

COSTRUZIONE DI UNO SPECCHIO ASTRONOMICO TEORIA E PRATICA

di

PROF. ANTONIO MISSANELLI



Il progetto, ideato e fermamente voluto dal Prof. Massimo Capaccioli, con la collaborazione del Prof. Antonio Missanelli dell'Istituto di Ottica Bernini, via Arco Mirelli 19 - Napoli, prevede la fornitura ai vari Istituti concorrenti di un kit completo d'assemblaggio di un telescopio Newton dalle caratteristiche avanzate (fig.1, 2) tali da soddisfare le esigenze di un astrofilo medio, e rappresentare una fondamentale esperienza per le scuole partecipanti al progetto, che alla fine disporranno di un validissimo ausilio per l'insegnamento dell'Astronomia, tale da sperimentare dal vivo tante nozioni che, nella strutturazione attuale dell'insegnamento, quasi sempre rimangono estremamente vaghe e nebulose. Col telescopio viene fornita anche una telecamera Meade.



Figura 1

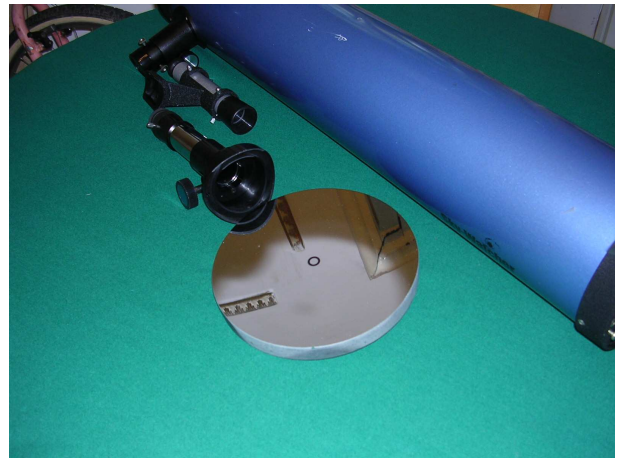


Figura 2

Ciò è stato possibile con un'oculatissima gestione dei fondi disponibili che ha reso possibile estendere la partecipazione a 10 Istituti. Inoltre parte delle attrezzature (polveri, sferometri, manuali, ecc.), che inevitabilmente hanno maggiormente inciso sul budget, sono disponibili per altre future iniziative che potranno interessare numerosissimi altri Istituti anche di altre regioni.

Le stesse Ditte fornitrici hanno limitato al massimo i loro guadagni, consapevoli dell'importanza del progetto.

In questo modo l'Osservatorio Astronomico di Capodimonte può fornire un prodotto di ottime caratteristiche suscettibile di miglioramenti e degno della sua grande tradizione scientifica.

Si è preferito fornire un kit completo per evitare che i tempi di costruzione si dilatassero "astronomicamente" nel reperimento, adattamento, costruzione dei singoli pezzi, con il rischio poi di avere uno strumento non finito o comunque molto approssimato.

La parte da costruire è lo specchio primario dal quale dipende in definitiva la bontà di tutto lo strumento finito.

Sarà quindi la bravura di ogni concorrente a far sì che alla fine del concorso anziché avere un tubo di stufa con manopole si possa aver realizzato uno strumento dalle caratteristiche indicate nelle tabelle.

La parte ottica è sorretta da una montatura molto stabile in grado di supportare anche accessori molto pesanti (macchine fotografiche, duplicatori di focale, raddrizzatori d'immagine, ecc.).

È inoltre dotato di motorizzazione su due assi regolabili con pulsantiera.

Presenta inoltre il cannocchiale polare per la messa in stazione rapida del telescopio.



Caratteristiche più approfondite sono reperibili nei manuali tecnici propri dell'apparecchio e comunque verranno forniti in corso d'opera.

Caratteristiche generali dei telescopi

Senza entrare nel merito delle caratteristiche ottiche dei vari telescopi (che potranno essere oggetto di ulteriori approfondimenti), si allegano alcune tabelle esplicative (tab. 1, 2, 3).

Diametro obiettivo (cm)	Raggio falso disco = limite di Rayleigh	Potere risolutivo	Limite di Dawes	Limite riconosci- mento doppie	Limite dettagli «puntiformi»
3	4",7	4",0	3",9	2",4	1",6
4	3,5	3,0	2,9	1,8	1,2
5	2,8	2,4	2,3	1,4	0,96
6	2,3	2,0	1,9	1,2	0,80
7,5	1,9	1,6	1,5	0,96	0,64
8	1,7	1,5	1,4	0,90	0,60
9	1,5	1,3	1,29	0,80	0,53
10	1,4	1,2	1,16	0,72	0,48
12	1,2	1,0	0,97	0,60	0,40
15	0,9	0,8	0,77	0,48	0,32
20	0,7	0,6	0,58	0,36	0,24
25	0,6	0,5	0,46	0,29	0,19
30	0,5	0,40	0,39	0,24	0,16
40	0,35	0,30	0,29	0,18	0,12
60	0,23	0,20	0,19	0,12	0,08
80	0,17	0,15	0,14	0,09	0,06
100	0,14	0,12	0,116	0,072	0,048
200	0,07	0,06	0,058	0,036	0,024
500	0,03	0,024	0,023	0,014	0,0096
600	0,02	0,020	0,019	0,012	0,0080

Tabella 1

Diametro obiettivo (cm)	Guadagno (geometrico) rispetto all'occhio (7 mm)	Magnitudine limite
3	18	9,2
4	33	9,8
5	51	10,3
6	73	10,7
7	100	11,0
7,6	118	11,2
8	131	11,3
9	165	11,6
10	204	11,8
11	247	12,0
12	294	12,2
13	345	12,4
15	459	12,7
20	816	13,3
25	1276	13,8
28	1600	14,0
30	1837	14,2
35	2500	14,5
40	3265	14,8
80	13061	16,3
100	20408	16,8
200	81633	18,3
600	734594	20,7

Tabella 2

Diametro obiettivo (cm)	Ingr. minimo	Ingr. risol.	Ingr. max teorico o utile	Ingr. max ef. rifl.	Ingr. max ef. rifr.
3	4x	15x	50x	80x	90x
4	6x	20x	67x	100x	120x
5	7x	25x	83x	120x	150x
6	9x	30x	100x	150x	173x
7,6	11x	38x	127x	170x	200x
8	11x	40x	133x	185x	224x
9	13x	45x	150x	198x	245x
10	14x	50x	167x	210x	264x
11	16x	55x	183x	221x	282x
12	17x	60x	200x	232x	300x
13	19x	65x	217x	242x	316x
15	21x	75x	250x	262x	346x
20	29x	100x	333x	305x	412x
25	36x	125x	417x	343x	469x
28	40x	140x	467x	364x	500x
30	43x	150x	500x	377x	520x
35	50x	175x	583x	408x	566x
40	57x	200x	667x	437x	608x
45	64x	225x	750x	464x	648x
50	71x	250x	833x	490x	686x
60	86x	300x	1000x	538x	755x
80	114x	400x	1333x	622x	877x
90	129x	450x	1500x	660x	933x
100	143x	500x	1666x	696x	985x
150	214x	750x	2500x	854x	1212x
200	286x	1000x	3333x	987x	1404x
250	357x	1250x	4167x	1105x	1572x
500	714x	2500x	8333x	1564x	2229x
600	857x	3000x	10000x	1713x	2443x

Tabella 3

Telescopio di Newton

telescopio che ci apprestiamo a costruire è un Newtoniano o riflettore che presenta uno schema molto semplice (fig. 3); risulta anche molto facile da collimare ed è quindi alla portata di tutti. *Autore: G. B. Sé.*

Altri schemi ottici risultano più complessi o comunque le singole parti sono di più difficile realizzazione.

iamo alcune semplici nozioni di ottica.

La luce, proveniente dall'infinito, che incide sullo specchio parabolico S, parallelamente all'asse ottico, sarebbe concentrata nel fuoco primario F1 se non fosse deviata in F^I dallo specchietto piano S^I, inclinato a 45° rispetto all'asse ottico e avente forma ellittica.

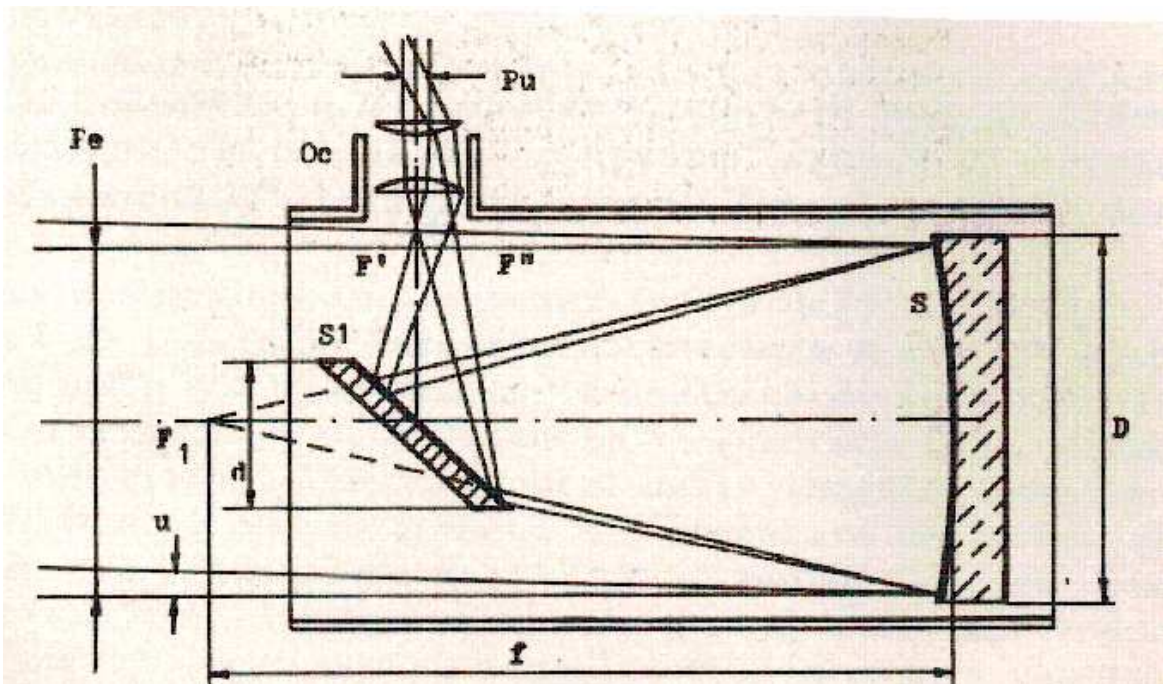


Figura 3

analogamente la radiazione inclinata rispetto all'asse viene focalizzata in F^{II} .

immagine viene osservata mediante l'oculare OC oltre il quale, in prossimità della p
ta (PU), è posto l'occhio dell'osservatore. Nei primi telescopi, tra i quali sono famosi qu
el, il primario era realizzato mediante ottone lucidato; attualmente da vetro industriale o n
ro a basso coefficiente di dilatazione.

causa dello specchietto S1 lo strumento risulta parzialmente oscurato. In realtà viene tolta una piccolissima quantità di luce incidente sullo strumento (esempio: se il secondario ha un diametro di 10 mm e il principale di 150 mm, si dimostra che viene tolto solo il 4% della luce).

