

Strumentazione spettrometrica per la misura delle caratteristiche di assorbimento, riflessione e trasmissione di vari materiali

G. Chiani¹, L. Mercatelli², P. Sansoni², D. Fontani², D. Jafrancesco², M. De Lucia¹

¹ Dip. Energetica - CREAR, Univ. Di Firenze, Via Santa Marta, 3 - 50139 Firenze - Italia -

Telefono: +39-055 4796 244 ; Fax: + 39-055 4796 342 ;

Email: gabriele.chiani@gedeone.de.unifi.it

² CNR-INOA Istituto Nazionale di Ottica Applicata, Largo E. Fermi 6 – 50125 Firenze - Italia -

Telefono: +39-055-23081; Fax: +39-055-2337755;

Email: paola.sansoni@inoa.it; daniela.fontani@inoa.it

Sommario

Sono state realizzate delle misure su campioni di materiali di diversa natura attraverso l'impiego di strumenti spettrofotometrici. La caratterizzazione dei vari campioni è stata effettuata sia nello spettro del visibile che nell'infrarosso. Questi test sono stati eseguiti allo scopo di permettere un confronto per quanto riguarda le proprietà ottiche dei materiali esaminati.

Nello specifico sono state tre le categorie di materiali presi in esame: riflettenti (specchi), assorbenti (acciaio e alluminio) e trasmittenti (vetri). I materiali scelti saranno poi utilizzati per la realizzazione di un impianto solare a concentrazione di tipo parabolico lineare. In tale struttura gli specchi saranno impiegati nella realizzazione della superficie riflettente del paraboloide. I tubi di acciaio o di alluminio, opportunamente trattati, verranno impiegati per la realizzazione dell'elemento assorbitore su cui si concentreranno i raggi solari. Il vetro servirà per la definizione di un volume di coibentazione intorno all'elemento assorbente al fine di minimizzare lo scambio termico con l'aria.

Il sistema a concentrazione è costituito da più moduli, le cui dimensioni saranno approssimativamente di 5mx2m con una lunghezza focale di 0.9m. L'elemento assorbitore sarà

costituito da un tubo metallico di diametro intorno ai 60mm, mentre il vetro avrà un diametro esterno di circa 80mm.

Nell'articolo viene infine presentata la strumentazione utilizzata per caratterizzare i campioni in esame illustrandone in dettaglio i principi di funzionamento e le metodologie applicate. Vengono infine riportati alcuni esempi dei risultati ottenuti.

1. Introduzione

Il presente articolo è stato redatto nell'ambito del progetto SALTO (Solar Assisted cooLing TOscana). Tale progetto si propone lo studio e lo sviluppo di un sistema di condizionamento basato su pannelli solari termici a concentrazione di tipo parabolico lineare. In particolare si occupa di studiare in ogni suo aspetto la realizzazione di un impianto basato su solar assisted cooling, dalle questioni relative alla progettazione ottica alla definizione del sistema di inseguimento solare fino a tutte le problematiche strutturali e tecnologiche in particolare tutto ciò che riguarda i materiali da impiegare nelle varie parti della struttura. Proprio da questa prospettiva si è partiti per indagare su cosa utilizzare per soddisfare le necessità delle varie componenti, particolarmente in relazione alla parte ottica.

In questo senso, la collaborazione con il *Laboratorio di Collettori di Luce Solare* e con il *Laboratorio di Fotometria e Illuminotecnica* dell'Istituto Nazionale di Ottica Applicata (INOA) sono stati fondamentali per la realizzazione della geometria della struttura, il primo, e per l'analisi dei possibili materiali da impiegare, il secondo.

Grazie al lavoro svolto presso l'INOA, è stato possibile caratterizzare tutti i materiali necessari per la realizzazione di un sistema ottico a concentrazione solare. Il lavoro è stato eseguito su tre macrogruppi di materiali: assorbenti(tubi), riflettenti(specchi) e trasparenti(vetri). La classificazione è stata definita a partire dagli impieghi degli stessi all'interno del progetto. Inoltre, si è fatto riferimento ai vari materiali sottintendendo la combinazione di questi con vari trattamenti e/o verniciature. Per quanto riguarda i materiali assorbenti per esempio si è osservato il comportamento di alcuni substrati, cioè l'acciaio e l'alluminio, soggetti a trattamenti preventivi e/o a verniciatura. Più correttamente quindi si dovrebbe parlare di *strutture assorbenti*, intendendo con questa denominazione l'insieme del materiale di base della struttura (per lo più acciaio ed alluminio), eventuali trattamenti superficiali di tale materiale ed il trattamento finale.

La seconda tipologia di materiali è costituita dai materiali riflettenti necessari per definire la superficie dello specchio parabolico. Per questo tipo di lavoro si è cercato di integrare le conoscenze proprie del Laboratorio di Fotometria e Illuminotecnica relativamente ad altri studi condotti su superfici riflettenti e la raccolta di campioni di tipo commerciale. Il nostro obiettivo è stato quello di

individuare, fra quelli presenti in commercio, prodotti che offrissero alte prestazioni di riflettività su tutto lo spettro della radiazione solare. Altri fattori di valutazione sono stati la lavorabilità e l'applicabilità sulle superfici di supporto e la resistenza agli agenti meccanici ed atmosferici che potrebbero andare a ridurre l'efficienza.

