

## CAPITOLO 6

### MATERIALI SELETTIVI NELLA CONCENTRAZIONE SOLARE

---

#### 6.1 INTRODUZIONE

Nei mesi di settembre, novembre e dicembre 2007 (nel mese di ottobre è stata svolta l'esperienza all'estero nell'Università Politecnica di Valencia) è stato effettuato uno stage presso l'Innova Technology Solutions nella sede a Piazza Zumbini n. 25, Cosenza che ha avuto come oggetto la “Ricerca e sperimentazione sulla concentrazione solare”.

L'argomento sviluppato è risultato essere lo studio dei materiali selettivi (assorbenti e riflettenti) nella concentrazione solare. Ciò è stato fatto in relazione allo sviluppo da parte dell'Innova di alcuni prototipi parabolici per la concentrazione della radiazione solare. Sono stati pertanto affrontati tutti quei materiali che, per natura o per particolari processi specifici, hanno delle caratteristiche selettive sulla radiazione solare.

La raccolta e la concentrazione della radiazione, che per sua natura ha una bassa densità di potenza, è una delle problematiche principali degli impianti solari. Viene effettuata mediante l'impiego di un concentratore, formato da pannelli di opportuna geometria con superfici riflettenti. Questo durante il giorno insegue il percorso del sole per raccogliere la componente diretta della sua radiazione e concentrarla sul ricevitore, che trasforma l'energia solare in energia termica, ceduta poi a un fluido fatto passare al suo interno. L'energia termica asportata dal fluido termovettore, prima dell'utilizzo nel processo produttivo, può essere accumulata in diversi modi: sfruttando il calore sensibile del fluido stesso posto in serbatoi coibentati, oppure cedendo il suo calore a materiali inerti a elevata capacità termica o a sistemi in cambiamento di fase. In questo modo l'energia solare, per sua natura altamente variabile, può diventare una sorgente di energia termica disponibile per l'utenza su domanda. I sistemi a concentrazione possono essere di tipo lineare o puntuale. I sistemi a concentrazione lineare sono più semplici ma, a causa della minore

concentrazione della radiazione, raggiungono temperature di funzionamento più basse e quindi minori rendimenti. In relazione alla geometria e alla disposizione del concentratore rispetto al ricevitore, si possono distinguere tre principali tipologie di impianto: il collettore a disco parabolico, il sistema a torre centrale e il collettore parabolico lineare. Risulta pertanto fondamentale la scelta dei materiali da impiegare in modo da ottimizzare la captazione e la riflessione della radiazione solare.

## 6.2. MATERIALI ASSORBENTI

I sistemi a concentrazione solare utilizzano materiali assorbenti per poter convertire l'energia solare in energia elettrica. In natura, sfortunatamente, non esistono "materiali ideali" che riescono ad assorbire tutta l'energia proveniente dal sole (lunghezza d'onda 0,3–2,5  $\mu\text{m}$ , Spettro UV-VIS-IR). Nella fig. 6.1 è riportata la distribuzione della potenza solare in funzione della lunghezza d'onda.

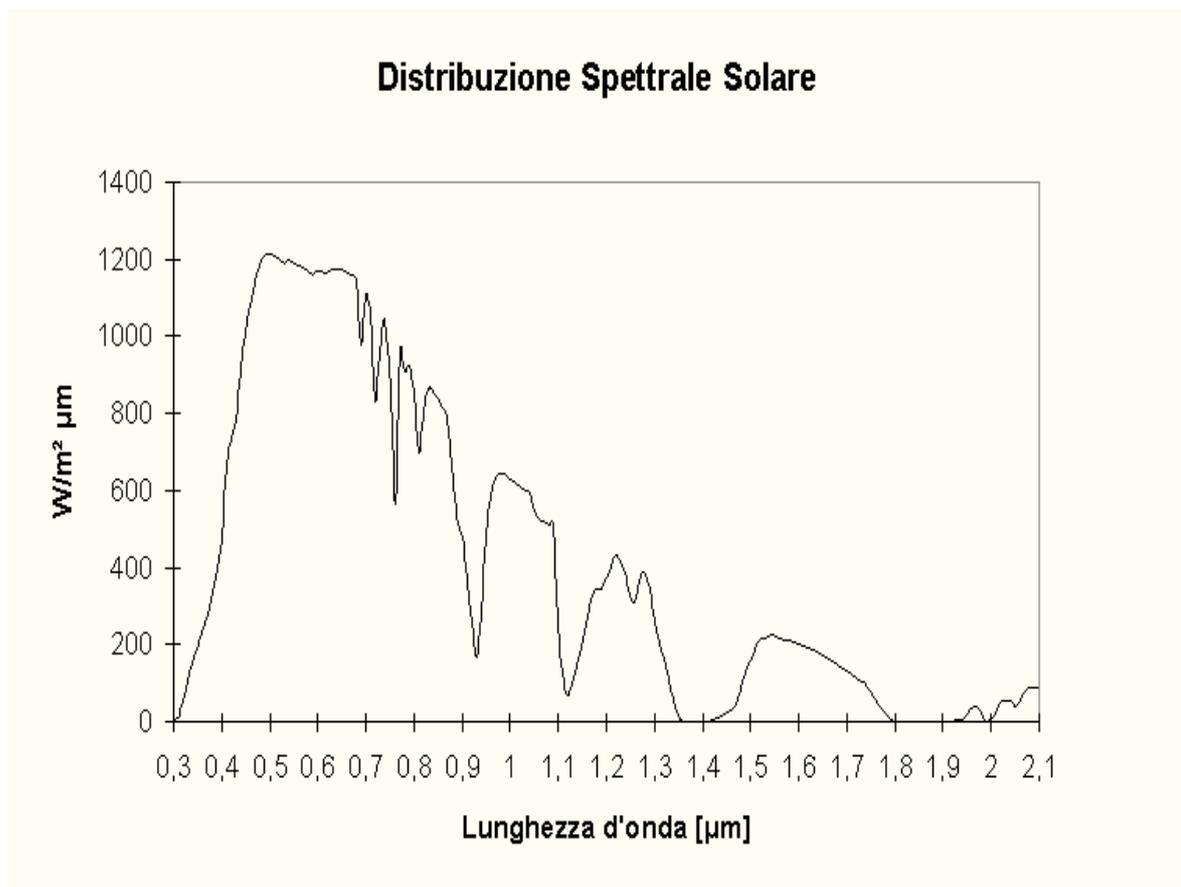


Fig. 6.1 - Distribuzione della potenza solare in funzione della lunghezza d'onda

Inoltre, quando riscaldiamo un corpo, questo al variare della sua temperatura, inizierà ad “emettere” energia termica, e tale energia sarà sempre più grande con l’aumento della temperatura. Tale distribuzione di energia ha un range di lunghezza d’onda che è superiore ai 3  $\mu\text{m}$ . Nella fig. 6.2 è riportata la potenza emessa da un corpo nero al variare della temperatura.

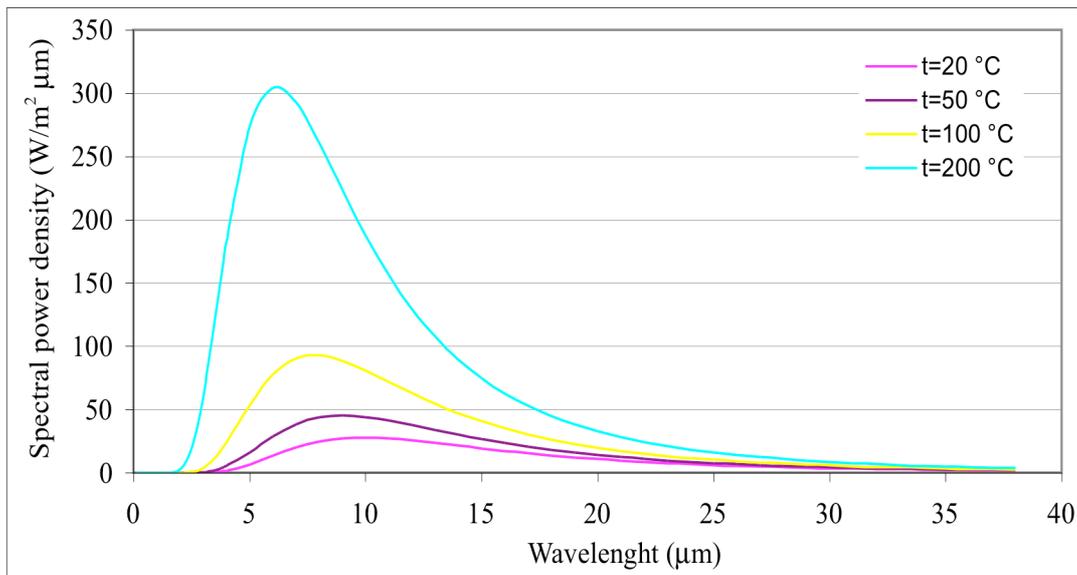


Fig. 6.2 - Emissione spettrale di un corpo nero al variare della temperatura.