I riflettori più in uso fra gli astrofili hanno un diametro intorno ai 200 mm e un'apertura $D/f = 1/6$. Il secondario viene scelto di dimensioni $1/5$ o $1/6$ del principale. Data la sua posizione inclinata rispetto all'asse ottico, dovrà essere di forma ellittica (per ottimizzare la montatura e la superficie utile per la riflessione) con asse minore $= d$, mentre l'asse maggiore sarà $d \cdot 1,41$.

Il primo modello fu presentato da Newton alla Società Reale di Londra nel 1672 e lo specchio primario aveva un diametro di 37 mm con una focale di 16 cm ed era realizzato con metallo di campana reso lucido da una soluzione di arsenico. Tutto il telescopio presentava un ingrandimento di 38x.

In seguito, come materiali furono usate:

- leghe di rame più arsenico
- lega di 68% di rame più 32% di stagno (SnCu_4) detta speculum

con uno di questi telescopi costruiti da Herschel nel 1789 (122 cm di diametro, 12,2 m di focale, 960 kg) furono scoperti i satelliti Encelado e Mimas.

Questi specchi però avevano una bassa riflettività (circa 55%) finché nel 1856 fu introdotta, ad opera di Steinheil e Foucault, l'argentatura su vetri ottici lavorati.

Attualmente tutti i grandi telescopi sono riflettori anche se con schemi ottici più complessi rispetto al modello di Newton.

L'impiego dei telescopi di grandi diametri, che implicherebbero un aumento di spessore dello specchio (in genere lo spessore è uguale a $1/5$ o $1/6$ del diametro), ha portato all'elaborazione di particolari tecnologie sia per i materiali impiegati che per le strutture di supporto:

- specchio a tasselli (fig. 4)



Figura 4

- ottica attiva (fig. 5, 6)

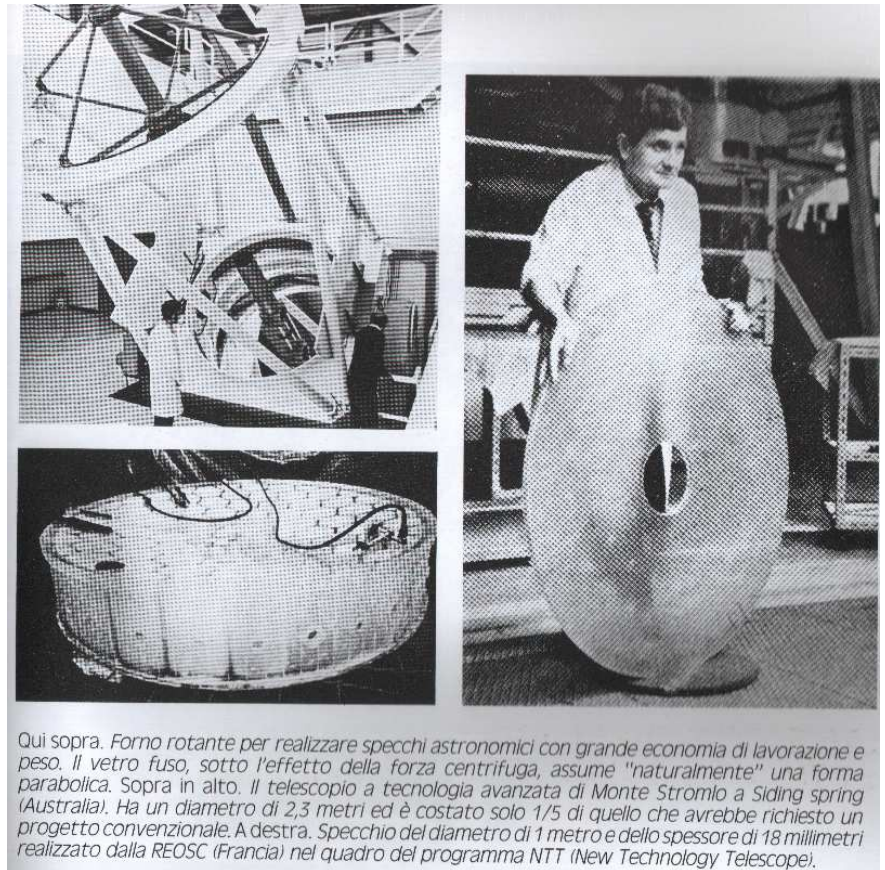


Figura 5



Figura 6

Vengono ora fornite le caratteristiche tecniche delle materie prime fornite.

Il vetro

Sono attualmente disponibili diversi tipi di vetro con diversi coefficienti di dilatazione (i prezzi sono inversamente proporzionali!!):

	coefficiente di dilatazione parti per.
vetro industriale	8,9 per milione per grado
Pirex	
Duran 50	3,2 per milione per grado
Zerodur	0,01 per milione per grado
Corning Ule	non determinabile

La differenza è dovuta oltre al coefficiente di dilatazione, anche al prezzo.

In genere per strumenti fino a 15-20 cm di diametro si usa il vetro industriale, disponibile in commercio in lastre fino a uno spessore massimo di 20 mm (spessori superiori sono più difficili da trovarsi, poiché nell'industria vetraria gli spessori maggiori vengono realizzati con lastre pluristratificate). Lo spessore in genere viene scelto in rapporto al diametro dello specchio e risulta compreso tra $1/5 - 1/6$ del diametro.

I vetri forniti (fig. 7) sono costituiti da 2 dischi da 15 cm di diametro di cui:

- uno di spessore 20 mm, costituirà lo specchio concavo finale
- l'altro di 12 mm, rappresenta l'utensile



Figura 7



Figura 8

I bordi sono stati già bisellati per evitare che nella lavorazione si possano staccare delle schegge che finendo fra i 2 vetri li righerebbero irrimediabilmente.

Le facce non interessate alla lavorazione sono state opportunamente smerigliate: per evitare specialmente nelle fasi di controllo della lucidatura indesiderati fenomeni di riflessione della faccia posteriore che interferirebbero con quelli della faccia anteriore. È bene che su queste prima della lavorazione vengano disegnate con pennarello indelebile le sigle:

S = specchio (fig. 8)

U = utensile

Nel taglio è stato controllato che la lastra di partenza non presentasse difetti ottici propri della massa vetrosa (bollicine, striature, tensioni, ecc.) (fig. 9, 10, 11, 12, 13).



Figura 9

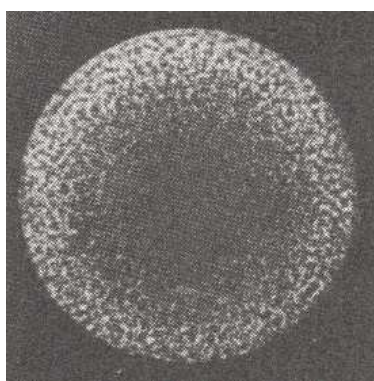


Figura 10

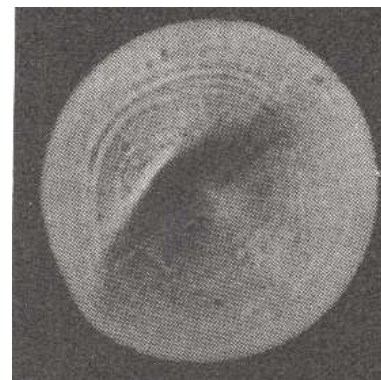


Figura 11

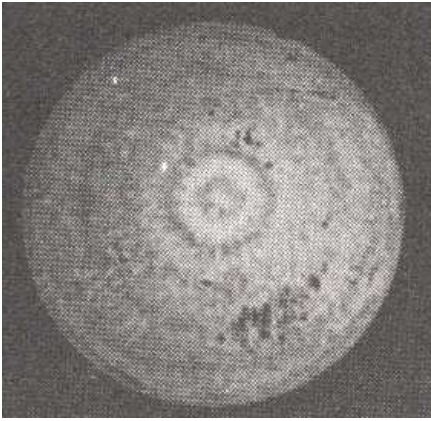


Figura 12

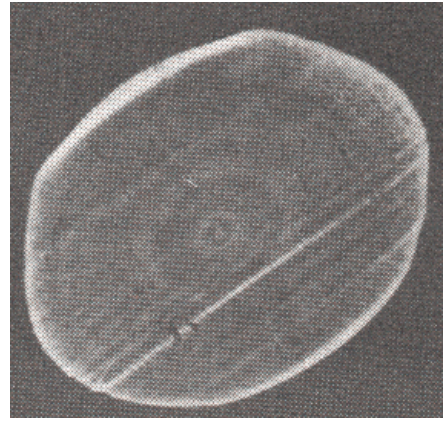


Figura 13



Figura 14

Tali difetti non influiscono sulla riflessione (lo strato argentato è sulla faccia anteriore) possono però creare problemi nella dilatazione che per la non isotropia del materiale si potrebbe espletare solo in alcune direzioni.

Il controllo va fatto anche sull'utensile poiché anche se di costo inferiore potrebbe essere riutilizzato per la costruzione di un altro specchio, sia come utensile sia come futuro specchio.

In alcune lavorazioni l'utensile è di metallo (già fornito a curvatura finale, simile alle patine delle lenti oftalmiche) ma è preferibile in ogni caso usare materiali uguali sia per lo specchio che per l'utensile, in quanto l'abrasivo incontra la medesima resistenza su entrambi i vetri e lavora in modo più uniforme. L'utensile e lo specchio hanno spessori differenti per ridurre la spesa.

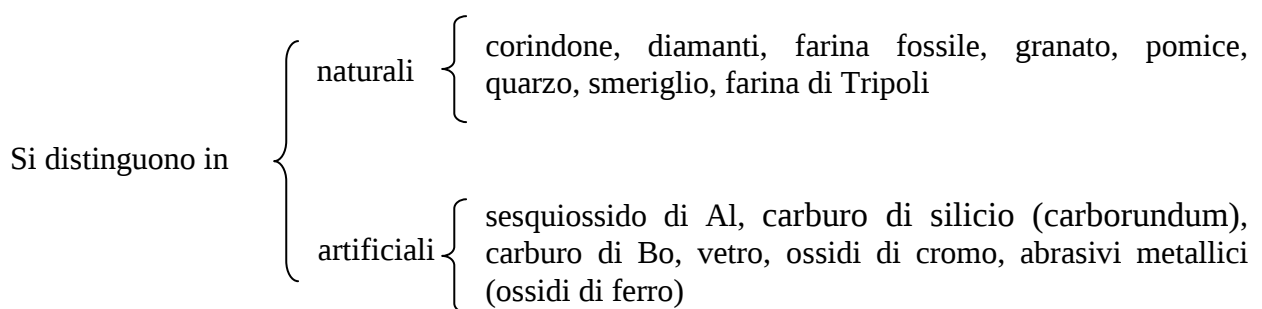
Abrasivi

Per ottenere la curvatura desiderata è necessario che i 2 vetri vengano trattati con appositi abrasivi.

