

Sommario

Introduzione	2
1 FASI DEL PROGETTO	2
1.1 Scelta degli specchi.....	2
1.1.1 Test di rugosità	3
1.1.2 Test di planarità dei singoli specchi.....	5
1.2 Il sistema di puntamento degli specchi	10
1.2.1 L'algoritmo per la posizione solare: spa.c	10
1.2.2 Estensione di spa.c	11
1.2.3 Valutazione dei parametri atmosferici.....	12
1.3 Scelta del tipo di colla e tecnica delle modalità di incollaggio	14
1.4 Materiali di supporto per lo specchio primario e secondario	16
1.4.1 Struttura di sostegno	18
1.5 sistema per la misura della forma dello specchio curvato	23
1.6 sistema per la misura della focale	29
1.6.1 Principi del Test di Roddier	29
1.7 Prototipi in legno MD	33
1.7.1 Cornice in MD e specchio	33
1.7.2 Cornice in MD, specchio, croci in MD.....	34
1.7.3 Cornice in MD, specchio superiore ed inferiore, supporto centrale	34
2 STUDIO DI FATTIBILITÀ DI SISTEMI OTTICI AVANZATI PER LA CONCENTRAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE E VALUTAZIONE DELLE POTENZIALITÀ DI UTILIZZO	36
3 VALUTAZIONE COSTI/BENEFICI	38
3.1 Effetti dell'ombreggiamento: Fotosintesi e Luce	38
3.2 Benefici Ambientali.....	39
Appendice - Il codice Perl	40

Introduzione

L'unità INAF Istituto Nazionale di Astrofisica ha sviluppato un progetto di ricerca denominato STAR finalizzato alla realizzazione di un concentratore solare. L'insieme delle attività svolte per la ricerca dei materiali e lo sviluppo delle tecniche/tecnologie costruttive sono state coordinate dall'Ing. Miglietta Luciano e dal Dott. Salinari Piero. Il progetto star è stato sviluppato su più fasi con l'obiettivo di riuscire a realizzare un prototipo del concentratore solare da mettere in esercizio sulla terrazza di proprietà di INAF Firenze.

1 FASI DEL PROGETTO

La prima parte del progetto è stata incentrata sullo studio degli specchi e delle loro caratteristiche fisiche; l'Ing. Benvenuti e la Dott.ssa Magrini hanno intrapreso un'attività di ricerca sul mercato di specchi in grado di soddisfare le caratteristiche tecniche richieste da progetto. Nello specifico le condizioni al contorno che hanno condizionato e indirizzato le scelte sono sintetizzabili su specchi basati con tecniche costruttive "secondo metodo di stiramento" e "metodo float". Rappresenta un parametro prevalente nella scelta dello specchio anche la tipologia dell'argentatura che può essere fatta a bagno, a spruzzo o a pannello. L'attività di ricerca dei materiali è stata sviluppata inoltre anche per quanto concerne la scelta del materiale di supporto per gli specchi e le tipologie di collante da utilizzare.

Una volta reperiti i materiali sono stati attivati test di laboratorio volti alla verifica delle caratteristiche dei prodotti soffermandosi principalmente sui test di rugosità e di planarità. L'ausilio di un software ha permesso inoltre di simulare la posizione del sole con una precisione congrua con quanto definito dall'Error Budget del progetto; le fasi citate sono di seguito riportate e approfondite nei paragrafi seguenti.

1.1 Scelta degli specchi

Per ottenere rendimenti tecnico-qualitativi elevati si utilizzano specchi di spessore ultrasottile (0,85 - 0,87 mm) riducendo al massimo la possibilità di assorbimento.

Lo specchio in esame si ottiene a seguito del trattamento di argentatura del vetro: consiste cioè, nella formazione di un sottile strato d'argento sulla superficie di una lastra di vetro dalle caratteristiche in tabella, immersa in una soluzione di nitrato d'argento, successivamente alla

ramatura galvanica per la protezione dello strato d'argento e applicazione di una vernice protettiva, a base di una miscela di resine alchidiche-melamminiche, può essere di due tipi: termoidurente con pigmenti di piombo o senza.

VETRI ULTRASOTTILI	
Dimensioni	
Float (spessore mm)	Misure (cm)
0,85	60 x 160
1	60 x 160

1.1.1 Test di rugosità

Al fine di verificare la bontà degli specchi si è pensato di fare verifiche a campione sulla qualità degli specchi.

Il procedimento di misura della rugosità consiste nella registrazione del profilo della superficie ottenuto lungo una determinata linea di misura; tale profilo viene poi analizzato definendo un parametro numerico che costituisce la misura della rugosità. Parte fondamentale del processo di calcolo dei vari parametri di rugosità è l'operazione di filtraggio che consente di ottenere una misura della sola qualità della superficie, depurata dagli effetti che gli errori di geometria del pezzo hanno sul profilo misurato.

La misura della rugosità Ra, espressa in micron, è il valore medio aritmetico degli scostamenti del profilo reale della superficie rispetto alla linea media. Il valore Ra non è però sufficiente per definire completamente le caratteristiche morfologiche della superficie, in quanto profili dagli andamenti differenti dallo stesso scostamento medio aritmetico presenteranno lo stesso valore di Ra; per tale motivo si sono valutati ulteriori parametri, come Rq, media quadratica degli scostamenti dei punti del profilo dalla linea media.

PRECISAZIONI TECNICHE

Parametri di misurazione del tester	Parametri calcolati: Ra - Rz - Ry- Rq - Rp - Rm - Rt - R3z - Rmax - Sk - S - Sm - tp
Campi di misurazione	Ra, Rq: 0,005 ... 16,00 µm Rz, Rt: 0,020 ... 160,0 µm
Risoluzione	0,001 µm fino al valore di misura di 10 µm 0,01 µm fino al valore di misura di 100 µm 0,1 µm per un valore di misura superiore a 100 µm
Precisione	classe 2 secondo la normativa DIN 4772 (> ±10 %)
Unità	µm / µinch (selezionabile)
Display	LCD, altezza delle cifre di 10 mm con illuminazione dello sfondo
Lunghezza delle onde limite (3) (cutt-off length)	0,25 mm; 0,8 mm e 2,5 mm con avviso automat. se si seleziona una lunghezza d'onda erronea
Velocità di palpazione	0,135 mm/s con una lunghezza d'onda limite: 0,25 mm 0,5 mm/s con una lunghezza d'onda limite: 0,8 mm 1 mm/s con una lunghezza d'onda limite: 2,5 mm Velocità di retrocesso 1 mm/s
Filtro digitale	RC: filtro a 2 stadi differenti PC-RC: metodo RC e correzione della fase GAUSS D-P: profilo non filtrato (algor. dei minimi quadrati)

Per misurare e valutare le microirregolarità degli specchi in esame si è utilizzato il rugosimetro mod. TR200 che è uno strumento in grado di misurare con una precisione del millesimo di micron. Tale strumento è composto dalle seguenti parti:

- Tastatore che è la parte a diretto contatto con la superficie da misurare e interpreta le variazioni di altezza misurate lungo l'asse di acquisizione come variazioni di tensione e posizione del raggio riflesso sulla superficie da tastare.

- Unità elettronica che gestisce la movimentazione dell'unità di traslazione e il trattamento dei dati rilevati tramite il tastatore.

- Unità di traslazione (traslatore) che è un'unità motorizzata fissata tramite apposito supporto al tastatore

che provvede a muovere quest'ultimo lungo l'asse di misura orizzontale per poter acquisire i dati della superficie.

Sono state effettuate prove su 12 campioni di specchio sottile (0.85 mm), in varie condizioni, di seguito si riporta in breve i risultati ottenuti dei parametri più significativi:

CAMPIONE 1 = prova su specchio semplice - Filtro RC - tastatore posizionato al centro

CAMPIONE 2 = specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato al centro

CAMPIONE 3= specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato su lato corto (filobordo)

CAMPIONE 4 = specchio incollato su schiuma di vetro sorretto manualmente

CAMPIONE 5 = specchio incollato su lastra di Al - tastatore posizionato su lato corto (filobordo)

CAMPIONE 6 = specchio incollato su lastra di Al - tastatore posizionato su lato lungo (filobordo)

CAMPIONE 7 = prova su specchio semplice - tastatore posizionato lungo il lato corto

CAMPIONE 8 = specchio incollato su lastra di Al - Filtro GAUSS

CAMPIONE 9 = specchio incollato su lastra di Al - tastatore posizionato al centro

CAMPIONE 10 = specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato al centro - Filtro GAUSS

CAMPIONE 11 = specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato al bordo - Filtro GAUSS

CAMPIONE 12 = prova su specchio semplice - tastatore al centro - Filtro GAUSS

		CAMPIONI					
PARAMETRI		1	2	3	4	5	6
μm	Ra deviazione aritmetica	0.001	0.005	0.002	0.018	0.001	0.002
	Rq scost. quadratico medio	0.004	0.010	0.004	0.024	0.003	0.003
	Rz media dei 5 valori max e min	0.000	0.006	0.002	0.004	0.008	0.003
	Ry max dist. tra picco e valle	0.20	0.04	0.027	0.122	0.0024	0.15
	Rt max lungo x tra picco e valle	0.029	0.119	0.004	0.2	0.0029	0.23
mm	S spaziatura media tra i picchi (dal vertice)	0.0069	0.002	0.0266	0.11	0.003	0.14
	Sm spaziatura media tra i picchi (media)	0.625	2	1.3	2.8	0.4	0.5
	Sk asimmetria del profilo	2.774	3.08	2.027	1.066	2.54	1.8

		CAMPIONI					
PARAMETRI		7	8	9	10	11	12
μm	Ra deviazione aritmetica	0.005	0.007	0.001	0.005	0.007	0.004
	Rq scost. quadratico medio	0.001	0.005	0.004	0.010	0.034	0.007
	Rz media dei 5 valori max e min	0.002	0.004	0.006	0.006	0.002	0.004
	Ry max dist. tra picco e valle	0.20	0.04	0.874	0.089	0.051	0.013
	Rt max lungo x tra picco e valle	0.029	0.119	0.069	0.004	0.026	0.037
mm	S spaziatura media tra i picchi (dal vertice)	0.002	0.007	0.003	0.14	0.06	0.08
	Sm spaziatura media tra i picchi (media)	0.04	0.095	0.4	0.5	0.23	0.09
	Sk asimmetria del profilo	2	1.047		1.98	2.74	2.06

Tutti I campioni di specchio prodotto con vetro float si sono quindi rivelati adeguati per quanto riguarda la microrugosità superficiale, indipendentemente dai processi di incollaggio e dalla tecnica di misurazione.

1.1.2 Test di planarità dei singoli specchi

Una ulteriore prova di verifica della qualità degli specchi è stata quella di verificare la planarità.

In uno specchio piano un fascio di raggi luminosi paralleli viene deviato, ma si mantiene il parallelismo dei raggi; ciascun raggio che colpisce lo specchio viene riflesso di un angolo che è identico a quello di incidenza.

Per verificare questo fenomeno, e quindi la planarità degli specchi, si è eseguita una prova simile al Test di Hartmann con qualche variazione.

La strumentazione utilizzata è stata disposta su un tavolo ottico e risulta costituita, in successione, da:

a) da una sorgente di luce posta a 90° rispetto all'asse ottico;

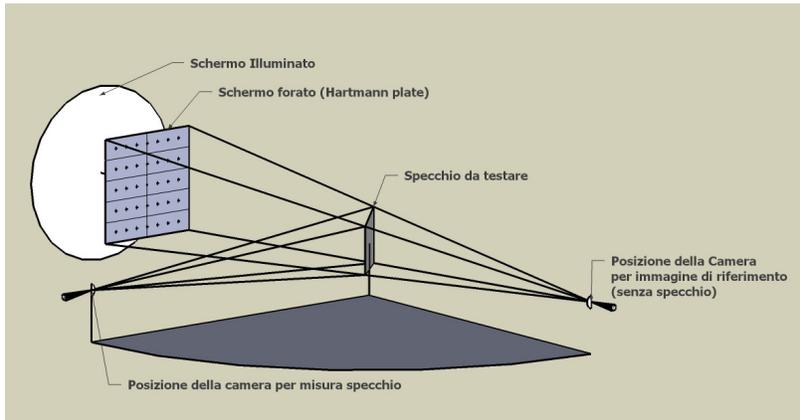
b) da un reticolo di fori di circa 1 - 1.5 mm ottenuti da un cartone nero che ricopre interamente la fonte luminosa ad una distanza

tra loro irregolare ma mediamente di circa 0.5 - 1.5 cm

disposti in maniera casuale; c) da un sistema camera Reflex con relativo zoom fotografico (formato di output: RAW: Il formato .RAW, che significa

grezzo, non ancora lavorato, fa riferimento all'immagine non ancora elaborata proveniente direttamente dal sensore della macchina digitale memorizzando direttamente i dati provenienti dal sensore nella scheda di memoria oltre che garantire una definizione del colore superiore perché i dati sono memorizzati a 16 bit contro gli 8 bit del formato jpg.);

d) da un sistema di ancoraggio meccanico per lo specchio e cavalletto di sostegno per la camera fotografica.