Quindi un materiale “ideale”, per quale che sia la temperatura  $T$  di funzionamento, dovrà avere un’assorbanza  $\alpha(\lambda)$  prossima ad 1 per  $\lambda \leq 3\mu\text{m}$ , ed una emittanza termica  $\epsilon(\lambda)$  minima, prossima a 0, per  $\lambda > 3\mu\text{m}$ . Tuttavia questo non è fisicamente realizzabile, poiché sia  $\alpha(\lambda)$  che  $\epsilon(\lambda)$  dipendono fortemente dalla temperatura di funzionamento del materiale. Quindi, al variare del range sia di temperatura  $T$  che di lunghezza d’onda  $\lambda$ , possiamo avere diversi tipi di comportamento del materiale selettivo; inoltre, qualunque sia il materiale, questo andrà a degradare le proprie performance al variare del tempo. La logica che sta dietro la realizzazione di un materiale selettivo è quella di realizzare un tandem tra due diversi tipi di materiali uno che assorbe l’energia solare (e quindi bassa riflettanza per  $\lambda \leq 3\mu\text{m}$ ) e l’altra che ha una bassa emittanza nell’infrarosso (e quindi alta riflettanza per  $\lambda > 3\mu\text{m}$ ).

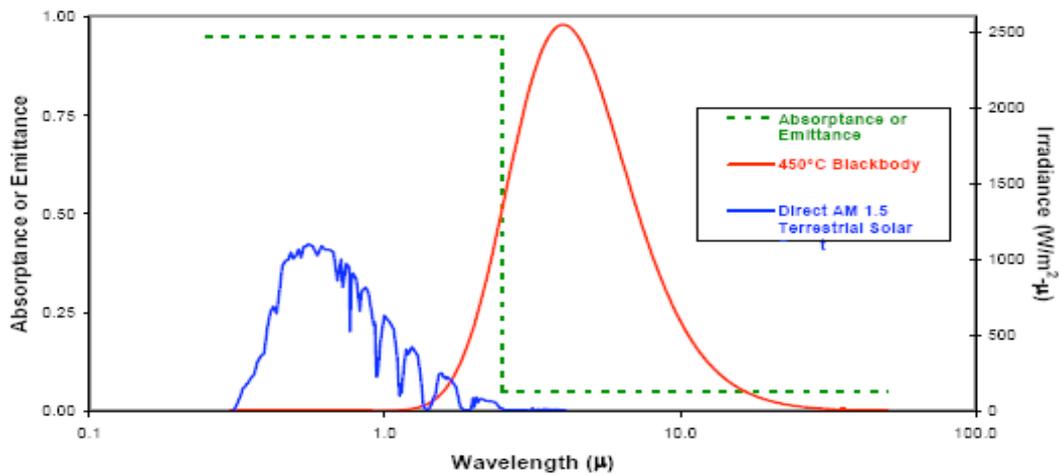


Fig. 6.3 – Assorbanza di un materiale selettivo ideale.

Come mostra la fig. 6.3, un materiale selettivo ideale (curva in tratteggio) deve avere un'alta assorbanza per  $0 \leq \lambda \leq 3$  e bassa radianza per  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ . il cut-off del materiale selettivo varia al variare della temperatura. Nella ricerca di materiale selettivo che abbia un range di temperatura sopra i 500-600 °C, si è visto che quasi tutti i materiali sono a livello prototipale e quindi non commerciali (Mo-Co-W-NiAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cermet multilayer, leghe ceramiche, SiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>, ZnS) ed inoltre si degradano molto velocemente nel giro di un paio di ore di funzionamento. Per il range di temperatura di circa 300-450°C sono stati contattati sedici fornitori di materiali i cui dati sono stati riportati nelle tabelle successive.

6. Materiali selettivi nella concentrazione solare

SOCIETA'	PRODOTTO	SUBSTRATES	$\alpha$	$\varepsilon$	RANGE DI TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO SPECIFICATA (°C)	ORE DI FUNZIONAMENTO GARANTITO
SOLEC	SOLKOTE	Silicone polimer (spray)	0,88-0,94	0,28-0,49	-100°F +1000°F	530	1 anno
MTI	KROSOL	Nickel-black chromium (coating)	0,95	0,08	n.d.	circa 350	n.d. (garanzia 25 anni)
INTERPANE	IPASOL	glass	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CERMETINC	ZnO Substrates	Zirconia	n.d.	n.d.	n.d.	circa 400	n.d.
COORSTEK	AD 995-AD 998	Zirconia-Alumina	n.d.	n.d.	n.d.	circa 350	n.d.
SCHOTT	SCHOTT ETC 16	glass	n.d.	n.d.	n.d.	298	n.d.
TINOX	Tinox Classic	Titanio	0,95	0,04	n.d.	circa 350	n.d.
SUNSTRIP	Sunstrip	Cu-Al	0,96	0,7	n.d.	250	n.d.
ENERGIE SOLAIRE	AS-AS+	n.d.	0,94	0,07	n.d.	n.d.	n.d.
NATIONAL METAL FINISHING CORP.	n.d.	Black chrome	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SOL-GEL (assenza di risposta)	-	-	-	-	-	-	-
SOLAR GENIX (assenza di risposta)	-	-	-	-	-	-	-

n.d.=dato non disponibile

6. Materiali selettivi nella concentrazione solare

SOCIETA'	PRODOTTO	SUBSTRATES	$\alpha$	$\epsilon$	RANGE DI TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO SPECIFICATA (°C)	ORE DI FUNZIONAMENTO GARANTITO
ALANOD-SUNSELECT	MIROTHERM SUNSELECT	Aluminium Copper	0,94 0,95	0,05 0,05	n.d. n.d.	Testato a 100°C Testato a 100°C	n.d. n.d.
SOLEL (assenza di risposta)	-	-	-	-	-	-	-
SPECTROSOLAR (assenza di risposta)	-	-	-	-	-	-	-
SOGES	PYROMARK	n.d.	0,95	n.d.	427°C 1093°C	427°C 1093°C	n.d.

n.d.=dato non disponibile

Dall'analisi delle aziende contattate si evince che un solo prodotto risulta essere soddisfacente per le temperature in gioco nella concentrazione solare, ovvero la vernice solare Solkote della Solec. Inoltre si nota come numerosi fornitori mantengano riservate alcune caratteristiche (temperatura, costo, ore di funzionamento, etc.). Il prodotto scelto per l'assorbimento solare che si avvicina alle nostre specifiche ( $0.85 < \alpha < 0.98$   $0.05 < \varepsilon < 0.40$  e range di temperatura oltre i  $350^{\circ}\text{C}$ ) è stato quindi lo spray solare Solkote, che è di seguito analizzato più in dettaglio.

### 6.2.1 SOLKOTE HI-SORB-II

<b>SOCIETA'</b>	SOLEC
<b>Prodotto</b>	SOLKOTE
<b>SUBSTRATES</b>	Silicone polimer (spray)
<b><math>\alpha</math></b>	0.88-0.94
<b><math>\varepsilon</math></b>	0.28-0.49
<b>Range di Temperatura</b>	-100°F +1000°F
<b>T di funzionamento certificata (°C)</b>	530
<b>Ore di funzionamento garantito</b>	1 anno

Di seguito vengono riportate le specifiche tecniche del prodotto:

### Specifiche del prodotto

Binder:	100% silicone polymer
Solvente:	Xylene
Range di temperatura di funzionamento:	- 100°F - +1000°F (530°C) (installato)
Temperatura di immagazzinamento:	- 50°F - 80°F (-45 - 27°C)
Viscosità:	25 seconds #1 Zahn's cup
Tasso di riempimento:	400 – 900 square feet (40 – 90 metri quadri)/gallone dipendendo dall'applicazione
Miscelamento:	pre-miscelato, pronto per l'uso
Lavaggio:	Xylene, Toluene

I vantaggi che scaturiscono con l'utilizzo del prodotto sono:

- basso costo (50-75% più basso del black chrome);
- eccellenti qualità ottiche;
- eccellente tolleranza alle alte temperature (fino a 530°C);
- eccellente resistenza ai raggi UV e alla degradazione dovuta all'umidità;
- durata eccellente (non perde le caratteristiche di assorbimento col tempo);
- facile applicazione spray.