Essi sono sostanze di notevole durezza che sotto forma di granelli taglienti servono per asportare del materiale dalle superfici di lavorazione.

Sono usati:

- direttamente sotto forma di polvere asciutta o inumidita con acqua o olio
- conglomerati sotto forma di mole, cartavetrata, tela smeriglia, ecc.



Un tempo in ottica (all'epoca di Galileo) venivano usate per la sgrossatura particolari sabbie (famosa era quella della spiaggia di Pesaro) mentre nella fase della lucidatura veniva usato fino a poco tempo fa l'ossido di ferro detto anche "rossetto dei gioiellieri" ora in disuso per la sua tremenda capacità di colorare in rosso ogni cosa, dagli strumenti di lavoro, alle facce e alle tute dei lavoratori addetti alla lucidatura, chiamati appunto "uomini rossi".

Attualmente per la sgrossatura e smerigliatura si usa il

carburo di silicio o carborundum (CSi) (fig. 15)

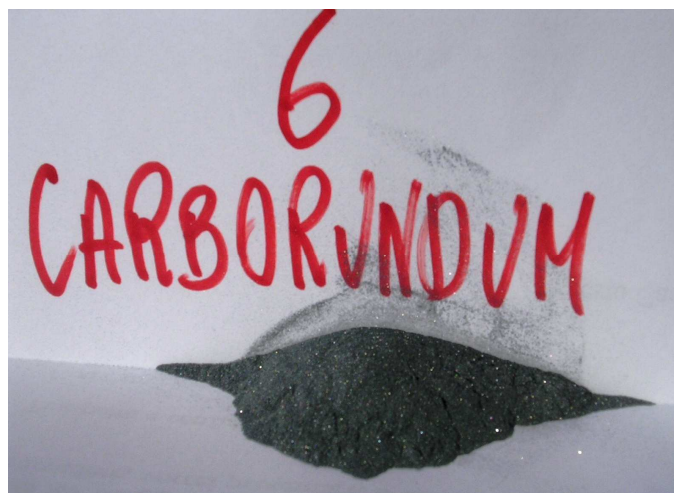


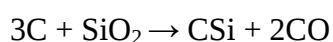
Figura 15

Si presenta in cristalli di color grigio-nero con riflessi azzurro-violacei. È durissimo (9,5 – 9,7 nella scala di Mohs).

Contiene: 30% di carbonio, 70% di silicio.

Viene preparato in forni elettrici scaldando a 2000 gradi una miscela di:

- 60 parti in peso di coke
- 100 di sabbia silicea finissima
- 10 di segatura di legno
- 10 di sale



Il sale serve a eliminare alcune impurezze: la segatura serve a mantenere porosa la massa e facilita lo svolgimento del CO. È posto in commercio sottoforma di polvere più o meno fine.

La finezza è indicata da un particolare numero che in origine indicava:

il numero di minuti durante i quali la polvere può rimanere sospesa nell'acqua.

Il metodo è ormai obsoleto ma è citato nei manuali di lavorazioni ottiche molto vecchi. Il processo viene denominato elutriazione.

Attualmente invece indica il numero delle maglie per pollice quadrato del setaccio attraverso il quale l'abrasivo viene selezionato: quindi gli abrasivi più fini sono quelli a numero più elevato.

Minore è il numero che esprime la grana, maggiori sono le dimensioni dei granuli (fig. 16). Quindi gli abrasivi di grana 60 hanno granuli di grosse dimensioni, mentre quelli grana 1000 li hanno piccolissimi.

A tutt'oggi non esiste una vera e propria standardizzazione dei numeri delle grane. I fabbricanti non rivelano i diametri dei fili delle tele dei propri setacci, per cui non è detto che le particelle di abrasivo 120 della ditta A abbiano lo stesso diametro della grana 120 della ditta B.

Il problema in realtà è solo apparente poiché sul mercato le ditte fornitrici sono pochissime e quindi si finisce per rivolgersi sempre alla stessa ditta.

In genere il prezzo delle polveri varia da 4 a 16 euro: l'inconveniente è che la fornitura avviene in sacchi da 25 kg; il singolo dilettante può eventualmente rivolgersi a Istituti di ottica, che nel loro programma d'insegnamento prevedono la lavorazione degli

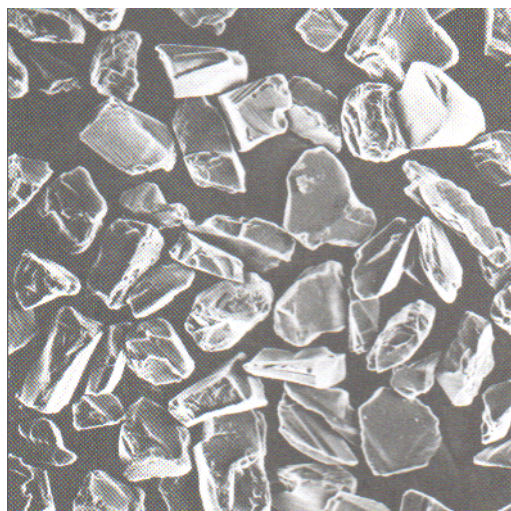


Figura 16

specchi e che saranno ben lieti di fornire anche tutte le indicazioni tecniche (Ipsia Bernini, Napoli: Prof. Antonio Missanelli).

Nel progetto sono fornite grane diverse da usarsi nelle varie fasi della lavorazione.

Nella sgrossatura iniziale è consigliabile insistere fin quasi al raggiungimento del raggio finale con la grana più grossa che è quella che più rapidamente abrade.

Le polveri a grana minore servono solo per la finitura finale, quando cioè si è ottenuta quasi la curvatura finale.

I vari tipi di grana vanno tenuti assolutamente separati fra di loro e nel cambio grana bisogna curare attentamente la pulizia dei vetri che vanno abbondantemente e ripetutamente risciacquati con acqua. Anche il piano del supporto va risciacquato (perciò abbiamo consigliato un particolare supporto). Ciò serve ad evitare che anche un solo grano della polvere precedente rimanga sul tavolo. Ciò significherebbe ricominciare da capo il lavoro.

Esistono altri tipi di abrasivi tipo:

- derivato del corindone
- derivati dello zirconio

Noi stessi durante una lavorazione, per mancanza momentanea della grana più grossa di carburundum, abbiamo usato l'abrasivo che un tempo veniva usato per la smerigliatura delle sedi delle valvole dei motori (pare che attualmente non si faccia più). Questa polvere è disponibile in tubetti, tipo dentifricio, detta Loctite e si presenta in pasta. Permette una rapida lavorazione della sgrossatura. L'inconveniente di tutte queste altre polveri è rappresentato dal prezzo.

Sesquiossido di alluminio (Al_2O_3)

In natura si trova sottoforma di:

- corindone: è presente nei terreni alluvionali derivante dalla distruzione delle rocce.
- smeriglio: è una varietà del precedente con impurità di ossido di ferro.

Artificialmente (presenta vari nomi: aldemite, aloxite, alundum, electric, alettrorubino, oxidalum) viene ricavato dalla bauxite preventivamente frantumata. Il materiale viene poi posto in forni rotativi elettrici mescolato ad antracite e trucioli di ferro. Fondendo il tutto a 2200 °C si forma il ferro silicio che essendo più pesante si separa facilmente dal sesquiossido di alluminio, avendosi così un prodotto estremamente puro (95-99%).

Il suo colore può variare dal grigio al bianco con riflessi metallici. Quello comunemente usato per le lavorazioni ottiche è bianco. La sua durezza Mohs è compresa tra 9 e 10.

La polvere abrasiva usata nel progetto è la Microgrit Wca particolarmente indicata per la smerigliatura e finitura delle superfici ottiche.

In essa i grani sono prodotti e dimensionati mediante un particolare procedimento brevettato ed ogni particella rappresenta un cristallo esagonale separato: questo procedimento consente di ottenere polveri abrasive perfettamente uniformi (fig. 17).

I cristalli hanno una superficie levigata e una forma a disco; proprio grazie a questa particolare struttura i grani abrasivi di Microgrit Wca si orientano parallelamente alla superficie da lavorare: ne risulta che le particelle agiscono con azione radente producendo una smerigliatura fine ed uniforme; nello stesso tempo resistono maggiormente alla rottura grazie alla maggior superficie di contatto sotto il carico della pressione di lavoro.

Tutto ciò rappresenta evidenti vantaggi nei confronti degli abrasivi tradizionali: le polveri Microgrit Wca consentono di diminuire i tempi di lavorazione, una miglior finitura ottica, una durata maggiore e un minor consumo.

Granulometrie disponibili: 9 t – 12 t – 15 t – 18 t – 20 t – 25 t.

Il prezzo di queste polveri varia dai 4 ai 16 euro e vengono venduti in confezioni da 20 kg; la loro reperibilità è più facile poiché vengono usate nella sgrossatura delle lenti oftalmiche.

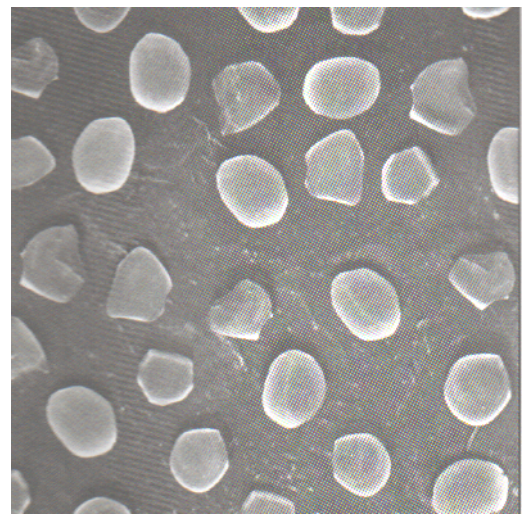


Figura 17

Lucidatura

Ha lo scopo di rendere la superficie del vetro perfettamente lucida e riflettente. Atta perciò a ricevere il successivo trattamento di:

- argentatura (che può essere fatta anche con metodi artigianali)
- alluminatura (che viene effettuata sottovuoto e che perciò è al di fuori della possibilità del dilettante).

A tale scopo viene usata una particolare polvere detta ossido di cerio (o cerox) che esiste in 2 grane differenti. Per gli usi normali ne basta una sola (fig. 18, 19).

