

Supporti laterali

Romano Zen e Mauro Da Lio

Introduzione

In un riflettore newtoniano, la funzione della cella è sostenere lo specchio senza deformarlo. Questa funzione si spezza in due: sostegno posteriore e sostegno laterale (a mano a mano che il telescopio si inclina).

Abbiamo visto le problematiche relative al supporto posteriore della cella in un altro documento di approfondimento. In questo documento saranno esaminate le problematiche relative al supporto laterale.

A differenza del supporto posteriore, per il quale esistono informazioni per il calcolo abbondanti e perfino un software gratuito di calcolo (PLOP), nel caso di supporto laterale non si trovano informazioni altrettanto ricche.

Un punto di partenza potrebbe essere la pagina di Robert Houdart dedicata al calcolo del supporto laterale <http://www.cruxis.com/scope/mirroredgecalculator.htm>. La pagina fornisce la stima delle deformazioni superficiali interpolando i dati di un certo numero di analisi a priori fatte con gli elementi finiti. E' possibile scegliere fra tre tipi di supporto: a) la classica cinghia avvolta per 180°; b) due punti di appoggio separati di 90° e simmetrici rispetto al diametro verticale dello specchio; c) una struttura flottante (whiffle tree) fatta con 4 punti di appoggio simmetrici e separati di 45°.

La pagina fornisce anche un utile calcolo della posizione del baricentro dello specchio.

In tutti i casi le forze esercitate dai punti di appoggio o dalla cinghia devono essere posizionate nel piano del baricentro dello specchio e dirette secondo il piano. Anche piccole forze dirette in direzione ortogonale al piano possono avere un effetto disastroso, come posto in evidenza di Nils Olof Carlin <http://web.telia.com/~u41105032/sling/sling.htm>.

Un altro gruppo di articoli relativi alle problematiche laterali (a opera di Mauro Da Lio) è apparso su un blog: <http://autocostruttori.blogspot.com/2007/11/how-good-can-it-be.html> (e articoli precedenti).

Il problema non è solo degli astrofili, anzi: in letteratura si possono trovare diversi studi. Per esempio Schwesinger (Nondistorting lateral edge support of large telescope mirrors, Applied Optics, 33-7, pp. 1198-1202, 1994) studia la possibilità di supportare specchi di grande diametro (oltre 4 metri) attraverso molte connessioni incollate lungo la circonferenza che realizzano un insieme sofisticato di forze di trazione, compressione e taglio, e arriva, per uno specchio di 8 metri, a valori residui di deformazione pari a 0.5 nm rms. Cho e Stepp (Effect of Gemini primary mirror position, relative to the lateral support, on mirror figure, Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering ISSN 0277-786X, vol. 4003, pp. 165-175, 2000) studiano una cella formata da un sistema di flottante idraulico a 6 gradi di libertà per controllare la posizione e la geometria dello specchio primario di 8 m del progetto Gemini.

Celle ottimizzate con gli elementi finiti

In questo documento si studiano due sistemi alternativi di supporto laterale:

- a) Due punti di appoggio a 90° simmetrici rispetto al diametro verticale.
- b) Cinghia avvolta per 180°.

La figura che segue, illustra per maggiore chiarezza la geometria corrispondente al caso a.