L'ambiente software scelto per analizzare le immagini ottenute dalle prove è IRAF Image Reduction and Analysis Facility poiché è uno dei migliori package per effettuare l'elaborazione fotometrica di immagini ed in particolare di campi stellari; in realtà l'immagine che si ottiene fotografando lo schermo forato (Hartmann plate) può tecnicamente assomigliarvi e quindi facilmente essere paragonato ad essi.

Di seguito si riportano alcune delle immagini ottenute del campo di riferimento e di quelle riflesse dallo Specchio.

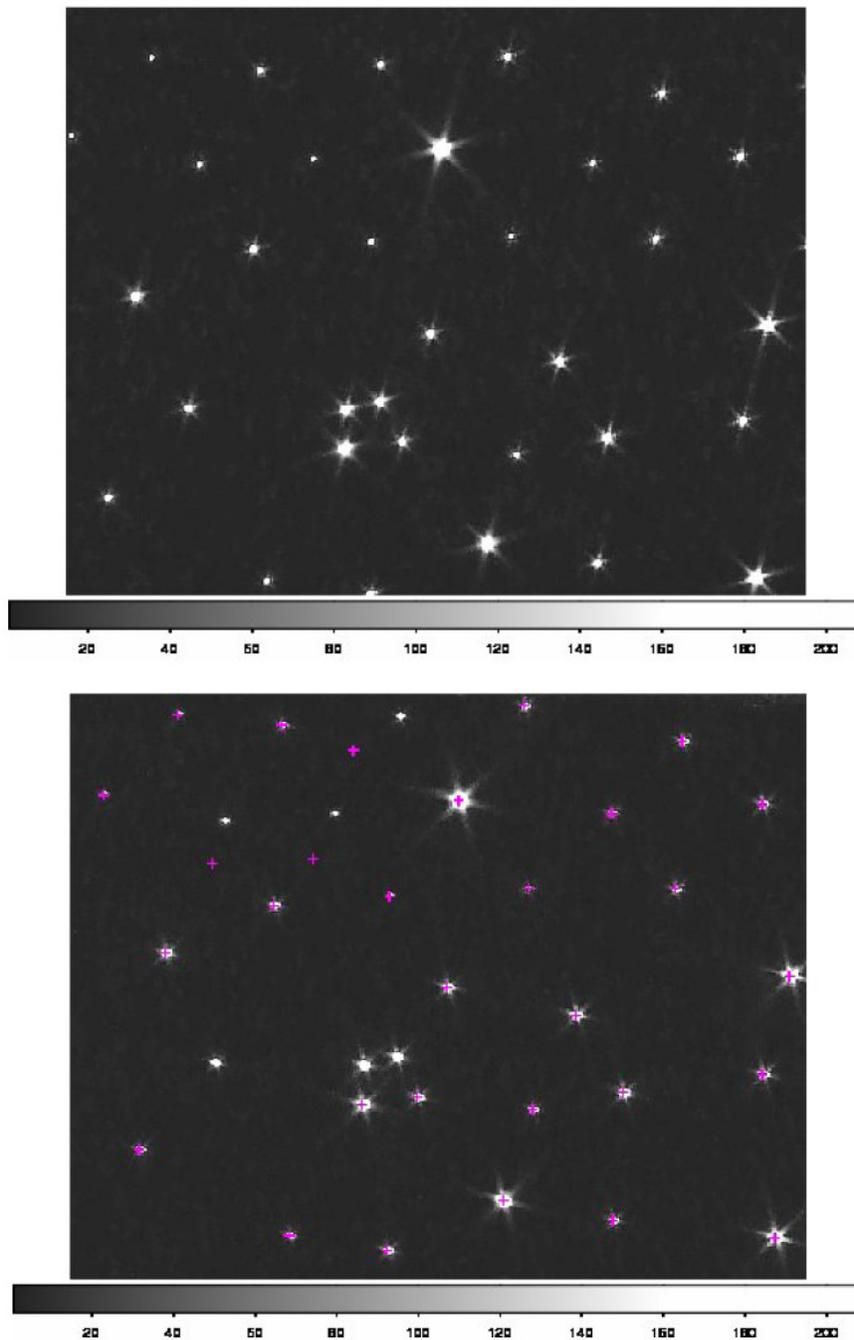


Immagine del campo di riferimento riflessa dalla specchio in analisi. In magenta sono evidenziati i punti luminosi del campo di riferimento identificati dopo l'inserimento dello specchio.

Le immagini del campo di riferimento ottenute con la camera fotografica, con e senza riflessione sulla specchio, sono state trattate con il software di analisi astronomica IRAF. Per essere analizzate con IRAF sono state convertite nel formato fits.

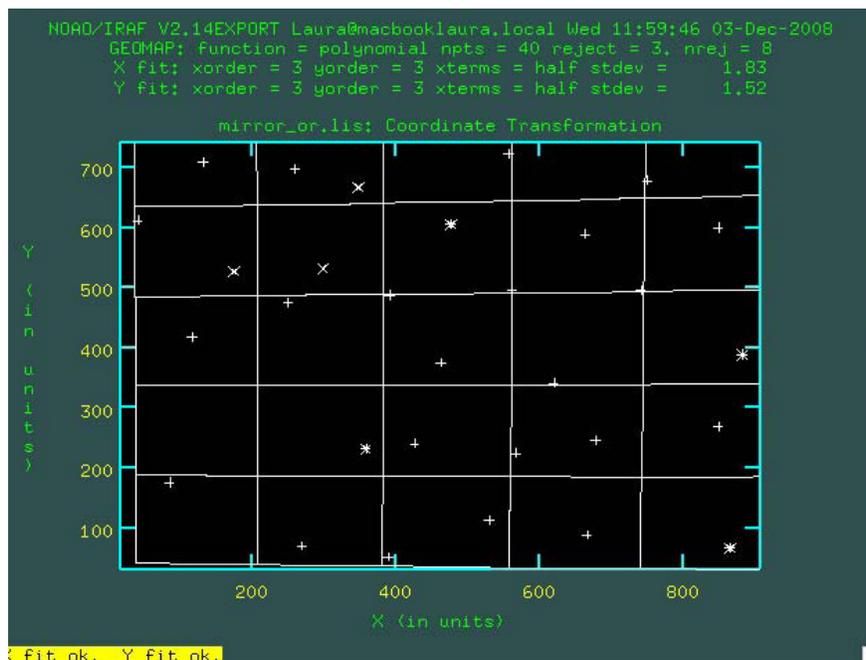
In particolare abbiamo utilizzato i tools dedicati alla fotometria (digiphot), identificando i punti luminosi in entrambe le immagini come se fossero stelle.

La prima identificazione dei punti luminosi nell'immagine di riferimento e' stata fatta mediante la task DAOFIND che permettere di individuare automaticamente sorgenti in un'immagine. Il file contenente le coordinate dei punti luminosi di riferimento e' stato utilizzato per identificare gli stessi nell'immagine di riflessione, preventivamente invertita lungo l'asse Y. I punti luminosi nell'immagine di riflessione sono stati individuati con la task PHOT (si veda Figura).

Abbiamo poi calcolato mediante la task GEOMAP la funzione di trasformazione da un sistema di coordinate

all'altro individuando così eventuali non linearità nella riflessione dello specchio.

Effetti geometrici quali rotazioni, traslazioni ed ingrandimenti sono stati considerati separatamente perché non dovuti alla riflessione sullo specchio ma al posizionamento della camera fotografica nelle due configurazioni, con e senza specchio.



Analisi della funzione di trasformazione tra le coordinate nel sistema di riferimento con e senza lo specchio.

Le coordinate dell'immagine riflessa vengono trasformate nelle coordinate dell'immagine di riferimento mediante due funzioni, f e g, la prima per le coordinate x e la seconda per le y, entrambe composte da una serie di polinomi.

Nel nostro caso abbiamo utilizzato polinomi di ordine massimo due. Le funzioni di trasformazione possono essere espresse dalle seguenti relazioni, in cui le coordinate dell'immagine riflessa dallo specchio (x_{in} e y_{in}) vengono trasformate nelle coordinate dell'immagine originale (x_{ref} e y_{ref}):

$$\text{Eq. 1) } x_{in} = a_{11} + a_{21} * x_{ref} + a_{12} * y_{ref} + a_{31} * x_{ref} ** 2 + a_{22} * x_{ref} * y_{ref} + a_{13} * y_{ref} ** 2$$

$$\text{Eq. 2) } y_{in} = a_{11}' + a_{21}' * x_{ref} + a_{12}' * y_{ref} + a_{31}' * x_{ref} ** 2 + a_{22}' * x_{ref} * y_{ref} + a_{13}' * y_{ref} ** 2$$

Esempio di risultato ottenuto per la funzione di trasformazione:

Coordinate mapping status

Xin and Yin fit rms: 1.256477 0.8947578

Coordinate mapping parameters

Mean Xref and Yref: 472.7473 348.1491

Mean Xin and Yin: 492.6192 379.7028

X and Y shift: 24.87345 30.13312 (xin yin)

X and Y scale: 0.9927479 1.014245 (xin / xref yin / yref)

X and Y axis rotation: 359.61896 0.32719 (degrees degrees)

I coefficienti di relazioni vengono dati dal programma GEOMAP. Per uno specchio essenzialmente piano ci si aspetta che i coefficienti dei termini di ordine superiore siano trascurabili. Un'analisi dettagliata di alcuni campioni di specchi e' attualmente in corso.

Esempio di coefficienti polinomiali ottenuti per il fit:

X fit		Yfit	
a11	15.43727	a11'	10.61837
a21	-0.07368	a21'	-0.0236
a31	7.13E-05	a31'	5.15E-06
a12	-0.01524	a12'	-0.03016
a22	2.36E-05	a22'	5.42E-05
a13	4.51E-06	a13'	6.66E-06

I termini di secondo grado sono a31, a22 e a13 e sono dell'ordine di 10⁻⁵-10⁻⁶, mentre i termini di primo grado a12 e a21 sono dell'ordine di 10⁻². Considerando la dimensione in pixel dell'immagine riflessa (900 x 750) abbiamo che la massima variazione della funzione di trasformazione dall'immagine di riferimento a quella riflessa per i termini di primo e secondo ordine è di circa 1.5 pixel lungo l'asse x e di circa 0.6 pixel lungo l'asse y. Quindi l'immagine riflessa è variata rispetto all'immagine di riferimento per termini non lineari di circa lo 0.2% lungo x e di 0.1% lungo y . Lo specchio in analisi può essere considerato quindi piano.

1.2 Il sistema di puntamento degli specchi

Per progettare e realizzare il sistema di puntamento degli specchi è necessario conoscere con un'ottima accuratezza la posizione del sole durante l'anno in funzione sia della latitudine e longitudine del luogo, sia dei parametri atmosferici, come temperatura e pressione atmosferica. Nell'ambito dell'error-budget del progetto STAR accuratezze del secondo d'arco sono più che sufficienti. Abbiamo comunque deciso di costruire le tabelle di posizione solare utilizzando un algoritmo di posizione solare che fornisce un'accuratezza di 0.003" perché contiene tutti i termini astronomici e di fisica dell'atmosfera necessari.

In particolare il sistema di specchi in corso di progettazione lavorerà anche nella prima ed ultima ora della giornata, al contrario dei concentratori solari attualmente in uso. Quindi una speciale cura è stata posta nell'analisi della rifrazione atmosferica, e delle variazioni dei parametri atmosferici e meteorologici per l'isola di Pianosa, forniti dall'Unità IBIMET partecipante al progetto STAR, che affetta principalmente la posizione solare all'orizzonte.

Il codice utilizzato per la realizzazione delle look-up tables è stato scritto in linguaggio di programmazione PERL per la sua versatilità e portabilità nei vari tipi di macchine e di sistemi operativi. Una messa a punto finale del codice e delle tabelle verrà fatto in seguito al momento della completa definizione delle specifiche del sistema di puntamento.

1.2.1 L'algoritmo per la posizione solare: spa.c

Uno dei migliori algoritmi scritti a questo scopo è quello sviluppato dal National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Il Solar Position Algorithm (SPA) permette di calcolare gli angoli di zenith e di azimuth con incertezze dell'ordine di 0.0003" in un lungo periodo temporale, dal anno 2000 all'anno 6000. La procedura su cui si basa è stata sviluppata inizialmente da Bretagnon (1982) e successivamente modificata da Bretagnon e Francou (1987). Come base per calcolare le tabelle di posizione solare per il progetto STAR abbiamo utilizzato il codice fornito da NREL, scritto in linguaggio c.

Questo codice calcola la posizione del sole istante per istante.