La terza classe di materiali studiati è stata quella dei *vetri*. Questo tipo di materiali deve offrire un livello di trasparenza massimo nello spettro di radiazione solare ed essere quanto più riflettente possibile nello spettro dell'infrarosso.

Il compito dei vetri infatti è quello di contenere i tubi metallici assorbitori, di cui parleremo di seguito, e di offrire loro una protezione sia dalla dispersione termica causata dal contatto con l'aria che dalla dispersione dovuta al re irraggiamento di un materiale ad una determinata temperatura, che andrebbero a ridurre sensibilmente il rendimento dell'impianto nel caso in cui gli assorbitori fossero lasciati direttamente a contatto con l'aria.



2. Gli strumenti impiegati per le indagini spettrofotometriche

La strumentazione adottata per lo svolgimento dello studio sui materiali è costituita da due spettrofotometri della Perkin-Elmer: il modello Lambda900 ed il modello FT-IR 2000.

I due strumenti sono stati impiegati per misure di riflettanza e di trasmittanza.

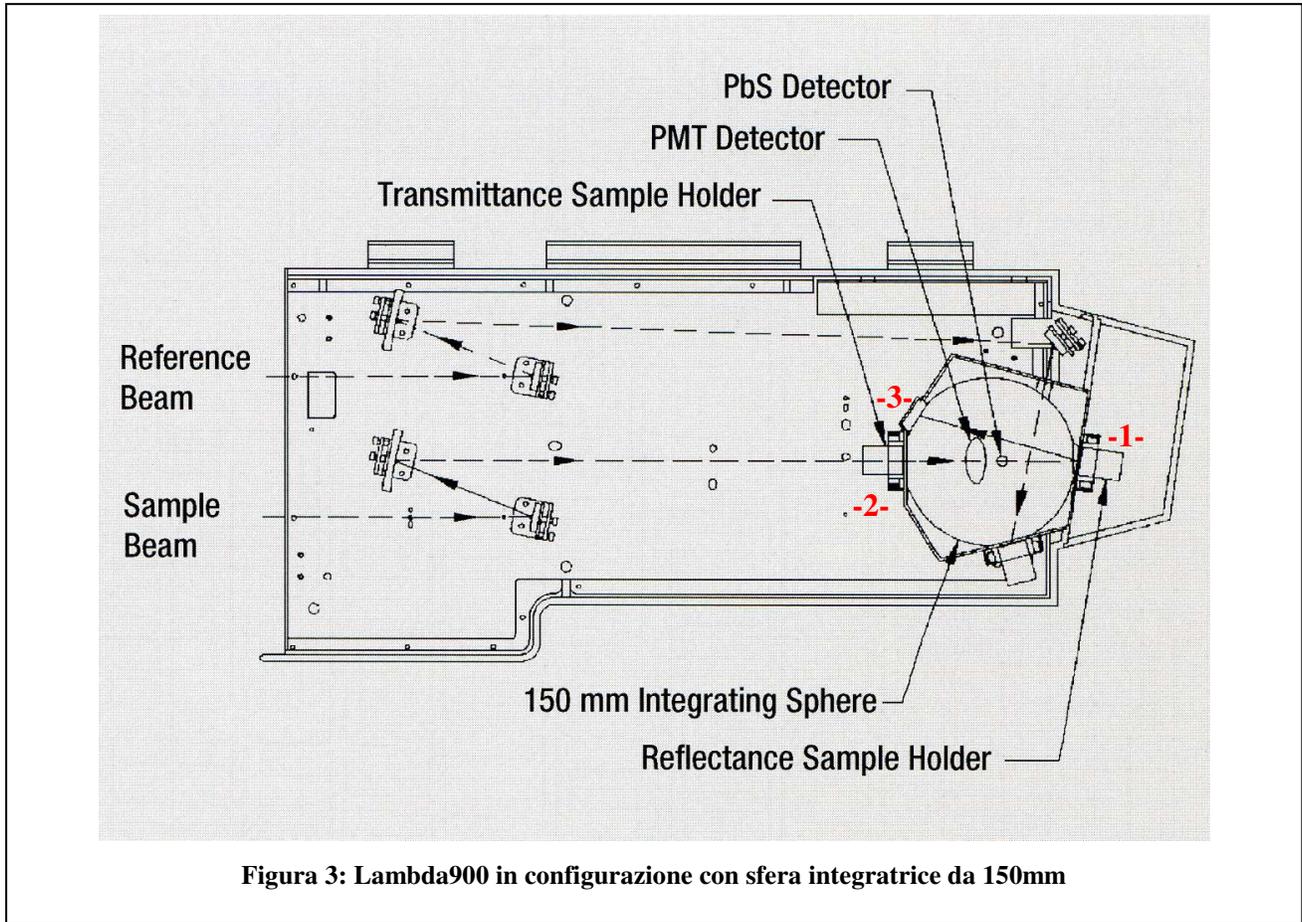


Figura 3: Lambda900 in configurazione con sfera integratrice da 150mm

Perkin-Elmer Lambda900

Il Lambda900 è uno spettrometro a scansione a doppio fascio che possiede un doppio reticolo per l'abbattimento della straylight ed è in grado di operare nell'intervallo di lunghezze d'onda comprese fra $0.20\mu\text{m}$ e $2.5\mu\text{m}$, ovvero dall'ultravioletto (UV) fino al vicino infrarosso (NIR) attraverso lo spettro del visibile (VIS – tra $0.38\mu\text{m}$ e $0.75\mu\text{m}$). Nel nostro studio è stato sufficiente eseguire le misure sull'intervallo $0.3\mu\text{m}$ - $2.3\mu\text{m}$. Questo range è quello