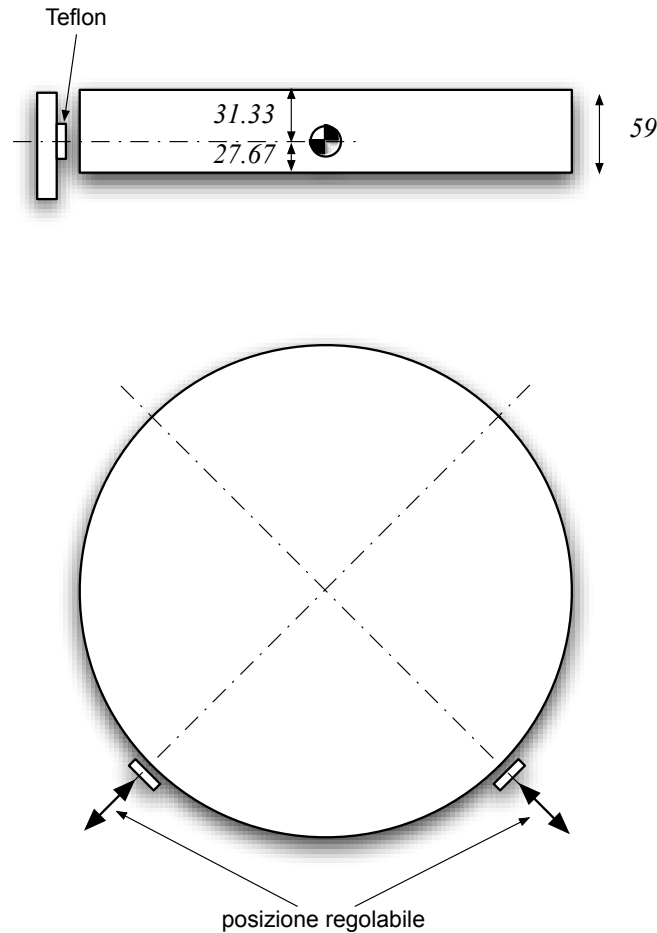


Fig.1 - Supporto laterale realizzato con due appoggi a 90°

Lo specchio è lo stesso esaminato nell'approfondimento relativo al supporto posteriore. Ha diametro di 600 mm, spessore al bordo di 59 mm (dopo la lavorazione), una lunghezza focale di 3000 mm (sagitta di 7,5 mm). L'ostruzione centrale è di 110 mm. Il materiale è SCHOTT SUPRAX, con caratteristiche riportate in tabella (per un confronto con il Pyrex si veda il precedente approfondimento).

	densità (kg/m ³)	modulo di elasticità (N/m ²)	modulo di Pois- son	conducibilità termica (W/m/°K)	coefficiente di espansione termica @20°C (°K ⁻¹)	calore specifico (J/kg/°K)
Suprax 8488	2.30e3	67.e9	0.2	1.2	4.30e-6	730 (?)

La figura illustra anche la posizione del centro di massa. È noto che le forze esercitate dal sistema di supporto laterale devono avere la retta di azione nel piano del centro di massa (vedi i link indicati nella introduzione).

Nel caso della soluzione con due supporti questo si può ottenere facilmente e con precisione, per esempio collocando dei tasselli di teflon nella precisa posizione del piano. Il teflon garantisce che le forze, oltre che essere applicate nel punto desiderato, abbiano anche inclinazione trascurabile rispetto al piano, grazie anche agli assestamenti durante i movimenti. Il alternativa si potrebbero usare appoggi a rulli, cuscinetti, o i classici "piano

wires". Per uno specchio di questa dimensione si pensa che sia preferibile garantire un'area di contatto uniforme e non troppo piccola, che si può ottenere solo se l'accoppiamento avviene per superfici (non per punti o linee). Il posizionamento dei tasselli di teflon in corrispondenza al piano desiderato si può fare con precisione (per esempio usando tasselli autoadesivi) soprattutto se si è avuto cura di segnare con una linea il piano del baricentro lungo il bordo dello specchio.

Per i motivi espressi nei documenti di approfondimento sul supporto posteriore, occorre anche poter regolare in direzione radiale i due supporti, come mostra la parte bassa della figura, allo scopo di ottenere un centraggio preciso dello specchio (si è infatti visto che è altamente raccomandabile centrare lo specchio rispetto alla cella con precisione almeno di un millimetro).