I parametri di ingresso sono:

- a) i parametri temporali (anno, mese, giorno, ora, minuto, secondo),
- b) i parametri del luogo (latitudine, longitudine, altezza sul livello del mare, fuso orario),
- c) i parametri atmosferici (pressione, temperatura, rifrazione atmosferica)

Inoltre sono necessari altri parametri che possono essere considerati in prima approssimazione costanti come ad esempio la differenza tra la rotazione della terra e il tempo terrestre. Questo parametro è derivato dalle osservazioni soltanto ed è riportato nel bollettino alla seguente pagina web:

<http://maia.usno.navy.mil/ser7/ser7.dat>

In uscita il codice spa.c fornisce l'azimuth e lo zenith locale del sole all'istante inserito in ingresso. E' possibile ottenere anche i valori dell'angolo di incidenza, dell'alba, e del tramonto.

Quello che è necessario nel sistema di puntamento degli specchi non e' la posizione solare per un singolo istante, ma una tabella che fornisca la posizione del sole per ciascun giorno dell'anno.

1.2.2 Estensione di spa.c

Per questa ragione abbiamo esteso il programma spa.c con un codice perl in modo da poter calcolare direttamente tabelle di azimuth e zenith per ciascun giorno dell'anno.

I parametri del luogo sono stati fissati ed identificati nella latitudine, longitudine e fuso orario dell'isola di Pianosa:

```
spa.timezone = +1.0;
```

```
spa.longitude = +010.0806;
```

```
spa.latitude = 43.582476;
```

I parametri temporali ed atmosferici sono stati lasciati liberi, in modo da poterli cambiare secondo i dati forniti da IBIMET durante le varie stagioni.

Il codice perl, allegato al termine di questo documento permettere di fornire in ingresso la data, nel formato anno, mesi, giorno, la temperatura, e la pressione atmosferica.

Da shell il comando per ottenere una tabella giornaliera è il seguente:

```
makespadays.pl YEAR MONTH DAY TEMP PRES
```

L'uscita di questo programma è una tabella che contiene le seguenti informazioni, ad intervalli di 10 minuti:

```
fprintf(f,"%.4i ",spa.year);
```

```
fprintf(f,"%%.2i ",spa.month);
```

```
fprintf(f,"%%.2i ",spa.day);
```

```
fprintf(f,"%%.2i ",spa.hour);
```

```
fprintf(f,"%%.2i ",spa.minute);
```

```
fprintf(f,"%%.2i ",spa.second);
```

```
fprintf(f,"%%.10f ",spa.azimuth);
```

```
fprintf(f,"%%.10f ",spa.zenith);
```

```
fprintf(f,"%%.6f ",spa.incidence);
```

```
fprintf(f,"%%.4f ",spa.pressure);
```

```
fprintf(f,"%%.4f ",spa.temperature);
```

```
fprintf(f,"%%.6f ",spa.sunrise);
```

```
fprintf(f,"%%.6f\n ",spa.sunset);
```

La tabella ha un nome univoco che puo' essere facilmente interpretabile:

```
spaYEAR-MONTH-DAY-TEMP-PRES
```

1.2.3 Valutazione dei parametri atmosferici

Una questione importante è quanto sia necessario conoscere pressione e temperatura atmosferica giorno per giorno per calcolare accuratamente la posizione solare. Per questo abbiamo fatto alcuni test, calcolando la posizione solare per lo stesso giorno in diverse condizioni di temperatura e di pressione atmosferica.

Abbiamo considerato due casi tipici di pressione e di temperatura, che possono essere associati a condizioni estive (alta pressione, 1022 mbar, alta temperatura 30 gradi) e condizioni invernali (bassa pressione 960 mbar e bassa temperatura, 10 gradi). Abbiamo considerato sia la variazione di uno solo dei due parametri, che la variazione di entrambi.

Test 1: Variazione della pressione atmosferica, a temperatura costante

Per la stessa data e lo stesso luogo è stata calcolata la posizione del sole con una pressione di 960 mbar e con una pressione di 1022 mbar. Nel pannello superiore di Figura a) è riportata l'altezza del sole (zenith) in funzione dell' azimuth. Nel pannello inferiore è riportata la differenza tra lo zenith a pressione 1022 mbar e pressione 960 mbar. Si noti che si hanno differenze consistenti solo nei primi 5 gradi e negli ultimi 5 gradi di azimuth, che corrispondono all'alba e al tramonto.

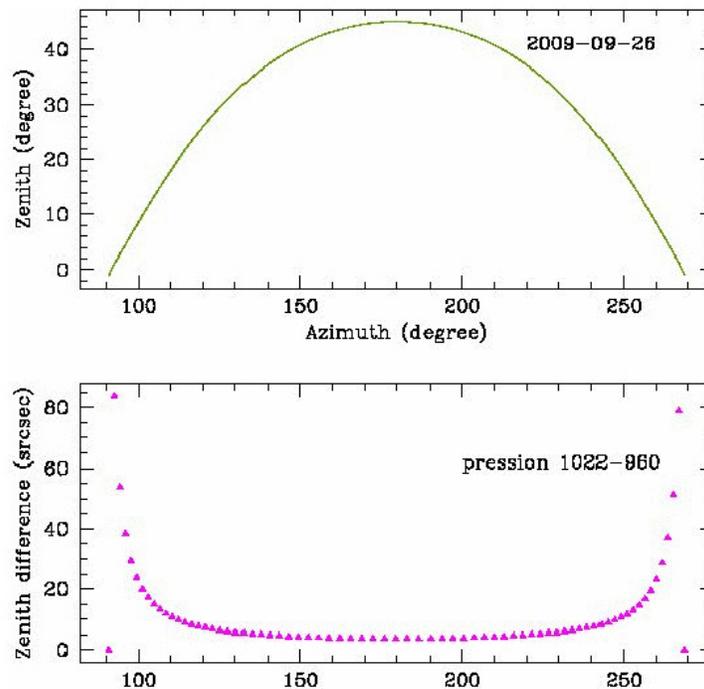


Figura a)

Test 2: Variazione della temperatura, a pressione costante

Per la stessa data e lo stesso luogo è stata calcolata la posizione del sole con una temperatura di 10 e di 30 gradi centigradi, mantenendo la pressione costante.

Nel pannello superiore di Figura b) è riportata lo zenith in funzione dell' azimuth. Nel pannello inferiore di

Fig.2 è riportata la differenza tra lo zenith a temperatura 10o e temperatura 30o . Si noti che, come nel caso precedente, si hanno differenze consistenti solo nei primi 5 gradi e negli ultimi 5 gradi di azimuth.

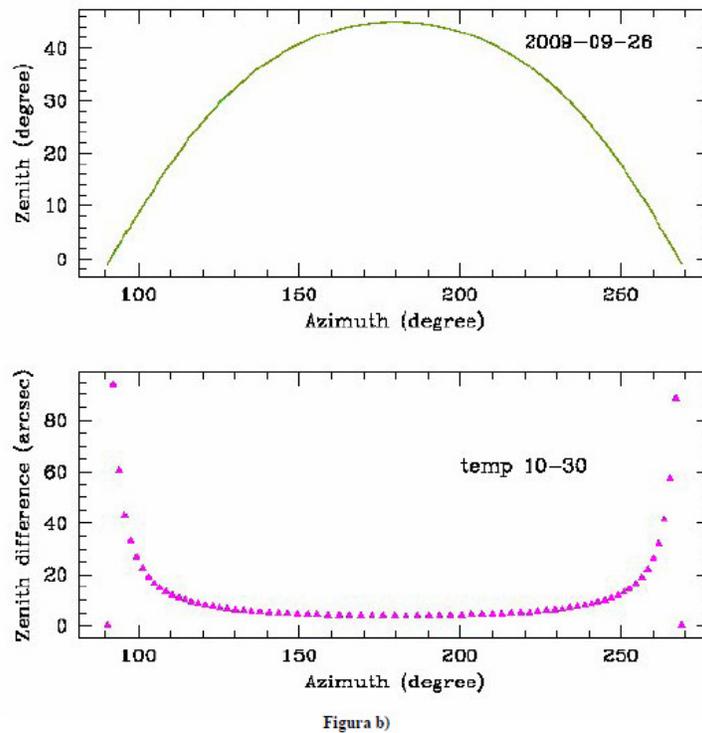


Figura b)

Test 3: Variazione della temperatura e della pressione

Il caso piu' completo e' una variazione di entrambe le quantita', supponendo che ad una variazione di pressione sia associata anche una variazione di temperatura.

Per la stessa data e lo stesso luogo è stata calcolata la posizione del sole con una temperatura di 10o e pressione di 960 mbar, e per temperatura 30o , mantenendo la pressione costante.

Nel pannello superiore di Figura 3 è riportata lo zenith in funzione dell' azimuth.

Nel pannello inferiore di Fig.3 è riportata la differenza tra lo zenith nelle due condizioni 10o,/960 mbar e 30° /1022 mbar. La prima condizione puo' essere approssimata al caso invernale, mentre la seconda al caso estivo. Si noti che in questo caso gli effetti di pressione e temperatura si compensano ed abbiamo piccolissime variazioni, dell'ordine al massimo di 3-4'' nella posizione solare anche all'alba e al tramonto.

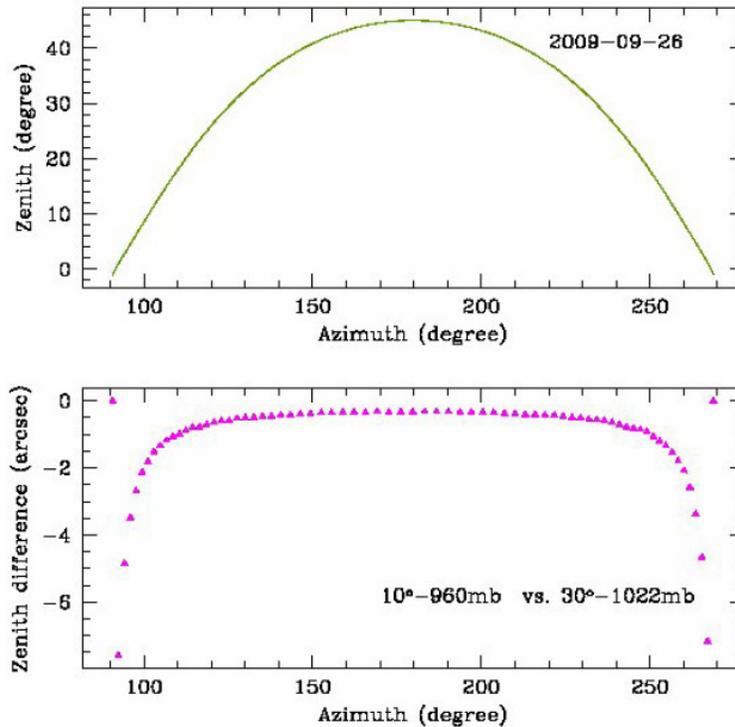


Figura c)

La piccola variazione della posizione solare con pressione e temperatura limitata ai primi gradi all'orizzonte fa sì che si possano adottare tabelle di posizione zenith/azimuth in cui si assume temperatura e pressione media nei vari periodi dell'anno come fornito da IBIMET. Non è quindi necessario compilare ogni giorno una tabella di posizione solare con gli esatti dati atmosferici, ma è sufficiente conoscere i valori medi dei parametri atmosferici.

1.3 Scelta del tipo di colla e tecnica delle modalità di incollaggio

Il sistema scelto per il fissaggio degli specchi alla struttura si basa sull'utilizzo di apposite colle; nel caso della realizzazione dello specchio primario e del secondario sono state effettuate prove con varie tipologie di colle bicomponenti.

Rendere maggiormente uniforme la distribuzione della colla, qualunque essa sia, significa ridurre le imperfezioni di planarità dello specchio e perciò si è proceduto con vari metodi.

Di seguito si riportano i tipi di colla testati:

1) ARALDITE 2010 (Resina bicomponente)epossidica semi-trasparente con viscosità (25°) di circa 150 mPa-s, peso specifico di 1,10 kg/l, tempo di lavorabilità \approx 10 ore. I due componenti devono essere miscelati con una proporzione 50:50. La colla è stata distribuita uniformemente (spessore

di circa 1 mm) con una spatola dentellata; vi è stato sovrapposto lo specchio dal lato argentato e infine, per una corretta essiccazione, è stato applicato un peso di 3 kg su una piastra di vetro (0,85 mm) con gommapiuma (circa 4 cm) per uniformare la distribuzione del peso.

Questa tecnica però ha portato ad un risultato non troppo positivo in quanto, a seguito di una semplice prova di riflessione del sole negli specchi si sono rilevate qualitativamente delle anomalie.

2) EPO 150 (EX EPO-INJ) Resina epossidica pura per iniezioni: è un prodotto a base di resine epossidiche molto fluide reticolabili a freddo mediante un indurente a base di ammine cicloalifatiche. Caratteristiche: trasparente con viscosità (25°) di circa 500 - 800 mPa-s, peso specifico di 1,04 kg/l, tempo di lavorabilità \approx 30 - 50 min e con buone caratteristiche di resistenza a trazione, flessione e compressione.

I due componenti devono essere miscelati con una proporzione 100:25; polimerizza senza ritiro e, ad indurimento avvenuto, è impermeabile all'acqua.

