

Art. n° 46 – La MISURA dell'APERTURA degli obbiettivi da microscopio

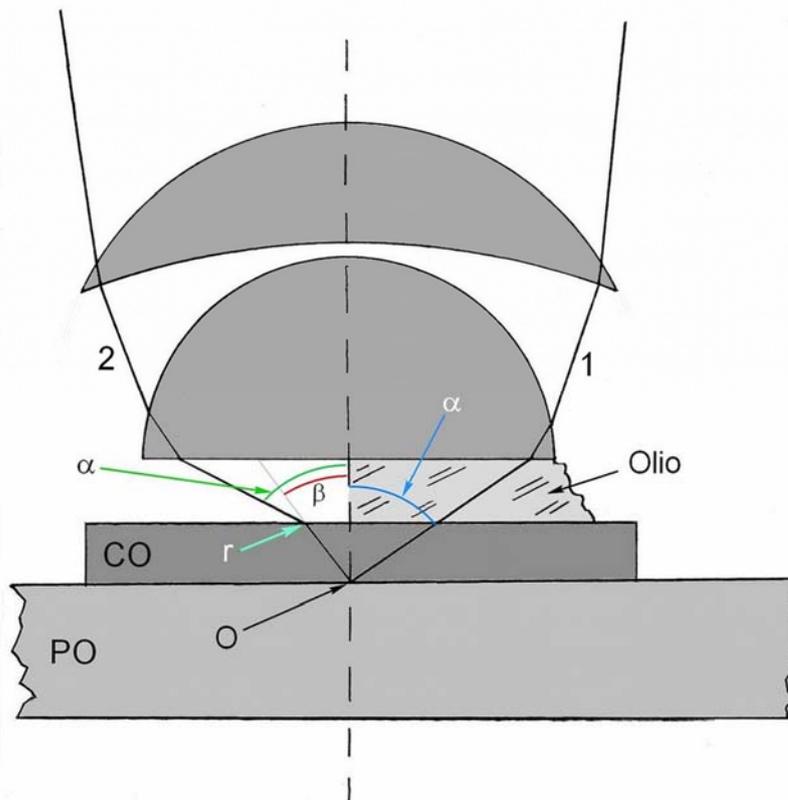
Negli obbiettivi costruiti dopo la metà del secolo scorso, è del tutto usuale trovare inciso il valore dell'apertura numerica rappresentata, come al solito, dal valore del prodotto $n \sin \alpha$ in cui n è l'indice di rifrazione del mezzo interposto fra la lente frontale dell'obbiettivo e l'oggetto¹ ed α è il semi-angolo di apertura (angolare) dell'obbiettivo, come è illustrato nella figura a fianco.

Fig. 1 – In questo schema è simboleggiata la sezione di un obbiettivo a secco (a sinistra) e ad immersione (a destra). Il semi-angolo di apertura è α .

O indica il punto mediano del piano oggetto. CO e PO rappresentano il coprioggetto ed il portaoggetto.

S'intuisce il vantaggio dell'immersione in quanto il raggio di maggior apertura (1) non viene deviato attraversando lo strato d'olio, mentre a secco l'angolo utile diventa β , più piccolo di α , per via della rifrazione in r , alla superficie superiore del copri-oggetto.

Nel concetto di $NA = \sin \alpha$, introdotto da E. Abbe per facilitare il calcolo della risoluzione, viene introdotto il valore di α , ma, negli obbiettivi a secco, l'angolo utile nello spazio oggetto è β . Si tratta di una convenzione che non rispetta l'andamento effettivo del fenomeno.



Sappiamo anche² su quali caratteristiche dell'immagine finale al microscopio influisce il valore dell'apertura dell'obbiettivo. Supponiamo noto che qui si parla di "apertura numerica", come sopra indicato ($n \sin \alpha$, indicata con NA – Numerical aperture – dagli autori inglesi, ON – Ouverture numerique – dagli autori francesi, A – Apertur – da quelli tedeschi).

Volendo riassumere, sono proporzionali ad $NA^{(3)}$ il potere risolutivo massimo ed al suo quadrato la luminosità dell'immagine. È inversamente proporzionale al suo quadrato la profondità di fuoco⁴ e, con legge non semplice, è inversamente proporzionale il contrasto.

La conoscenza della NA di un obiettivo da microscopio consente dunque a colpo

¹ L'indice dell'aria è $n = 1,0$ nel caso degli obbiettivi a secco; $n = 1,515$ nel caso dell'olio per gli obbiettivi ad immersione omogenea; $n = 1,33$ nel caso dell'acqua, per gli obbiettivi ad immersione in acqua; $n = 1,456$ per l'immersione in glicerina; $n = 1,655$ per il monobromonaftalene; $n = 1,76$ per lo ioduro di metile.

² Per evitare ripetizioni, com'è stato fatto in altri articoli di questa serie, faremo spesso riferimento ad altri testi presenti in questo sito, sempre nella sezione "Microscopia ottica". In questo caso, si cerchi il manuale "Problemi tecnici della microscopia ottica", cap. 5.2 (pag. 57 – Concetti di apertura) e 5.2.9 (pag. 61 – Gli apertometri).

³ D'ora in poi, parlando di apertura, faremo sempre riferimento all'apertura numerica e l'indicheremo brevemente con NA.

⁴ Vedi il citato manuale al cap. 14, pag. 123.

d'occhio un apprezzamento di alcune delle proprietà essenziali di quel sistema ottico.

Ma ... Prima di tutto, nei prodotti fino alla metà del secolo scorso, non era spesso indicato il valore della NA. Lo si poteva, qualche volta, ricavare da apposite tabelle compilate dal costruttore, ma queste tabelle generalmente sono andate perdute.

In secondo luogo, il valore indicato, o inciso sulla superficie esterna dell'obiettivo, il valore nominale insomma, non è sempre reale. Anche nei valori nominali degli ingrandimenti occorre accettare una certa tolleranza.

Di conseguenza, in alcuni casi critici, è bene disporre di mezzi semplici per la misura di questi parametri. Per l'ingrandimento, si veda in questo sito, sezione "Microscopia ottica", il manuale "Problemi tecnici della microscopia ottica", cap. 12 (pag. 93). Per l'apertura, oltre un breve cenno al cap. 5.2.9, vogliamo ora affrontare meglio il problema.

I costruttori classici ignorano generalmente il problema: nessuno offre lo strumento adatto per la misura della NA. Faceva eccezione la casa Zeiss di Jena, che oggi, dopo le vicende del secondo conflitto mondiale, ha modificato la ragione sociale ed il programma di produzione.

Nel 1878, il "Journal of the Microscopical Society" già descriveva l'apertometro progettato da E. Abbe nel 1876, contemplato poi nei cataloghi della casa dal 1880 circa al 1927.

Tale accessorio scompare nei cataloghi dal 1937 in poi.

Lo illustriamo qui sotto, in una delle due versioni; l'altra differiva solo per qualche dettaglio meccanico. L'immagine è tratta dai cataloghi Zeiss del 1913.