Il prodotto usato presenta la sigla commerciale Super Cerox 1663 ed è particolarmente studiata per la lucidatura di superfici ottiche su supporti in schiuma di poliuretano.

Offre i seguenti vantaggi:

- elevata efficacia lucidante
- una perfetta qualità della superficie lucidata
- diminuzione del consumo per superfici lucidate
- facilità di lavaggio

La granulometria media è da 1 a 2 micron.

In origine la lucidatura veniva fatta apprestando una patina di pece fusa che veniva colata sull'utensile, e conformata poggiando lo specchio. Una volta raffreddata venivano eseguiti dei solchi. Il tutto poi veniva trattato come la smerigliatura (fig. 20). Nel procedimento da noi adottato invece sull'utensile viene applicato un foglio di poliuretano sul quale viene spalmato la sospensione di cerox (in pratica è il procedimento che viene attuato per la lucidatura delle lenti oftalmiche).

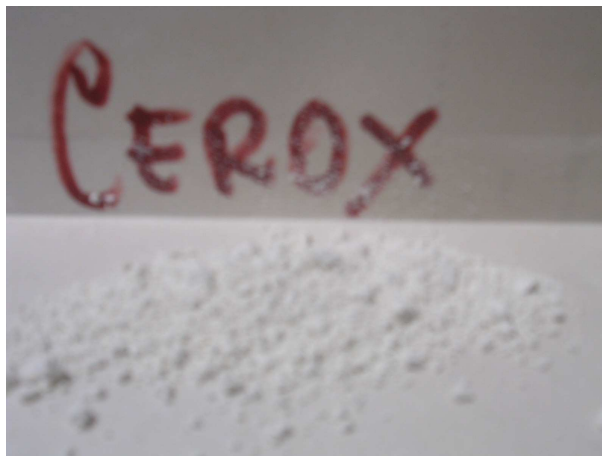


Figura 18

Ricordiamo che il progetto prevede:

- la sgrossatura dello specchio al raggio richiesto
- la lucidatura



Figura 19

La parabolizzazione (fig. 21)

Per gli specchi di diametro fino a 15 cm, la curvatura sferica permette la realizzazione di un fuoco approssimativamente in un sol punto e quindi la lavorazione si può considerare conclusa con la lucidatura.

Per diametri maggiori l'ottica dimostra che anziché avere un fuoco si ha una caustica nella quale i raggi periferici vanno a fuoco a minor distanza dallo specchio, mentre quelli centrali vanno a fuoco più avanti. L'inconveniente che è minimo per i diametri ridotti, si avverte già con un 200 mm.

Come rimedio si può diaframmare lo specchio o giostrare col focalizzatore facendo raccogliere all'oculare solo il fuoco dei raggi assiali e parassiali (ed è questo che si fa in molti telescopi commerciali); ciò però vanificherebbe il vantaggio di avere un diametro maggiore. Si ricorre perciò alla parabolizzazione della curvatura che consiste nell'approfondire il centro dello specchio di circa 2 o 3 milionesimi di centimetro (ovviamente dopo aver portato a buon fine la lucidatura e dopo i soliti controlli con il reticolo di Ronchi). Ciò si ottiene levigando maggiormente il centro per un periodo di 3 – 5 minuti.

Data la relativa complessità dei controlli la parabolizzazione non viene richiesta.

La parabolizzazione nonché l'alluminatura verranno effettuate dall'Osservatorio astronomico di Capodimonte che poi consegnerà gli specchi finiti ai vari concorrenti. Essi dovranno poi procedere al montaggio delle singole parti del telescopio e all'allineamento delle ottiche secondo le indicazioni che verranno mano mano fornite.

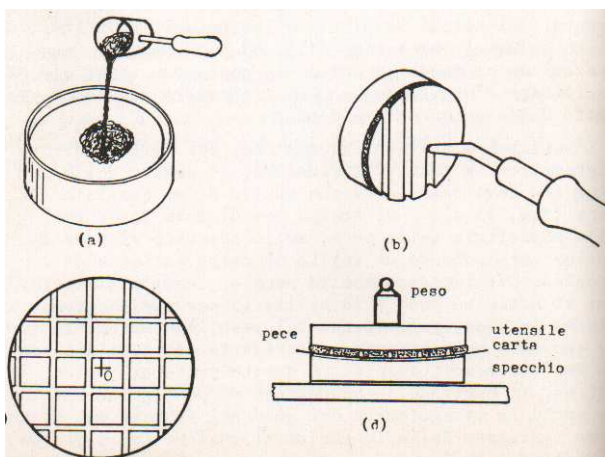


Figura 20



Figura 21

Sequenza degli abrasivi

Essi vanno usati in una determinata sequenza relativamente al numero della grana; questa progressione permette di ottenere una superficie ottimale. Se per esempio si passasse da una grana 60 direttamente a una 500 (credendo di abbreviare il lavoro), sarebbe molto difficile togliere le tracce lasciate dall'abrasivo molto più grossolano: in effetti ogni grana seguente riesce a togliere le righe lasciate dall'abrasivo precedente, praticandone altre più sottili e meno evidenti.

Inizialmente si impiega durante la sbozzatura una grana tale da rimuovere rapidamente la quantità di vetro necessaria, raggiungendo in un tempo ragionevolmente breve (in ogni caso 2 - 3 ore) la profondità voluta. Si tien conto delle dimensioni dell'ottica da realizzare secondo la tabella:

diametro dello specchio	grana iniziale consigliata per la sbozzatura
inferiore a 150	80
da 150 a 400	60
oltre i 400	40

Attualmente c'è la tendenza a costruire specchi a focale molto ridotta, quindi la fase di sbozzatura è molto più lunga.

Per uno specchio da 150 mm la sequenza consigliabile è:

- carborundum 60 – 80 – 120 – 220 – 500
- Microgrit Wca 20 - 15 – 9
- Cerox

Banco da lavoro (fig. 22, 23)

Dev'essere di forma circolare, diametro intorno ai 40 cm e altezza proporzionata alla statura dell'operatore. La forma circolare è tassativa perché come vedremo, durante la lavorazione, l'operatore dovrà girare sempre attorno ad esso allo scopo di evitare astigmatismi dello specchio (che lo renderebbero del tutto inutilizzabile).

In alcune pubblicazioni viene suggerito l'uso di un barile (il problema è trovarlo! Inoltre i bordi sopraelevati laterali interferirebbero durante la lavorazione) opportunamente zavorrato con sabbia, oppure di fusti metallici cilindrici. Noi consigliamo invece un particolare tripode per strumenti di misura oftalmica che oltre al peso presenta il vantaggio di una

regolazione dell'altezza del piano di lavoro tramite un volantino coassiale (in modo da potersi adattare all'altezza dell'operatore).

Il piano di lavoro è facilmente smontabile per poter essere opportunamente lavato durante i cambi di grana della polvere abrasiva: esso è stato ricavato da tavole di truciolo nobilitato (ricavate da piani di banchi scolastici in disuso tagliati circolarmente) opportunamente imbullonati tra di loro.

Il tutto è stato fissato a un'apposita crociera metallica del tripode, che per ulteriore stabilità (date le tremende sollecitazioni determinate dalla lavorazione) è stato poi fissato al pavimento con



Figura 22



Figura 23

opportuni bulloni ad espansione. I buchi potranno poi essere chiusi con stucco per marmo a due componenti.

Sul piano di lavoro vengono sistemati tre bulloni che serviranno per bloccare sul banco lo specchio o l'utensile a seconda dei casi. Due si fissano a una distanza dal centro uguali al raggio dello specchio, l'altro dovrà essere fissato a una distanza maggiore in modo da lasciare un po' di spazio per l'introduzione di un cuneo di legno di bloccaggio.

Il tavolino, che poi a fine progetto potrà essere utilizzato rimontando il piano originale, può essere facilmente reperito presso fornitori di strumenti ottici.

Misura del raggio di curvatura

Nelle varie fasi di lavorazione è necessario controllare la curvatura che per il 90% va ottenuto impiegando l'abrasivo a grana più grossa. Esso è funzione della focale richiesta. La misura non è estremamente critica poiché la diversa focalizzazione dell'immagine può essere compensata dal focalizzatore dell'oculare, **entro certi limiti**.

Esistono 3 metodi:

1) metodo della sesta:

trattandosi di uno specchio con focale 75 cm, per una legge di Ottica, il raggio di curvatura sarà 150 cm. Quindi con un filo di ferro di 150 cm, fissato su di un punto, si può tracciare su di un cartoncino, di 15 cm di lunghezza, un arco di cerchio che individuerà una parte concava e una convessa. La parte convessa può essere usata come dima durante la lavorazione: sarebbe più opportuno ricavarla da un lamierino di alluminio. Però come si potrebbe notare, dato il raggio considerevole, la curvatura della dima sarebbe appena accennata e quindi il metodo non è estremamente preciso; è comunque indicativo nella prima fase della lavorazione.

Un'idea della curvatura la si può ottenere poggiando una riga metallica sui bordi (fig. 24).



Figura 24

2) metodo Ottico (fig. 25, 26, 27):

durante la sgrossatura si lava via tutta l'abrasivo, si risciacqua bene lo specchio e lo si mette di taglio in posizione verticale, immobilizzandolo in qualche modo affinché non rotoli. Si accende quindi una piccola lampadina portatile e la si muove lentamente da destra a sinistra in modo da poterla vedere riflessa sulla superficie bagnata dello specchio. Mano mano si indietreggia e si nota che la sorgente luminosa riflessa diventa mano mano più grande e si muoverà sempre nella

direzione nella quale viene mossa la sorgente luminosa (movimento concorde).

Indietreggiando ulteriormente si noterà che spostando la lampadina a destra, la sua immagine si muove verso sinistra (movimento discorde). Ciò significa che si è oltrepassato la distanza focale; a questo punto si ritorna lentissimamente verso lo specchio fino a determinare il punto preciso nel quale, pur muovendo la sorgente luminosa, la sua immagine rimane immobile, anzi lo specchio apparirà tutto illuminato.

Può verificarsi, specialmente se l'esperienza viene fatta dopo pochi minuti dall'inizio del lavoro, che per trovare il fuoco bisognerà allontanarsi oltre i 6 m.