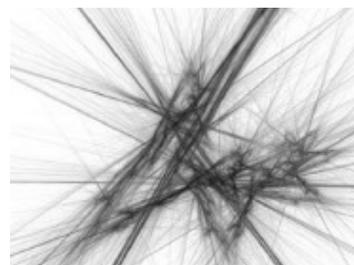
Questo tipo di colla, grazie alla caratteristica di essere estremamente fluida, ha permesso di eseguire in vari modi la sua applicazione, utilizzando sempre entrambi i tipi di supporto (schiuma di vetro o alluminio); di seguito si descrivono tra i metodi quelli che hanno prodotto risultati migliori.

A. La colla è stata disposta sullo specchio lato argentato col metodo "goccia a goccia" e successivamente vi è stato posto il supporto.

B. La colla è stata disposta sul materiale di supporto dello specchio con un pennello a modo di rendere uniforme lo strato (tecnica valida soprattutto nel caso di utilizzo della schiuma di vetro, poiché si sono ben riempite le cavità)

C. Sfruttando la gravità e l'alto valore di fluidità si sono distribuite tre macro gocce sullo specchio lato argentato, si è aspettato qualche minuto dandogli il modo di distribuirsi uniformemente e vi abbiamo applicato il supporto.

3) La ditta RONDA, fornitrice degli specchi e delle strutture a supporto del progetto ENEA Archimede, ha proposto l'utilizzo di un'ulteriore tipo di colla monocomponente superfluida. È stato nostro impegno testare, la validità della tecnica di incollaggio proposta dalla ditta Ronda. Tale ditta ha proposto di utilizzare un adesivo strutturale per l'accoppiamento dello specchio sottile al



pannello di supporto. Questo adesivo polimerizza senza creare tensione tra specchio e pannello, caratteristica principale richiesta.

1.4 Materiali di supporto per lo specchio primario e secondario

La ricerca del materiale migliore da utilizzare per il supporto dello specchio primario è stata molto complessa in quanto sono state esaminate le caratteristiche fisiche e meccaniche (es. modulo di Young) di vari materiali metallici e non.

Si riportano le proposte dei materiali ipotizzati per la realizzazione del supporto allo specchio primario.

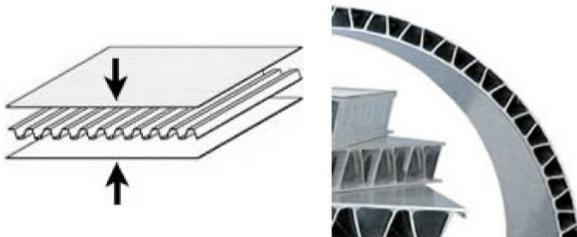
- Schiuma di vetro poiché, come si vede dalla seguente Tabella, ha circa lo stesso coefficiente termico del vetro dello specchio ed inoltre ha un buon coefficiente di resistenza.



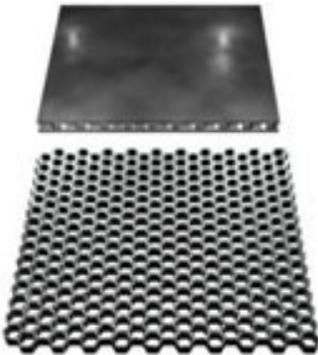
Densità	~ 120 kg/m ³
Conduttività termica λ_D (EN ISO 10456)	0,040 W/mK
Resistenza alla compressione Resistenza alla compressione media a zona di fiducia 95%	0,63–0,66 N/mm ²
Fractile 7,5% a livello di fiducia 95% (valore che ha 7,5% di probabilità di non essere raggiunto)	0,45 N/mm ²
Fractile 2,5% a livello di fiducia 95% (valore che ha 2,5% di probabilità di non essere raggiunto)	0,37 N/mm ²
costrizione di compressione ammissibile sotto carico nominale – nel caso di elementi portanti ¹⁾ – nel caso di collocazione sotto soletta di ripartizione ²⁾	0,21 N/mm ² 0,25 N/mm ²
Coefficiente di dilatazione lineare	$9 \times 10^{-6}/K$
Calore specifico	0,84 kJ/kgK
Diffusività termica	$4,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec.}$
Modulo di elasticità (si riferisce alla costrizione di compressione)	75 N/mm ² nel bitume caldo senza manti impermeabili bituminosi
Campi di applicazione	FOAMGLAS® Tetti e terrazze compatte Isolamento di pavimenti Muri Soffitti

Descrizione delle resistenze alla compressione (σ_{adm} , [N/mm²])
¹⁾ quale parte della struttura portante, sotto la fondazione
²⁾ sotto la soletta flottante e la soletta di ripartizione, gli eventuali aumenti per effetti dinamici essendo inclusi

- Supporto in alluminio/acciaio di tipo Doluflex cioè una lamiera grecata ottenuta in linea con un sistema di formatura a freddo



- Pannelli in Honeycomb: pannelli in nido d'ape di alluminio con finitura in vetroresina la cui forma realizzati con alluminio Al 3003.



Entrambe le soluzioni sono state considerate in dettaglio ma non si sono rivelate del tutto adeguate per la loro caratteristica di rigidità che non permette di piegare e lavorare la struttura finale specchio + supporto.

- Pannello ditta Ronda High-Tech: il materiale utilizzato per realizzare il pannello di supporto è una formulazione speciale di preimpregnato termoindurente SMC low-profile, a ritiro zero. Il raggiungimento di valori di CTE prossimi a quelli del vetro è fondamentale sia per non tensionare il vetro stesso fino a valori prossimi o superiori a quelli di rottura durante le escursioni termiche cui è sottoposto durante l'esercizio, sia per prevenire fenomeni di distacco del vetro dal supporto (delaminazione), sia infine per garantire una stabilità di forma adeguata al variare della temperatura ambiente. A questo proposito la Ronda ha sottoposto il pannello a prove in camera climatica per la verifica della compatibilità con le temperature di esercizio attraverso cicli di temperatura su di un range più ampio di quello operativo previsto (-10, +60) senza riportare danneggiamenti o deformazioni permanenti.
- Legno MD (Medium Density): Il MDF (Medium density fibreboard, pannello di fibra a media densità) è un derivato del legno; è il più famoso e diffuso della famiglia dei pannelli di fibra comprendenti tre categorie distinte in base al processo impiegato e alla densità: bassa (LDF), media (MDF) e alta (HDF). Il legno MD si presta perfettamente alla costruzione di prototipi per:
 - ✓ facilità di reperibilità, lavorazione ed incollaggio;
 - ✓ caratteristiche quali il coefficiente di espansione termica ($4.5 \times 10^{-6} \text{mm/mm/}^\circ\text{C}$) e il modulo di Young (10-13 GPa) compatibili con quelle del vetro costituente lo specchio;
 - ✓ planarità della superficie, con variazioni rms inferiori a 0.3 mm, e massime di 0.5 mm.

1.4.1 Struttura di sostegno

La struttura di sostegno allo specchio è stata realizzata in ferro delle dimensioni di 1,6 X 1,2 mt con profilati pieni in sezione; tali profilati sono stati saldati nelle giunture dei quattro angoli a formare una cornice rettangolare ove ad essi sono stati saldati profilati quadrati cavi per permettere la curvatura controllata dell'intera struttura tramite un collegamento rigido formato da barre circolari cave da braccio a braccio con delle viti a giro infinito, questa struttura è stata posta sullo specchio lato riflettente .

Per sorreggere in modo uniforme lo specchio è stata realizzata una ulteriore cornice senza "bracci" da apporre sul retro dello specchio Il sistema descritto provoca una sollecitazione alla struttura che porta ad un momento flettente; per semplicità, si può dire che un corpo è soggetto ad uno sforzo di flessione quando, per effetto dei vincoli cui è sottoposto, reagisce, opponendosi, ad un sistema di forze ad esso applicate che tenderebbero a farlo ruotare attorno ad un proprio punto.

Nel modello in esame la trave (cioè il braccio della cornice) è sollecitata a flessione quando è sottoposta ad un sistema di carichi che possiede una componente perpendicolare all'asse longitudinale, generando un momento flettente che provoca l'incurvatura della trave stessa, ciò avviene applicando n giri alle 4 viti che comandano la rigidità tra i bracci.

Nella trave sottoposta a flessione nascono delle tensioni unitarie di trazione e compressione, idealmente separate da uno strato di fibre detto "asse neutro" (x) che non subisce alcun allungamento o accorciamento.

In una sezione di una trave soggetta a flessione la tensione unitaria si calcola con la relazione:

$$\sigma = \frac{My}{J}$$

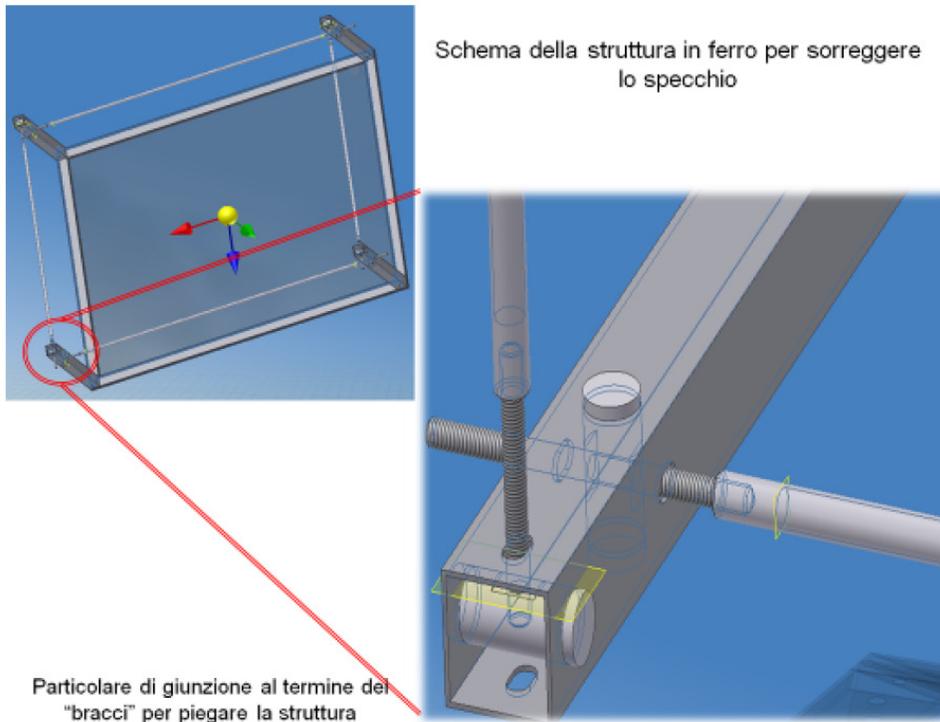
σ è la sollecitazione unitaria (N/mm²);

M è il momento flettente (Nmm)

y è la distanza di un'area elementare dall'asse neutro (mm);

J è il momento d'inerzia rispetto all'asse neutro (mm⁴)

Nell'immagine seguente si riporta un dettaglio costruttivo utile per mettere in trazione i "bracci" della cornice.



In conseguenza al movimento della struttura di sostegno anche lo specchio ancorato ad esso avrà un comportamento particolare, infatti uno dei fattori che può influenzare tale comportamento è il sistema di ancoraggio dello specchio alla cornice che è stato affrontato con più soluzioni:

- 1) nei lati interni della cornice è stato steso del nastro biadesivo e sopra a questo è stata applicata una striscia di gomma fine inoltre per tenere insieme le due cornici si sono utilizzati dei morsetti
- 2) Poiché la soluzione 1) introduceva errori dettati dalla presenza dei morsetti, si sono eliminati tali togliendo anche la gomma ed applicando direttamente lo specchio sul nastro biadesivo
- 3) Come ultima prova partendo dalla 2) si è riempito tutto il contorno dello specchio con della colla araldica molto fluida per permettere che questa penetrasse in ogni cavità/imperfezione lungo i quattro lati della cornice.



Prototipo 1

Per verificare l'analisi degli spostamenti differenziali dello specchio inizialmente piano e successivamente curvato è stato creato uno schermo nero forato con luce diffusa sul retro posto frontalmente allo specchio sorretto da una struttura metallica capace di curvarsi sia lungo x che lungo y e successivamente sono state acquisite immagini digitali tra le quali: una diretta dello schermo (distanza 4 m) e le altre contenenti lo schermo riflesso (distanza 2 m) con curvatures incrementali o/e cicliche dei quattro lati dello specchio.

Tramite l'applicazione del Teorema del Coseno in un foglio di calcolo è stata stimata la focale raggiungibile e la freccia imposta per ottenerla. Chiamando A, B e C i tre vertici di un triangolo e γ l'angolo in corrispondenza di C e tracciando l'altezza AH relativa al lato BC, si ottengono così due triangoli rettangoli ai quali è possibile applicare il teorema di Pitagora.