Nel caso il supporto sia realizzato con una cinghia, è possibile regolare la centratura verticale dello specchio regolando la lunghezza della cinghia (è necessario poterla controllare al millimetro). La posizione laterale potrebbe essere regolata con due piccoli appoggi sul diametro orizzontale (altrimenti varia se il telescopio non è in bolla). Infine la posizione della intera cinghia, compresi i tratti liberi, deve essere nel piano del centro di massa. Questa ultima cosa appare alquanto difficile da ottenere con la stessa precisione con cui si possono regolare i due appoggi.

Analisi delle due soluzioni e sensibilità agli errori di costruzione e di esercizio

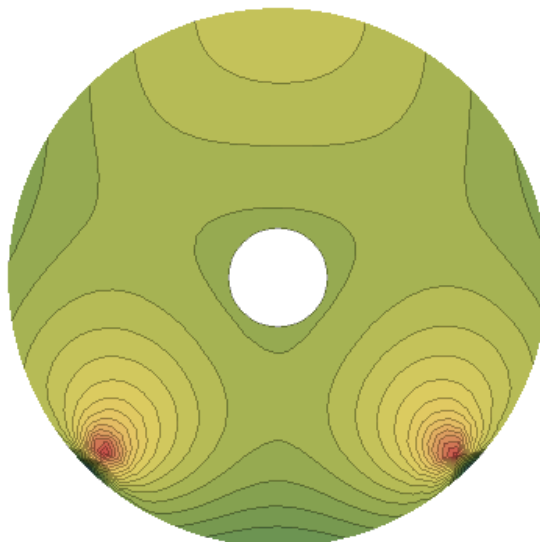
Come si è visto nel precedente documento, è importante non solo valutare le prestazioni teoriche di una cella perfettamente realizzata, ma stimare anche il degrado che si può produrre quando intervengono errori di costruzione e/o di regolazione della cella.

Da questo punto di vista la cella preferibile è quella più "robusta", vale a dire quella che garantisce la migliore geometria superficiale tenuto conto degli errori di costruzione o di regolazione. Di seguito si presentano alcune analisi agli elementi finiti, fatte con COMSOL.

a) Celle con due appoggi.

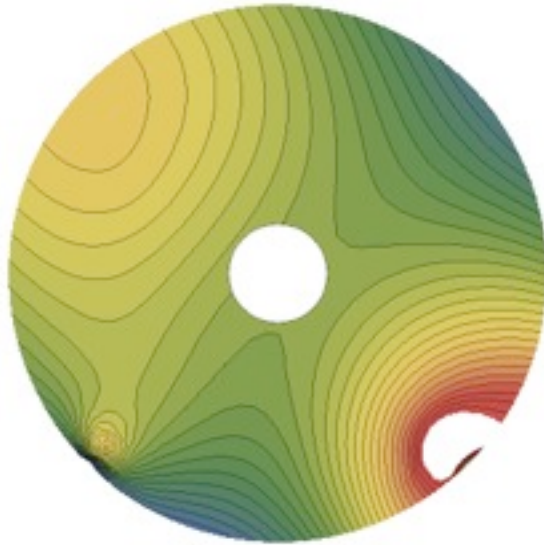
Nel caso di una cella con supporto su due appoggi sono stati considerati i seguenti casi:

- 1) **Realizzazione perfetta.** Supporti a 90° posti esattamente nel piano del baricentro. In questo caso si ottengono le deformazioni in figura e i seguenti valori di merito (N.B. si tratta di valori relativi alla superficie; sul fronte d'onda sono raddoppiati):
rms superficiale = 1,94 nm ($\lambda/284$); PV superficiale = 24 nm ($\lambda/22,9$).



