Relazione Progetto STAR-

I Semestre 2009

INAF: Luciano Miglietta, Piero Salinari, Giovanna Benvenuti, Laura Magrini

Prototipo di laboratorio di un colettore solare con sistema adattivo per la correzione delle aberrazioni e inseguimento solare

Introduzione

Durante questa prima fase del progetto STAR si è rivolta particolare attenzione alla realizzazione del modello/prototipo e lo studio degli specchi che saranno utilizzati per la realizzazione del concentratore solare.

Il principale scopo di questa prima fase è stato di valutare la disponibilità e le possibilità offerte dal mercato nella ricerca dei materiali con particolare riguardo alla tipologia della struttura/scheletro di supporto del concentartore, la varietà degli specchi impiegabili in paralello alla realizzazione di test che potessero misurare qualitativamente le caratteristiche tecniche e le qualità ed inoltre l'error-budget del progetto. Principalmente sono state considerate le seguenti opzioni:

- 1. Ipotesi sulla fattibilità di sistemi ottici avanzati per la concentrazione della radiazione solare;
- 2. Valutazione delle potenzialità di utilizzo;
- Possibilita' presenti sul mercato per quanto riguarda la scelta degli specchi, considerando specchi creati con metodo di stiramento e con metodo float, ed i vari tipi di argentatura (a bagno, a spruzzo, a pennello);
- 4. Scelta del materiale di supporto per gli specchi;
- 5. I vari tipi di colla e i vari sistemi di fissaggio.

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 escursus 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 PxQ "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/m2) 900.00, successivamente è stato ridotto a circa 600.00 W/m2.

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 tabella



Un ipotetico materiale, poi scartato successivamente, per eseguire la funzione di piano di appoggio degli specchi

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

IPOTESI 3) - 4)

Un modello differente dai precedenti è stato pensato a seguito della visita alla ditta Ronda Reflex poichè è stato proposto di utilizzare un pannello precurvato in SMC, in due modi: incollare interamente lo specchio al pannello precurvato delle dimensioni di 1,6 X 1,2 m (dimensioni massime per la produzione industriale del supporto), altimenti incollare lo specchio a una cornice precurvata che funzionerebbe da supporto eliminando azioni inutili sullo specchio stesso.



Scelta dei materiali

Scelta degli specchi, del tipo di colla e tecnica di utilizzo

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

Per la realizzazione del concentratore sono state effettuate prove di incollaggio 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 provveduto ad applicarla con vari metodi. Le colle utilizzate sono:

1) ARALDITE 2010 La colla è stata distribuita uniformemente (spessore di circa 1 mm) con una spatola dentellata sia su una lastra di schiuma di vetro che una lastra di Al spessa 6 mm entrambe di dimensione coincidente con gli specchi (10X15 cm); vi è stato sovrapposto lo specchio dal lato argentato e infine, per una corretta esiccazione, è stato applicato un peso di 3 kg e su una piastra di vetro (0,85 mm) e 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, in entrambi i casi, si notano qualitativamente delle anomalie. Di seguito si riportano i risultati fotografici.

2) EPO 150 (EX EPO-INJ) Resina epossiduica pura per iniezioni: è un prodotto a base di resine epossidche 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 ≈ 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, poichè 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 per ENEA degli specchi del progetto Archimede, ha proposto l'utilizzo di

un'ulteriore tipo di colla monocomponente superfluida. Sarà nostro impegno testare, non appena possibile, la validità della tecnica di incollaggio proposta dalla dittaRonda. 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.



Scelta dei materiali di supporto dello specchio

Una scelta molto accurata, e tutt'ora in fase di completamento, è la scelta di materiali per la realizzazione del supporto allo specchio. brevemente si riportano le eventuali ipotesi

- Inizialmente il materiale prescelto per il supporto degli specchi era la schiuma di vetro poiché, come si vede dalla Tabella, ha circa lo stesso coefficiente termico del vetro dello specchio ed inoltre ha un buon coefficiente di resistenza.

• Le alternative proposte sono state:

- un supporto in alluminio/acciaio di tipo Doluflex, come descritto precedentemente, cioè una lamiera grecata ottenuta in linea con un sistema di formatura a freddo



- Pannelli in Honeycomb: pannelli la cui forma geometrica e quella tipica del nido

d'ape formato da celle esagonali, relizzati 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.