Applicando tale teorema al triangolo AHB, si ha :

$$\overline{AB}^2 = \overline{AH}^2 + \overline{BH}^2$$

Risolvendo il triangolo rettangolo AHC abbiamo anche:

$$\overline{AH} = \overline{AC} \sin \gamma.$$

Vale inoltre:

$$\overline{BH} = \overline{BC} - \overline{HC} = \overline{BC} - \overline{AC} \cos \gamma.$$

Sostituendo nella prima uguaglianza si ottiene:

$$\overline{AB}^2 = \overline{AC}^2 \sin^2 \gamma + \overline{BC}^2 + \overline{AC}^2 \cos^2 \gamma - 2\overline{BC} \cdot \overline{AC} \cos \gamma.$$

Per la relazione fondamentale $\sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma = 1$, questa equazione può essere semplificata in:

$$\overline{AB}^2 = \overline{AC}^2 + \overline{BC}^2 - 2\overline{AC} \cdot \overline{BC} \cos \gamma$$

Attualmente le prove sono realizzate sul terrazzo di Arcetri, ove parte della struttura adoperata in laboratorio permette di sorreggere lo specchio e la sua struttura di sostegno da incurvare.



Per vedere la figura del sole riflessa, e di conseguenza fare una stima della bontà del sistema, si utilizza uno schermo di circa 2.0 X 1.6 m a fondo bianco con una griglia regolare di 1 X 1 cm.

Purtroppo le immagini ottenute non corrispondono a quanto aspettato per cui stiamo cercando di fare correzioni alla struttura di supporto e di ancoraggio dello specchio stesso. Un primo intervento correttivo è stato quello di realizzare una struttura con tubi innocenti per sorreggere lo specchio limitando le possibili interferenze dovute ad un supporto manuale.

Il risultato delle prime immagini, nonostante sia cambiato il tipo di sostegno dell'intera struttura, ottenute con la luce diretta del sole non hanno dimostrato una concordanza tra le aspettative teoriche e la realtà; per porre una spiegazione ai risultati ottenuti il lavoro si svolge nell'analisi distinta di una correzione delle aberrazioni che si sono manifestate (probabilmente dovute alla saldatura non corretta, al sistema di fissaggio dello specchio alla cornice, alla non uniforme aderenza della cornice metallica allo specchio nonostante la guaina in gomma e/o nastri biadesivi utilizzati, ecc...) e una analisi agli elementi finiti della simulazione della struttura attualmente utilizzata. Un ulteriore lavoro condotto in parallelo ai precedenti è

quello di ipotizzare una struttura realizzata con materiale differente (es. proprio in SMC) ed eliminare la doppia cornice adesso utilizzata.

1.5 sistema per la misura della forma dello specchio curvato

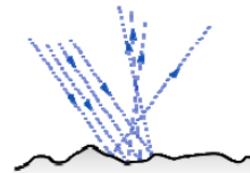
Il primo prototipo è stato costruito in laboratorio con lo scopo di monitorare la curvatura ottenuta dal piegamento dello specchio piano. Infatti, in uno specchio piano un fascio di raggi luminosi paralleli viene deviato, ma si mantiene il parallelismo dei raggi; ciascun raggio che colpisce lo specchio viene riflesso di un angolo che è identico a quello di incidenza. Quando, invece di uno specchio piano, si utilizza uno specchio curvo, come ad esempio un paraboloide, la direzione dei raggi incidenti dipende dalla curvatura locale dello specchio.

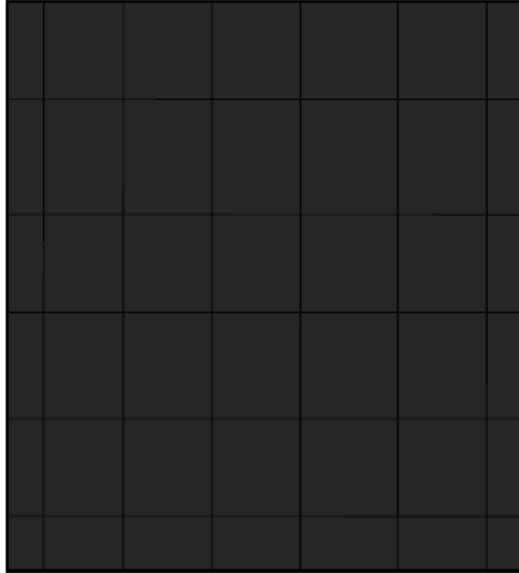
Per verificare questo fenomeno, e quindi sia la planarità iniziale degli specchi che la successiva forma ottenuta per il piegamento, si è eseguita una prova simile al

Test di Hartmann con qualche variazione.

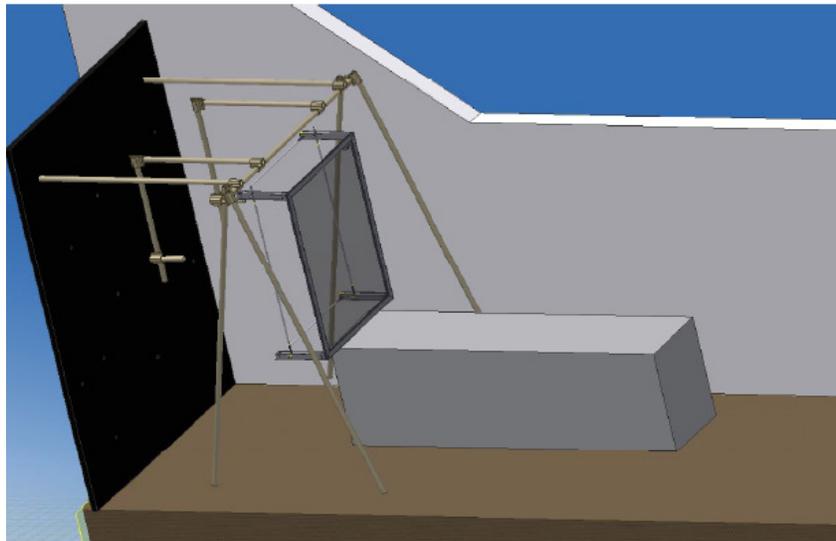
La strumentazione utilizzata risulta costituita, in successione, da:

- a) una sorgente di luce posta a 90° rispetto all'asse ottico;
- b) un reticolo di fori di circa 1 - 1.5 mm ottenuti da un cartone nero che ricopre interamente la fonte luminosa ad una distanza regolare, così da comporre un reticolo composto da quadrati di circa 20 cm di lato;
- c) un sistema camera Reflex con relativo zoom fotografico (formato di output: RAW) posto nella parte centrale forata dello schermo e fissato con un cavalletto di sostegno;
- d) un sistema di ancoraggio meccanico per lo specchio di dimensioni 1.2 x 1.6 m. Lo specchio è inserito in un "tavolino" che permette di curvare i quattro lati.





Schema dello schermo di riferimento in ogni punto di intersezione tra righe e colonne è stato praticato un foro di circa 1-1.5 mm di diametro.



L'ambiente scelto per analizzare le immagini ottenute dalle prove è IRAF Image Reduction and Analysis Facility poiché è uno dei migliori package per effettuare l'elaborazione fotometrica di immagini ed in particolare di campi stellari; in realtà l'immagine che si ottiene fotografando lo schermo forato (Hartmann plate) può tecnicamente assomigliarvi e quindi facilmente paragonato ad essi.

Le immagini del campo di riferimento ottenute con la camera fotografica, con e senza riflessione sulla specchio, sono state trattate con il software di analisi astronomica IRAF. Per essere analizzate con IRAF sono state convertite nel formato FITS.

In particolare abbiamo utilizzato i tools dedicati alla fotometria (digiphot), identificando i punti

luminosi in entrambe le immagini come se fossero stelle.

Effetti geometrici quali rotazioni, traslazioni ed ingrandimenti sono stati considerati separatamente perché non dovuti alla riflessione sullo specchio ma al posizionamento della camera fotografica nelle due configurazioni, con e senza specchio.

Le immagini sono state acquisite con la fotocamera digitale Nikon D40:

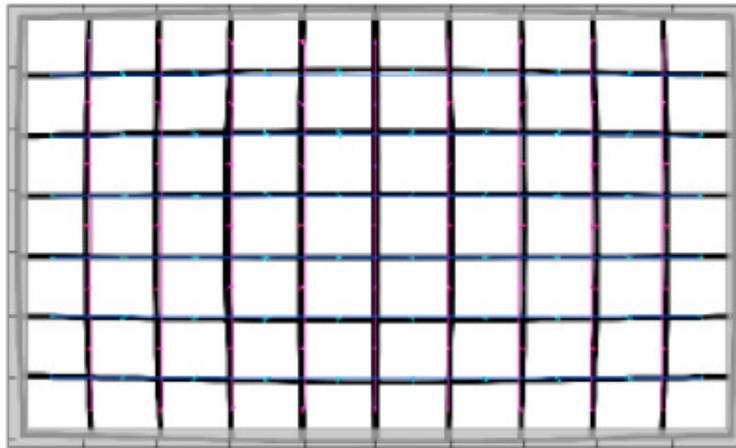
- I. Immagine diretta dello schermo (distanza 4m)
- II. Immagine dello specchio contenente lo schermo riflesso (distanza 2m)
- III. Immagini corrispondenti a curvature incrementali e cicliche dei quattro lati dello specchi

Alcune caratteristiche delle prime acquisizioni sono qui brevemente riassunte:

- i) tempi di esposizione tipici 20 s;
- ii) obiettivo da 18 mm;
- iii) focale F22, corrispondente alla minima apertura del diaframma.

L'immagine dello specchio occupa la zona centrale del campo di vista limitando l'effetto delle deformazioni dell'obiettivo 18mm. Con una successiva modifica del cavalletto abbiamo potuto utilizzare la camera ruotata di 90 gradi, e quindi usare l'obiettivo da 35 mm. La rotazione infatti ci permette di sfruttare meglio la forma rettangolare del CCD della camera. Il vantaggio è stato notevole perché l'obiettivo da 35 mm presenta minori distorsioni di campo rispetto al 18 mm. Infatti la presenza di distorsioni di campo dell'ottica della camera produce spostamenti nella posizione delle immagini dei fori illuminati. Tali variazioni si vanno a sommare agli spostamenti delle immagini dei punti luminosi dello schermo dovuti alla curvatura dello specchio. I due effetti non sono separabili, quindi è auspicabile utilizzare obiettivi con le minori distorsioni. Si vedano nelle figure seguenti le distorsioni delle ottiche relative ai due obiettivi 18 e 35 mm, rispettivamente.

Distortion with decentering: 3rd order 02-Jan-2009 23:40:39
18mm.jpg

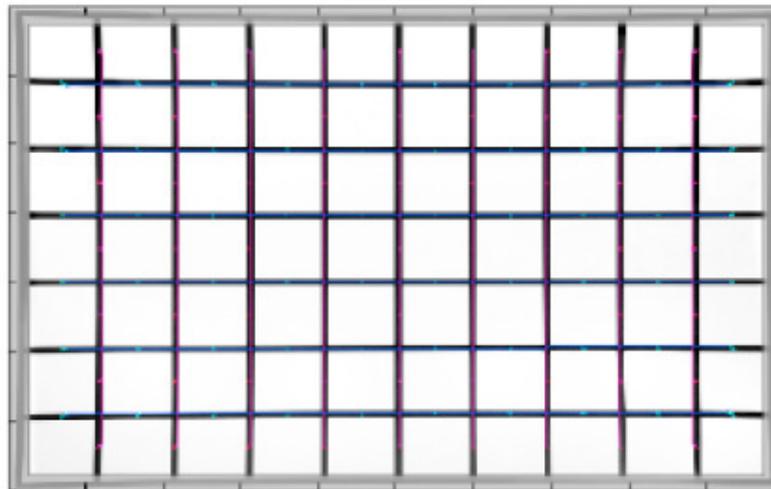


SMA TV Distortion = -3.52% Barrel
Decenter $r = 0; \theta^0$
 $k_1 = 0.0626$ ($\hat{\sigma}_s = r_1 + k_1 r_1^2$)
($\hat{\sigma}$ in ch-corner units.)
 $h_1, h_2 = 0.100, -0.0429$
PW/Pro Coeff = 0.04175
PW/Pro Scale = 0.2804
Line calc: 3rd order

Selected EXIF data
File: 2009-01-02 23:20:44
Make: NIKON CORPORATION
Model: NIKON D200
Taken: 2008-11-16 20:51:52
Res: 1000 x 712
FL: 18.0mm
Exp: 0.167 s (1/6)

Apert: f/3.0
ISO: 200
EdDist: 1.33
vMDef: Auto

3.1 Master 



SMA TV Distortion = 1.62% Pincush
Decenter $r = 0; \theta^0$
 $k_1 = -0.0241$ ($\hat{\sigma}_s = r_1 + k_1 r_1^2$)
($\hat{\sigma}$ in ch-corner units.)
 $h_1, h_2 = -0.0432, 0.0227$
PW/Pro Coeff = -0.0275
PW/Pro Scale = 1.025
Line calc: 3rd order

Selected EXIF data
File: 2009-01-02 23:24:12
Make: NIKON CORPORATION
Model: NIKON D200
Taken: 2008-11-23 23:52:00
Res: 1000 x 701
FL: 35.0mm
Exp: 0.125 s (1/8)

Apert: f/3.0
ISO: 200
EdDist: 1.33
vMDef: Auto

3.2 Master 

Le immagini sono state analizzate compiendo i seguenti passi:

1. Identificazione con un programma automatico (daofind di Iraf) dei punti luminosi nell'immagine di riferimento (schermo);
2. Fit gaussiano per determinare il centro di ciascun punto luminoso;
3. Inversione dell'asse x nelle immagini riflesse, re-identificazione e fit gaussiano automatico degli stessi punti riflessi;
4. Analisi degli spostamenti differenziali x,y di ciascun punto luminoso;

5. Fit con una superficie x,y di primo grado che corrisponde alla derivate prime parziali in x e in y della superficie attesa dello specchio (paraboloide) delle posizione x,y rispetto alle stesse sullo schermo x_{in}, y_{in}

6. Integrazione degli spostamenti locali sia lungo l'asse x che lungo l'asse y che permette di ricostruire la curvatura dello specchio punto punto come mostrato in Figura 9 e 10.