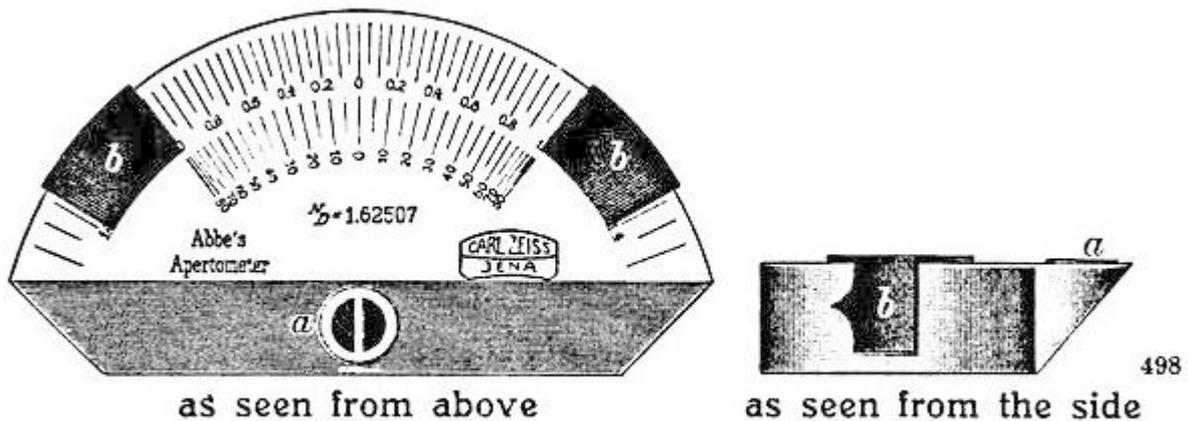


Fig. 46.

Apertometer No. 12.7600.

Fig. 2 – Una lastra di vetro quasi semicircolare del diametro di 90 mm e dello spessore di 20 mm mostra lungo il lato diametrale una faccia inclinata a 45°. In corrispondenza al centro di tale faccia si trova sulla faccia superiore un dischetto di vetro (a). Un raggio che attraversi radialmente la faccia ricurva percorre la lastra orizzontalmente, a metà altezza fra le facce orizzontali, fino ad incontrare la faccia a 45° (dove avviene una riflessione interna totale) ed infine attraversa verticalmente il centro del dischetto a. Lungo la faccia ricurva scorrono due squadrette metalliche (b) che la possono percorrere per tutta la sua estensione.

Se l'obiettivo è focalizzato sul dischetto a, in esso perviene, per via della riflessione sulla faccia a 45°, un fascio illuminante proveniente dalla faccia ricurva (diffusamente illuminata con un mezzo qualunque). Se si guarda la pupilla d'uscita dell'obiettivo da sopra (l'apertometro di Abbe veniva fornito con una lente da porre all'interno del tubo al fine di realizzare una specie di microscopio ausiliario), si deve vedere un'immagine impiccolita di quella faccia ricurva. Poiché su di essa scorrono le due piastrine b, si possono allargare le due piastrine finché esse scompaiono alla vista ai bordi della pupilla. La posizione delle piastrine in quelle condizioni indica i punti estremi del fascio conico d'apertura che l'obiettivo può accogliere. La posizione delle piastrine si può leggere su una graduazione posta sulla superficie superiore della lastra, con indicazione dell'angolo α , e su un'altra, che indica direttamente il valore di NA.

Poiché quello strumento non è più commerciale da tanto tempo, si può proporre qualche sur-

rogato, abbastanza semplice da poter essere costruito “in casa”, con materiali facilmente reperibili.

Nel manuale “Problemi tecnici della microscopia ottica” presente in questo sito, sezione “Microscopia ottica”, al cap. 5.2.9, pag. 61, si è accennato all’apertometro di Beck, più semplice di quello di Abbe in quanto basato su una lastra di vetro a facce parallele, ma con qualche limite per gli obiettivi forti. Ma anche questo è difficilmente realizzabile con materiali di facile reperibilità.

In questo articolo vogliamo esaminare qualche semplice dispositivo pensato per la misura dell’apertura in un microscopio, realizzabile con “mezzi poveri”; ne vedremo vantaggi e svantaggi.

Un primo tentativo ricalca quello dell’apertometro di Beck, ma facendo lavorare l’obiettivo in aria.

Fig. 3 – Una vaschetta, di qualunque natura, viene munita di una graduazione (g) deposta sul fondo. La graduazione è in millimetri, lunga almeno 60 mm; la si può ricavare dall’orlo di uno di quei piccoli calendari su tessera, spesso distribuiti a scopo pubblicitario.

La profondità della vaschetta (d) deve essere di almeno 20 mm.

Sugli orli della vaschetta si tende un filo sottile, anche cotone da rammendo (f), su cui andrà focalizzato l’obiettivo.

O è il punto a fuoco sull’asse ottico.

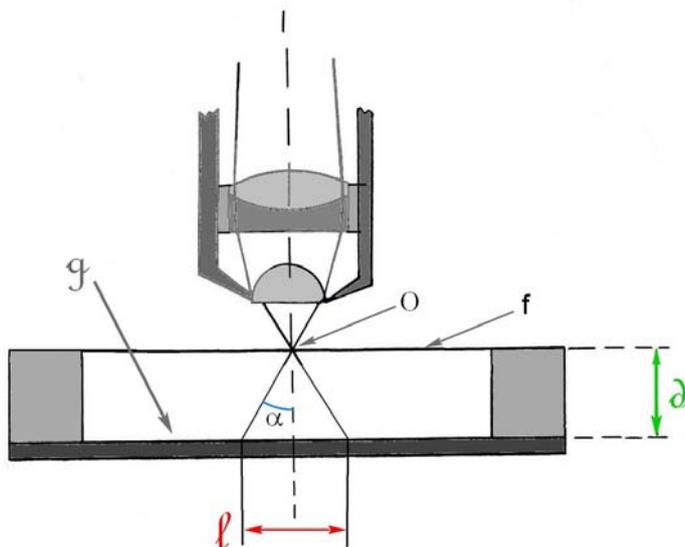


Fig. 4 – Ancora più semplice: due blocchetti di polistirolo espanso incollati su una striscia di cartone rigido. Su quest’ultima, fra i due blocchetti, la graduazione, evidentemente ricavata da quel calendarietto di cui sopra.

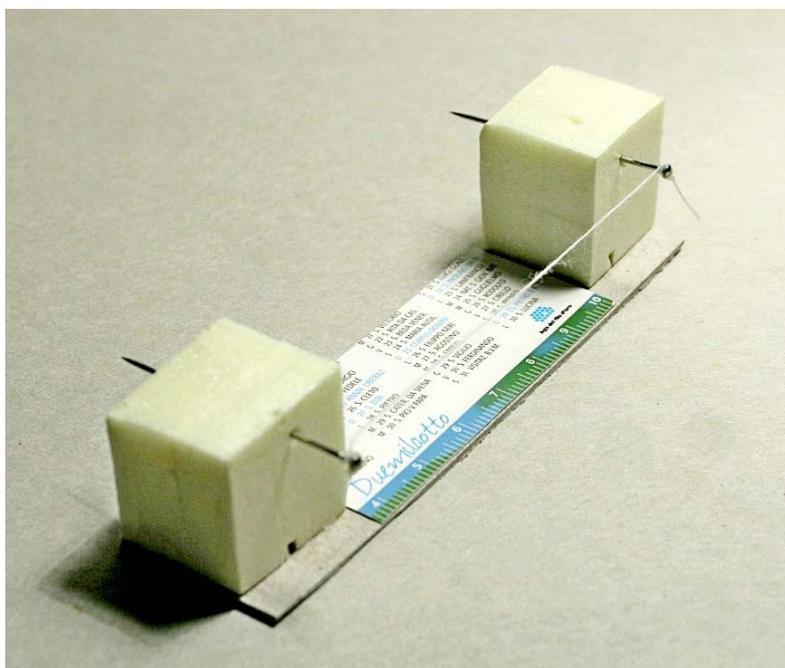
A 20 mm (per esempio, ma per gli obiettivi più forti occorre almeno il doppio) al di sopra della graduazione si piantano nel polistirolo due spilli collegati da un sottile filo ben teso, fissato con due gocce di una colla qualunque. Il filo deve stare sopra la graduazione.