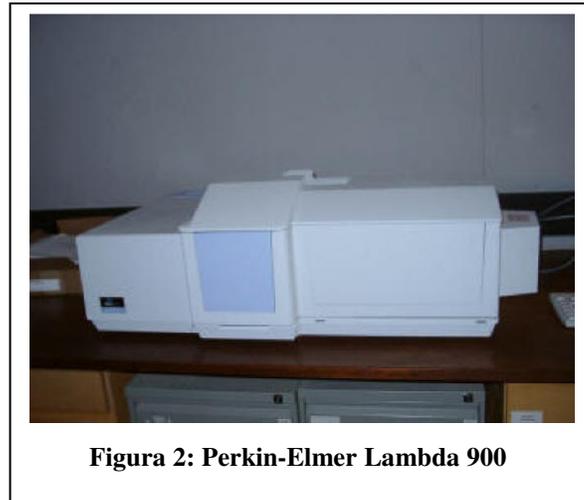


Figura 2: Perkin-Elmer Lambda 900

osservato per la radiazione solare, come mostrato in Figura 6, pertanto, all'interno del nostro lavoro questo intervallo è stato quello più importante dato che ha definito lo spettro che massimamente avrebbe dovuto essere riflesso dal collettore verso il tubo ricevitore, non essere ostacolato dal vetro di protezione ed infine essere assorbito dall'elemento assorbitore.

La configurazione utilizzata per le misurazioni è stata quella per la rilevazione della riflettanza emisferica totale (o riflettanza totale), della riflettanza diffusa e della trasmittanza totale la quale prevedeva l'impiego di una sfera integratrice. Facciamo riferimento adesso alla **Errore. L'origine**

riferimento non è stata trovata.: a seconda che si stia eseguendo una misura di riflettanza o di trasmittanza il campione va posizionato in -1- od in -2- rispettivamente. Nel caso in cui poi si stia procedendo ad una misura di riflettanza diffusa sarà necessario aprire la trappola indicata da -3-.

Perkin-Elmer FT-IR 2000

Si tratta di uno spettrometro a trasformata di Fourier, che opera nell'intervallo di lunghezze d'onda comprese fra 1.3µm e 27µm, tuttavia per le nostre indagini è stato impiegato solamente fino a 25µm. L'intervallo descritto è quello dell'IR ed un'analisi in questa direzione ci è servita per chiarire che tipo di combinazioni adottare per l'assorbitore. Seppur ottimo per le misure di trasmittanza sui vetri, per le quali è stato progettato, e quelle di riflettanza sugli specchi e sui vetri, questo strumento non è adeguato per lo studio IR sui materiali assorbenti.

Sovrapponendo infatti le misure di riflettanza ottenute tramite il Lambda900 e tramite lo FT-IR 2000 nell'intervallo comune ai due strumenti (tra 1.3µm e 2.5µm) si è notato che le curve, anche volendo tenere di conto di alcuni fattori correttivi non

erano né sovrapponibili né confrontabili. Si è infatti osservato che le curve ottenute tramite FT-IR 2000 erano sempre inferiori a quelle ottenute tramite Lambda900. Questo è stato spiegato osservando il principio di funzionamento dei due strumenti, che risulta essere molto diverso. Il Lambda900 impiega per le misure una sfera integratrice che permette di raccogliere tutta la radiazione riflessa da un materiale, mentre lo FT-IR 2000, come si vede dallo schema a blocchi delle misure di riflettanza in Figura 5, utilizza un sensore in grado di rilevare solamente la