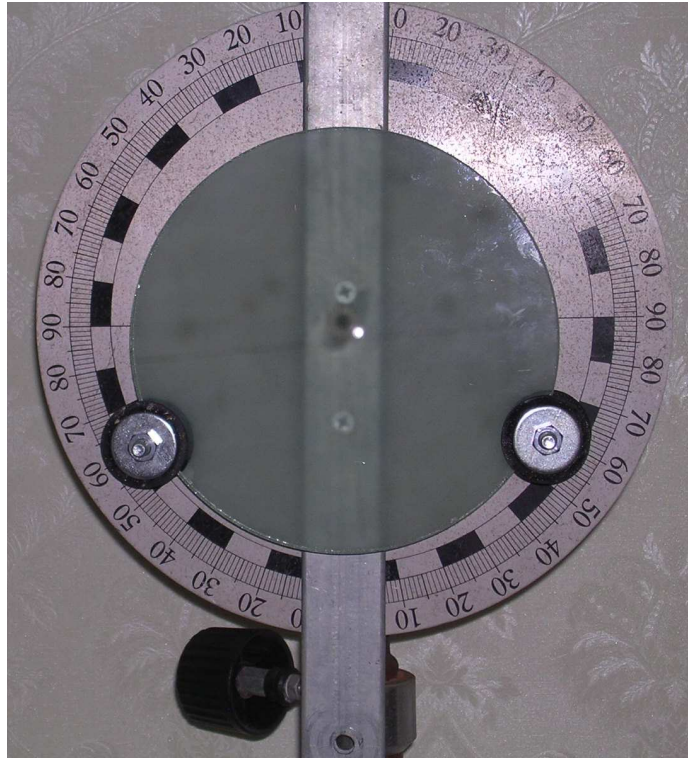


Figura 25

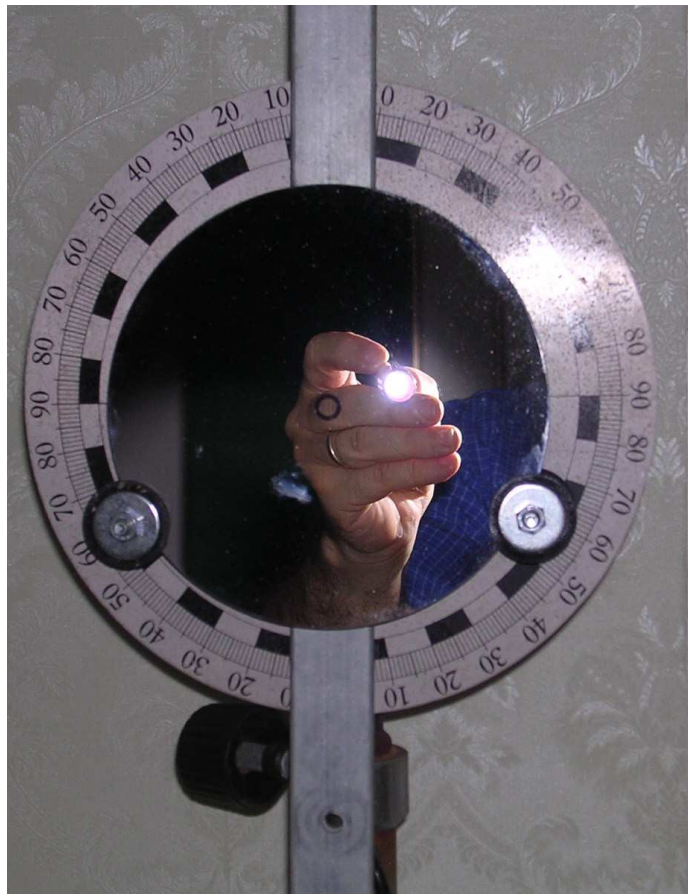


Figura 26

Ciò significa che siamo ancora agli inizi del lavoro poiché il raggio di curvatura deve avere un valore intorno a 1.5 m (dal momento che la focale è di 75 cm.).

Nelle foto allegate:

la prima si riferisce ad uno specchio sgrossato e bagnato. L'immagine della sorgente luminosa è rappresentata dal puntino luminoso; il movimento è concorde e quindi ci troviamo in posizione intra-focale.

La seconda invece si riferisce a uno specchio finito: è evidente l'estrema luminosità dell'immagine; il movimento è ancora concorde.

Nella terza foto, l'immagine della sorgente luminosa sta diventando più grande fino a occupare l'intera superficie speculare. Questo punto rappresenta il fuoco dello specchio.



Figura 27

Allontanandosi ulteriormente si ritorna alla fig. 26, però il movimento sarà discorde (posizione quindi extra-focale).

In Oculistica il principio è sfruttato in una particolare metodica detta schiascopia, che serve per il rilievo immediato dei vari difetti visivi.

Nel passato veniva usata una candela accesa. Attualmente la sorgente luminosa può essere facilmente realizzata modificando una piletta con un dischetto nero forato con uno spillo posto dinanzi alla lampadina: le più indicate sono le lampadine a diodo led (fig. 28).

È bene impratichirsi di questo metodo perché rappresenta la base del test di Ronchi per la lucidatura.



Figura 28

3) metodo dello sferometro:

È stato fornito anche uno sferometro del tipo indicato in figura 31, col quale si misura facilmente la freccia sferometrica appoggiando lo strumento sullo specchio dopo aver azzerato il comparatore su una superficie piana (si raccomanda di trattare con grande delicatezza lo strumento e sincerarsi che il cilindro centrale scorra senza attrito).

In realtà viene fornito solo lo sferometro: bisogna quindi realizzare la staffa di supporto che può essere costruita a partire da una piastrina di legno di cm 22 x 5 x 1,7 (fig. 29, 30).

Le misure non sono tassative; al cento si effettua un foro da 7 mm per il passaggio del piede dello sferometro.

A distanza di 7 cm (questa distanza rappresenta la r nella formula di Fig. 32) si effettuano altri fori da 5 mm per il passaggio di 3 bulloni da 6 mm opportunamente appuntiti, che fungono da viti calanti. I bulloni stessi, essendo di diametro lievemente maggiore al foro d'invito della piastrina, la filettano internamente.

Sullo spessore della piastrina e in corrispondenza del foro dello sferometro si effettua un altro foro passante da 5 mm nel quale va avvitato un bullone che serve a bloccare lo sferometro stesso.

La piastrina di legno viene poi dipinta con vernice nera opaca.

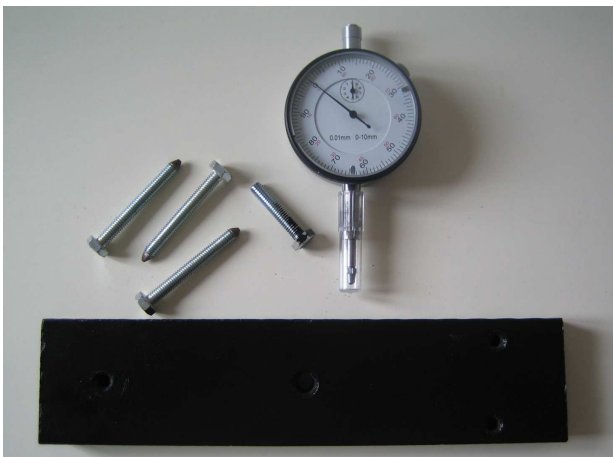


Figura 29

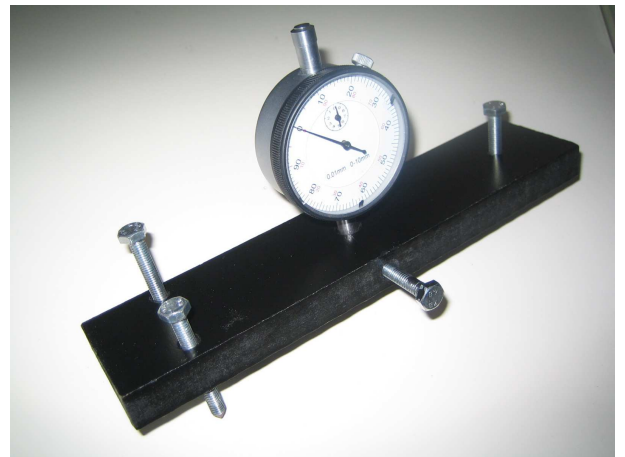


Figura 30

Se si ha a disposizione un laboratorio di meccanica e un po' di pazienza, si può realizzare uno sferometro come quello della figura (partendo da una staffa di alluminio) (fig. 33, 34).



Figura 31

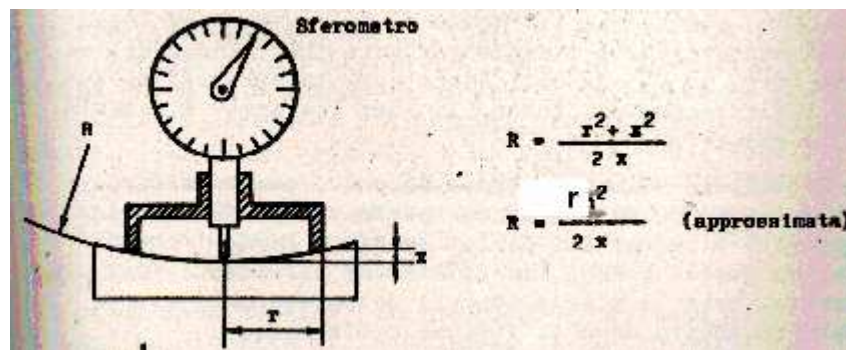


Figura 32

Si ricava il raggio di curvatura dello specchio con la formula approssimata (fig. 32):

$$R = \frac{r^2}{2 \cdot x_1}$$

in cui x_1 è la freccia sferometrica, r il semidiametro della staffa di supporto dello sferometro.

Per una misura più precisa si può applicare la seguente:

$$R = \frac{r^2 + x_1^2}{2 \cdot x_1}$$

Come è noto il raggio di curvatura è uguale al doppio della lunghezza focale.



Figura 33

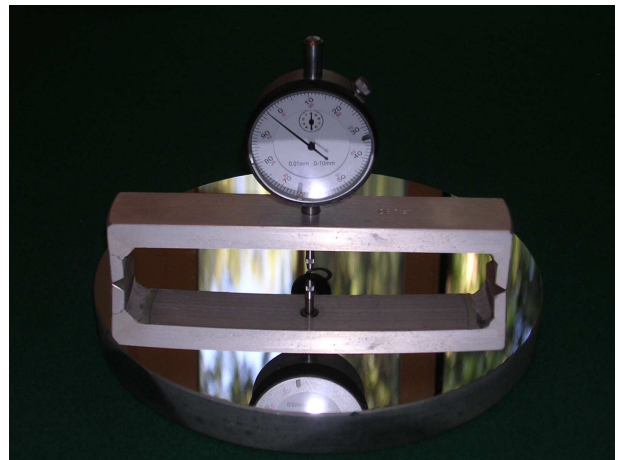


Figura 34

Se al controllo il valore della stessa non dovesse corrispondere a quello voluto, si deve continuare la sbazzatura:

- a specchio sopra → per ridurre il raggio R
- a specchio sotto → per aumentare il raggio R

Un metodo molto semplice per la misura del raggio di curvatura (che evita l'impiego di un piano perfettamente orizzontale e indeformabile) è il seguente:

- 1) si azzerò lo sferometro con la propria staffa sullo specchio concavo in lavorazione
- 2) si misura il raggio sull'utensile convesso
- 3) il risultato si divide per due

Lavorazione dello specchio parabolico

Approntato tutto il materiale, si procede ora alla lavorazione che consiste in diverse fasi:

- smerigliatura
- lucidatura
- parabolizzazione

Il locale deve essere abbastanza luminoso ed assolutamente privo di polvere (è quindi consigliabile lavare il pavimento e il supporto del tavolino).