#### 6.2.1.1 CARATTERISTICHE OTTICHE

SOLKOTE è dipendente dal substrato di applicazione. Le qualità ottiche ideali per le applicazioni termiche solari sono realizzate al meglio applicando uno strato sottile sui substrati a bassa emissività quale l'acciaio inossidabile, rame o dell'alluminio. L'emissività può variare da 0.28 a 0.49 ed assorbimento da 0.88 a 0.94, dipendendo dal substrato e dallo spessore della pellicola secca. Le figure sottostanti dimostrano importanti caratteristiche di riflessione nella banda di nostro interesse (circa 2500 nm) su rame ed alluminio. E' interessante notare che i materiali su cui è testato lo spray sono facilmente reperibili e di basso costo, il che rende ancora più conveniente l'utilizzo di SOLKOTE.

#### 6.2.1.2 RIFLETTANZA SPETTRALE SU ALCUNI MATERIALI CON L'APPLICAZIONE DI SOLKOTE

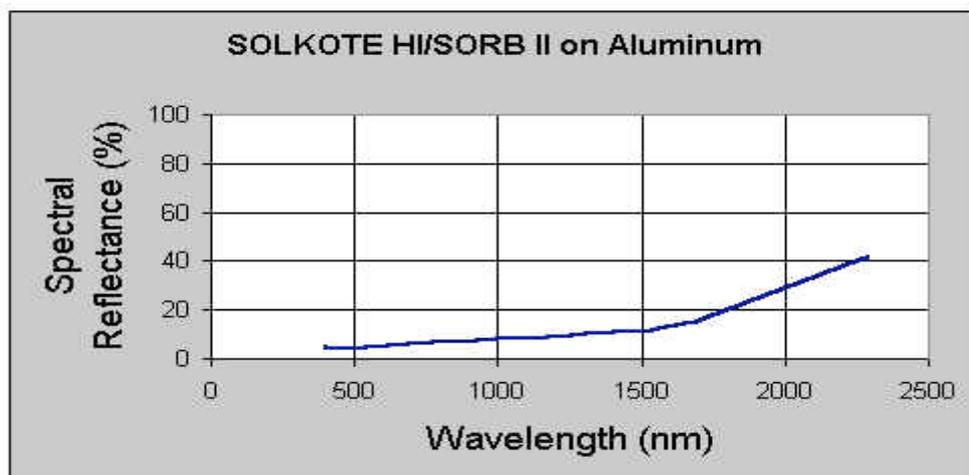


Fig. 6.4 – Riflettanza spettrale del solkote su substrato di alluminio

Di seguito è riportato un test delle caratteristiche di SOLKOTE sull'acciaio inossidabile. Si evince come l'assorbimento migliora utilizzando più layer, ovvero più strati, dello spray.

### 6.2.1.3 SOLKOTE HI-SORB-II SU ACCIAIO INOSSIDABILE

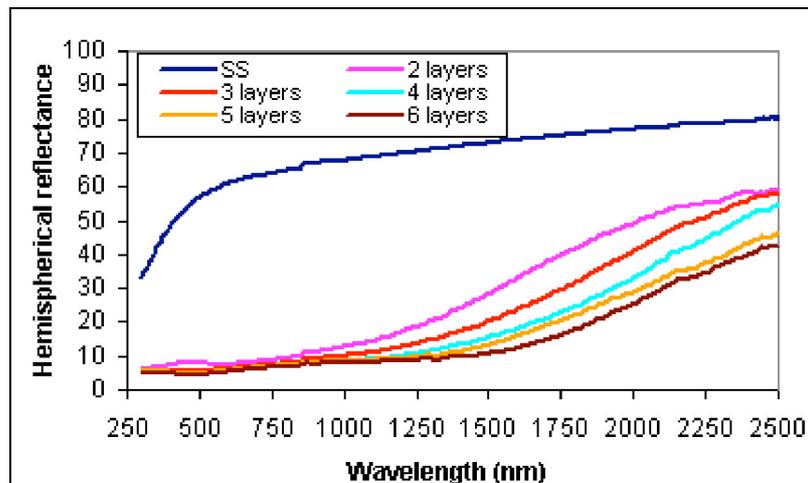


Fig. 6.5 -- Riflettanza spettrale del solkote su substrato di acciaio inox

L'acciaio inossidabile AISI 304 è stato rivestito in SOLKOTE HI/SORB-II. Dopo ogni strato, le riflessioni emisferiche solari e infrarosse sono state misurate per calcolare l'assorbimento solare  $\alpha$  e l'emissività termica  $\epsilon$  (400°C).

	2 layers	3 layers	4 layers	5 layers	6 layers
Thickness (nm)	----	800	900	----	----
$\epsilon$	0.23274044	0.23986406	0.22446309	0.252773	0.27234121
$\alpha$	0.8703696	0.8971231	0.91374536	0.91630217	0.92443275

### 6.3 MATERIALI RIFLETTENTI

La riflettanza indica, in ottica, la porzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere. È quindi rappresentata dal rapporto tra l'intensità del flusso radiante riflesso e l'intensità del flusso radiante incidente; è una grandezza adimensionale. Sottoposto ad irraggiamento termico o luminoso, ogni corpo ha una determinata proprietà di riflessione, assorbimento e trasmissione sia del calore radiativo, sia della luce. La riflettanza ( $\rho$ ) è il potere riflessivo di un corpo sottoposto a radiazione. Si tratta di un parametro percentuale adimensionale. La somma dei parametri di riflettanza ( $\rho$ ), trasmittanza ( $\tau$ ) e assorbanza ( $\alpha$ ) dà sempre 1, ossia:  $\alpha + \rho + \tau = 1$ . Ciò è dimostrabile facilmente in quanto l'intero raggio radiativo che giunge sul corpo si frammenta: una parte è riflessa, una parte trasmessa ed una parte assorbita.

La trasmittanza totale, in ottica e in spettroscopia, è la frazione di luce incidente che attraversa un campione.

$$\tau = \frac{I_1}{I_0} \quad (6.1)$$

dove  $I_0$  e  $I_1$  sono rispettivamente l'intensità della luce incidente e della luce che emerge dal campione attraversato (vedi fig. 6.6).

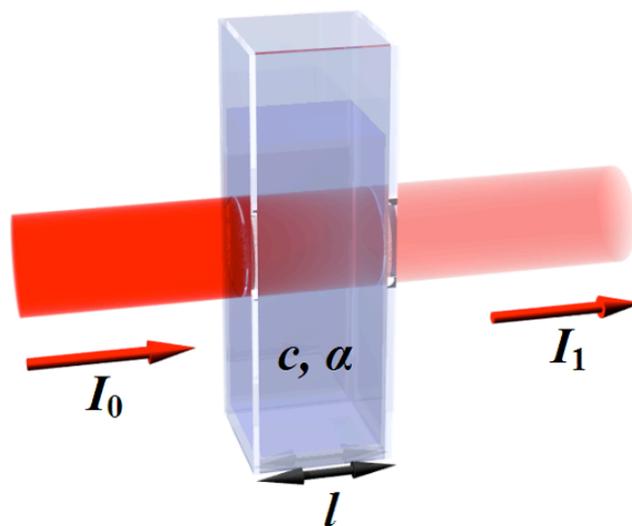


Fig. 6.6 – Frazione di energia trasmessa attraverso un materiale trasparente

Generalmente la trasmittanza è espressa come valore percentuale:

$$\tau_{\%} = \frac{I_1}{I_0} \cdot 100 \quad (6.2)$$

La trasmittanza è legata all'assorbanza dalla seguente relazione:

$$\alpha = \log_{10} \left( \frac{1}{\tau} \right) \quad (6.3)$$

L'andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per una data sostanza rappresenta lo *spettro* della sostanza stessa.