Infine è stata considerata la possibilità offerta dalla ditta Ronda High-Tech, che propone un pannello in SMC già composto realizzato con uno stampo personalizzabile. 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.

Struttura di sostegno

La struttura di sostegno allo specchio è stata realizzata in ferro delle dimesioni 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 di diametro XXXX 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 ulkteriore 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 rigidezza 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) Poichè 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 aralditica 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 forellato 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 curvature 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 disrtinta 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 nonostanrte la guaina in gomma e/o nastri biadesivi utilizzati, ecc...) e una analisi agli elementi finiti della simulazione della struttura attualemente 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. Fase 1 - primo prototipo: 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) 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 regolare, così da comporre un reticolo composto da quadrati di circa 20 cm di lato;
- c) da 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) da un sistema di ancoraggio meccanico per lo specchio di dimensioni 1.2 x 1.6 m. Lo specchio e' inserito in un "tavolino" che permette di curvare i quattro lati.



Figure 1: 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.



Figure 2: Struttura del sistema di monitoraggio della curvatura dello specchio

L'ambiente scelto per analizzare le immagini ottenute dalle prove è IRAF Image Reduction and Analysis Facility poichè 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 com la camera fotografica, con e senza rilessione 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 perchè 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 in Figura 2 e 3 le distorsioni delle ottiche relative ai due obiettivi 18 e 35 mm, rispettivamente.





COMPANY OF A



Le immagini sono state analizzate compiendo i seguenti passi:

- 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 xin, yin
- 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:

 $\sqrt{\left(x-0\right)^2+\left(y-p\right)^2}=y+p$ Semplificando l'equazione si ottiene la formula usuale della parabola

```
x^2 = 4pyy = \frac{x^2}{4p}
```

dove p e' la distanza focale della parabola.



Figure 3: definizione matematica 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 ripoportati 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.



Figure 4: 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.



Figure 5: 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.



Figure 8: Sostegno esterno per lo specchio

Fase 2 - secondo prototipo: 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:

a) da un supporto di tubi innocenti con ruote atto a sostenere il tavolino con lo specchio (1.2 x 1.6
m) (si veda Figura 11);

b) uno schermo in legno di circa 2x3 m, coperto con carta quadrettata (con quadrettatura da 1x1 cm) (Figura 12);

c) da un sistema camera Reflex con relativo zoom fotografico (formato di output: RAW);

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 IO. Consideriamo un piccola porzione della pupilla: il flusso luminoso che passa da questa piccola porzione illumina l'immagine intrafocale su una supeficie piu' piccola I1, e l'immagine extrafocale su una superfici I2 della stessa dimesione. Le due superfici I1 e I2 saranno uguali perchè le due immagini sono alla stessa distanza dal fuoco. Quindi l'intensità iniziale I0 e' concentrata allo stesso modo nelle due immagini.



Figure 7: Schermo per la proiezione dell'immagine del sole



Figure 8: Schema delle immagini intra ed extra-focali di uno strumento perfetto

11=12

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:

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.



Figure 11: Schema delle immagini intra ed extra-focale di un strumento con un difetto ottico.



distanze

Quindi il problema e' 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 dello specchio nella posizione orizzontale o verticale. Tale variabilità indica la grande influenza della gravità e del tipo di appaggio. 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.



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 puo' vedere dalle zone piu' scure e da quelle piu' 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 assumente è quella del paraboloide.

Abbiamo analizzato possibili ragioni per queste divergenze dalla forma attesa:

- 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 posso 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 planarita' del tavolino e della cornice superiore sono probabilmente la causa

principale del fallimento dell'esperimento. Un nuovo tavolino è attualmente in fare di progettazione.

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

Fase 3 – 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 espansone termica (4.5 x 10-6mm/mm/°C) e il modulo di Young (10-13 GPa) compatibili con quelle del vetro constituente 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 precendente, quali l'ultilizzo di stecche in ferro non rettificate, incollaggio non uniformi e a diverse temperature, presenza di saldature irregolari.

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 e' stato possibile ottenere un profilo parabolico, e l'immagine nella posizione focale risulta piu' 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.

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.

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 17 m.

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 dulla 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 simulatione 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.



Figure 10: Studio agli elementi finiti della struttura tavolino e specchio. Si noti la forma parabolica assunta dallo specchio.