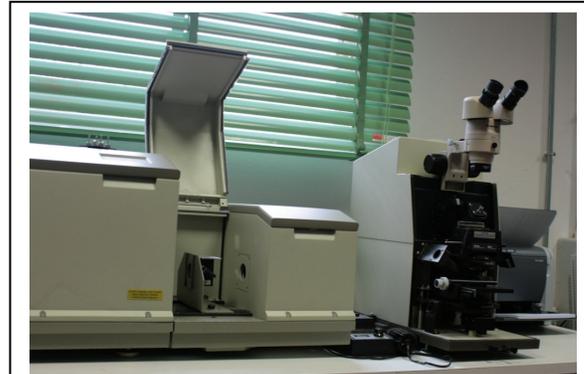


Figura 4: Perkin-Elmer FT-IR 2000

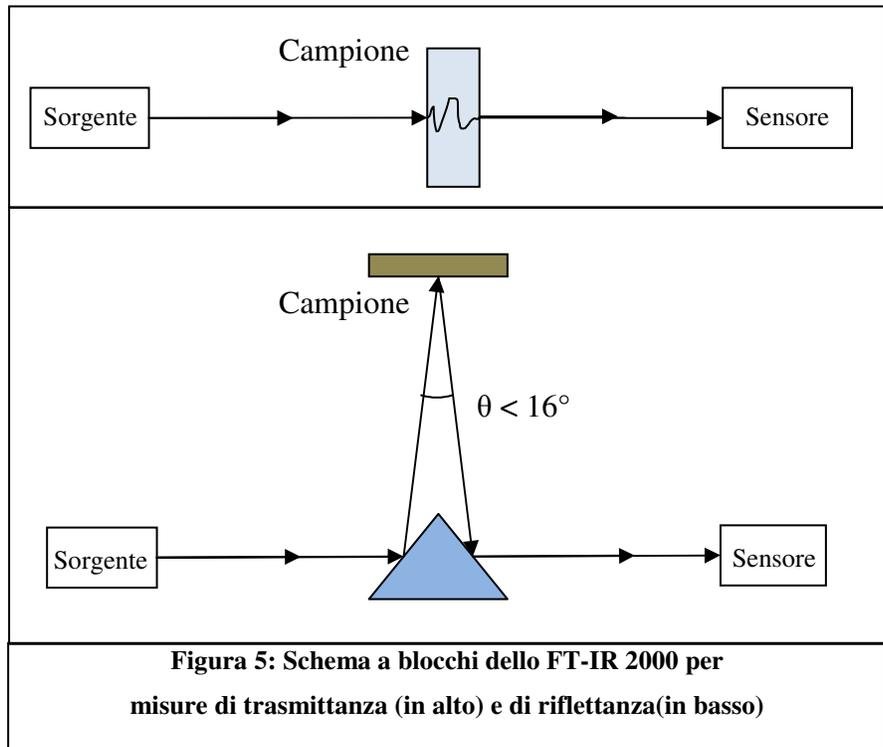


Figura 5: Schema a blocchi dello FT-IR 2000 per misure di trasmittanza (in alto) e di riflettanza(in basso)

radiazione riflessa direttamente ma non permette di capire cosa succede in direzioni diverse dalla direzione speculare.

Al contrario con i vetri e gli specchi, si ha a che fare con materiali la cui rugosità superficiale è ben inferiore di quella della radiazione incidente. Ciò porta ad avere un fascio ben collimato nella direzione del sensore. Di conseguenza, le misure fatte sui campioni assorbenti nell'IR offrono solamente delle indicazioni di natura qualitativa che tuttavia non possono essere prese per definitive.

3. Le tipologie di materiali presi in esame

Il punto di partenza teorico è quello relativo alla caratterizzazione ottica dei materiali. Dal punto di vista della radiazione incidente su un corpo, le caratteristiche di un dato materiale sono la trasmittanza (τ), ovvero la capacità di un materiale di lasciar passare la radiazione, la riflettanza (ρ), ovvero la tendenza di un materiale a riflettere la radiazione, ed infine l'assorbanza (α), ovvero la tendenza di un materiale ad assorbire

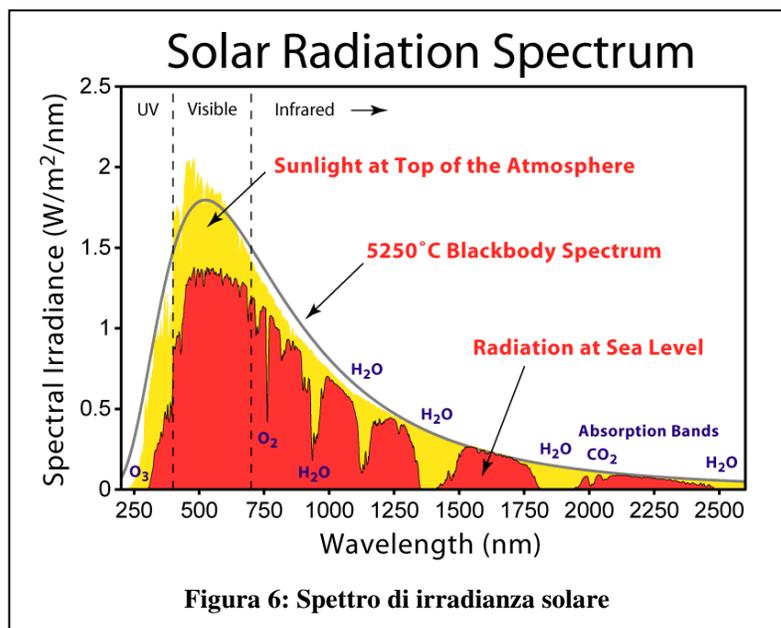


Figura 6: Spettro di irradianza solare

la radiazione. Tali grandezze sono, in generale, funzione della lunghezza d'onda (λ) e dalla temperatura (T). Sono inoltre legate fra loro dalla relazione:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

dove α , ρ e τ in generale sono maggiori o pari a 0.