I risultati ottenuti hanno rivelato che le varie parabole intersezione dello specchio con piani ortogonali a diverse altezze hanno coefficienti diversi tra di loro.

Misurare i coefficienti della parabola è molto importante perché essi sono strettamente legati al fuoco dello specchio. In particolare il coefficiente del termine di secondo grado è matematicamente legato al fuoco.

La parabola è infatti definita con il luogo dei punti situati alla stessa distanza da un punto fisso detto fuoco e da una linea chiamata direttrice.

In Figura, il fuoco è della parabola è situato in posizione (0, p), la direttrice è y = -p. La distanza d di ciascun punto (x,y) dal fuoco (0, p) è la stessa distanza che c'è tra il punto e la direttrice:

La misura dei coefficienti delle varie parabole, intersezione con piani orizzontali e verticali a varie altezze, e' stata fatta ricostruendo la forma tridimensionale dello specchio a partire dagli spostamenti di posizione delle immagini dei punti luminosi. Tali spostamenti rappresentano le derivate parziali locali in x e in y.

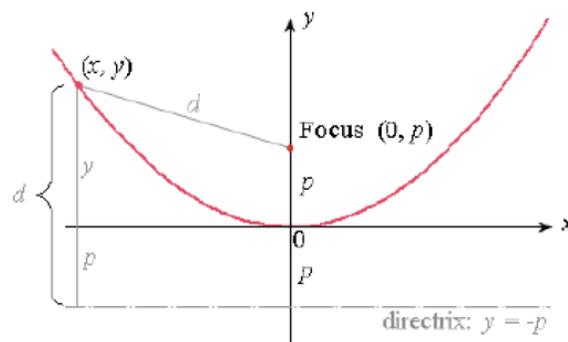
$$\sqrt{(x-0)^2 + (y-p)^2} = y + p$$

Semplificando l'equazione si ottiene la formula usuale della parabola

$$x^2 = 4py$$

$$y = x^2 / 4p$$

dove p e' la distanza focale della parabola.



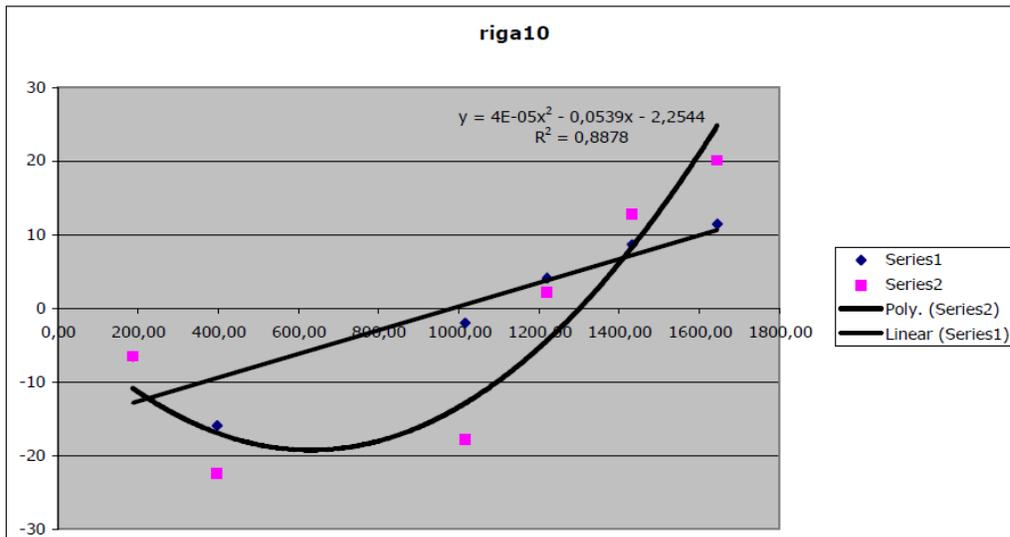
La misura dei coefficienti delle varie parabole, intersezione con piani orizzontali e verticali a varie

altezze, e' stata fatta ricostruendo la forma tridimensionale dello specchio a partire dagli spostamenti di posizione delle immagini dei punti luminosi. Tali spostamenti rappresentano le derivate parziali locali in x e in y.

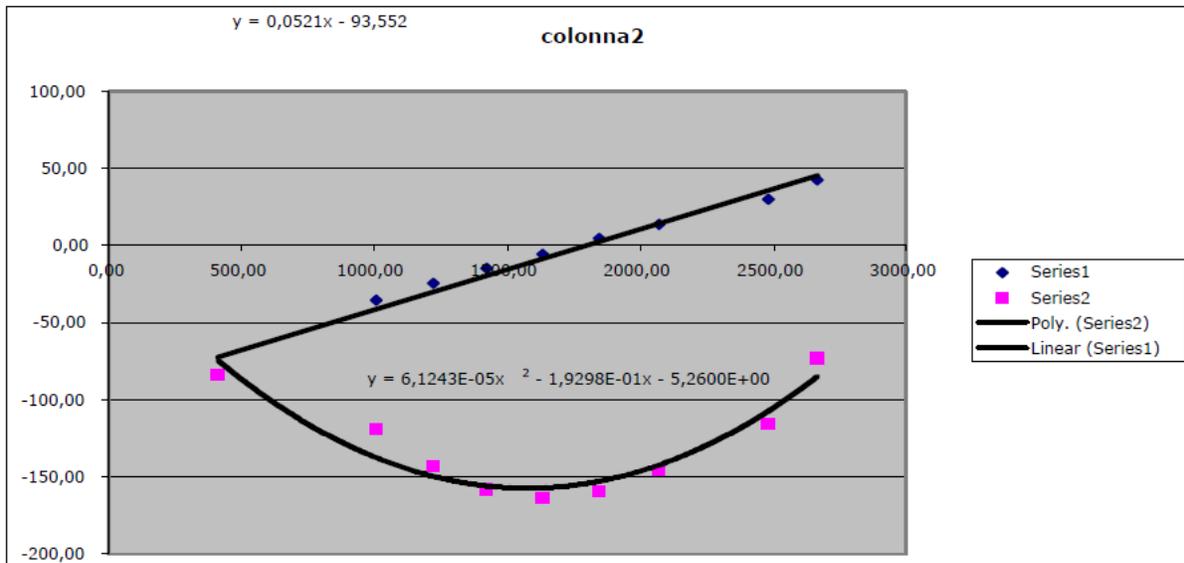
Una prima approssimazione è stata quella di calcolare la funzione integrale, considerando che per ogni intervallo spaziale tra due punti luminosi, lo spostamento sia costante (integrazione per rettangoli).

Nelle Figure sono mostrati sue esempi di integrazione per riga e per colonna. I valori dei coefficienti sono espressi in pixel. La conversione in unità fisiche e' di 1 pixel=0.53mm.

Si noti che i coefficienti dei termini quadratici delle parabole riportati nelle Figure non sono uguali per il fit lungo l'asse x (Figura: riga10) e lungo l'asse y (Figura: colonna2), indicando una diversa deformazione del lato corto e del lato lungo dello specchio.



Ricostruzione della forma 3d dello specchio mediante integrazione degli spostamenti lungo l'asse x. In blu gli spostamenti misurati, in magenta il loro integrale. La linea continua in nero (Poly nella legenda), è il fit della funzione integrale con un polinomio di secondo grado, mentre la linea retta (Linear) è il fit degli spostamenti rispetto alla posizione di riferimento sullo schermo.



Ricostruzione della forma 3d dello specchio mediante integrazione degli spostamenti lungo l'asse y. In blu gli spostamenti misurati, in magenta il loro integrale. La linea continua in nero (Poly nella legenda), è il fit della funzione integrale con un polinomio di secondo grado, mentre la linea retta (Linear) è il fit degli spostamenti rispetto alla posizione di riferimento sullo schermo

1.6 sistema per la misura della focale

Il secondo prototipo è stato montato all'aperto sulla terrazza dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri con lo scopo di misurare la distanza focale ed eventualmente fare un test di Roddier o Curvature sensing test.

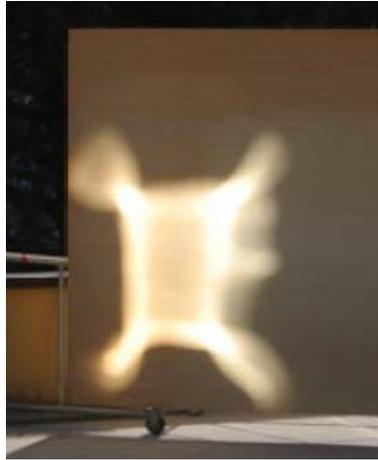
In questo caso la strumentazione utilizzata risulta costituita, in successione, da:

- da un supporto di tubi innocenti con ruote atto a sostenere il tavolino con lo specchio (1.2 x 1.6 m);
- uno schermo in legno di circa 2x3 m, coperto con carta quadrettata (con quadrettatura da 1x1 cm);
- da un sistema camera Reflex con relativo zoom fotografico (formato di output: RAW);

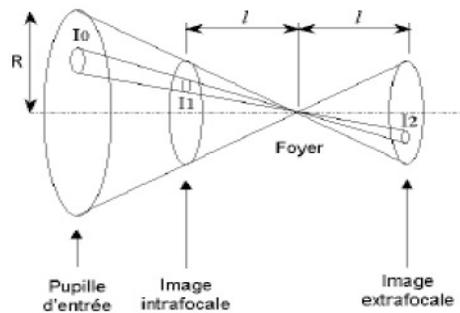
1.6.1 Principi del Test di Roddier

Per cominciare, consideriamo uno strumento perfetto. Otteniamo due immagini fuori fuoco poste alla stessa distanza dal fuoco, ma una prima e una dopo. La pupilla in entrata è illuminata in modo uniforme con intensità I_0 . Consideriamo una piccola porzione della pupilla: il flusso luminoso che passa da questa piccola porzione illumina l'immagine intrafocale su una superficie più piccola I_1 , e l'immagine extrafocale su una superficie I_2 della stessa dimensione.

Le due superfici I1 e I2 saranno uguali perché le due immagini sono alla stessa distanza dal fuoco. Quindi l'intensità iniziale I0 e' concentrata allo stesso modo nelle due immagini.



Schermo per la proiezione dell'immagine del sole



Schema delle immagini intra ed extra-focali di uno strumento perfetto

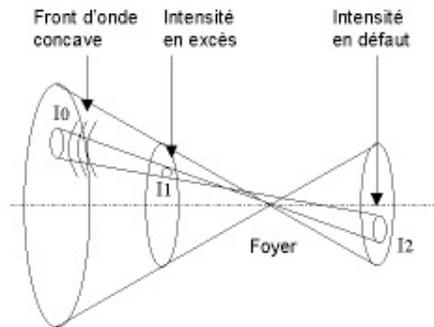
$$I_1 = I_2$$

Supponiamo adesso che il fronte d'onda abbia un difetto: sulla superficie della pupilla considerata precedentemente risulta in curvato. Il fuoco reale è per questa parte di pupilla situato piu' avanti rispetto al fuoco complessivo dello strumento. Sull'immagine intrafocale la luce è più concentrata che su quella extrafocale:

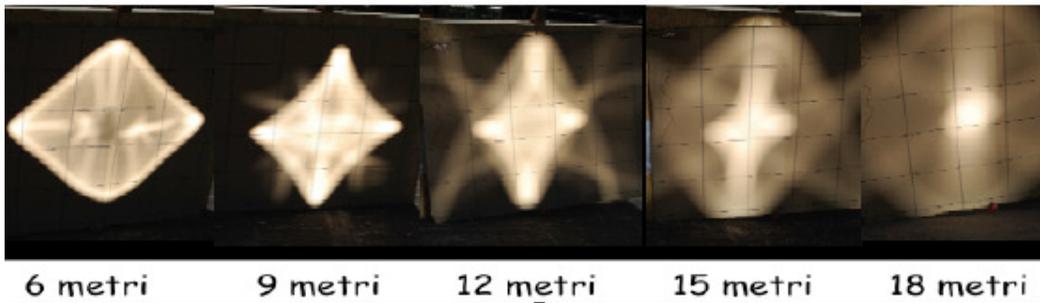
$$I_1 > I_2$$

Il test di Roddier consiste nel confrontare I1 e I2. Il calcolo di I2-I1 permette di risalire alla forma del fronte d'onda.