Il principio di funzionamento di questo dispositivo è illustrato nella figura seguente.

L’obiettivo viene focalizzato sul filo teso (f).

La graduazione va illuminata intensamente da un faretto.

Nel microscopio s’introduce un microscopio ausiliario o, se disponibile, la lente di Amici-Bertrand⁵ e li si focalizza sulla pupilla d’uscita dell’obiettivo. Se la graduazione si trova sotto l’obiettivo, nella pupilla si vedrà, più o meno deformata, una parte di essa, di cui si potrà misu-



⁵ Vedi in questo sito l’art. n° 44.

rare la lunghezza ℓ (figura seguente).

Fig. 5 – I raggi di maggiore apertura che l’obiettivo può accogliere sono disegnati nello schema. Ad essi corrisponde un tratto della graduazione (ℓ) la cui immagine impiccolita è visibile nella pupilla d’uscita dell’obiettivo, o almeno poco sopra al suo piano focale.

Sia d la distanza della graduazione g dal filo f su cui è focalizzato l’obiettivo.

Ovviamente, (1) $\operatorname{tg} \alpha = \ell / 2 / d$. Da qui, con un calcolatore portatile, è facile calcolare α e, da questo valore, $\operatorname{sen} \alpha = \text{NA}$.

Questo metodo verrà nel seguito indicato come “apertometro a graduazione piana” o “**apertometro piano**”.

I limiti di questo metodo si presentano con gli obiettivi molto deboli, da 5:1 in giù. Infatti, in essi la focale è forte (almeno 30 mm). Come prima conseguenza, poiché la graduazione g si trova ad una distanza d molto inferiore all’infinito, la sua immagine non si forma nella pupilla d’uscita dell’obiettivo, ma molto più su. Addirittura, se la distanza d è minore della focale, l’immagine della graduazione sarà virtuale.

Occorrerà aumentare il valore di d e la graduazione dovrà essere, in proporzione, più lunga.

Con gli obiettivi forti, nascono altri problemi: se il valore di α è forte ($\text{NA} > 0,7$ circa), il valore di ℓ diventa elevato, e questo non sarebbe un problema. Il peggio è che gli estremi della graduazione vengono visti “di striscio”, ed appaiono compressi fino a renderli indecifrabili. Ne vedremo qualche esempio nelle foto seguenti.

Per risolvere questi problemi, c’è un sistema molto semplice: disporre la graduazione all’interno di un semicilindro e focalizzare l’obiettivo sull’asse del medesimo. Più semplice a farsi che a dirsi (o quasi).

Considerati vari problemi, conviene prendere un pezzo della solita graduazione millimetrata su cartoncino ed avvolgerlo con qualche filo sottile. La graduazione sia lunga esattamente 36 mm in modo che, avvolgendola a cilindro con un diametro interno di 22,9 mm, essa formi esattamente un semicilindro.

Fig. 6 – Tutto diventa più semplice se si dispone di un cilindro qualunque (un flacone per pillole segato, ad es.) con un diametro interno di circa 23,4 mm. La graduazione vi sia forzata dentro, tenuta ferma da un blocchetto di gommapiuma, in modo che, al netto dello spessore del cartoncino, il diametro interno di essa risulti circa 22,9 mm. La parte sporgente venga legata con filo sottile, sempre formando esattamente un semicilindro. Il tutto venga consolidato con qualche goccia di colla, anche Vinavil.

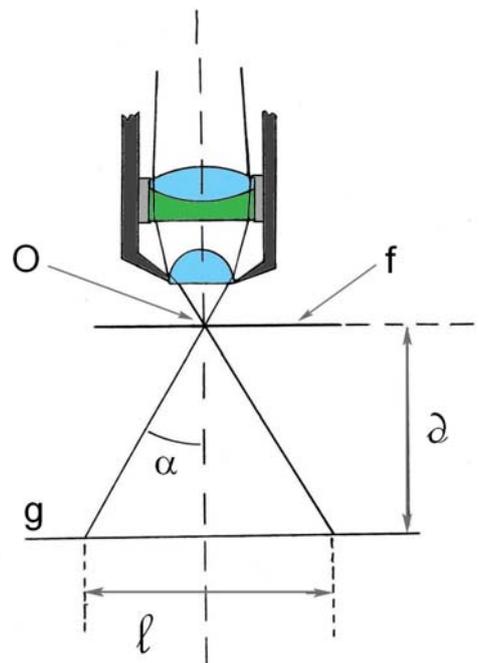


Fig. 7 – Estratto dal flacone, a colla indurita, si ottiene il semicilindro graduato, che si può fissare con un po' di mastice ad un porta-oggetti.

I fili avvolti sul semicilindro rappresentano altrettanti diametri del cilindro; essi dovranno trovarsi esattamente orizzontali ed uno di essi dovrà trovarsi sopra la graduazione.

Su quello, sul suo centro, dovrà essere focalizzato l'obiettivo in esame. Se la graduazione va da 0 a 36 mm, al centro della pupilla si deve vedere il trattino 1,8 (cm). Si vedano le figure 10b o 13b.

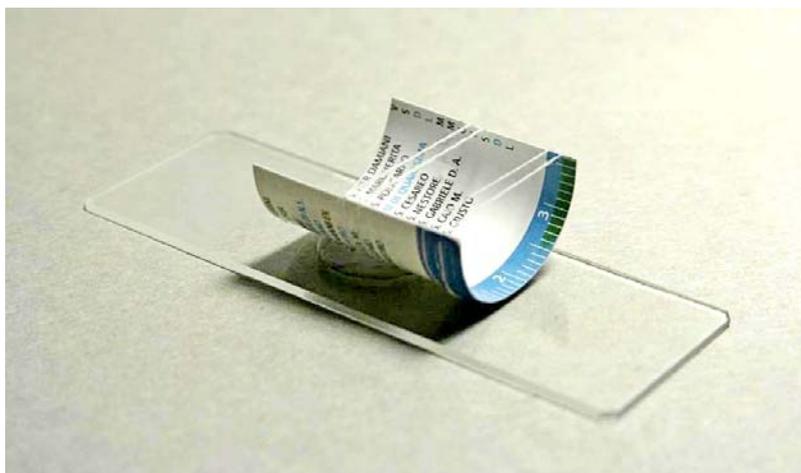
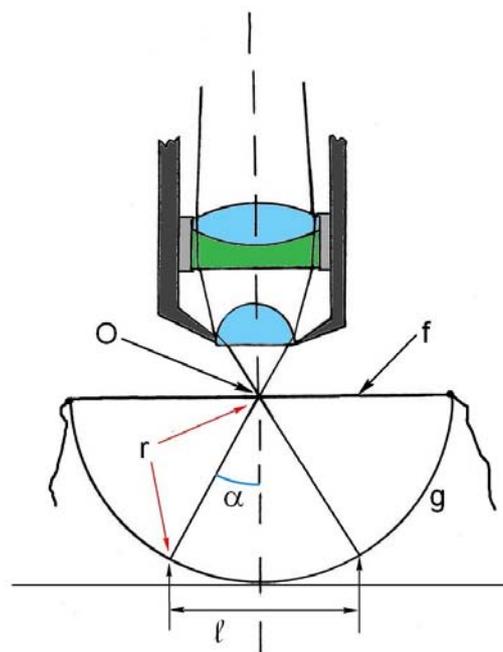


Fig. 8 – Il principio di funzionamento del dispositivo qui sopra è semplice e s'intuisce dallo schema. Il raggio r è costante per qualunque valore di apertura e quindi la deformazione sopra descritta dell'immagine della graduazione (g) non si dovrebbe verificare; si potrebbero allora poter esaminare anche obiettivi molto forti. In realtà, in un obiettivo forte i piani principali non sono piani e la deformazione si verifica ancora, sia pure molto minore (fig. 13b o 14b). Del resto, l'oggetto (la graduazione stessa) non è piana e non può essere piana la sua immagine.

