

Art. n° 34 – **Gli OBIETTIVI DEBOLI**

Nell'articolo n° 12 (“La fotografia con lo stereo-microscopio”) presente in questo sito, nella sezione “Approfondimenti di microscopia ottica”, abbiamo suggerito alcune considerazioni sulla fotografia a piccolo ingrandimento ed alcune soluzioni pratiche per fotografare con uno “stereo”.

Ora vogliamo allargare l'argomento facendo confronti fra la fotografia che può essere eseguita con: – un sistema fotografico usuale, – lo stereomicroscopio, e poi, in dettaglio, – il microscopio composto, ai minimi ingrandimenti ad esso consentiti.

Per un microscopio “biologico” o anche episcopico, i normali corredi raramente offrono obiettivi d'ingrandimento inferiore a 4:1; con un normale oculare (10 ×), dunque, si parte da 40 ingrandimenti visuali in su. E raramente ci si preoccupa di andare sotto questo limite. Ma c'è molto terreno da arare in quella direzione.

Infatti, il 102% dei micrografi, quando esamina un obiettivo da microscopio, punta sempre all'ingrandimento, come un ragazzo pensa alla cilindrata del motorino.

Ma, come il solito, le cose non sono così semplici.

È chiaro che un esame citologico o microbiologico ha bisogno della massima risoluzione e del massimo ingrandimento. Ma una veduta d'insieme di un vetrino (in diascopea) o della superficie di un oggetto opaco (roccia, terriccio, corteccia, foglia, fiore, da osservare in episcopio) può richiedere un ingrandimento assai piccolo, anche 1:1.

Per l'osservazione, si ricorre allora al microscopio stereoscopico, e per ingrandimenti modesti può andare benissimo (meglio non superare 20 ×).

Ma per la fotografia si tratta sempre di un ripiego, come abbiamo spiegato nell'articolo n° 12 sopra citato. Anche nel cap. 29 del manuale “Problemi tecnici della microscopia ottica” (sempre nel sito www.funsci.com) si spiega come l'ingrandimento utile massimo per i normali stereoscopici sia circa 100 × in quanto la loro apertura non supera in genere 0,10; così la loro risoluzione, per ragioni di pura geometria, difficilmente può superare 5-10 μ (nel piano oggetto). Ma c'è di più: nei modelli sec. Greenough, l'asse ottico di ognuno dei due obiettivi non è perpendicolare al piano del tavolino ed un oggetto piano può risultare a fuoco solo in una striscia verticale. Nei modelli ad obiettivo comune (CMO) i due fasci principali occupano regioni periferiche dell'obiettivo e quindi si verificano su tutto il campo alcune aberrazioni extra-assiali (coma, astigmatismo e cromatica laterale).

Ecco perché una foto allo stereoscopico mostra sempre una modesta definizione.

Rimane allora la classica “macrofoto”¹, la fotografia ottenuta fissando l'immagine reale prodotta direttamente da un obiettivo. Anche quando l'obiettivo è costituito da molte lenti, al fine di ridurre le aberrazioni, lo si può sempre ricondurre ad una lente semplice: non si forma un'immagine intermedia e non esiste un oculare che la ingrandisca in un secondo stadio. Insomma: “macrofoto” con solo un obiettivo, contrapposta a “microfoto”, ottenuta con un microscopio composto (obiettivo + oculare).

Per la “macrofoto”, per ingrandimenti da 1:1 a 100:1, sono stati prodotti allora molti modelli di obiettivi speciali: ricordiamo i “Mikro-Tessar” della Bausch e Lomb (quattro modelli con focali da 16 a 72 mm), i tipi “M” della Zeiss Jena (8 modelli con focali da 10 a 120 mm), i “Mikropolar” della Reichert (5 modelli, con focali da 20 a 100 mm), i “Luminar” della Zeiss Oberkochen (5 modelli da 16 a 100 mm), i “Summar” ed i “Milar” della Leitz (13 modelli da 20

¹ Si dovrebbe dire “fotomacrografia” e limitare questo termine alla fotografia con immagine più grande dell'oggetto (ingrandimento $M > 1:1$).

a 120 mm), i “Mikronar” della Galileo (4 modelli, da 35 a 100 mm).