L'**assorbanza** (indicata con  $\alpha$ ) in spettroscopia è definita come il logaritmo decimale dell'inverso della trasmittanza

$$\alpha = \log_{10} \left( \frac{1}{\tau} \right) = \log_{10} \left( \frac{I_0}{I_1} \right) \quad (6.4)$$

L'assorbanza è in relazione lineare con la concentrazione di un campione - per concentrazioni sufficientemente basse - secondo la legge di Lambert-Beer. La **legge di Lambert-Beer** è una relazione empirica che correla la quantità di luce assorbita da un mezzo alla natura chimica, alla concentrazione ed allo spessore del mezzo attraversato. Quando un fascio di luce (mono- o policromatica) di intensità  $I_0$  attraversa uno strato di spessore  $l$  di un mezzo, una parte di esso viene assorbita dal mezzo stesso e una parte ne viene trasmessa con intensità residua  $I_l$ . Il rapporto tra le intensità della luce incidente e trasmessa con il mezzo attraversato è espresso dalla seguente relazione

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-k_{\lambda} l} \quad (6.5)$$

dove  $k_{\lambda}$  è detto *coefficiente di estinzione* ed è una costante tipica del mezzo attraversato per la lunghezza d'onda  $\lambda$ . Definita quindi la trasmittanza ( $\tau$ ) come il rapporto  $I_1/I_0$  e come assorbanza ( $\alpha$ ) il logaritmo decimale del reciproco della trasmittanza, la legge assume una forma ancora più semplificata:

$$\alpha = k_{\lambda}' \ell \quad (6.6)$$

che, per una soluzione, viene ulteriormente modificata in

$$\alpha = \varepsilon_{\lambda} c \ell \quad (6.7)$$

dove  $\varepsilon_{\lambda}$  è detto coefficiente di estinzione molare e  $c$  è la concentrazione molare della soluzione. Il valore di  $\varepsilon_{\lambda}$  è considerato costante per una data sostanza ad una data lunghezza d'onda, benché possa subire lievi variazioni con la temperatura. Inoltre, la sua costanza è garantita solo all'interno di un dato intervallo di concentrazioni, al di sopra delle quali la linearità tra assorbanza e concentrazione può essere inficiata da fenomeni chimico-fisici (ad esempio la precipitazione della specie chimica colorata). La misura dell'assorbanza di soluzioni chimiche a lunghezze d'onda tipiche è il principio su cui si basa l'analisi per spettrofotometria. Il valore di questi parametri è molto importante per poter definire la scelta del materiale che sarà utilizzato per le applicazioni solari. Si è cercato di valutare quei materiali aventi una riflessione totale compresa tra il 92% e il 98% ed un valore di riflessione diffusa compresa tra il 6% ed il 10%. Nella tabella 6.1 sono riportati i coefficienti di riflessione speculare per alcuni materiali.

<i>Material</i>	<i>Reflectivity</i>
Copper	0.75
Aluminized type-C Mylar (from Mylar side)	0.76
Gold	$0.76 \pm 0.03$
Various aluminium surfaces-range	$0.82 \pm 0.02$
Anodized aluminium	$0.82 \pm 0.05$
Aluminized acrylic, second surface	0.86
Black-silvered water-white plate glass	0.88
Sliver (unstable as a front surface mirror)	$0.94 \pm 0.02$

Tabella 6.1 – Coefficiente di riflessione speculare per alcuni materiali

Di seguito, in base ad alcune ricerche, sono riportate le varie aziende contattate che producono materiali riflettenti.

### 6.3.1 MATERIALI RIFLETTENTI IN ALLUMINIO

- ALANOD
- VU-DU

Sono lastre di alluminio aventi un massimo di riflessione totale del 94 %, riflessione diffusa < 9 % al costo di 20,18 Euro/m<sup>2</sup> . Sono presenti anche lastre aventi una riflessione totale dell'84% e una riflessione diffusa del 18 %, al costo di 13,53 Euro/m<sup>2</sup> .

### 6.3.2 MATERIALI RIFLETTENTI (SPECCHI)

- |                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| - AIRGLASS AB                | - BINICOM S.R.L.        |
| - FLABEG Gmbh                | - SAP PIACENZA / FAAWEB |
| - SUMESCAL s.l.              | - VENETO VETRO S.r.l.   |
| - VETRO&GLASS                | - SCHOTT                |
| - GRAVERA                    | - GLASS OF CHINA        |
| - FARGLASS                   | - CIVIDAL VETRO         |
| - SAINT GOBAIN GLASS         | - AB PANEVEZIO STIKLAS  |
| - GUARDIAN                   | - ETS ALLARD S.A.       |
| - VETROMED                   | - A.T.E. GLASS S.R.L.   |
| - GLAVERBEL                  | - EURO TEMPERA S.r.l.   |
| - F.lli DE MARINIS           | - MARICA GLASS          |
| - ZANATTA VETRO S.r.l OKALUX | - FLAGSOL               |
| - VITARELLI SPA              | - VASA ARGENTINA        |
| - HARD GLASS S.R.L.          | - EXENZA                |
| - SANGALLI GAS GROUP         | - OKALUX                |
| - ROBER GLASS                |                         |

Nella maggior parte dei casi si tratta di vetro rivestito da ossido di argento con una riflessione totale compresa tra il 94 % ed il 98 % ed una riflessione diffusa compresa tra il 2 % ed il 6 %. Il costo oscilla in base alla superficie delle lastre ed al tipo di taglio che si intende fare (circa 25 Euro/m<sup>2</sup>+ taglio).

### 6.3.3 MATERIALI RIFLETTENTI (VETRI CURVI)

- CURVET

Questo tipo di vetro è molto particolare a causa della sua lavorazione. Un vetro stratificato composto da 2 vetri accoppiati da 4 mm e specchiati ha un costo di 220 Euro. Se l'argentatura è fatta dal cliente il costo dei vetri stratificati è di 150 Euro. I valori di riflessione totale e riflessione diffusa non sono pervenuti ma rispecchiano perfettamente le caratteristiche dei vetri argentati.

#### 6.3.4 MATERIALI RIFLETTENTI (MYLAR)

- IDROPONICA
- KATCO LTD
- BENTONGRAPHICS. Inc
- SCHALLER
- INDOORLINE
- NUTRICULTURE ITD

I teli riflettenti argentati in mylar hanno caratteristiche di riflessione totale compresa tra il 25 % ed il 50 % e bassa riflessione diffusa. Il prezzo varia in funzione dei metri lineari; ad esempio un rullo da 100 m \* 1.4 m costa 2.5 Euro/m<sup>2</sup>.

#### 6.3.5 MATERIALI RIFLETTENTI (RIVESTIMENTI RIFLETTENTI)

- JML OPTICAL

Sono sottili strati di coatings per migliorare l'efficienza degli specchi. La riflessione totale dei films metallici usati nello spettro visibile vanno dal 75 % al 96 %. Nell'infrarosso l'oro può raggiungere più del 98 % come riflessione totale.

### 6.4 RICERCA E SVILUPPO

Le alternative ai riflettori di vetro (specchi) sono state in servizio ed in sviluppo per più di 15 anni. È noto che tutte le alternative identificate sono in varie fasi di sviluppo o di prova iniziale. Gli sviluppi correnti principali sono elencati sotto:

- gli specchi di vetro sono più durevoli come riflettori di vetro e relativamente leggeri rispetto al vetro spesso. Tuttavia, gli specchi sono più fragili, il che aumenta le spese di trasporto e le perdite dovute alla rottura degli specchi. Per ridurre i problemi di corrosione, i nuovi campioni sperimentali di vetro sottili recentemente sono stati messi a punto e sono sotto sperimentazione in condizioni controllate.
- 3M sta sviluppando un riflettore non metallico a sottili pellicole che usa una tecnologia radiante a più strati. La tecnologia impiega gli strati co-estrusi alternati del polimero dai differenti indici di rifrazione per generare un riflettore senza l'esigenza di uno strato riflettente del metallo. I programmi di 3M sviluppano un riflettore solare con gli strati UV migliorati della selezione e un hardcoat di strato superiore per migliorare la durevolezza esterna.
- ReflecTech e NREL sta sviluppando insieme un materiale laminato del riflettore che usa un riflettore commerciale di polimero argentato come materiale base con

una pellicola a selezione UV laminata ad esso per provocare la durezza esterna. I risultati della prove iniziali ad esposizione accelerata del prototipo sono stati promettenti, anche se è necessario un lavoro supplementare sulla produzione del materiale. Il materiale inoltre trarrebbe beneficio dal rivestimento duro per la lavabilità migliore.