Questa volta, la lettura di ℓ consente di arrivare direttamente al valore di α : (2) $\alpha = \ell/4 \times 10$. Il divisore 4 viene dal fatto che $\sin \alpha$ va calcolato non sull'intero valore di ℓ , ma sulla metà di esso; inoltre, poiché, per ragioni pratiche, la graduazione sarebbe difficilmente manipolabile se fosse lunga solo 18 mm (corrispondente a 180°), si è preferito consigliare un valore doppio (36 mm).

Il fattore 10 dipende dal fatto che la graduazione non è divisa in 180 parti, ma solo 36, che diventano 18 dopo la divisione per 2 sopra citata.

Applicando la (2), $\alpha = \ell/4 \times 10$, e da qui si risale facilmente a $\sin \alpha$. Ovviamente, il simbolo f in figura rappresenta il filo teso dai bordi del semicilindro.



Questo dispositivo fornisce risultati comparabili a quelli del precedente. Lo chiameremo “apertometro a graduazione cilindrica” o “**apertometro cilindrico**”.

Vedremo nelle figure seguenti cosa esso può fornire, ma per esso vale la stessa limitazione descritta sopra per gli obiettivi deboli: occorrerebbe una graduazione avvolta a semicilindro di diametro assai maggiore, anche molti centimetri⁶.

Si può tentare di aggirare questi ostacoli con un terzo metodo, anche più semplice.

Si disponga in luogo dell'oculare una sorgente forte e di piccole dimensioni: un led bianco di qualche potenza, una lampadina a filamento concentrato (vanno bene quelle da auto a 12V/21 W, a filamento singolo). Questa sorgente va posta in luogo dell'immagine intermedia (di solito, 10 mm sotto l'orlo del tubo). In sostanza si percorre a ritroso il normale cammino ottico: dall'immagine intermedia all'obiettivo, fino al piano oggetto (il filo teso sulla graduazione).

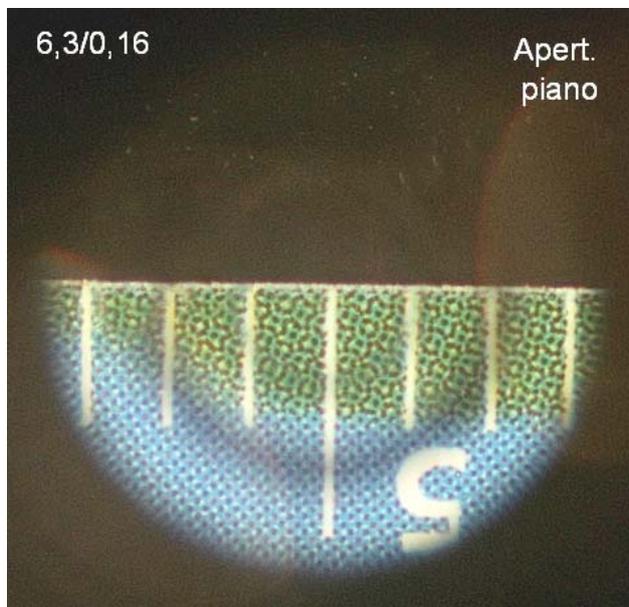
Il tratto della graduazione che risulta illuminato dal fascio, reso convergente dall'obiettivo, si può leggere sia su una graduazione piana che cilindrica. Gli schemi e le formule rimangono

⁶ Quando l'obiettivo è molto debole, nell'apertometro cilindrico si abbraccia un arco piccolo che si può sensibilmente approssimare alla tangente nel suo punto centrale. Le letture ottenute si avvicinano molto allora a quelle dell'apertometro piano.

quelli visti sopra. Chiameremo questo metodo “**apertometro a proiezione**”.

Ora mostriamo cosa si può ottenere con una serie di obbiettivi, sia per diascopea che per episcopia, e con i tre apertometri appena citati.

Per ogni misura si calcolerà la NA con la formula (1)(pag. 4) per l’apertometro piano e quello a proiezione; con la formula (2)(pag. 5) per l’apertometro cilindrico.



Le misure a proiezione sono state effettuate solo con la graduazione piana; per questo si applica ad esse la formula (1).

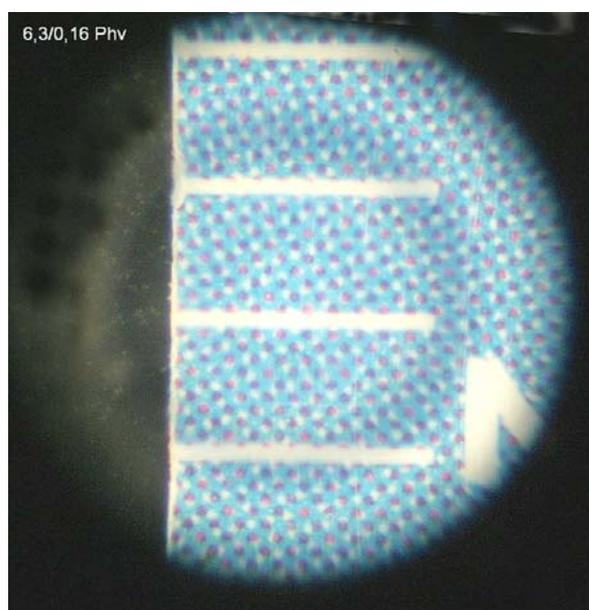


Fig. 9 a/b/c – Obiettivo acromatico 6,3/0,16 (Phv, a contrasto di fase variabile, con un doppio anello che appare sfocato).

Apertometro piano (sopra); lettura: $l = 6,4$. NA = 0,158.

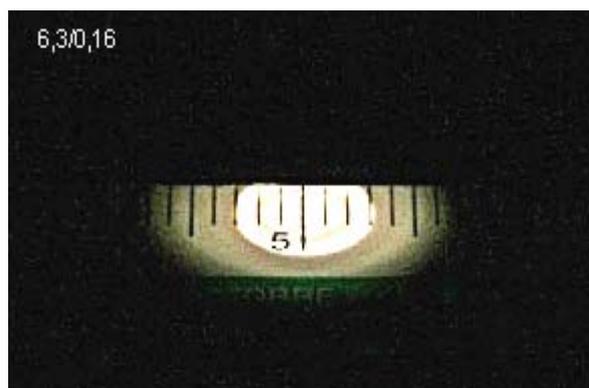
Apertometro cilindrico (a destra in alto); $l = 3,8$. NA = 0,165.

Apertometro proiezione (a destra); $l = 6,3$. NA = 0,156.

Come avevamo detto, gli obbiettivi deboli non consentono misure precise; infatti, le tre misure differiscono per la terza cifra significativa. Basta osservare che l’immagine della graduazione non è a fuoco assieme agli anelli di fase, cioè sul secondo piano focale dell’obbiettivo, ma molto più su.

Ciò a causa della forte focale degli obbiettivi deboli, come detto sopra.

Per questo motivo, i confini della pupilla non sono definiti poiché il microscopio ausiliario è stato focalizzato sull’immagine della graduazione, che si trova ben al di sopra di essa.