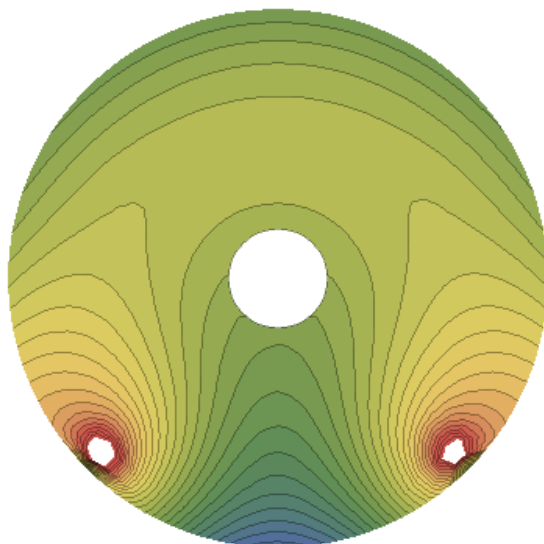
Le curve di livello della figura sono spaziate di 1 nm. Notare come si realizzano deformazioni elevate (24 nm PV) ma in corrispondenza ad aree molto piccole, vicine ai punti di appoggio. Queste deformazioni sono dovute al fatto che il materiale compresso nei punti di appoggio in senso radiale si espande lateralmente (il modulo di Poisson del materiale regola questa espansione traversa). L'area interessata da queste deformazioni è però molto piccola ed il valore rms dell'errore superficiale è contenuto sotto i 2 nm.

- 2) **Appoggio destro 1 mm sopra il piano del baricentro.** Si suppone che, per errori di registrazione, l'appoggio di destra si trovi 1 mm sopra il piano del baricentro. Si ottiene: rms superficiale = 5 nm ($\lambda/110$); PV superficiale = 46,6 nm ($\lambda/11,8$).



In questo caso la deformata è prevalentemente astigmatismo, con asse inclinato a 45°. È anche interessante osservare come un solo millimetro di errore sia sufficiente a indurre un errore superficiale al limite di quanto normalmente assunto come accettabile (ma un errore di 1 mm è facilmente controllabile in questo caso).

- 3) **Entrambi gli appoggi sono 1 mm sopra il piano del baricentro.** Si ottiene: rms superficiale = 4 nm ($\lambda/138$); PV superficiale = 32,8 nm ($\lambda/16,8$).



È interessante notare come la situazione sia migliore nel caso in cui entrambi gli appoggi abbiano lo stesso errore. Ancora, un errore di posizione degli appoggi di 1 mm è abbastanza facile da verificare, specie se si è segnato il piano del baricentro sul bordo dello specchio (oppure misurando la distanza fra superficie inferiore dello specchio ed appoggio con un calibro).

b) Celle con cinghia.

Nel caso di una cella con supporto a cinghia sono stati considerati i seguenti 4 casi:

- 4) **Realizzazione perfetta.** La cinghia si avvolge lungo 180° nella semicirconferenza inferiore; non c'è attrito con la superficie; la cinghia sta esattamente nel piano del baricentro inclusi i tratti liberi (si stacca dallo specchio restando perfettamente allineata con il piano). Gli errori che si ottengono sono:
rms superficiale = 1 nm ($\lambda/550$); PV superficiale = 6,3 nm ($\lambda/87,7$).