L'importanza della quantificazione di questi fattori deriva dal fatto che per avere un'idea precisa del comportamento che mostrerà un dato materiale soggetto a particolari condizioni di irraggiamento sarà necessario incrociare questi valori con lo spettro della radiazione incidente sul materiale stesso. In particolare è possibile definire, su determinato spettro di radiazione incidente, delle grandezze dipendenti dai tre parametri definiti poco prima: il coefficiente di trasmissione totale medio sullo spettro (τ_{tot}), legato alla trasmittanza, il coefficiente di riflessione totale medio sullo spettro (ρ_{tot}), legato alla riflettanza ed il coefficiente di assorbimento totale medio (α_{tot}), legato all'assorbanza. Inoltre nel caso dei materiali assorbenti è stato fondamentale il calcolo del fattore di emissione totale medio (ϵ_{tot}). Tale fattore deriva da un'altra grandezza: l'emittanza (ϵ), la quale, per la legge di

Kirchhoff, è uguale per ogni lunghezza d'onda all'assorbanza del materiale stesso. Nella sezione seguente saranno definite le formule per il calcolo di questi coefficienti.

Strutture assorbenti

Quello su cui è stata posta l'attenzione in questo caso è stata la capacità di tali strutture assorbenti di trattenere la radiazione solare concentrata su di esse dal riflettore. Questo dal punto di vista analitico si traduce in due caratteri distinti: la capacità di assorbire la radiazione dello spettro solare e la scarsa tendenza ad emettere radiazione nello spettro dell'infrarosso. Per quanto detto sulla legge di Kirchhoff infatti, un materiale che abbia una buona assorbanza ad una data lunghezza d'onda avrà un altrettanto buona emittanza a quella lunghezza d'onda. Sfortunatamente oltre i $2.3\mu\text{m}$ la radiazione solare che arriva sulla terra assume valori trascurabili ed il tubo metallico, riscaldandosi, tende a riemettere parte di quanto ha assorbito sotto forma di radiazione IR, cioè emette calore. Per questo motivo le nostre indagini ci hanno indirizzato nel ricercare materiali che avessero un'elevata assorbanza nello spettro UV-VIS-NIR ed avessero una scarsa assorbanza (ovvero emittanza) nello spettro IR oltre i $2.5\mu\text{m}$.

Le misure eseguite su questi materiali sono state di riflettanza sia nel range UV-VIS-NIR che nel range IR anche se, in quest'ultimo caso abbiamo utilizzato la misura solo per trarne delle indicazioni di massima. Il calcolo della riflettanza ci ha permesso di dedurre l'assorbanza dei tubi grazie alla relazione

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$$

avendo assunto $\tau(\lambda) = 0$.

Materiali Riflettenti

Per quanto riguarda i materiali riflettenti lo studio ha riguardato solamente l'ambito dello spettro di irradianza solare dato che questa parte non si trova coinvolta, in pratica, in problematiche di reirraggiamento o di scambio termico con l'elemento assorbitore. Come già accennato, lo studio è stato condotto su una serie di campioni provenienti da prodotti commerciali.

L'interesse è stato quindi rivolto alla sola misura della riflettanza con Lambda900. Quello che abbiamo cercato nei campioni è stata la più alta capacità di riflettere direttamente la radiazione incidente riducendo al minimo fenomeni di assorbimento e di riflessione diffusa che genera in pratica un peggioramento delle prestazioni generali del sistema.

Grazie alla sfera integratrice dello strumento ed alla possibilità di escludere la porzione di luce riflessa direttamente all'interno della stessa abbiamo potuto valutare la riflettanza diretta dei campioni sottraendo ai valori delle misure di riflettanza totale (diretta più diffusa) quelli di riflettanza diffusa.

Anche in questo caso abbiamo assunto $\tau(\lambda) = 0$.

Materiali Trasparenti

Lo studio dei vetri infine è stato condotto attraverso misure sia di trasmittanza che di riflettanza su entrambi gli strumenti. Queste misure hanno fornito le informazioni sufficienti per calcolare:

$$\alpha(\lambda) = 1 - (\rho(\lambda) + \tau(\lambda))$$

Ovviamente in questo caso non è stato possibile fare alcuna semplificazione.

Gli esami sui vari tipi di vetro sono stati condotti nella speranza di individuare quello con il miglior fattore di trasmissione nell'intervallo UV-VIS-NIR e quello con il minor assorbimento nell'IR.

4. Risultati: analisi e sintesi

Una volta raccolti tutti i dati questi sono stati elaborati in modo da fornire per ogni tipologia di materiale una figura di merito o per lo meno delle indicazioni su quale sia la scelta migliore.

Le figure di merito calcolate sono divise a seconda che si stia parlando dell'intervallo UV-VIS-NIR o dell'intervallo IR.

Intervallo UV-VIS-NIR (0.3-2.3) μm

Per l'assorbitore si è calcolato il fattore di assorbimento totale medio sullo spettro indicato:

$$\alpha_{tot} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{sole}(\lambda)\alpha(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{sole}(\lambda)d\lambda}$$

dove $I_{sole}(\lambda)$ rappresenta l'irradianza spettrale del sole. Riguardo alla grandezza appena definita è interessante sottolineare come questo valore non vari tanto in funzione del materiale impiegato (alluminio o acciaio) per il substrato, quanto in funzione del trattamento di finitura superficiale ed in funzione di un'eventuale verniciatura finale. In generale una superficie liscia ha mostrato maggior tendenza a riflettere la radiazione rispetto ad una superficie trattata per aumentarne la rugosità.