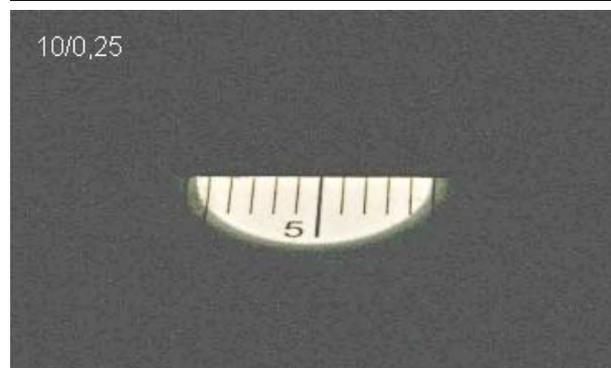
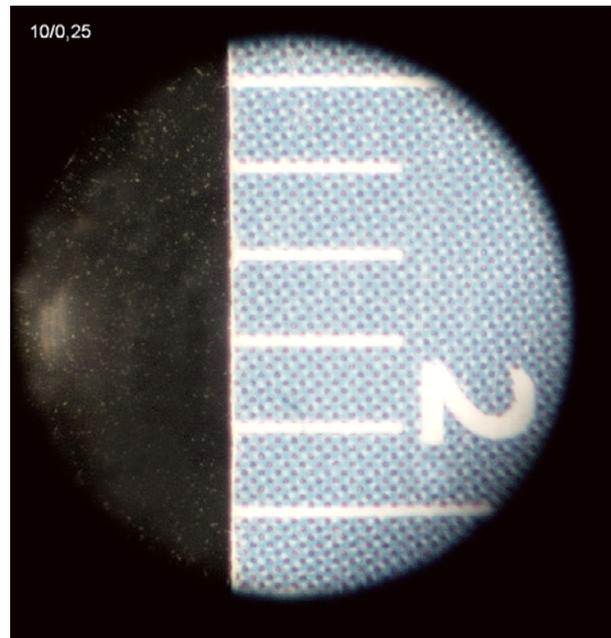
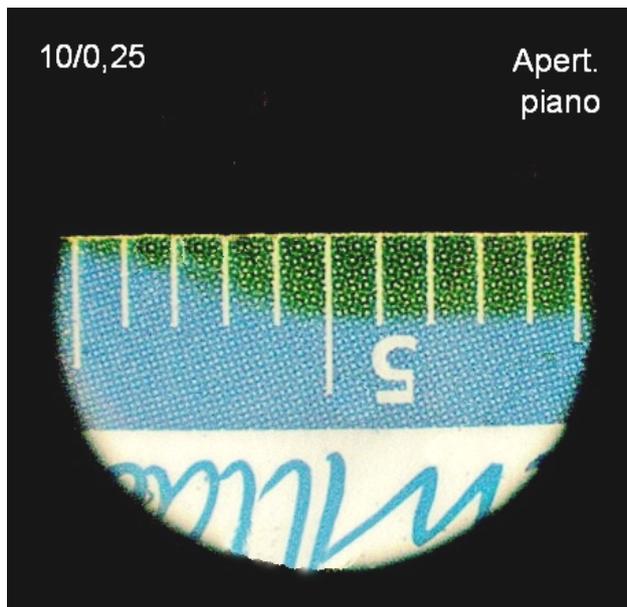


Fig. 10 a/b/c – Obiettivo acromatico 10/0,25.

Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 10,4$. NA = 0,252.

Apertometro cilindrico (a destra in alto); $\ell = 6,1$. NA = 0,263.

Apertometro a proiezione (a destra); $\ell = 10,3$. NA = 0,25.

La misura che differisce di più dal valore nominale è quella con l'apertometro cilindrico; infatti, in questo caso l'orlo della pupilla è ancora poco definito.



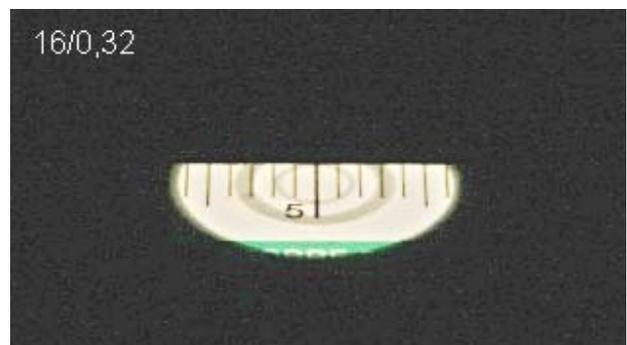
Fig. 11 a/b/c – Obiettivo acromatico 16/0,32 (Phv, a contrasto di fase variabile, con un doppio anello che ora appare nitido).

Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 13,2$. NA = 0,311.

Apertometro cilindrico (a destra in alto); $\ell = 7,25$. NA = 0,31.

Apertometro proiezione (a destra); $\ell = 12,6$. NA = 0,307.

In questo caso le tre misure sono ragionevolmente simili e vicine al valore nominale.



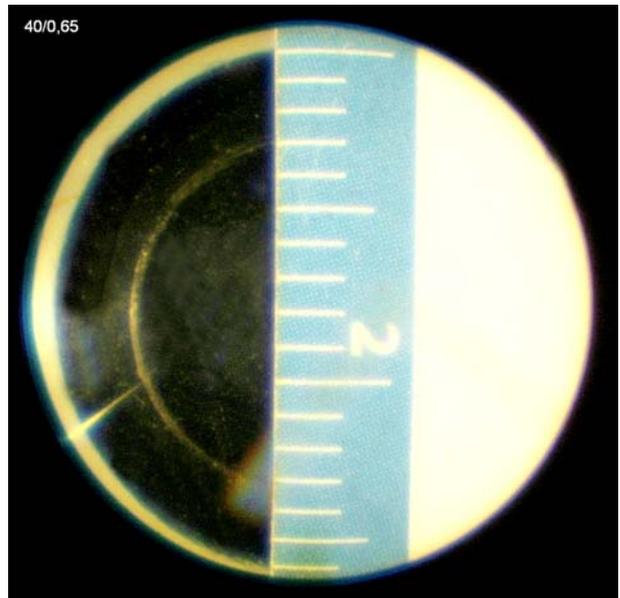


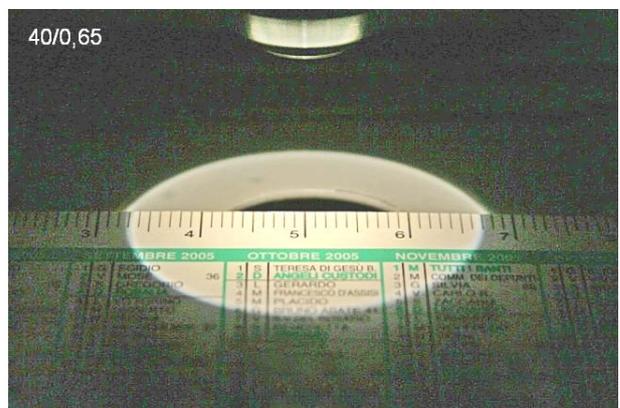
Fig. 12 a/b/c – Obiettivo acromatico 40/0,65.

Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 34,5$. NA = 0,653.

Apertometro cilindrico (a destra in alto); $\ell = 17,0$. NA = 0,675.

Apertometro proiezione (a destra); $\ell = 34,0$. NA = 0,66.

Visto che le tre misure sono molto simili, viene da pensare che il valore nominale dichiarato dal costruttore sia stato arrotondato per rispetto dei valori classici, ma in realtà l'obiettivo sia un po' più aperto del dichiarato.