- Luz Industries Israel ha generato una superficie frontale dello specchio che consiste di un substrato polimerico con uno strato di adesione del dielettrico o del metallo, uno strato riflettente d'argento e un rivestimento duro superiore, denso e protettivo.
- SAIC della McLean, Virginia e NREL stanno sviluppando un materiale chiamato *Super Thin Glass*. Questo è anche un concetto della superficie frontale dello specchio con un rivestimento duro protettivo.
- Alanod della Germania ha sviluppato un riflettore con superficie frontale alluminizzata che utilizza un substrato di alluminio lucidato, uno strato riflettente di alluminio aumentato e uno strato superiore ossidato protettivo dell'allumina. Questi riflettori hanno durezza inadeguata negli ambienti industriali. Un prodotto con un rivestimento polimerico per proteggere lo strato dell'allumina ha migliorato la durezza.

La tabella 6.2 ricapitola le caratteristiche delle tecnologie alternative del riflettore. Probabilmente, il vetro spesso rimarrà il metodo preferito per i campi parabolici su grande scala, anche se le tecnologie alternative del riflettore possono divenire più importanti in futuro.

	<b>Riflettanza (%)</b>	<b>Costo (\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Caratteristiche</b>
Flabeg Thick Glass	94	40	Costo, rottura
Thin glass	93-36	15-40	Maneggiamento, rottura
All-Polymeric	99	10	Il rivestimento protettivo UV ha bisogno di un rivestimento duro
ReflecTech	>93	10-15	Rivestimento duro e produzione migliorata
Solel FSM	>95	-	Solel ha una durezza sconosciuta attualmente
SAIC Super Thin Glass	>95	10	Produzione scale-up
Alanod	90	<20	Riflettanza discreta

Tabella 6.2 – Riflettanza e costo di alcuni materiali utilizzabili per il riflettore

## 6.5 CONFRONTI

In molte applicazioni di energia solare, sia solare termico che fotovoltaico, è utile usare i concentratori economici per amplificare l'irradianza sul ricevitore. A causa del loro basso costo e della loro flessibilità nella lavorazione, l'alluminio anodizzato o ricoperto da un foglio è spesso usato come concentratore. Basti pensare che l'alluminio è il metallo più abbondante in natura e il terzo più presente sulla crosta terrestre. I riflettori di alluminio offrono spesso una riflessione solare iniziale del 87 - 91 %. Essi hanno buone qualità meccaniche e sono facili da riciclare, ma la poca durata della riflessione a "lungo periodo" è un problema importante. Se una superficie di alluminio non protetta è esposta all'esterno, le relative proprietà ottiche inizialmente favorevoli degraderanno severamente in un paio d'anni. Il comportamento dell'alluminio anodizzato esposto all'aria è migliore dell'alluminio non trattato, a causa dello strato  $Al_2O_3$ , che protegge il metallo da ulteriori reazioni,; l'anodizzazione è quindi spesso utilizzata per prolungare la vita dei riflettori di alluminio.

Nel 2004 il Dipartimento di Ingegneria di Upsala ha pertanto realizzato un confronto tra sei materiali sul loro comportamento ottico e la loro reazione agli agenti esterni. Le superfici dei campioni sono state ispezionate usando la profilometria e la microscopia ottica. Gli spettri totali e speculari di riflessione sono stati misurati usando la spettrofotometria ed i valori solari che tengono conto della riflessione di riflessione sono stati calcolati prima e dopo l'invecchiamento dei campioni. Riflettori del vetro argentato, alluminio anodizzato, alluminio anodizzato rivestito da film sottile e l'alluminio arrotolato-laccato hanno sostenuto bene la prova di accelerazione, mentre un riflettore di alluminio laminato sottoposto ad evaporazione che era inizialmente speculare, è diventato diffuso. La tabella 6.3 ricapitola i dati per i sei differenti materiali del riflettore testati. L'informazione del prezzo è approssimativa e dipende dal tipo, dalla quantità e su quale mercato i riflettori sono comprati. Il numero esatto di pellicole, come pure la composizione e lo spessore delle pellicole sottili sui campioni 3 e 4, non è conosciuto. Lo strumento utilizzato per la caratterizzazione ottica, nel range di lunghezza d'onda UV-NIR, è stato uno spettrofotometro dotato di una sfera integrata. Le misure sono state realizzate ogni quinto di manometro per le lunghezze d'onda tra 200 e 2500 nanometri. Questo intervallo di lunghezza d'onda è stato ritenuto sufficientemente largo per la descrizione ottica coprendo il 98.5% dell'energia solare terrestre totale.

NUMERO CAMPIONE	MATERIALE	PROPRIETÀ MECCANICHE	PREZZO PER m <sup>2</sup>
1	Specchio d'argento evaporato su vetro di 1.2 mm	Fragile, pesante	15–40 euro
2	Alluminio anodizzato	Peso medio	9 euro
3	Film sottile (TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /Al)-rivestito di alluminio anodizzato	Peso medio	13 euro
4	Film sottile (TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /Al)-rivestito con alluminio anodizzato	Peso medio	13 euro
5	Rivestimento protettivo PMMA laminato	Flessibile, peso leggero	5 euro
6	Alluminio laccato-rotolato	Flessibile, peso leggero	2-3 euro

Tabella 6.3 – Materiali riflettenti utilizzati nei test

**Campione 1:** Superficie posteriore di specchio d'argento evaporato su vetro di 1.2 mm con la parte posteriore dello strato d'argento protetto da vernice.

**Campione 2:** Foglio di alluminio anodizzato.

**Campione 3:** Film sottile disponibile sul mercato (TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al) rivestito da alluminio anodizzato con protezione della superficie.

**Campione 4:** Film sottile disponibile sul mercato (TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al) rivestito da alluminio anodizzato con protezione della superficie del polimero.

**Campione 5:** Foglio di alluminio evaporato protetto da 60 mm di PPA.

**Campione 6:** Foglio di 9 mm di alluminio laccato-rotolato laminato su 250 mm di PET.

La riflessione speculare è stata calcolata dalla totale misurata e dalla riflessione diffusa secondo la relazione:

$$\rho_{\text{spec}}(\lambda) = \rho_{\text{tot}}(\lambda) - \rho_{\text{diff}}(\lambda) \quad (6.8)$$

$$\rho_{\text{tot}}^{\text{solar}} = \frac{\int_{305\text{nm}}^{2537\text{nm}} \rho_{\text{tot}}(\lambda)G(\lambda)d\lambda}{\int_{305\text{nm}}^{2537\text{nm}} G(\lambda)d\lambda} \quad (6.9)$$

$$\rho_{\text{spec}}^{\text{solar}} = \frac{\int_{305\text{nm}}^{2537\text{nm}} \rho_{\text{spec}}(\lambda)G(\lambda)d\lambda}{\int_{305\text{nm}}^{2537\text{nm}} G(\lambda)d\lambda} \quad (6.10)$$

$$\rho_{\text{tot}}^{\text{PV}} = \frac{\int_{305\text{nm}}^{1100\text{nm}} \rho_{\text{tot}}(\lambda)G(\lambda)d\lambda}{\int_{305\text{nm}}^{1100\text{nm}} G(\lambda)d\lambda} \quad (6.11)$$

$$\rho_{\text{spec}}^{\text{PV}} = \frac{\int_{305\text{nm}}^{1100\text{nm}} \rho_{\text{spec}}(\lambda)G(\lambda)d\lambda}{\int_{305\text{nm}}^{1100\text{nm}} G(\lambda)d\lambda} \quad (6.12)$$

Di seguito si riporta una tabella (tabella 6.4) che mostra le proprietà ottiche misurate dei sei materiali differenti del riflettore, prima e dopo 2000 ore di invecchiamento, così come dopo invecchiamento esterno:

Sample number	Initially				After 2000h of accelerated ageing				After 9 months of outdoor exposure			
	$R_{\text{tot}}^{\text{Solar}}$	$R_{\text{spec}}^{\text{Solar}}$	$R_{\text{tot}}^{\text{PV}}$	$R_{\text{spec}}^{\text{PV}}$	$R_{\text{tot}}^{\text{Solar}}$	$R_{\text{spec}}^{\text{Solar}}$	$R_{\text{tot}}^{\text{PV}}$	$R_{\text{spec}}^{\text{PV}}$	$R_{\text{tot}}^{\text{Solar}}$	$R_{\text{spec}}^{\text{Solar}}$	$R_{\text{tot}}^{\text{PV}}$	$R_{\text{spec}}^{\text{PV}}$
1	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	n. a. <sup>a</sup>	n. a.	n. a.	n. a.
2	0.88	0.87	0.87	0.85	0.88	0.86	0.87	0.85	0.83	0.79	0.82	0.77
3	0.89	0.87	0.88	0.86	0.87	0.86	0.86	0.85	0.81	0.68	0.80	0.69
4	0.90	0.87	0.88	0.86	0.88	0.86	0.87	0.85	0.86	0.82	0.85	0.81
5	0.85	0.79	0.83	0.78	0.82	0.07	0.80	0.07	0.83	0.77	0.81	0.75
6	0.85	0.58	0.83	0.55	0.82	0.51	0.80	0.48	0.82	0.55	0.80	0.52