Per le ultime due fasi sarebbe consigliabile un locale a parte per l'estrema delicatezza della lavorazione.

Il personale operante deve essere perfettamente istruito poiché per la lunghezza della lavorazione saranno necessari diversi operatori e poiché la fase della lucidatura prevede una lavorazione ininterrotta.

La prima fase, indubbiamente, è la più faticosa poiché bisogna portare a curvatura lo specchio ed è necessario un notevolissimo sforzo. È necessario controllare periodicamente il serraggio dei bulloni del treppiedi al pavimento.

La grana più grossa va usata fino al raggiungimento del 75-80% della curvatura definitiva. Le altre grane servono a levigare i microcrateri della prima grana e ad integrare il restante della curvatura.

Questa va controllata con l'apposito sferometro. Nel caso si sia superata la curvatura richiesta (evento molto improbabile data la laboriosità della procedura!) si ovvierà procedendo con:

- specchio sotto
- utensile sopra

Le varie grane vanno usate in successione, e non bisogna saltare la sequenza poiché ogni grana leviga la smerigliatura della grana precedente.

Le varie polveri vanno poi tenute assolutamente separate fra di loro.

La smerigliatura

I due dischi di vetro, già bisellati (lo smusso sul bordo è necessario per evitare che nella lavorazione eventuali schegge di vetro, staccandosi dal bordo, vadano ad incastrarsi tra i due pezzi in lavorazione) vengono forniti in diametro da 15 cm e in due diversi spessori:

- 15 mm che sarà l'utensile
- 20 mm che sarà lo specchio

entrambi con due facce smerigliate: la lavorazione avverrà ovviamente sulle facce lucide.

Sopra al banco di lavoro si dispone il disco di vetro che funge da utensile. Esso viene fissato al banco con l'aiuto di un cuneo di legno che viene spinto tra il bullone eccentrico e il vetro, sotto il quale si pone un disco di feltro dello stesso diametro del vetro per rendere il complesso più elastico. Utilizzando un cucchiaino di plastica si versa sull'utensile una piccola quantità d'abrasivo e un po' d'acqua poi si mette sopra l'altro vetro che diventerà lo specchio. Si inizia il lavoro imprimendo allo specchio, tenuto saldamente tra le mani dell'operatore, un movimento continuo, regolare ed uniforme risultante dall'azione contemporanea di tre movimenti distinti (fig. 35):

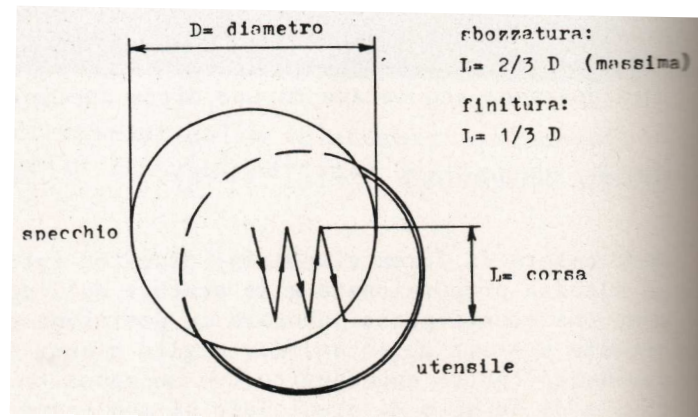


Figura 35

- Movimento di va e vieni con spostamento laterale
- Rotazione dello specchio fra le mani di una piccola frazione di giro ad intervalli regolari
- Rotazione lenta ma continua dell'operatore intorno al tavolo

Il primo movimento è il più importante in quanto l'abrasivo agisce in modo efficace proprio durante lo strisciamento tra i due vetri.

Il secondo e terzo movimento permettono di regolarizzare l'operazione di smerigliatura e di evitare errori sistematici.

Per facilitare la presa del disco di vetro (ed evitare traumi alle mani) può usarsi una ventosa circolare (di quelle che servono ai vetrai per il trasporto delle lastre) dal prezzo molto contenuto (€ 4).

Un tempo si usava un pezzo di legno tronco-conico incollato con pece.

L'acqua aggiunta all'abrasivo in parte fuoriesce dai bordi dei vetri e in parte si consuma per evaporazione a causa del vapore prodotto per attrito, mentre la polvere abrasiva diventa una poltiglia priva di efficacia; ciò avviene quando ci si avvicina alla cosiddetta "seccata".

Continuando il lavoro di smerigliatura in tali condizioni è possibile che i due vetri si "incollino" tra di loro per la mancanza di lubrificazioni fra le superfici. Succede spesso nella lavorazione: in questo caso i due vetri sono stati immersi in acqua calda per un certo tempo finché non si sono staccati

facilmente con le sole mani. Bisogna assolutamente astenersi dal far uso di cacciaviti, martelli ed altro.

Durante la lavorazione la lunghezza della corsa dello specchio dev'essere compresa tra $\frac{2}{3}$ e $\frac{4}{5}$ del diametro dello specchio. Si passa poi a grana di smeriglio progressivamente più sottili. Nel cambio bisogna assolutamente pulire tavolo da lavoro e vetri con cura scrupolosa per evitare che anche un solo grano di abrasivo a grana grossa vada a finire fra quelli più fini. Ciò determinerebbe la necessità di rifare la fase precedente di smerigliatura.

A tal fine si è proceduto a lavare sotto acqua corrente il piano di lavoro (che poteva essere smontato dal supporto); anche il pavimento del laboratorio è stato lavato; nel frattempo i vetri (come in tutte le fasi d'interruzione della lavorazione) sono stati posti in appositi recipienti pieni d'acqua. Le varie polveri abrasive sono state tenute separate in appositi recipienti.

La superficie lavorata deve essere continuamente controllata a luce radente per osservare sul vetro i micro-crateri prodotti dall'abrasivo nonché la loro distribuzione e uniformità (nei nostri laboratori in genere usiamo la lampada a fessura che è uno strumento oculistico per il controllo delle strutture oculari).

Nel caso si apprezzassero striature o graffi è bene riprendere per pochi minuti la smerigliatura con la grana più grossa. È inutile insistere con la grana in lavorazione, poiché si avrebbe un lavoro lunghissimo e inconcludente.

Nella fase finale poi sono stati invertiti i vetri (utensile sopra e specchio sotto) per regolarizzare le curve ed eliminare errori grossolani di forma.

Durante la lavorazione la quantità di luce riflessa, scarsa in fase di sbazzatura, aumenta sensibilmente in fase di finitura. Ciò è messo in evidenza osservando la luce, emessa dal filamento di una lampada ad incandescenza, riflessa dalla superficie smerigliata del vetro, che aumenta quanto più la luce è radente allo specchio (fig. 36).

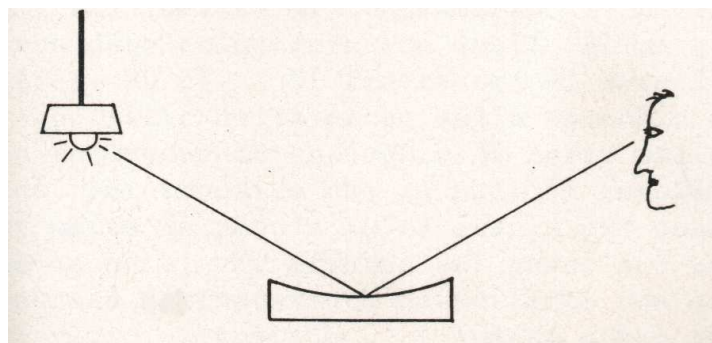


Figura 36

A finitura ultimata avremo una superficie uniforme anche se non ancora perfetta, pronta per la successiva operazione di lucidatura.

Misura del raggio di curvatura (fig. 37)

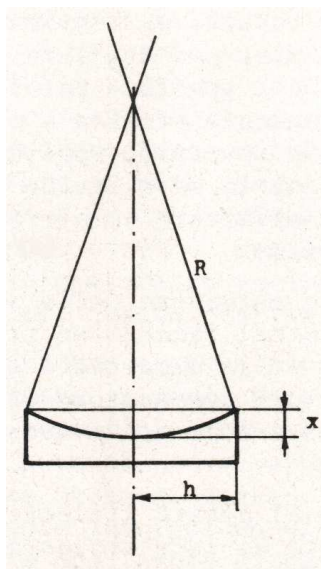


Figura 37

È stato fornito anche uno sferometro del tipo indicato in figura 38 col quale si misura facilmente la freccia sferometrica appoggiando lo strumento sullo specchio dopo aver azzerato il comparatore su una superficie piana.

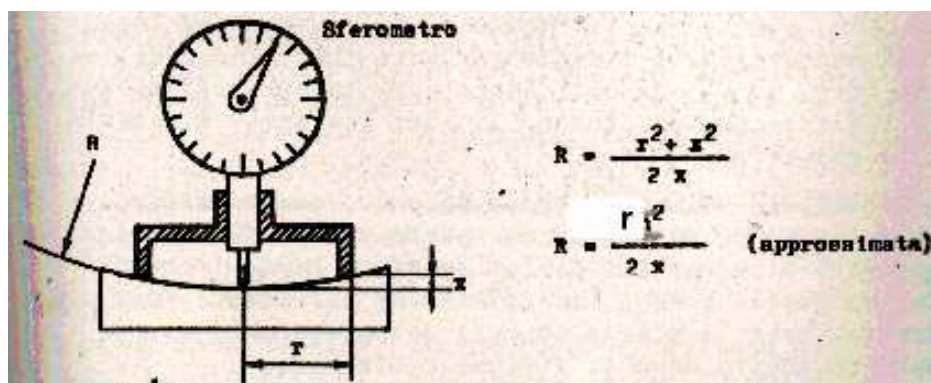


Figura 38

Si ricava il raggio di curvatura dello specchio con la formula approssimata:

$$R = \frac{r^2}{2 \cdot x_1}$$

in cui x_1 è la freccia sferometrica, r il semidiametro della staffa di supporto dello sferometro.

Per una misura più precisa si può applicare la seguente:

$$R = \frac{r^2 + x_1^2}{2 \cdot x_1}$$

Come è noto il raggio di curvatura è uguale al doppio della lunghezza focale.

Se al controllo il valore della stessa non dovesse corrispondere a quello voluto, si deve continuare la sbazzatura:

- a specchio sopra → per ridurre il raggio R e aumentare la curvatura
- a specchio sotto → per aumentare il raggio R e diminuire la curvatura

Esempio:

Consideriamo di dover apprestare uno specchio 200 mm di diametro e focale 1200 mm (quindi un F:6). Si vuol calcolare il valore della freccia corrispondente.