La teoria mostra che considerando le due immagini nel loro insieme, il segnale ottenuto dalla loro sottrazione è proporzionale al Laplaciano del fronte d'onda.

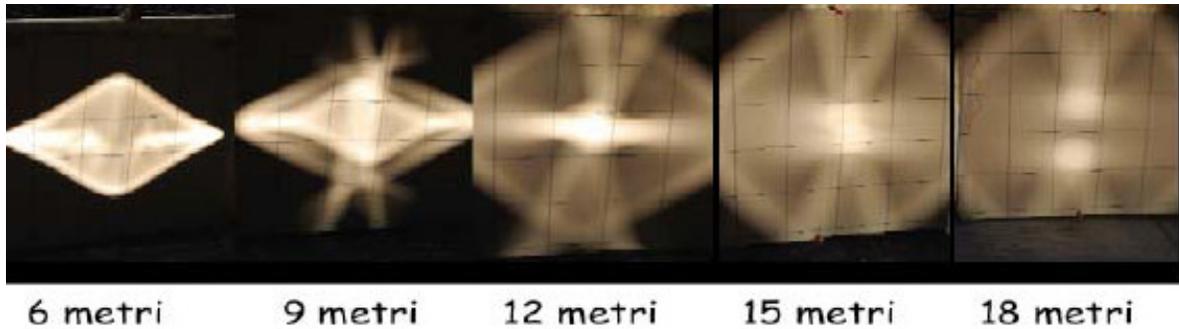


Schema delle immagini intra ed extra-focale di un strumento con un difetto ottico.



Immagini del sole prodotto dallo specchio curvato in posizione verticale a varie distanze

Quindi il problema è risalire dal Laplaciano alla forma del fronte d'onda e quindi dello specchio. Le nostre prime analisi si sono basate sull'osservazione dell'immagine riflessa del sole, individuando la miglior distanza focale in rapporto alla curvatura dello specchio. Nelle seguenti immagini si mostra l'immagine del sole prodotta dallo specchio a varie distanze dal suo asse e in due posizioni: verticale ed orizzontale. Si noti sia la variazione della distanza focale (circa 18 m per la posizione orizzontale e circa 12 m per la posizione verticale) che le diverse figure prodotte dallo specchio nella posizione orizzontale o verticale. Tale variabilità indica la grande influenza della gravità e del tipo di appoggio. Inoltre abbiamo notato che il posizionamento dei morsetti che tengono unito lo specchio alla cornice e al tavolino di piegamento influenzano la forma finale assunta dallo specchio.



Immagini del sole prodotto dallo specchio curvato in posizione orizzontale a varie distanze

Le immagine di Figura rappresenta la differenza tra due immagini, una intrafocale e una extrafocale, come richiesto del Test di Roddier o Curvature sensing.

Come si può vedere dalle zone più scure e da quelle più luminose lo specchio non ha un unico fuoco.

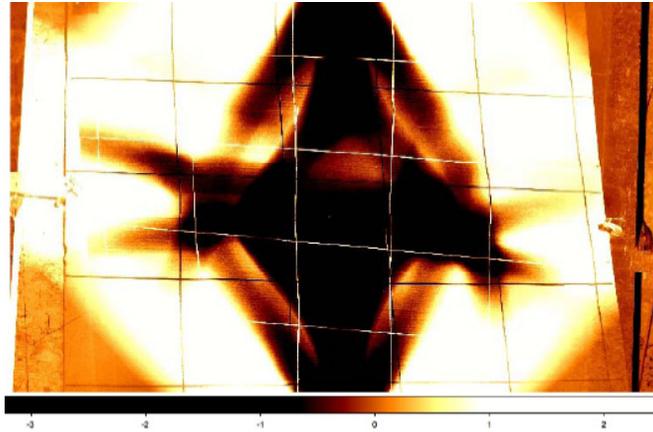
Lo specchio piegato con il tavolino in acciaio, fermato con nastro biadesivo e morsetti, come nel nostro primo prototipo, non riesce a riprodurre la forma geometrica che ci aspettavamo dalla teoria. Infatti un accurato calcolo agli elementi finiti prova che la forma che lo specchio così curvato dovrebbe assumere è quella del paraboloide.

Abbiamo analizzato possibili ragioni per queste divergenze dalla forma attesa:

1) tipo di incollaggio: nei primi prototipi abbiamo utilizzato del nastro biadesivo, con e senza uno strato di gomma di pochi mm per proteggere lo specchio. Sia il nastro biadesivo che la gomma possono aver alterato il piegamento dello specchio. Nel prototipo successivo, attualmente in fase di prova, abbiamo incollato direttamente lo specchio alla struttura metallica.

2) Struttura del tavolino di piegamento: la presenza di saldature, la non perfetta planarità del tavolino e della cornice superiore sono probabilmente la causa principale del fallimento dell'esperimento. Un nuovo tavolino è attualmente in fase di progettazione.

3) La presenza di morsetti, di nastro adesivo sulla parte posteriore dello specchio sono stati un'altra causa di variazione della forma dello specchio.



Differenza tra immagine intra ed extrafocale

1.7 Prototipi in legno MD

La terza fase del nostro studio è stata dedicata alla costruzione di una serie di prototipi di specchio pieghevole in legno MD (Medium Density). Il MDF (Medium density fibreboard, pannello di fibra a media densità) è un derivato del legno: è il più famoso e diffuso della famiglia dei pannelli di fibra comprendenti tre categorie distinte in base al processo impiegato e alla densità: bassa (LDF), media (MDF) e alta (HDF).

Il legno MD si presta perfettamente alla costruzione di prototipi per:

- i) facilità di reperibilità, lavorazione ed incollaggio;
- ii) caratteristiche quali il coefficiente di espansione termica ($4.5 \times 10^{-6} \text{mm/mm/}^\circ\text{C}$) e il modulo di Young (10-13 GPa) compatibili con quelle del vetro costituente lo specchio;
- iii) planarità della superficie, con variazioni rms inferiori a 0.3 mm, e massime di 0.5 mm.

Il nostro studio si è basato sulla costruzione di tre prototipi in MD, utilizzando gli specchi in vetro temperato forniti dalla Ronda Reflex. Lo scopo è stato quello di eliminare gli errori compiuti nella fase precedente, quali l'uso di stecche in ferro non rettificata, incollaggio non uniforme e a diverse temperature, presenza di saldature irregolari.

1.7.1 Cornice in MD e specchio

Il primo modello è costituito da due cornici in legno MD, ciascuna di spessore 1.9 cm e larghezza 7 cm. Lo specchio di spessore 0.86 mm è incollato tra le due cornici senza nessun sostegno posteriore.

Con un sistema di morsetti e cavi di acciaio la struttura di MD + specchio è stata piegata, in modo da curvare lo specchio nella forma richiesta.

Non è stato possibile ottenere un profilo parabolico, e l'immagine nella posizione focale risulta più grande e dispersa rispetto a quella attesa per uno specchio parabolico.

Si ottengono due fuochi, il primo a una distanza di circa 15 m corrispondente alle zone laterali maggiormente piegate, ed il secondo a circa 30 m relativo alle zone centrali dello specchio.

Uno studio più dettagliato agli elementi finiti ci mostra che questo comportamento è riconducibile al regime non lineare in cui lo specchio si trova durante la flessione. Infatti, la freccia necessaria per ottenere una focale di circa 17 m è dell'ordine di 1.5 cm. Questa freccia è quindi molto maggiore dello spessore di 0.86 mm, mentre per rimanere nel regime lineare dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza.

1.7.2 Cornice in MD, specchio, croci in MD

Il secondo modello è simile al primo per quanto riguarda la cornice esterna e lo specchio, ma ha in aggiunta due croci in MD dello stesso spessore e larghezza, una posta sulla faccia superiore ed una su quella inferiore dello specchio. Le due croci uniscono i punti medi dei quattro lati della cornice esterna.

Lo scopo delle due croci è quello di riportare la flessione dello specchio nel regime lineare, rinforzandone le parti centrali.

Il risultato però non è quello atteso, le quattro porzioni di specchio evidenziate della croce continuano a non seguire profili parabolici.

1.7.3 Cornice in MD, specchio superiore ed inferiore, supporto centrale

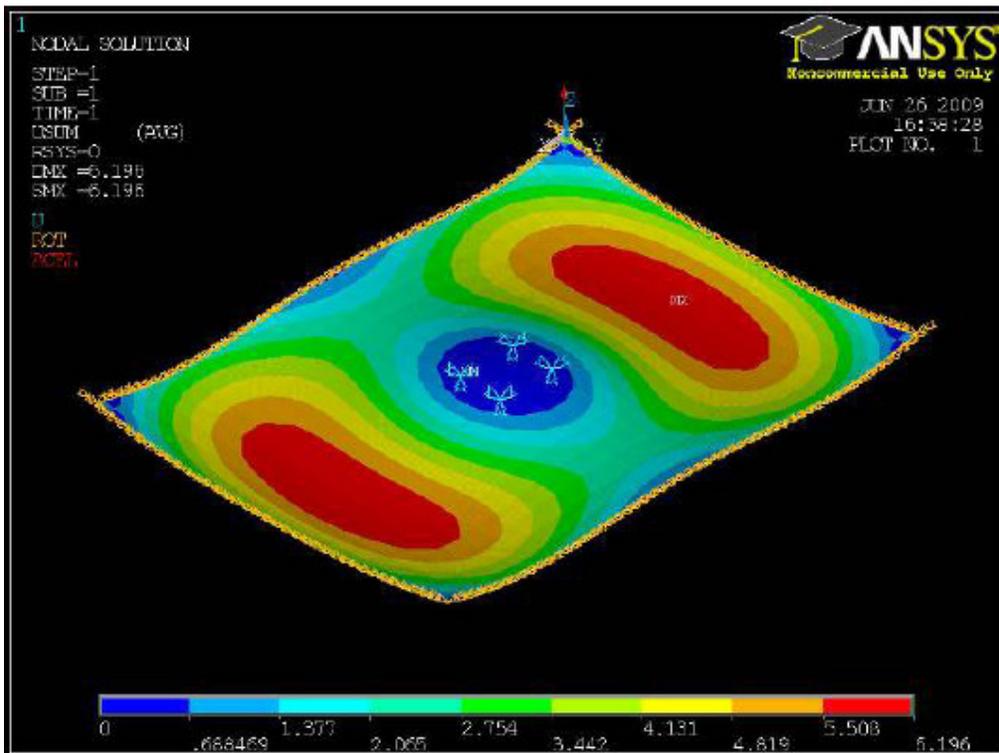
Il terzo modello ha lo scopo di rientrare nel regime lineare costruendo un supporto per lo specchio, di spessore superiore a quello della freccia massima richiesta per ottenere la focale di 17m.

Per mantenere la vena neutra nella parte centrale del supporto, una lastra di materiale isolante, abbiamo incollato in maniera simmetrica due specchi, uno sulla faccia superiore ed uno su quella inferiori. La cornice in MD ha le stesse dimensioni e caratteristiche delle precedenti.

Il risultato è stato una struttura troppo rigida per essere piegata. Lo specchio incollato sulla superficie sottoposta a trazione di è rotto.

Le conclusioni raggiunte in questo studio di fattibilità sono state che è necessario riportarsi nel regime lineare per ottenere specchi parabolici, ma che supporti troppo rigidi e spessi non permettono di piegare la struttura.

Una simulazione agli elementi finiti dello specchio con il supporto centrale ha fornito gli elementi per la costruzione del prototipo finale: un supporto centrale in MD di spessore 8 mm, uno specchio incollato sulla superficie superiore e una lastra in acciaio dello stesso spessore sulla superficie inferiore. Il prossimo passo è la costruzione di questo prototipo.



Studio agli elementi finiti della struttura tavolino e specchio. Si noti la forma parabolica assunta dallo specchio

2 STUDIO DI FATTIBILITÀ DI SISTEMI OTTICI AVANZATI PER LA CONCENTRAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE E VALUTAZIONE DELLE POTENZIALITÀ DI UTILIZZO

Di seguito si riporta un breve excursus delle ipotesi iniziali per la realizzazione del concentratore solare, però prima di spiegare tali sistemi è bene definire alcuni termini che saranno poi utilizzati per la descrizione dei modelli.

In generale nei vari modelli pensati il concentratore solare è composto da N moduli; un "Modulo" è composto da una colonna di M "Pannelli" attivi ed orientabili composti a loro volta da una matrice di $P \times Q$ "Specchi" piani.

Per "Focale" si intende la distanza a cui si sovrappongono tutti i fasci originati dagli specchi di un pannello.

Per Potenza Nominale si intende la potenza termica (al picco di insolazione) che raggiunge il collettore, nelle varie stime che sono state fatte inizialmente si è assunto che il picco di insolazione sia (W/m^2) 900.00, successivamente è stato ridotto a circa 600.00 W/m^2 .

Si assume un sistema di coordinate cartesiane con origine nell'intersezione fra asse di rotazione del concentratore e piano del terreno.