Tabella 6.4 – Proprietà ottiche sperimentali dei materiali impiegati (per il riflettore)

I risultati dalle misure ottiche e dalle prove di invecchiamento accelerato indicano che gli specchi di vetro, l'alluminio anodizzato ed i riflettori sottili dell'alluminio rivestiti di pellicola hanno buone proprietà ottiche iniziali per le applicazioni di energia solare e sostengono la prova accelerata senza degradazione significativa. I riflettori laminati senza chiusura a tenuta si deteriorano più velocemente nel calore umido che gli specchi metallici; ciò è dovuto all'umidità che si diffonde fra gli strati differenti. Inoltre, alcuni riflettori

laminati e a film sottile hanno strati riflettenti sottili che degradano velocemente se la protezione dall'umidità è danneggiata. I riflettori laccati sottoposti ad invecchiamento accelerato si comportano meglio rispetto ai riflettori laminati; ciò è dovuto al contatto chiuso tra lo strato protettivo laccato e quello riflettente che rende difficile la penetrazione dell'umidità nel metallo. I materiali laccati e laminati si comportano meglio all'invecchiamento esterno rispetto alle prove di invecchiamento accelerato; ciò è dovuto ai rivestimenti che proteggono lo strato riflettente da umidità, abrasione e sostanze inquinanti. I riflettori laminati dell'alluminio sul PET, con riflessione totale dell'82-83% dopo esposizione esterna, sono interessanti per i sistemi a bassa concentrazione, nei quali i riflettori con più bassa riflessione speculare possono essere tollerati, ed a causa del loro basso costo, possono essere redditizi come riflettore-ripetitore statico per le applicazioni di energia solare. I riflettori di alluminio anodizzato nudo e di alluminio anodizzato rivestito di pellicola sottile non hanno avuto un buon comportamento all'invecchiamento esterno. Una spiegazione è che le sostanze inquinanti dell'aria aiutano la corrosione del metallo riflettente durante l'esposizione esterna. La riflessione solare totale e speculare iniziale dell'alluminio anodizzato del foglio era rispettivamente dell'88% e dell'87%. Dopo nove mesi di invecchiamento esterno, la riflessione solare totale era dell'83% e la riflessione speculare era del 79%. Dopo 18 anni di esposizione esterna in Svezia, la riflessione speculare di un campione di alluminio anodizzato era soltanto del 18% ed è così evidente che l'alluminio anodizzato non sostiene l'esposizione di lunga durata ad umidità. La degradazione veloce della riflessione speculare dell'alluminio anodizzato, rispetto, per esempio, agli specchi d'argento, rende l'alluminio anodizzato inadatto all'inseguimento per applicazioni ad alta concentrazione, a meno che sia protetta da una verniciatura o da una lacca. Se i riflettori anodizzati dell'alluminio sono coperti da una verniciatura, risultano protetti dalla pioggia e dalla neve e risulta fornita la ventilazione sufficiente per rimuovere l'umidità; le loro prestazioni ottiche di lunga durata, in tal caso, possono essere migliorate considerevolmente. La riflessione totale dell'alluminio anodizzato nudo non diminuisce velocemente quanto la riflessione speculare e quindi scoprire l'alluminio anodizzato potrebbe essere redditizio per i sistemi con i rapporti di concentrazione moderati, dove una riflessione speculare più bassa può essere tollerata. In conclusione si evince che processi di degradazione differenti governano la degradazione del metallo nudo e dei riflettori laccati o laminati e che è necessaria una comprensione completa dei meccanismi che

governano la corrosione del materiale specifico del riflettore per interpretare correttamente i risultati dell'invecchiamento accelerato.

## 6.6 MATERIALI RIFLETTENTI DI PROVA UTILIZZATI NELLE PARABOLE

Diversi materiali semplici “di prova” possono essere utilizzati per la riflessione solare sulle parabole. In modo rapido e poco costoso una parabola può essere rivestita da Mylar, fogli di alluminio e specchi. La riflessione risulta essere abbastanza buona in ognuno di questi casi.

### 6.6.1 FOGLI DI ALLUMINIO

L'alluminio si adatta molto bene alla forma della parabola ed è di facile impiego (vedi foto 1, 2, 3). La riflessione dei fogli non è però molto elevata.



Foto n. 1



Foto n. 2



Foto n. 3

### 6.6.2 MYLAR

Il Mylar è un materiale molto utilizzato per i cibi e quindi di comodo utilizzo (foto 4 e 5). La riflessione totale in questo caso risulta essere circa il 70 %.



Foto n. 4



Foto n. 5

### 6.6.3 SPECCHI

Sebbene gli specchi aderiscano in maniera peggiore rispetto ai fogli di alluminio e al mylar, essi rappresentano però il rivestimento migliore per le parabole grazie alla loro riflessione totale elevata ( $> 90\%$ )(foto 6 e 7). Tramite simulazioni ottiche sviluppate con un simulatore si è risaliti alla loro dimensione ottimale, che non dovrebbe essere superiore alla dimensione di  $10*10$  cm, in modo da determinare un fuoco abbastanza preciso.



Foto n. 6



Foto n. 7

## 6.7 SPERIMENTAZIONE

Ai fini sperimentali è stato realizzato dall'Innova nel mese di novembre 2007 un prototipo di parabola rivestita di specchi da 10\*10 cm di circa 10 m<sup>2</sup> (vedi foto 8, 9 e 10).