Ponendo di avere uno sferometro con r (=semibraccio supporto) = 90
si avrà che:

$$e = \frac{r \cdot r}{2R}$$

$$R = 2f = 2 \times 1200$$

e cioè:

$$e = \frac{90 \cdot 90}{2 \cdot 2400} = \frac{8100}{4800} = 1,6875$$

Si considerano 1,68 mm.

La curvatura in realtà non è estremamente tassativa perché piccole oscillazioni possono essere compensate dalla corsa del focheggiatore o in casi maggiori dalla lunghezza del tubo del telescopio.

Nel nostro caso, il tubo è già fornito a lunghezza definitiva e quindi l'approssimazione è molto ristretta.

Esempio:

specchio da 150 mm di diametro e focale di 750 mm (quindi un F:5).
70 è il semibraccio del supporto sferometro = r.

$$e = \frac{r \cdot r}{2R}$$

$$R = 2f = 2 \times 1200$$

$$e = \frac{70 \cdot 70}{2 \cdot 1500} = \frac{4900}{3000} = 1,633$$

La lucidatura

Serve a rendere la superficie del vetro perfettamente lucida e riflettente; già durante le prime fasi del lavoro si vedranno scomparire i micro crateri prodotti durante la lavorazione col carborundum e, al termine, le immagini riflesse dalla superficie dello specchio risulteranno perfettamente nitide. Durante le varie fasi della lucidatura la superficie in lavorazione viene accuratamente controllata con la lampada a fessura (che viene usata nella pratica oculistica per il controllo delle varie strutture ottiche dell'occhio). In alternativa può essere usato un oculare tipo Kellner (in pratica l'oculare del telescopio fornito).

La lavorazione va effettuata in un locale ben illuminato, assolutamente privo di polvere e possibilmente diverso dal locale dove sono state effettuate le precedenti lavorazioni.

Nel passato veniva fusa una patina di pece greca che fungeva da patina per la lucidatura (fig. 20). Per ovvie ragioni (difficoltà di reperimento della pece, della fusione e dell'approntamento dello stampo) in alternativa è stato fornito un foglio di poliuretano che viene fissato, dopo accurata pulizia e sgrassatura con alcool dell'utensile, molto accuratamente (l'uso del foglio di poliuretano viene usato correntemente per la lucidatura delle lenti). Il lavoro procederà per il momento a specchio sopra.

Si stempera in acqua una piccola dose di ossido di cerio e con un pennello si preleva una piccola quantità della miscela, spalmando sulla patina in modo uniforme. Sopra questa si appoggia lo specchio e si inizia a lucidare con movimento regolare del tutto simile a quello eseguito durante la smerigliatura. Quando il movimento comincia a richiedere uno sforzo maggiore, bisogna ripristinare l'ossido; si pulisce lo specchio con una spugna inumidita in acqua a temperatura ambiente, e si riprende il lavoro. L'operazione, per ovvie ragioni, non può essere portata a termine in un'unica giornata poiché il tempo totale per la lucidatura viene considerato ottimale in circa quattro ore: quindi viene effettuata a più riprese. È bene tener presente che ogni operazione va protratta senza interruzione per almeno mezz'ora, poiché ad ogni ripresa il primo quarto d'ora serve ad adattare la superficie della patina a quello dello specchio.

Correzione degli errori di forma: uso del reticolo di Ronchi (fig. 39)

È ora necessario controllare con il reticolo l'andamento delle frange d'ombra per capire quali sono i difetti della superficie dello specchio e decidere come correggerli.



Figura 39

Il reticolo di Ronchi rappresenta un metodo estremamente semplice, immediato e preciso tale da essere utilizzato con profitto anche dal dilettante con ottimi risultati (fig. 40, 41, 42).

Essa è stata messa a punto qualche decennio fa da uno dei nostri migliori ottici: Vasco Ronchi, scomparso recentemente. Egli è stato autore di numerose opere fondamentali sulla tecnica ottica nonché docente alla scuola di ottica di Vinci.

Il suo metodo si basa sul principio di porre vicino al fuoco dell'obiettivo un reticolo di linee parallele; generalmente il reticolo è formato da linee scure alternate a spazi chiari con una frequenza media compresa fra 5 e 20 tratti per millimetro. Un tale reticolo si può sia acquistare che autocostruire.

Il reticolo si monta al posto dell'oculare: osservando una stella abbastanza luminosa, si sposta il foceggiatore spostando così il reticolo avanti e indietro rispetto al piano focale fin che, ad un certo punto, si osservano le frange di interferenza.

Si chiamano così le bande alternativamente bianche e scure provocate dalla presenza del reticolo. Facciamo in modo da osservare quattro o cinque scure ed esaminiamole con attenzione. Un'ottica ben lavorata deve mostrarle perfettamente dritte e parallele, in caso contrario si ha un segno inequivocabile di anomalia nella lavorazione. È ovvio che quando il reticolo è esattamente nel fuoco le frange scompaiono, mentre ricompaiono in posizioni intra ed extra focali.

Il metodo però prevede:

- il montaggio dello specchio nella culla del tubo, che può essere praticato facilmente dal momento che si ha a disposizione l'intero telescopio
- l'osservazione di notte (procedura altamente indaginosa)

si preferisce quindi in laboratorio usare una sorgente luminosa puntiforme che può essere realizzata con vari artifici.

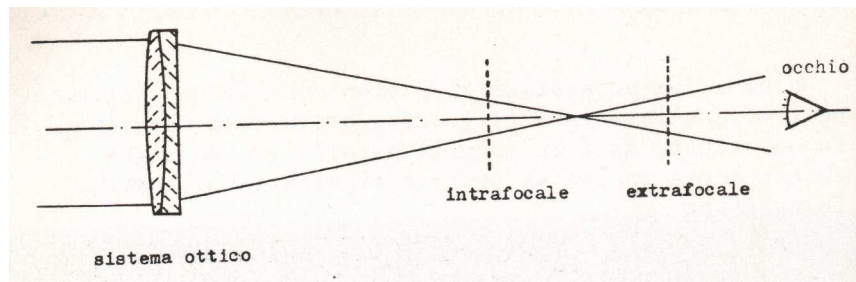


Figura 40

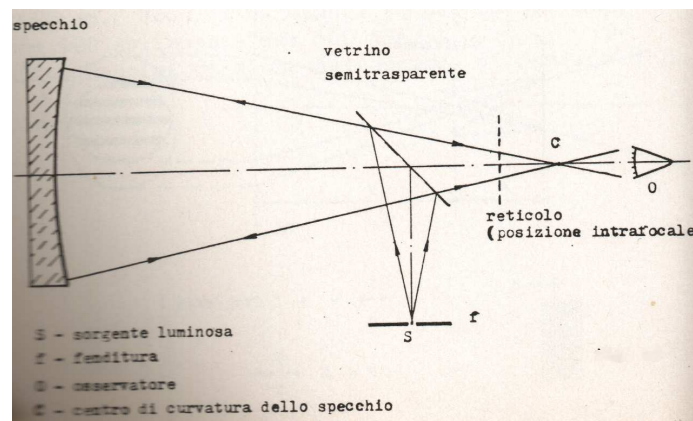


Figura 41

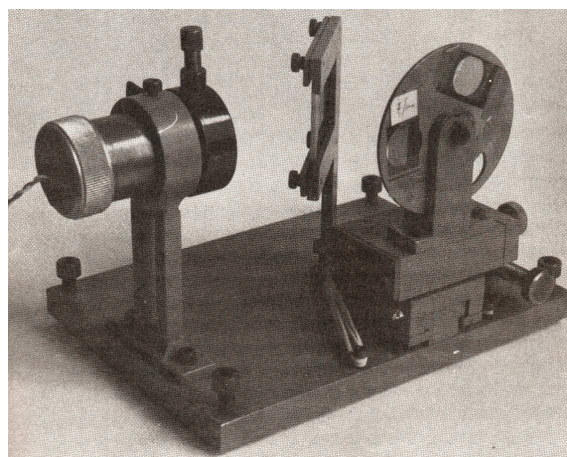


Figura 42

Noi usiamo dei reticoli inseriti tra due vetrini di diversa frequenza. Per la sorgente di luce puntiforme usiamo vari metodi. Il più semplice prevede una sorgente luminosa realizzata da una lampada incandescenza da pochi watt inserita in un tubo di cartone o plexiglas con un foro ricoperto da un lamierino di rame forato al centro con uno spillo (fig. 43 e 44).

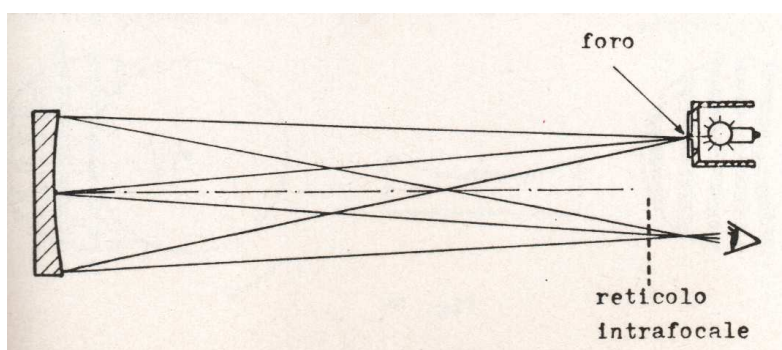


Figura 43



Figura 44

Il tubo presenta anche altri fori liberi per l'esatto centraggio della lampada lungo l'asse ottico dello specchio. Un altro sistema è illustrato nelle figure 45 e 46 che rappresentano un apparecchio facilmente realizzabile.



Figura 45



Figura 46

In genere nei nostri laboratori usiamo un sistema costituito da una originaria torcia luminosa in cui il vetro anteriore è stato sostituito con un disco opaco centrato da un supporto su cui viene avvitata una fibra ottica. Il tutto viene fissato su un apposito stativo o addirittura tenuto in mano (fig. 47).



Figura 47

Nella figura viene rappresentato uno strumento facilmente auto-costruibile partendo da un piano di legno.

In ogni modo il reticolo e la sorgente luminosa vanno tenuti leggermente disassati per poter osservare le frange d'ombra.

Lo specchio deve risultare perfettamente sferico e le frange d'ombra diritte (fig. 48); usando il reticolo circolare si dovranno vedere dei cerchi concentrici distanziati in modo uniforme (quest'ultimo serve anche per la ricerca di eventuali difetti zonali).