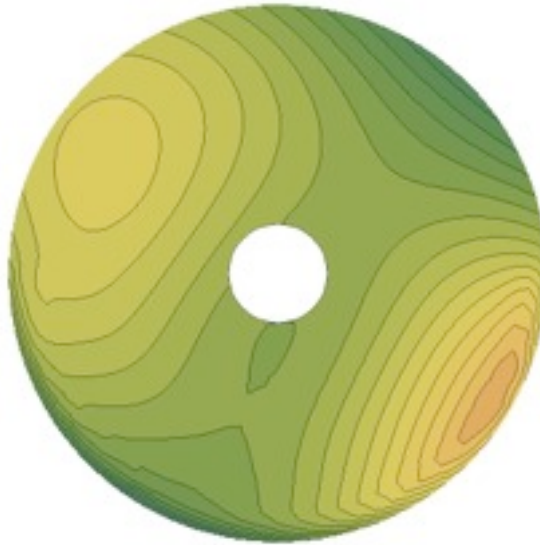


In questo caso si realizzano deformazioni veramente piccole. Le più importanti sono gli ingrossamenti in corrispondenza all'arco di avvolgimento della cinghia dovuti alla compressione radiale e alla conseguente espansione laterale del materiale che corrispondono alla formazione di due ampie colline alte 3 nm rispetto al centro dello specchio. Notare anche come l'estremo bordo inferiore sia ribattuto di 3-4 nm. In ogni caso si tratta di deformazioni trascurabili, che necessitano però di condizioni difficili da garantire. In particolare mantenere la cinghia sul piano desiderato per tutti i 180° di avvolgimento è più difficile che posizionare due punti di appoggio nel piano. Ancora più difficile è garantire che i tratti liberi fino ai punti di sospensione continuino a rimanere nel piano. Per non parlare della difficoltà di controllare l'attrito.

Le analisi seguenti quindi esaminano gli effetti di eventuali errori nella posizione della cinghia.

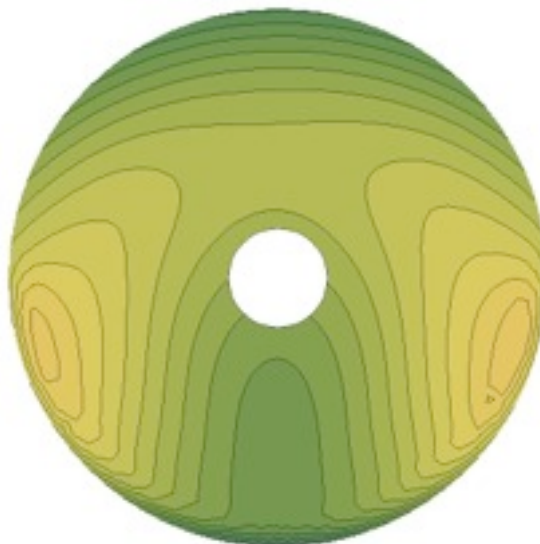
- 5) **Cinghia avvolta ad elica con passo di 1 mm.** Rispetto al caso precedente la cinghia entra in contatto a sinistra con il disco nel punto desiderato, ma durante l'avvolgimento procede ad elica e si stacca, a destra, 1 mm sopra il piano del baricentro. Questo caso corrisponde grossomodo al caso 2, nel senso che il lato destro della cinghia sta, al massimo, 1 mm più in alto del lato sinistro. Gli errori che si ottengono sono :

rms superficiale = 2,84 nm ($\lambda/194$); PV superficiale = 16,1 nm ($\lambda/34,2$).



La deformazione che si ottiene è prevalentemente astigmatismo, come nel caso 2. Apparentemente la situazione è meno severa che nel caso 2, ma non va dimenticato che mentre è facile registrare e verificare la posizione di un punto di appoggio, non è altrettanto semplice prevenire che la cinghia si avvolga ad elica avanzando di 1 mm.

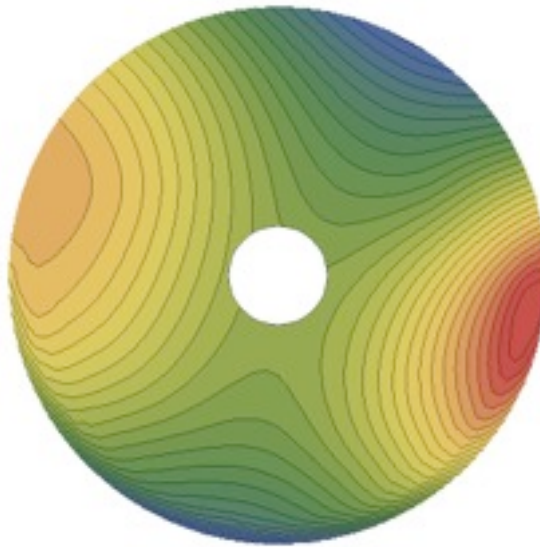
- 6) **Cinghia posta 1 mm sopra il piano del baricentro.** Come nel caso 4 eccetto che la cinghia sta 1 mm sopra il piano del baricentro. Questo caso corrisponde al caso numero 3. Gli errori che si ottengono sono :
rms superficiale = 2,33 nm ($\lambda/236$); PV superficiale = 13,8 nm ($\lambda/39,9$).