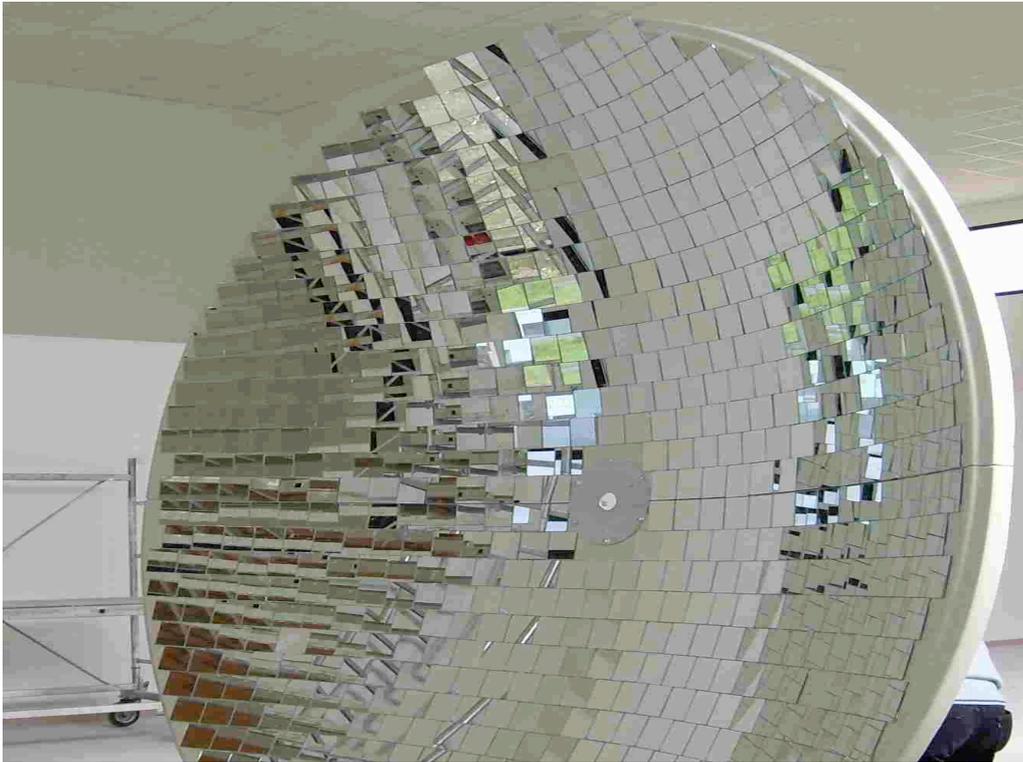
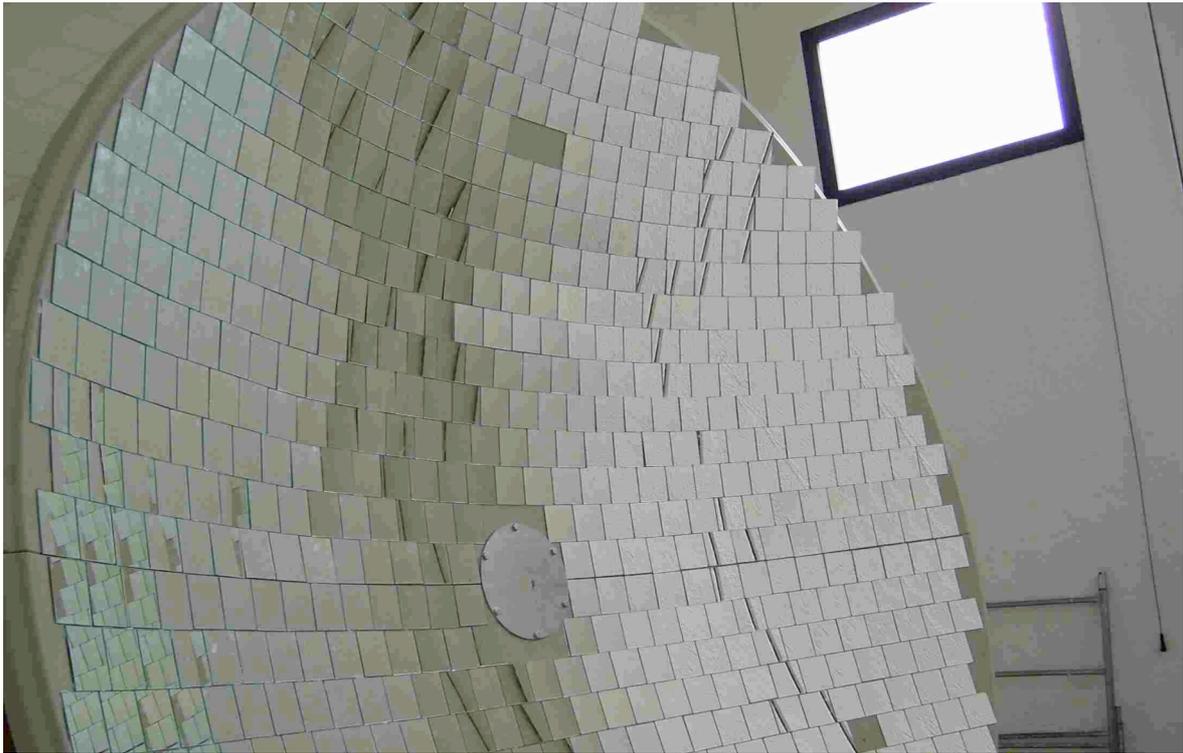


Foto n. 8



Foto n. 9



*Foto n. 10*

Su tale prototipo, nella prima metà di novembre sono stati fatti dei test sulla concentrazione solare utilizzando come ricevitore una piastra circolare di raggio 15 cm (vedi foto 11).



*Foto n. 11*

I materiali da porre sul ricevitore dovevano presentare una resistenza termica capace di resistere a temperature di almeno 500°C per più ore possibili senza subire degradazioni; inoltre l'assorbimento richiesto doveva essere almeno del 90%. Pertanto i materiali testati sul ricevitore sono stati una lana ceramica assorbente, una lega di acciaio e lo spray solare Solkote fatto pervenire dalla Solec (USA). La temperatura del ricevitore è stata rilevata con l'ausilio di tre termocoppie posizionate in maniera omogenea sulla piastra assorbente. I tests sono stati effettuati il 12-13-14 novembre 2007 (condizioni di cielo sereno e giornate abbastanza soleggiate) dalle ore 10 alle ore 16.00 circa (vedi tabelle 6.4, 6.5, 6.6).

Temperatura (°C)	Ora
196	10.30
267	11.00
346	11.30
424	12.00
512	12.30
505	13.00
494	13.30
467	14.00
402	14.30
386	15.00
312	15.30

*Tabella 6.4 – Temperature rilevate nel primo giorno di test*

Temperatura (°C)	Ora
201	10.00
232	10.30
278	11.00
366	11.30
476	12.00
522	12.30
551	13.00
501	13.30
486	14.00
432	14.30
379	15.00
322	15.30
301	16.00

*Tabella 6.5 – Temperature rilevate nel secondo giorno di test*

Temperatura (°C)	Ora
197	10.00
228	10.30
268	11.00
357	11.30
464	12.00
516	12.30
543	13.00
492	13.30
474	14.00
423	14.30
364	15.00
314	15.30
297	16.00

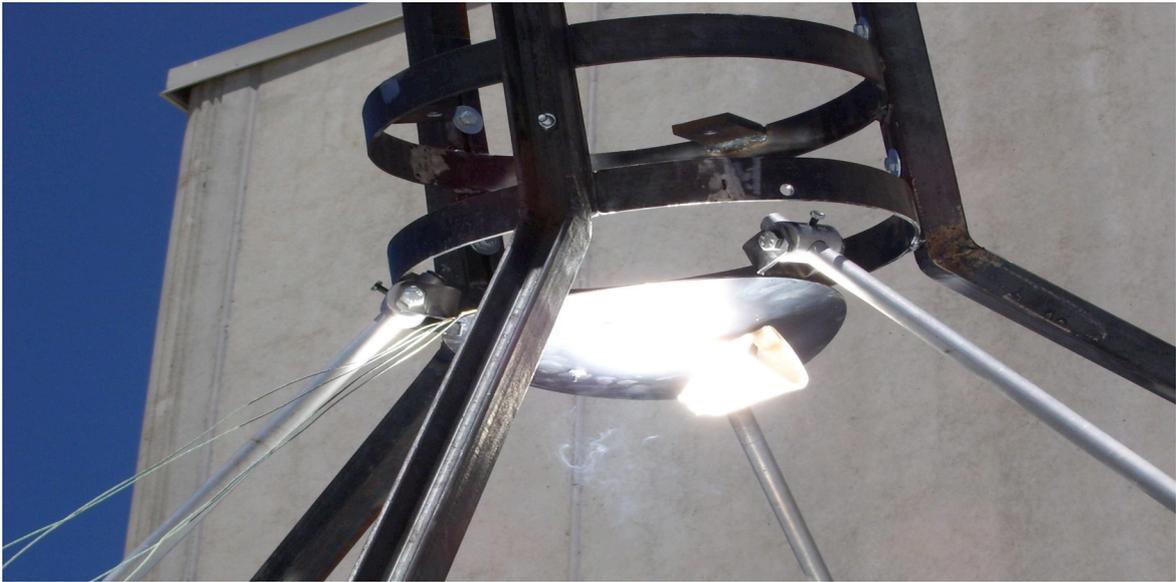
Tabella 6.6 – Temperature rilevate nel terzo giorno di test

La temperatura media di focalizzazione è risultata essere tra 200 e 550°C circa, avendo un picco di 551 °C alle ore 13.00 del secondo giorno di test (13 novembre)(vedi foto 12).



Foto n. 12

Il primo giorno di test è servito a testare la lana ceramica assorbente e la lega in acciaio (posizionate sulla piastra circolare assorbente), ma in entrambi i casi i risultati non sono stati soddisfacenti a causa delle alte temperature (oltre 500°C) avute in un arco di tempo prolungato. In particolare la lana ceramica assorbente si è degradata (bruciandosi) dopo poche ore di esposizione, risultando quindi non adatta alle temperature di sperimentazione (vedi foto 13 e 14).