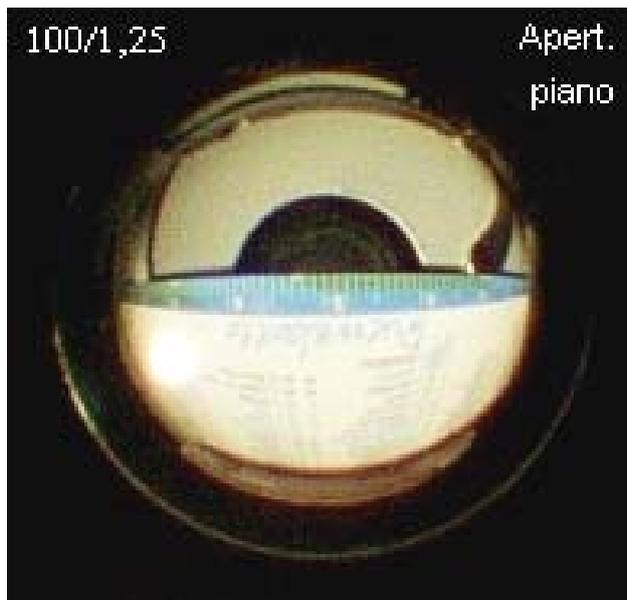


Fig. 13 a/b/c – Obiettivo acromatico HI 100/1,25.

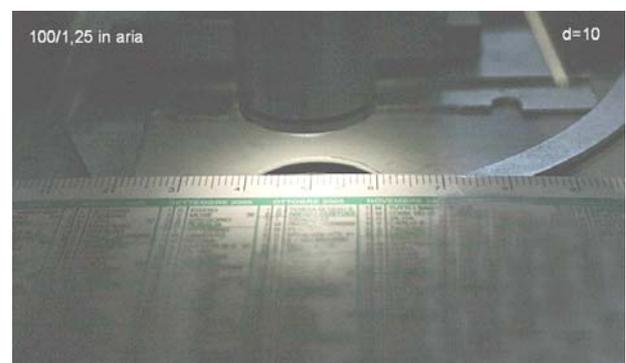
Poiché gli apertometri qui descritti operano in aria, ovviamente, i valori misurati vanno moltiplicati per l'indice del liquido usato per l'immersione. Se quest'ultima è omogenea, $n = 1,51$, ed il valore rilevato va moltiplicato per 1,51.

Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 60$. $NA = 0,832 \times 1,51 = 1,256$.

Apertometro cilindrico (a destra in alto; obiettivo Phv); $\ell = 31$. $NA = 0,976 \times 1,51 = 1,47$.

Apertometro proiezione (a destra): per migliorare l'immagine, la distanza fra obiettivo e graduazione è stata ridotta a 10 mm; $\ell = 40$. $NA = 0,9 \times 1,51 = 1,35$.

Notare come, in queste immagini, appare qualche oggetto posto sul tavolino, oltre la graduazione: la pinza del guida-oggetti.



Nel caso degli obiettivi ad immersione, come previsto, le misure si fanno incerte poiché gli estremi della graduazione appaiono “compressi” ed il fascio proiettato nell'ultimo caso appare ad orli molto sfumati.

Nel caso qui esaminato sembra però che il valore nominale (1,25) sia sottostimato.



Fig. 14 a/b/c – Obiettivo semiapocromatico HI 100/1,30.

Anche qui, i valori misurati vanno moltiplicati per l'indice del liquido usato per l'immersione: $n = 1,51$.

Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 40$. $NA = 0,894 \times 1,51 = 1,35$. Distanza fra obiettivo e graduazione ridotta a 10 mm

Apertometro cilindrico (a destra in alto); $\ell = 29$. $NA = 0,95 \times 1,51 = 1,44$.

Apertometro proiezione (a destra): per migliorare l'immagine, la distanza fra obiettivo e graduazione è stata ridotta a 10 mm; $\ell = 36$. $NA = 0,874 \times 1,51 = 1,32$.

Anche in questo caso, l'apertometro cilindrico fornisce le misure più discoste dal valore nominale.

Rimane ancora una volta il sospetto che i valori nominali siano sottostimati, o almeno sotto-dichiarati al fine di rimanere sui valori tradizionali.



Ora esaminiamo una serie di obiettivi episcopici (da usare senza lamella: $d = 0$), con seconda coniugata infinita.

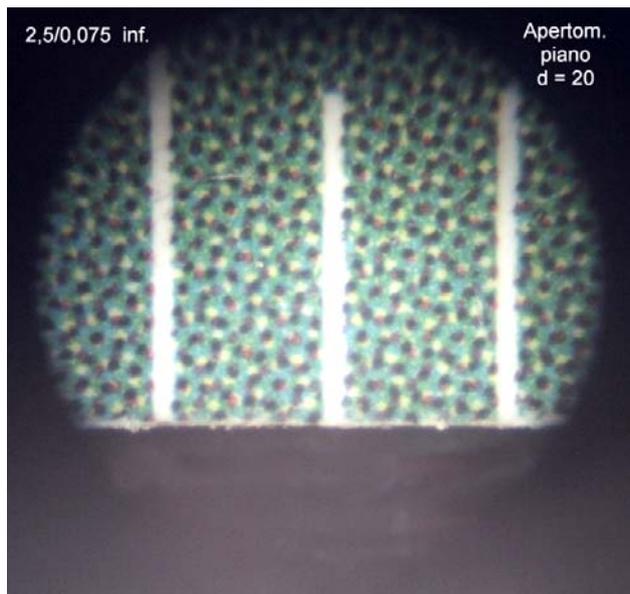
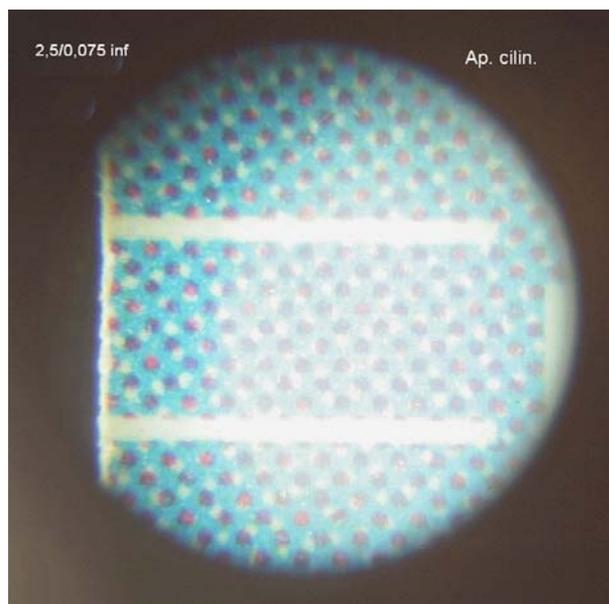


Fig. 15 a/b/c – Obiettivo CF 2,5/0,075.

Apertometro piano (sopra); lettura: $l = 3$. $NA = 0,074$.

Apertometro cilindrico (a destra in alto); $l = 2,2$. $NA = 0,09$.



Apertometro proiezione (a destra): $l = 4$. $NA = 0,07$.

NB: la distanza d dello schema di pag. 4 è stata aumentata a 30 mm.

Trattandosi di un obiettivo debole, non stupisce l'incertezza della misura: la pupilla non è uniformemente illuminata.

In questi casi, è preferibile il metodo a proiezione, magari aumentando la distanza d dello schema.





Fig. 16 a/b/c – Obiettivo CF 5/0,10.

Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 8,3$. NA = 0,103.

NB: il valore di d è stato portato a 40 mm.