Ogni obiettivo era ottimizzato per una limitata gamma di valori d’ingrandimento, per es. da 1:1 a 8:1 per il Luminar 100 mm, da 4:1 a 20:1 per il Luminar 40 mm, ecc. E ciò al fine di ottimizzare le correzioni di ogni modello per precisi valori d’ingrandimento.

La loro apertura relativa non era elevata, sempre per migliorare le correzioni, e poteva andare generalmente da f 2 ad f 6. Erano spesso chiamati “microfotografici”, ma impropriamente, poiché andavano usati per la classica “macrofoto”. L’uso del termine “microfotografici” era giustificato solo dal fatto che molti di essi possedevano una vite di fissaggio a passo normalizzato, quello “RMS”, comune presso gli obiettivi da microscopio.

Questo tipo di fissaggio consente di montare l’obiettivo sul revolver di qualunque microscopio e munire lo stativo di un raccordo (senza oculare) per la fotocamera (privata dell’obiettivo fotografico). Molti costruttori fornivano per quasi ogni modello di microscopio e per alcuni modelli di fotocamera il raccordo adatto, con il vantaggio di poter sfruttare i meccanismi di messa a fuoco, di spostamento del preparato, d’illuminazione, ecc., presenti in qualunque microscopio biologico o episcopio.

Le prestazioni di questi obiettivi “microfotografici” erano ottime, ma essi sono oggi quasi introvabili, e sul mercato sono presenti ben pochi equivalenti moderni.

Del resto, il meccanismo complessivo sommariamente descritto non era privo d’inconvenienti: l’inquadramento e la messa a fuoco presupponevano nella fotocamera un mirino “reflex” e l’osservazione dell’immagine “aerea” su un vetro smerigliato, sia pure munito di lenti di Fresnel, micropismi, ecc. Ma questi sistemi di controllo della messa a fuoco sono progettati per un’apertura (lato immagine) fra f 2 ed f 8, al minimo, mentre l’apertura (lato oggetto) di un obiettivo “microfotografico” si limita spesso a f 10 o f 20. Il risultato è che i micropismi o il vetro smerigliato appaiono assai scuri e nascondono i dettagli dell’immagine. Anche uno “stigmometro” a sdoppiamento d’immagine non appare mai tutto illuminato.

Per ovviare a questa limitazione, sono stati proposti stativi con soffietto dotati di vetro di messa a fuoco con zona centrale lucida e reticolo; col metodo “della parallasse” (vedi, nel citato manuale “Problemi tecnici della microscopia ottica”, il cap. 30.8.3 c) si può migliorare la messa a fuoco, magari osservando il reticolo con una lente d’ingrandimento, ma il sistema diviene ingombrante e scomodo (vedi la figura a lato, tratta da un catalogo Leitz 51.2 – D40, del 1966, che raffigura il classico stativo “Aristophot”).

I risultati possono però essere splendidi. Tutto il sistema è ottimizzato per far lavorare l’obiettivo nelle migliori condizioni: ingrandimento ben definito per ogni modello, apertura modesta, nessun altro mezzo interposto, ecc.

Si potrebbe obiettare che non c’è bisogno di obiettivi così speciali: molte fotocamere commerciali hanno fra i loro accessori almeno un obiettivo “Macro” che permette riprese a distanza ravvicinata, con ingrandimento uguale o maggiore di 1:1.

Ma occorre non farsi illusioni: tali obiettivi sono progettati per un uso generico: distanza dell’oggetto da pochi cm all’infinito, apertura grande e variabile, campo angolare grande, ecc. Ed il progettista cercherà di ottimizzare l’obiettivo per l’uso più frequente (oggetto a grande distanza, apertura intermedia, e così via), ma non potrà allo stesso tempo ottenere il meglio per l’applicazione “macro”: l’utente “medio” userà in genere quell’obiettivo come se fosse un obiettivo normale; tanto peggio per i casi particolari.



Se poi pensiamo ad oggetti molto piccoli, che richiedono un'illuminazione particolare, una focalizzazione accurata, spostamenti millimetrici, allora ci si rende conto che un normale treppiede con sopra una normale fotocamera non basta più.