Per quanto riguarda gli specchi invece abbiamo valutato il coefficiente di riflessione totale medio sull'intervallo specificato. Esso vale:

$$\rho_{tot} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{sole}(\lambda)\rho(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{sole}(\lambda)d\lambda}$$

Abbiamo misurato su superfici riflettenti costituite da pellicole argentate che specchi costituiti da un sottile strato di vetro al quale era stato applicata sulla faccia posteriore un trattamento di

argentatura. Entrambi questi tipi di strutture hanno offerto buone prestazioni in termini di riflessione sullo spettro solare. Tuttavia le pellicole argentate hanno mostrato di essere soggette fortemente alle azioni meccaniche anche di modesta entità, questo fatto le rende meno adatte degli specchi classici con argentatura posteriore ad essere impiegate all'esterno a contatto diretto con agenti atmosferici. Nello spettro di irradianza solare infine, i vetri sono quelli che hanno fornito meno spunti di riflessione, avendo mostrato che il loro comportamento, se non si ricorre a particolari accorgimenti come trattamenti superficiali o composizioni particolari, non è un fattore di grande variabilità. Di seguito è riportato come si calcola il coefficiente di trasmissione totale medio sull'intervallo di lunghezze d'onda compreso fra λ_1 e λ_2 .

$$\tau_{tot} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{sole}(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{sole}(\lambda)d\lambda}$$

Intervallo IR (1.3-25.0) μm

Non abbiamo ritenuto necessario valutare il comportamento degli specchi in questo range, in quanto non sono in alcun modo coinvolti con problematiche di scambio termico per irraggiamento.

In questo intervallo per quanto riguarda gli assorbitori abbiamo dovuto tenere di conto che le misure effettuate non potevano avere carattere definitivo. Il principio di funzionamento dello FT-IR 2000 infatti non consente di valutare efficacemente il coefficiente di riflessione di un campione la cui rugosità sia di dimensione paragonabile a quella della radiazione incidente. Presumibilmente, fino a che la radiazione non raggiunge lunghezze d'onda molto maggiori della dimensione della rugosità ($>10\lambda$) l'effetto che ci si deve aspettare è quello di una riflessione diffusa che non può essere efficacemente raccolta da un sensore solo a meno che questo non sia mobile o non sia inserito in una sfera integratrice. Tuttavia, al fine di avere delle indicazioni di massima, abbiamo valutato il fattore di emissione totale medio sull'intervallo come:

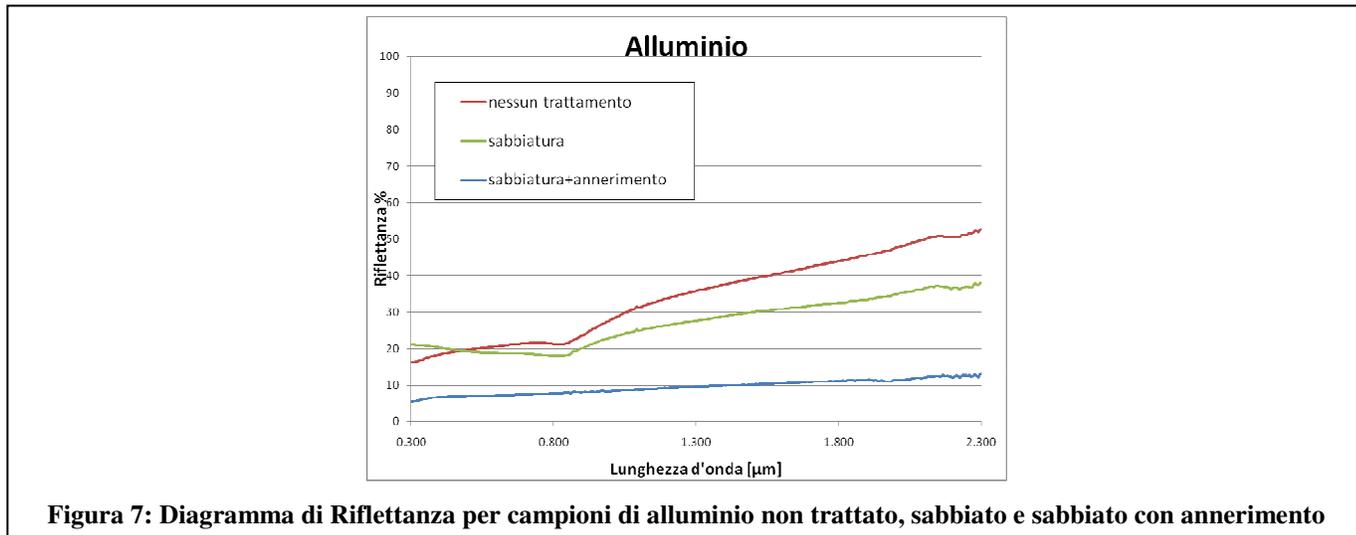
$$\epsilon_{tot} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda,T)\epsilon(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda)d\lambda}$$

Dove $B(\lambda,T)$ è la radiazione spettrale di corpo nero ad una determinata T. Questa formula dice quanto il tubo, portato alla temperatura di lavoro, tende ad irradiare calore verso l'esterno.