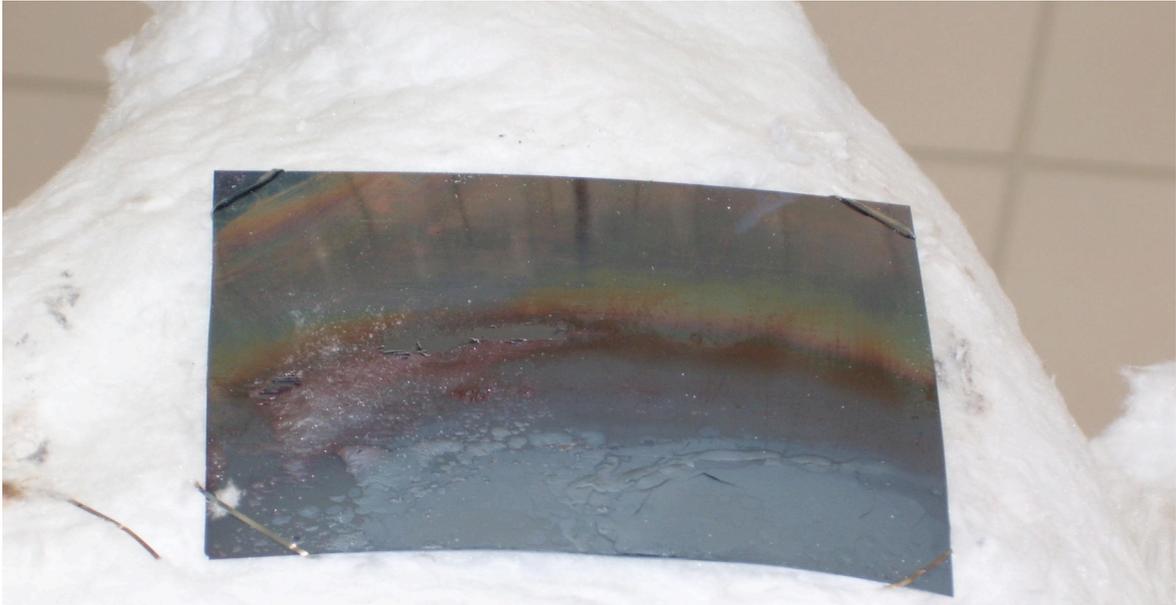


*Foto n. 13*



*Foto n. 14*

La lega in acciaio, invece, ha mostrato una resistenza migliore della lana ceramica ma ha subito deformazioni abbastanza rilevanti nei punti di maggior concentrazione della piastra assorbente (vedi foto 15).



*Foto n. 15*

Il secondo giorno è stato pertanto testato lo spray solare Solkote di cui è stata rivestita la piastra assorbente. Dopo circa sei ore di focalizzazione (dalle ore 10 alle ore 16.00) si è potuto notare che la piastra rivestita con Solkote ha resistito abbastanza bene alle temperature elevate (la temperatura massima misurata è stata di 551°C) e soprattutto non ha evidenziato bruciature e degradazione dello spray solare (vedi foto 16 e 17).



Foto n. 16

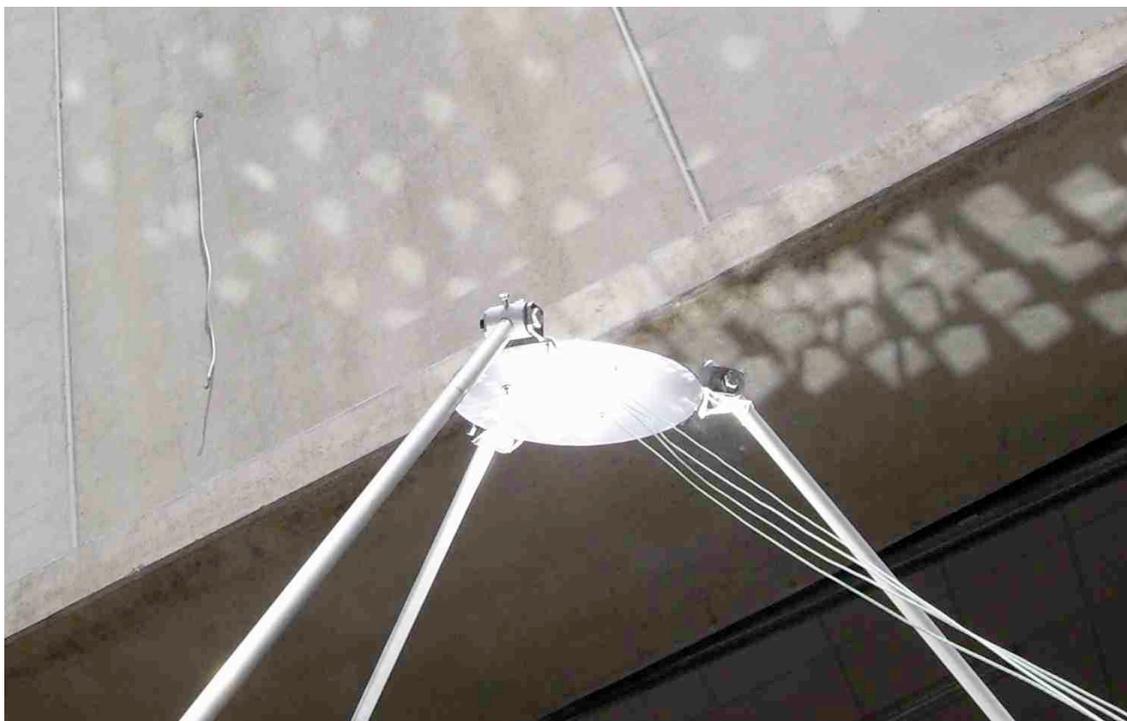


Foto n. 17

Al fine di confermare l'esito positivo del test il giorno seguente (14 novembre 2007) è stato effettuato un nuovo test con lo spray Solkote. Le ore di focalizzazione sono state uguali al giorno precedente e si è potuto notare che anche in questo caso la piastra non ha mostrato degradazioni (vedi foto 18).



Foto n. 18

Pertanto la sperimentazione effettuata ha mostrato ottime indicazioni sulle scelte fatte; infatti gli specchietti 10\*10 cm utilizzati per rivestire la parabola hanno determinato un'ottima focalizzazione, fornendo un'immagine focale circolare e ben definita. Nel caso dei materiali assorbenti, la lana ceramica e la lega in acciaio non hanno mostrato la resistenza necessaria, mentre la scelta di utilizzare lo spray solare Solkote si è dimostrata soddisfacente e ha mostrato ottimi riscontri nella sperimentazione.

## 6.8 CONCLUSIONI

Lo stage effettuato all'Innova mi ha permesso di sviluppare molte competenze, sia teoriche che pratiche. Nella prima fase è stato affrontato lo studio ottico dei materiali, il quale è stato fondamentale per maturare le conoscenze necessarie alla determinazione del problema. Successivamente è stata sviluppata una “ricerca commerciale” mirata ai materiali aventi le caratteristiche ottiche emerse nella prima fase; tale ricerca è risultata molto importante in quanto ha permesso di creare un’interfaccia con le varie aziende contattate. Si è creata in alcuni casi una vera e propria collaborazione che ha portato a risultati più che positivi; nel caso degli specchietti che hanno rivestito la parabola, ad esempio, lo spessore “ottimo” degli stessi è stato deciso insieme all’azienda locale che li ha costruiti, a seguito di alcune prove ottiche. L’iter effettuato è risultato di grande interesse in quanto è stata determinata la progettazione del corpo riflettente (gli specchietti) e la sua simulazione ottica (tramite alcuni software) passando repentinamente alla fase realizzativa; è stato pertanto possibile sviluppare competenze legate alla progettazione, simulazione e lavorazione degli specchi, al loro dimensionamento e al loro fissaggio. Anche nel caso dei materiali assorbenti vi è stata un’importante collaborazione con le ditte contattate; in particolar modo è risultata molto utile l’interfaccia avuta con la Solec (USA), che ha evidenziato le problematiche dell’utilizzo dello spray solare Solkote sul ricevitore della parabola; in particolar modo è stato deciso di comune accordo di effettuare più verniciature di Solkote sul ricevitore, in modo da ottimizzare la resistenza alla degradazione del ricevitore e non perdere le caratteristiche di assorbimento dello stesso.

Molto importante, inoltre, è risultata essere la fase di sperimentazione; sono state sviluppate le conoscenze sui sensori di temperatura (termocoppie), sul rilevamento dei dati (tester), nonché sulla resistenza dei materiali alle alte temperature e sulle normative di sicurezza per sperimentazioni di questo tipo.

Lo stage effettuato presso l'Innova Technology Solutions ha mostrato pertanto un percorso completo sulla caratterizzazione dei materiali selettivi, affrontando lo studio sulla riflessione e dell'assorbimento solare, la ricerca dei prodotti esistenti sul mercato, la progettazione e simulazione ottica dei materiali presi in esame, l'interfaccia con alcune società nazionali ed internazionali e soprattutto la sperimentazione, che ha dato risposte molto valide utilizzando i materiali scelti dopo un'attenta analisi.