IPOTESI 1)

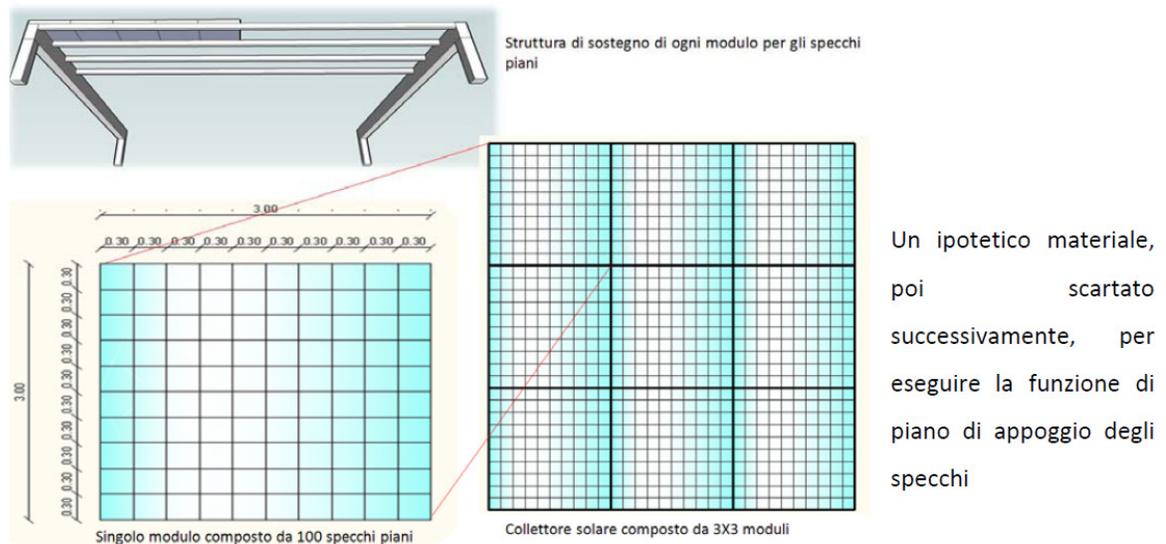
Il concentratore solare è composto da N moduli disposti in righe per colonne, in cui ogni modulo è formato da 100 specchi piani a sua volta disposti in 10 righe X 10 colonne, i profilati UNI sono un possibile esempio di materiale che può svolgere la funzione di aste di appoggio per gli specchi, è importante precisare inoltre che lo specchio dovrà comunque avere queste caratteristiche:

Distanza punti d'appoggio da bordo (m) 0,02

Distanza fra punti d'appoggio (m) 0,26

Spessore vetro (m) $8,60E-04$

Le caratteristiche geometriche del modulo sono riassunte nella seguente figura.



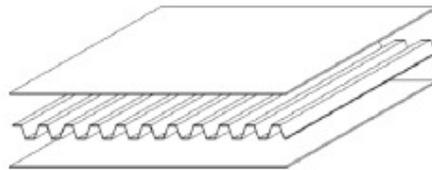
IPOTESI 2)

Ogni modulo è composto da n lastre di vetro i quali poggiano incollati su un pannello DOLUFLEX (ved. figura)

che permette di eliminare la perdita di efficienza di concentrazione della “doppia segmentazione”

(rispetto a

specchietti piani quadrati il guadagno in concentrazione è circa un fattore due).



Si eliminano inoltre gran parte dei meccanismi di supporto ed allineamento (nell'ipotesi di specchi di misura 30 X 30 cm si passa da 100 supporti a 10).

Con tale sistema si riduce parte della struttura di supporto (tutte le stecche della struttura a scaletta) ed i relativi problemi di protezione dalle intemperie dell'acciaio al carbonio.

3 VALUTAZIONE COSTI/BENEFICI

3.1 Effetti dell'ombreggiamento: Fotosintesi e Luce

Date le dimensioni del progetto si è pensato opportuno di eseguire uno studio sulla possibilità di vita, e quindi di una possibile variazione del processo di fotosintesi, delle piante presenti sul sito di destinazione del progetto.

Le piante, in genere, hanno un ampio corredo di pigmenti fotosintetici, che le consentono di assorbire quasi tutto lo spettro del visibile della radiazione solare incidente. A seconda del loro adattamento a regimi luminosi diversi le piante si possono suddividere in eliofile e sciafile, a meno che amino di più o di meno la luce. Questa attitudine si traduce in un tipico meccanismo di risposta della fotosintesi alla luce come riportato nella figura sottostante da Barbour et al. (1999)

Indipendentemente dal tipo di piante o di foglie che consideriamo la curva di risposta della

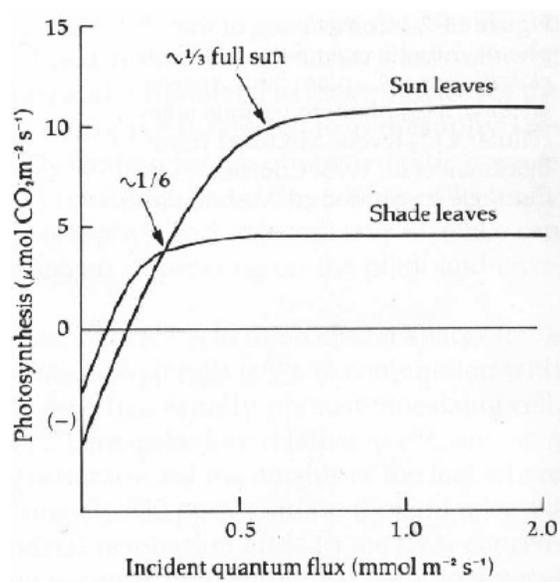
fotosintesi all'aumentare della radiazione, ha andamento caratteristico, infatti aumenta in modo proporzionale fino ad un massimo per saturare. La diversa soglia di saturazione differenzia le piante o le foglie di una stessa pianta se sono esposte al sole o all'ombra.

Questo vuol dire che l'efficienza della fotosintesi è massima anche a regimi radiativi bassi, inoltre va considerato che il processo fotosintetico è in continua "lotta fisiologica" con il processo traspirativo. Infatti

entrambi i processi avvengono attraverso le aperture stomatiche delle foglie, che consentono alla CO₂ di entrare, ma al tempo stesso, gli stomi consentono all'H₂O di evaporare, creando un flusso di calore latente. In poche parole, la pianta perde acqua.

Quindi non è da meravigliarsi che durante il giorno, nelle ore di massima insolazione la pianta sospenda la fotosintesi, in questo modo, tenendo gli stomi chiusi evita di perdere troppa acqua.

L'efficienza dell'uso della luce è definito come quantum yield ed è misurato dalla quantità di CO₂ fissata per unità di luce assorbita. All'interno della stessa pianta ci possono essere foglie adattate alla luce e foglie adattate all'ombra.



un
poi

Per calcolare se la realizzazione del progetto, ovunque venga messo, arrechi danni alla vegetazione retrostante dobbiamo considerare due situazioni di ombra che eventualmente la nostra struttura provocherebbe su di un ecosistema. L'ombra provocata direttamente dalla struttura ovvero quella porzione di terreno che anche al variare del moto apparente del sole rimarrebbe comunque in ombra e quella che varia in funzione del moto apparente del sole.

Nel primo caso ovviamente avremo un'influenza del fattore ombra molto determinante, la vegetazione non è in grado di crescere in assenza totale di radiazione, nel secondo invece non abbiamo nessuna conseguenza, forse sul lungo periodo potremmo avere dei meccanismi compensativi evolutivi, ovvero una prevalenza di specie vegetali sciafile piuttosto che eliofile.

A titolo di commento possiamo pensare all'ombra degli edifici sui giardini o alla vegetazione di alcuni boschi che a seconda della loro compattezza della chioma, possono far filtrare o meno la luce diretta. In questi casi abbiamo un sottobosco più o meno ricco di specie ma mai assenza di vegetazione.

Si può concludere, in seguito a quanto premesso, che lo stato vegetativo e del terreno imminente all'area degli specchi primari, non subirà particolari alterazioni, di conseguenza l'utilizzo di tale superficie può comunque essere mantenuto anche in seguito al posizionamento della struttura ove l'attività lo permette.

3.2 Benefici Ambientali

Si riporta di seguito una stima delle emissioni evitate supponendo di realizzare un impianto della potenza di

circa 500 kWp situato in una zona dell'Italia centrale utilizzando dati di radiazione UNI 10349:

- CO₂ 489.746 kg/anno;
- Tonnellate equivalenti di petrolio: 166,9 TEP/anno
- Emissioni di NO_x: 1088,3 kg/anno

Appendice - Il codice Perl

```
Makespaday.pl
#!/usr/bin/perl
use Math::Complex;
$year=$ARGV[0];
$month=$ARGV[1];
$day=$ARGV[2];
$temp=$ARGV[3];
$pres=$ARGV[4];
#create the program SPADAY.C for the given year, month, day
$iteration="01";
$it=1;
$continue=1;
while ($continue) {
$iteration=sprintf "%02d", $it;
$itplusone=$it+1;
$itminusone=$it-1;
$iterationplusone=sprintf "%02d", $itplusone;
$iterationminusone=sprintf "%02d", $itminusone;
#print "iteration: $iteration\n";
$spaday="/home/laura/STAR/spaday${iteration}.c";
open (OUT, ">$spaday") || die;
# da sunrise a sunset
if ($it>=1 && $it<=6) {
$hour=00;
$min=10*$it-10;}
elseif($it>=7 && $it<=12) {
$hour=01;
$min=10*$it-70;}
elseif($it>=13 && $it<=18) {
$hour=02;
$min=10*$it-130;}
elseif($it>=19 && $it<=24) {
$hour=03;
$min=10*$it-190;}
elseif($it>=25 && $it<=30) {
$hour=04;
$min=10*$it-250;}
elseif($it>=31 && $it<=36) {
$hour=05;
$min=10*$it-310;}
elseif($it>=37 && $it<=42) {
$hour=06;
$min=10*$it-370;}
elseif($it>=43 && $it<=48) {
$hour=07;
$min=10*$it-430;}
elseif($it>=49 && $it<=54) {
$hour=8;
$min=10*$it-490;}
elseif($it>=55 && $it<=60) {
$hour=9;
$min=10*$it-550;}
elseif($it>=61 && $it<=66) {
$hour=10;
$min=10*$it-610;}
elseif($it>=67 && $it<=72) {
```

```

$hour=11;
$min=10*$it-670;}
elseif($it>=73 && $it<=78) {
$hour=12;
$min=10*$it-730;}
elseif($it>=79 && $it<=84) {
$hour=13;
$min=10*$it-790;}
elseif($it>=85 && $it<=90) {
$hour=14;
$min=10*$it-850;}
elseif($it>=91 && $it<=96) {
$hour=15;
$min=10*$it-910;}
elseif($it>=97 && $it<=102) {
$hour=16;
$min=10*$it-970;}
elseif($it>=103 && $it<=108) {
$hour=17;
$min=10*$it-1030;}
elseif($it>=109 && $it<=114) {
$hour=18;
$min=10*$it-1090;}
elseif($it>=115 && $it<=120) {
$hour=19;
$min=10*$it-1150;}
elseif($it>=121 && $it<=126) {
$hour=20;
$min=10*$it-1210;}
elseif($it>=127 && $it<=132) {
$hour=21;
$min=10*$it-1270;}
elseif($it>=133 && $it<=138) {
$hour=22;
$min=10*$it-1330;}
elseif($it>=139 && $it<=144) {
$hour=23;
$min=10*$it-1390;}
print OUT <<EOI;
#include <stdio.h>
#include "spa.h" //include the SPA header file
int main (int argc, char *argv[])
{
spa_data spa; //declare the SPA structure
int result;
float min, sec;
spa.year = $year;
spa.month = $month;
spa.day = $day;
spa.hour = $hour;
spa.minute = $min;
spa.second =00;
spa.timezone = +1.0;
spa.delta_t = 65;
spa.longitude = +010.0806;
spa.latitude = 43.582476;
spa.pressure =$pres;
spa.temperature =$temp;
spa.slope = 30;

```

```
spa.azm_rotation = -10;
spa.atmos_refract = 0.5667;
spa.function = SPA_ALL;
result = spa_calculate(&spa);
if (result == 0) //check for SPA errors
{
FILE *f;
f = fopen("spa$iteration.dat", "w");
fprintf(f, "%.4i ", spa.year);
fprintf(f, "%.2i ", spa.month);
fprintf(f, "%.2i ", spa.day);
fprintf(f, "%.2i ", spa.hour);
fprintf(f, "%.2i ", spa.minute);
fprintf(f, "%.2i ", spa.second);
fprintf(f, "%.10f ", spa.azimuth);
fprintf(f, "%.10f ", spa.zenith);
fprintf(f, "%.6f ", spa.incidence);
fprintf(f, "%.4f ", spa.pressure);
fprintf(f, "%.4f ", spa.temperature);
fprintf(f, "%.6f ", spa.sunrise);
fprintf(f, "%.6f\n ", spa.sunset);
fclose(f);
} else printf("SPA Error Code: %d\n", result);
return 0;
}
EOI
$it++;
if ($it > 144) {exit}
}
```