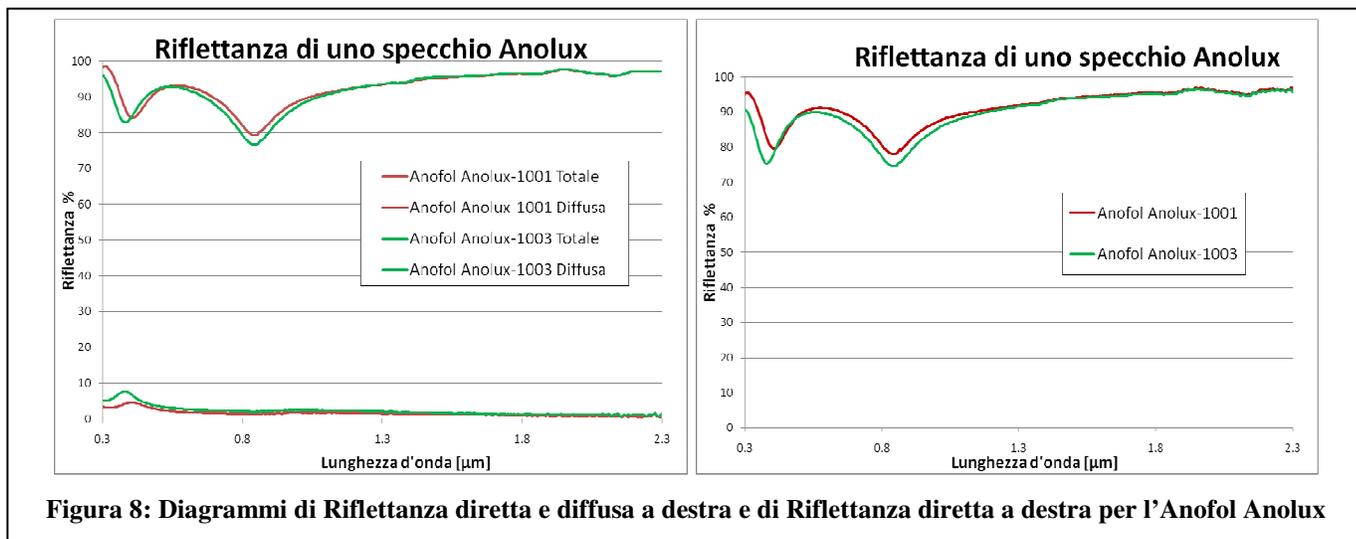
Di seguito infine sono riportati alcuni esempi di diagrammi usati per valutare le prestazioni dei materiali analizzati.

Esempi di diagrammi nello spettro UV-VIS-NIR (Lambda900)

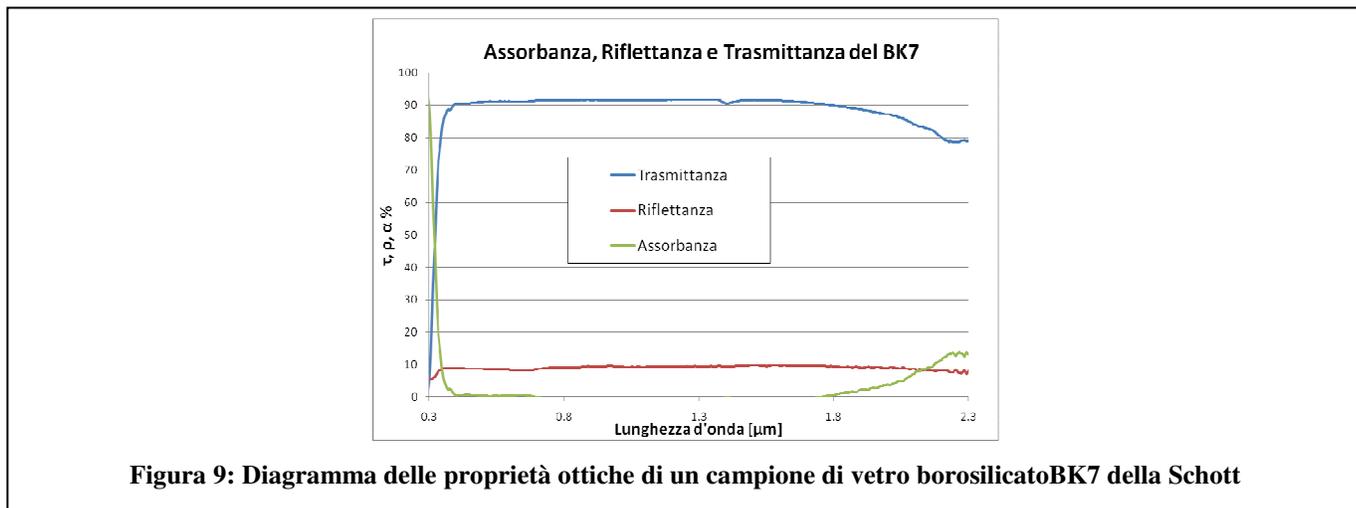
ASSORBITORI



SPECCHI



VETRI



Esempi di diagrammi nello spettro IR (FT-IR 2000)