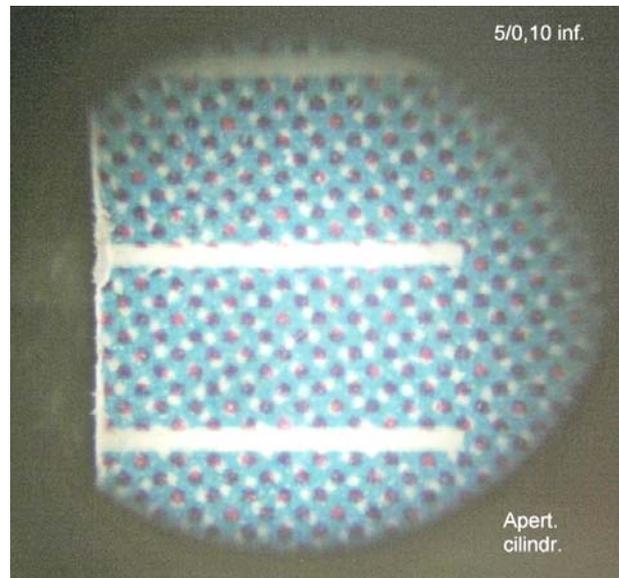
Apertometro cilindrico (a destra in alto); $\ell = 2,4$. NA = 0,104.

NB: il valore di d è rimasto a 20 mm.

Apertometro proiezione (a destra): $\ell = 6$. NA = 0,10.

NB: il valore di d è stato portato a 30 mm.

L'immagine della pupilla mostra ancora orli sfumati. Nessuna sorpresa se la misura è ancora un poco incerta, ma solo sulla terza cifra significativa.



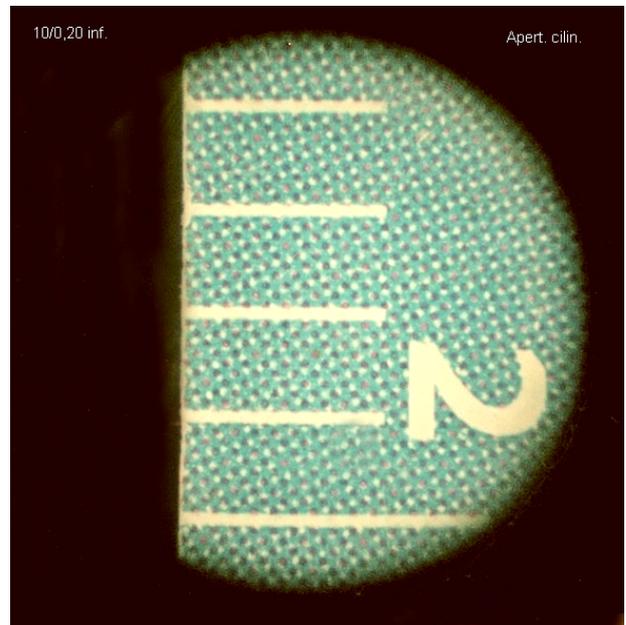


Fig. 17 a/b/c – Obiettivo CF 10/0,20.

Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 8,4$. NA = 0,20.

Apertometro cilindrico (a destra in alto); $\ell = 5,0$. NA = 0,22.

Apertometro proiezione (a destra): $\ell = 12,3$. NA = 0,20.

NB: il valore di d è stato portato a 30 mm.

Anche in questo caso, l'apertometro cilindrico fornisce i valori più discosti dalle attese. I bordi della pupilla appaiono, infatti, più sfumati, probabilmente perché la graduazione si trova dal centro del piano oggetto ad una distanza molto piccola: occorrerebbe una graduazione avvolta su un cilindro molto più grande, per es. 45 mm, in modo che la graduazione sia lunga 72 mm.



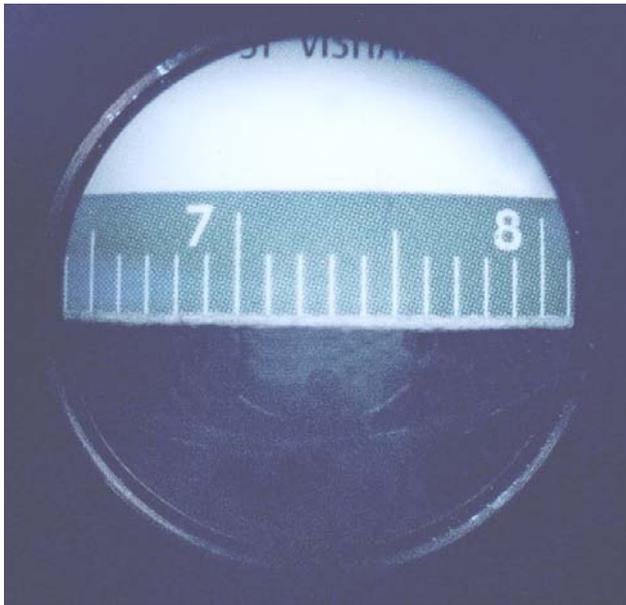
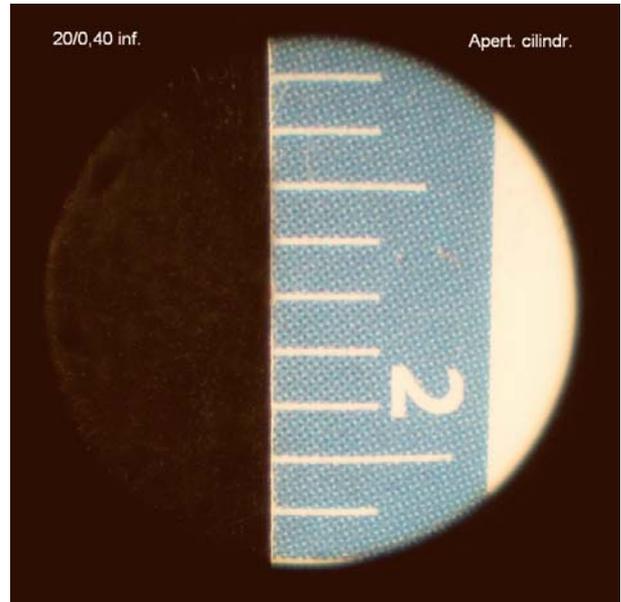


Fig. 18 a/b/c – Obiettivo CF 20/0,40.

Apertometro piano (sopra); lettura: $l = 17,2$. NA = 0,39.

Apertometro cilindrico (a destra in alto); $l = 9,5$. NA = 0,40.



Apertometro proiezione (a destra): $l = 26,3$. NA = 0,40

NB: il valore di d è stato portato a 30 mm.

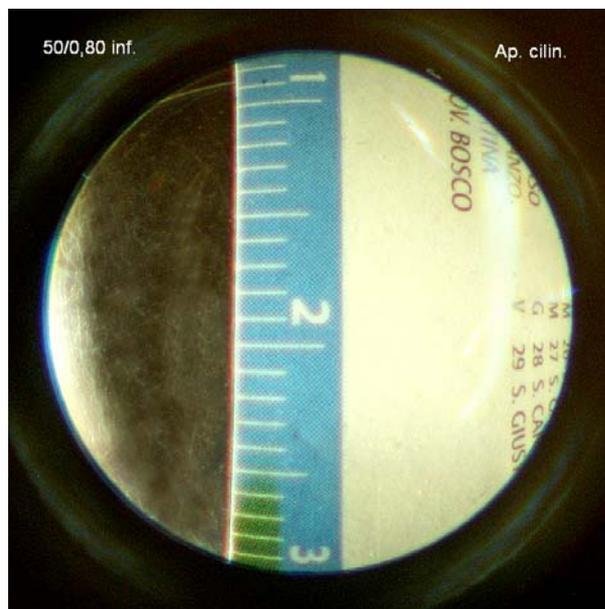
I valori delle tre misure collimano molto bene, fra loro e col valore nominale.