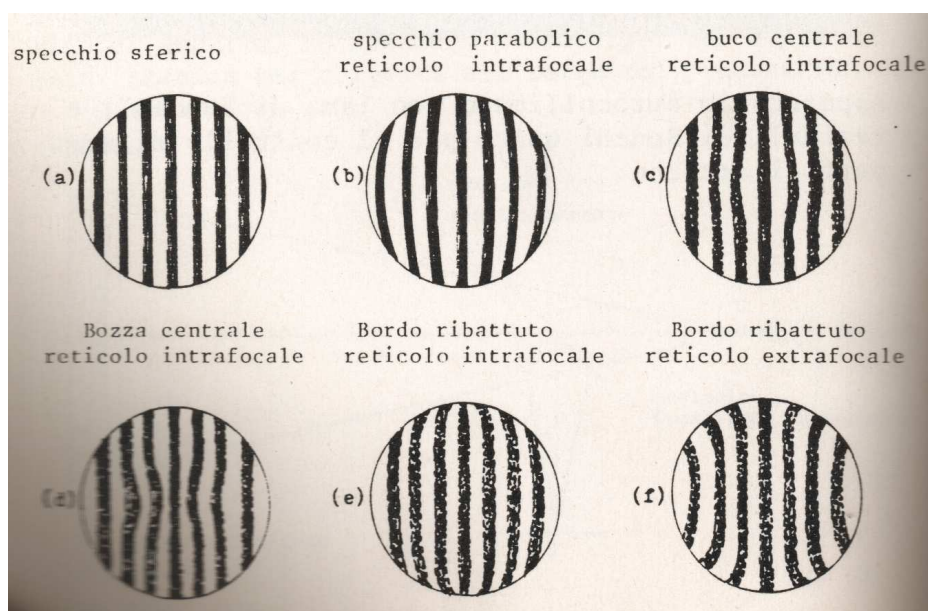


Figura 48

Questi sono più raramente riscontrabili perché causati da errori personali dell'operatore o da errori sistematici. Per evitare questa evenienza tutte le fasi di lavorazione sono state eseguite da numerosissimi alunni opportunamente istruiti).

Nel controllo abbiamo tenuto presente gli appositi grafici che si allegano (fig. 49, 50, 51).

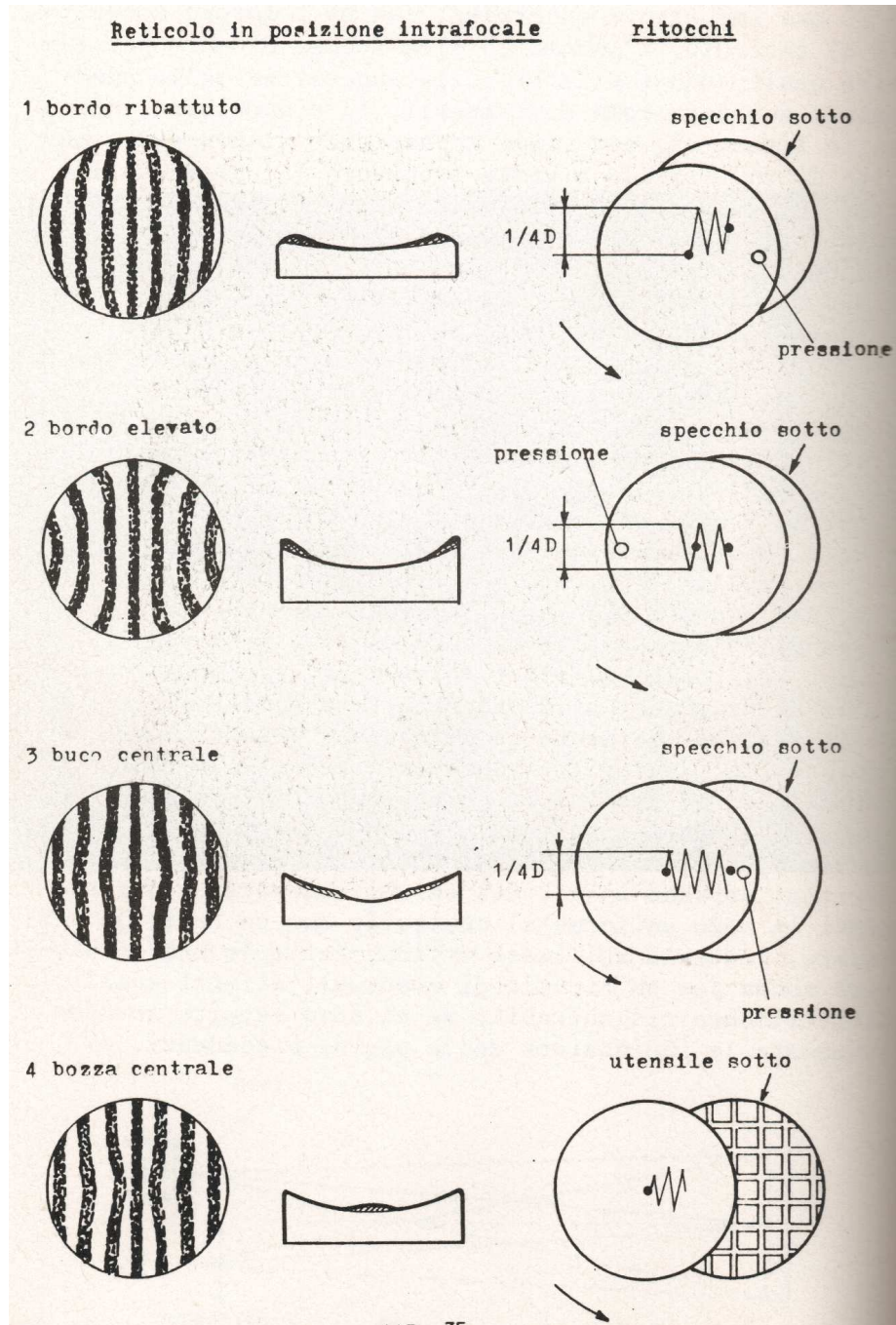


Figura 49

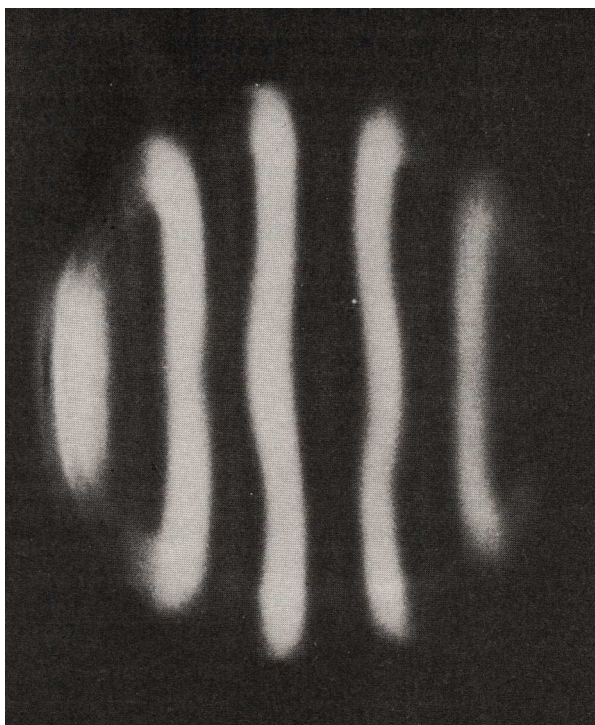


Figura 50

Reticolo intrafocale: specchio con buco centrale e bordo elevato.

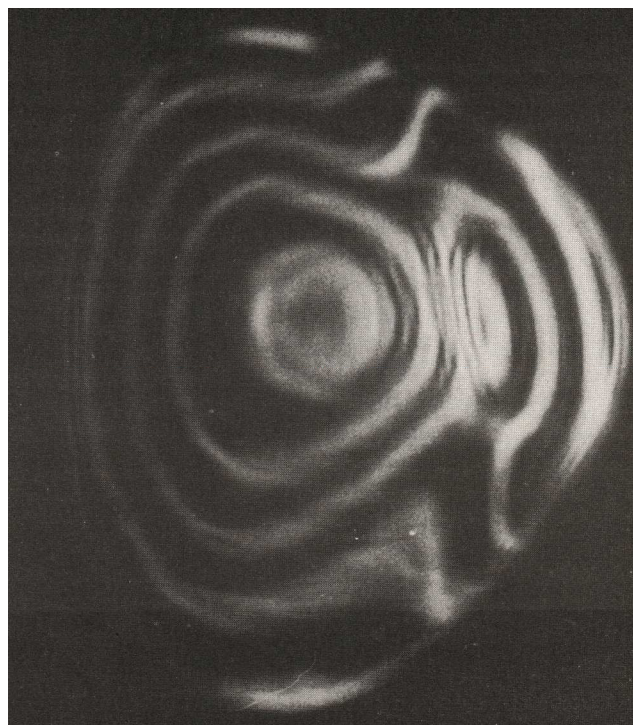


Figura 51

Peggior di così ... !

Le ulteriori fasi di lavorazione, quali:

- la parabolizzazione
- l'alluminatura (fig. 52 e 53) e quarzatura (che hanno sostituito la vecchia argentatura che può essere anche realizzata artigianalmente)

saranno effettuate nei laboratori dell'Osservatorio astronomico di Capodimonte, che procederanno anche ad una correzione degli errori più gravi: si prega comunque di non consegnare specchi come quello della figura.

Prof. Dott. Antonio Missanelli
Oculista
Docente di Oculistica
nell'Istituto di Ottica "G. L. Bernini"
Via Arco Mirelli, 19
Napoli

Tel.: 081 5564597
e mail: missanelli@alice.it
www.ipiabernini.it



Figura 52



Figura 53

REPERIBILITA' DEL MATERIALE

In primis si ringraziano vivamente tutti i responsabili delle Ditte sotto elencate per la loro disponibilità offerta durante tutte le fasi del progetto che con il loro interesse e suggerimenti ci hanno permesso anche di correggere alcune fasi della lavorazione.

VETRI:

Ditta F.lli Ranieri, via Vicinale Reggente, 84 Napoli; tel. 081 5872700; Sig. Gennaro

POLVERI ABRASIVE:

Fiamma Abrasivi Milano, Sig. Alessandro Ferrari

Duered Milano, tel. 02 40070303, Ing. Redaelli

Tener presente che la fornitura avviene solo in sacchi da 25 kg.

SFEROMETRI:

Ditta Vogel, via Toledo, Napoli

BIBLIOGRAFIA:

- A. Danjon – A. Couder, Lunette et telescopes
- Ferioli, Appunti di ottica astronomica, Hoepli
- Ferreri, Il libro dei telescopi, Il Castello
- Missanelli, Appunti dalle lezioni di ottica oculistica
- V. Ronchi, Introduzione all'ottica degli strumenti, Giunti Barbera
- V. Ronchi, Lenti per occhiali, Giunti Barbera
- J. Texereau, La construction du telescope d'amateur, Societe astronomique de France

RINGRAZIAMENTI:

- a mio figlio Emiliano che *maxima cum patientia* ha curato tutta l'elaborazione grafica
- a tutta la mia famiglia:

silenziosa partecipe dell'intelligenza,
intelligente partecipe del silenzio.