ASSORBITORI

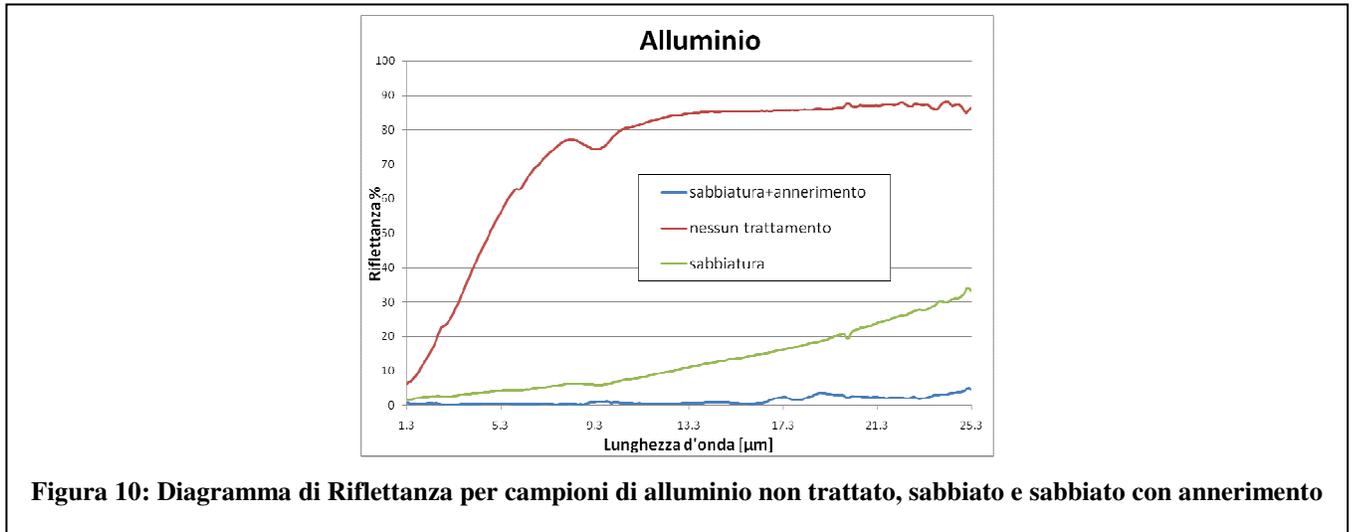


Figura 10: Diagramma di Riflettanza per campioni di alluminio non trattato, sabbato e sabbato con annerimento

VETRI

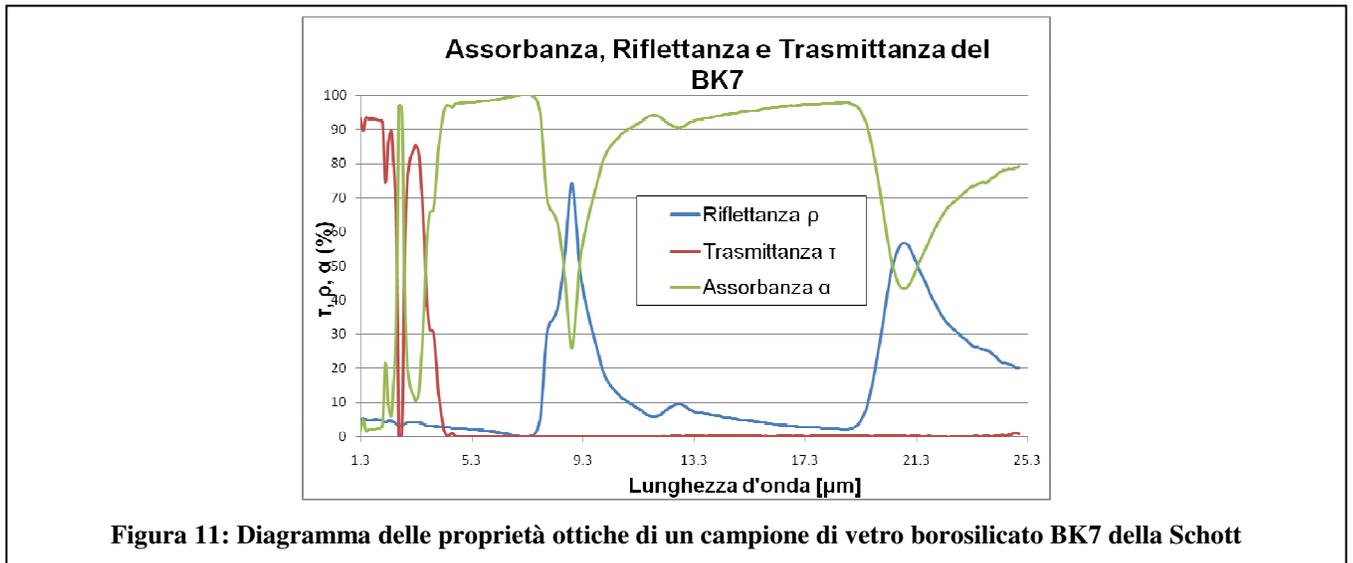


Figura 11: Diagramma delle proprietà ottiche di un campione di vetro borosilicato BK7 della Schott