Fig. 19 a/b/c – Obiettivo CF 50/0,80.
Apertometro piano (sopra); lettura: $\ell = 54$. NA = 0,80.

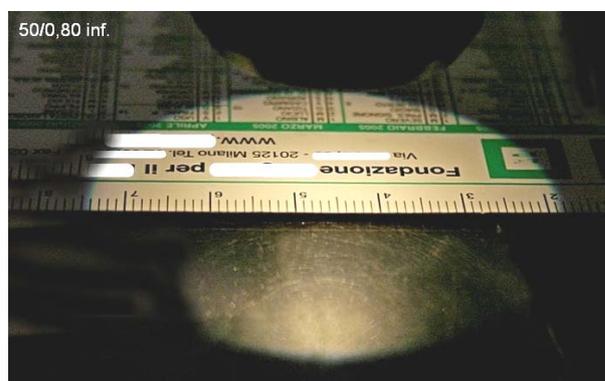
Apertometro cilindrico (a destra in alto); $\ell = 22$.
NA = 0,82.



Apertometro proiezione (a destra): $\ell = 55$. NA = 0,81

NB: il valore di d è rimasto a 20 mm.

Ecco che un obiettivo forte a secco consente ancora buone misure.



CONCLUSIONE: Data la quasi impossibilità di reperire un apertometro professionale e la difficoltà di riprodurlo integralmente, può essere utile costruirlo con mezzi semplici. Abbiamo sottolineato i limiti dei tre modelli proposti ma, quando il valore dell'apertura non è indicato dal costruttore – prodotti di prima della metà del '900 – o quando si hanno seri dubbi sul valore nominale, un semplice dispositivo può essere utile.

In sostanza, com'è indicato in uno dei riferimenti bibliografici sopra riportati, “*Se la distanza fra graduazione ed obiettivo è di alcune volte la focale dell'obiettivo e se la graduazione è uniformemente illuminata, presso il piano focale superiore dell'obiettivo si ha un'immagine impiccolita e rovesciata di essa, o almeno di quella parte di essa che corrisponde all'angolo di apertura dell'obiettivo. Si ha così una lettura diretta del valore di apertura angolare da cui, fatti gli opportuni calcoli, si ricava NA*”.

Questo vale per i modelli a graduazione piana o cilindrica. Il modello “a proiezione” è ancora più semplice da realizzare e forse è anche più affidabile. Con esso si possono ancora usare una graduazione piana o cilindrica. Nelle foto esposte sopra si è sempre usata la “proiezione” su una graduazione piana. Sarebbe più adatta ad aperture minime e massime una graduazione ricurva,

ma questa dovrebbe avere un diametro di molti centimetri ed essere ben centrata rispetto all'asse ottico del sistema. Qualche difficoltà costruttiva in più, ma una maggiore flessibilità e precisione.

Per comodità del lettore riportiamo una tabella che riassume i risultati delle misure descritte sopra.

Obiettivo	Apertometro	Formula	Letture (ϕ)	d	$\text{tg } \alpha$	α	$\sin \alpha$	NA
-----------	-------------	---------	-----------------------	-----	---------------------	----------	---------------	----

Acrom. Phv 6,3/0,16 160/-	Piano	(1)	6,4	20	0,16	9,09	0,158	0,158
Acrom. Phv 6,3/0,16 160/-	Cilin.	(2)	3,8	11,5		9,5	0,170	0,165
Acrom. Phv 6,3/0,16 160/-	Proiez.	(1)	6,3	19,5	0,158	8,95	0,156	0,156
Acrom. 10/0,25 160/0,17	Piano	(1)	10,4	20	0,26	14,6	0,252	0,252
Acrom. 10/0,25 160/0,17	Cilin.	(2)	6,1	11,5		15,25	0,263	0,263
Acrom. 10/0,25 160/0,17	Proiez.	(1)	10,3	19,5	0,26	14,6	0,25	0,25
Acrom. Phv 16/0,32 160/0,17	Piano	(1)	13,1	20	0,327	18,1	0,31	0,31
Acrom. Phv 16/0,32 160/0,17	Cilin.	(2)	7,25	11,5		18,12	0,31	0,31
Acrom. Phv 16/0,32 160/0,17	Proiez.	(1)	12,6	19,5	0,323	17,9	0,307	0,307
Acrom. 40/0,65 160/0,17	Piano	(1)	34,5	20	0,862	40,8	0,653	0,653
Acrom. 40/0,65 160/0,17	Cilin.	(2)	17,0	11,5		42,5	0,675	0,675
Acrom. 40/0,65 160/0,17	Proiez.	(1)	34	19,5	0,87	41,0	0,66	0,66
Acrom. HI 100/1,25 160/0,17	Piano	(1)	60	20	1,5	56,3	0,832	1,256
Acrom. HI 100/1,25 160/0,17	Cilin.	(2)	31	11,5		77,5	0,976	1,474
Acrom. HI 100/1,25 160/0,17	Proiez.	(1)	62	19,5	1,59	57,8	0,85	1,28
Semiapo. HI 100/1,30 160/0,17	Piano	(1)	40	10	2,00	63,4	0,894	1,35
Semiapo. HI 100/1,30 160/0,17	Cilin.	(2)	29	11,5		72,5	0,95	1,44
Semiapo. HI 100/1,30 160/0,17	Proiez.	(1)	36	20	1,8	60,9	0,874	1,32

Epi CF 2,5/0,075 $\infty/-$	Piano	(1)	3	20	0,075	4,29	0,074	0,074
Epi CF 2,5/0,075 $\infty/-$	Cilin.	(2)	3	11,5		4,3	0,074	0,074
Epi CF 2,5/0,075 $\infty/-$	Proiez.	(1)	4	30	0,07	4,81	0,07	0,07
Epi CF 5/0,10 $\infty/-$	Piano	(1)	4,3	20	0,107	6,13	0,11	0,11
Epi CF 5/0,10 $\infty/-$	Cilin.	(2)	2,4	11,5		6	0,104	0,104
Epi CF 5/0,10 $\infty/-$	Proiez.	(1)	6	30	0,1	5,7	0,1	0,1
Epi CF 10/0,20 $\infty/-$	Piano	(1)	8,4	20	0,21	11,86	0,205	0,205
Epi CF 10/0,20 $\infty/-$	Cilin.	(2)	5,0	11,5		12,5	0,22	0,22
Epi CF 10/0,20 $\infty/-$	Proiez.	(1)	12,3	30	0,205	11,6	0,20	0,20
Epi CF 20/0,40 $\infty/-$	Piano	(1)	17,2	20	0,43	23,3	0,395	0,395
Epi CF 20/0,40 $\infty/-$	Cilin.	(2)	9,5	11,5		23,7	0,40	0,40
Epi CF 20/0,40 $\infty/-$	Proiez.	(1)	26,3	30	0,438	23,7	0,401	0,401
Epi CF 50/0,85 $\infty/-$	Piano	(1)	54	20	1,35	53,5	0,804	0,804
Epi CF 50/0,85 $\infty/-$	Cilin.	(2)	22	11,5		55	0,82	0,819
Epi CF 50/0,85 $\infty/-$	Proiez.	(1)	55	20	1,37	53,9	0,81	0,81

Obiettivo	Apertometro	Formula	Letture (ϕ)	d	$\text{tg } \alpha$	α	$\sin \alpha$	NA
-----------	-------------	---------	-----------------------	-----	---------------------	----------	---------------	----