La deformazione che si ottiene è simile al caso 3 e apparentemente meno severa, ma, ancora, mentre è facile registrare e verificare la posizione dei punti di appoggio, non è altrettanto semplice farlo per la cinghia.

- 7) **Il tratto libero destro si stacca con inclinazione pari a 1/100.** Come nel caso 4 eccetto che la cinghia si stacca da destra con inclinazione di 1/100 radiante (soltanto

0.6°!). Questo corrisponde alla situazione esaminata da Nils Olof Carlin e menzionata in introduzione. Si tratta di un problema che non ha analogo nel caso dei punti di appoggio. Gli errori che si ottengono sono :
rms superficiale = 5,73 nm ($\lambda/96$); PV superficiale = 28,2 nm ($\lambda/19,5$).



In questo caso la deformazione è astigmatismo e non è piccola. Questo è il vero punto debole della cinghia. È sufficiente che la direzione in cui la cinghia tira sia appena 0.6° fuori dal piano per determinare astigmatismo sensibile, fatto del resto già messo da Nils Olof Carlin. La grande sensibilità a questo errore dipende dal fatto che le forze esercitate dalla cinghia nel punto in cui cambia direzione sono applicate ai punti estremi sul diametro orizzontale, rendendo in questo modo massimo l'effetto di flessione dello specchio.

Il motivo per cui la cinghia si stacca dal piano del baricentro con un certo angolo è dovuto al fatto che il punto di sospensione non è nel piano, cosa che è difficile da garantire mancando dei riferimenti precisi e la possibilità di fare misure. In linea di principio ogni volta che si ritocca la collimazione in maniera significativa, l'inclinazione dello specchio rispetto alla cella cambia e sarebbe quindi necessario aggiustare la posizione dei punti di sospensione.

Conclusioni

In condizioni ideali la cinghia garantirebbe il sostegno laterale dello specchio con le deformazioni minime. D'altra parte anche i due punti di appoggio garantiscono deformazioni molto piccole in condizioni ideali.

La vera differenza fra i due sistemi riguarda la possibilità di mantenere condizioni sufficientemente buone in esercizio. I due appoggi possono essere facilmente verificati, regolati e mantenuti nella posizione desiderata. Per esempio la vite di collimazione nella parte bassa dello specchio può essere usata per spostare in maniera micrometrica avanti e indietro lo specchio rispetto agli appoggi (per la collimazione si usano le due viti superiori). La posizione relativa di un tassello rispetto all'altro può essere facilmente misurata con un calibro e se necessario uno dei tasselli può essere spostato. Le situazioni indicate ai punti 2 e 3 appaiono quindi situazioni che possono essere abbondantemente garantite con facilità.

Per quanto riguarda le forze concentrate, esercitate sugli appoggi, si possono adottare tasselli di teflon con supporto adesivo spugnoso (come quelli da mettere sotto le gambe dei mobili). In questo modo si garantisce la distribuzione delle forze di contatto in maniera

uniforme. Nelle dimensioni di 10 mm x 20 mm il tipico carico che un tassello supporta (circa 250 N) corrisponde a sollecitazioni unitarie di pochi Newton per millimetro quadrato. Al contrario la cinghia è molto più difficile da gestire. Intanto perché è più difficile garantire la posizione della cinghia su tutto l'arco di avvolgimento, ma soprattutto, il vero limite della cinghia è la necessità di assicurare che i tratti liberi che si staccano dallo specchio siano nel piano desiderato con una precisione di mezzo grado! In linea di principio è possibile pensare che, con molta più attenzione, si possa regolare la cinghia. Resta però il fatto che questa regolazione è "accoppiata" con la regolazione della collimazione e andrebbe aggiustata ogni volta che si ritocca la collimazione.