — 60131 - Ancona, Italy

---