Mostreremo poco oltre alcuni risultati ottenibili con una moderna fotocamera digitale in posizione "macro" e li confronteremo con le prestazioni di uno stereoscopico e di vari obiettivi deboli per microscopio biologico. Sarà questo il nostro argomento.

A questo punto, ripensiamo ad un normale microscopio composto.

Nel cap. 19.2 del manuale "Problemi tecnici della microscopia ottica" (sempre nel sito www.funsci.com), avevamo precisato che:

« ... almeno in centro al campo ("sull'asse"), l'obiettivo del microscopio è otticamente perfetto, cioè "diffraction limited", tranne il caso di strumenti giocattolo.

Degli obiettivi destinati ad altri usi, solo pochi tipi specialissimi (ad es. quelli destinati alla micro-litografia) possono vantare un simile livello di correzione.

Questa posizione privilegiata dell'obiettivo da microscopio si spiega in base ad alcune condizioni favorevoli di cui esso gode in via quasi esclusiva:

- L'ingrandimento M , salvo casi assai particolari, è fisso.
- L'apertura NA , in genere, è fissa. Queste due condizioni consentono di ottimizzare il progetto su valori fissi di M ed NA .
- La focale e le coniugate sono piccole e pertanto, in scala, è piccolo il cerchio di confusione dovuto alle aberrazioni.
- Le piccole dimensioni consentono, senza aumentare troppo l'ingombro delle lenti, di raggiungere le massime aperture, e quindi il minimo diametro della centrica. Anche le eventuali disomogeneità dei vetri ottici hanno minor peso in minori dimensioni.
- Visto che non esistono in genere problemi di peso ed ingombro, quindi di dimensioni delle lenti, si rende possibile l'uso di materiali particolari e costosi come la fluorite, che facilitano la correzione di certe aberrazioni (cromatiche e sferica, soprattutto).
- Il campo angolare è piccolo, difficilmente superiore a 3° (semicampo).
- In certi casi (oculari compensatori, vedi il § 19.3.1 nel citato manuale, o certe lenti di tubo, § 3.2.3) alcuni residui di aberrazioni dell'obiettivo possono venir corretti dall'oculare.
- Di solito è possibile accettare valori molto bassi di penetrazione e ciò permette di raggiungere valori molto elevati di apertura.
- In molti casi (oggetti trasparenti spessi), si può tollerare la curvatura di campo dell'immagine.

Si pensi, per confronto, ad un obiettivo fotografico che deve lavorare con ingrandimento ed apertura variabile, campo angolare grande, molti limiti di ingombro e peso, l'esigenza di fornire un'immagine piana e con forte profondità di fuoco, focale elevata, ecc. e si capirà la posizione favorevole dell'obiettivo da microscopio.»

Dopo questa premessa, nascerebbe la deduzione che, finché si può, si debba preferire, per l'osservazione come per fotografia, l'uso del microscopio composto, non stereoscopico². Oltre ai citati vantaggi dell'obiettivo, il microscopio composto offre alcuni vantaggi pratici, come una struttura meccanica stabile, una facile focalizzazione (macro- micro-), la possibilità di muovere l'oggetto con precisione, un'ampia varietà di sistemi d'illuminazione con micro-lampade o epi-illuminazione, filtri di ogni genere, ecc.

Per ingrandimenti superiori a circa 20:1 (fotografia) o 40 × (osservazione), questa deduzione è effettivamente vera.

Ma vi è un campo d'ingrandimenti, diciamo da 1:1 a 10:1 per la fotografia, per il quale un normale corredo di obiettivi non offre alcuna possibilità. Facciamo il caso del sistema micro-fotografico più consigliabile: obiettivo - oculare (se occorre, compensatore) – microcamera con

² Abbiamo già spiegato perché il microscopio stereoscopico non possa dare il meglio in fatto di definizione.

“fattore di camera” pari a $0,5 \times$ (abituale nelle microcamere tradizionali oppure, comunque, fotocamera con un obiettivo con focale pari a circa 3 volte la diagonale del sensore digitale). In queste condizioni, con un obiettivo 4:1 (di solito, il più debole in molti corredi) ed un normale oculare $10 \times$, l’ingrandimento fotografico risulta: $4 \times 10 \times 0,5 = 20$. In molti casi è troppo.

Occorre allora cercare obiettivi d’ingrandimento fra 1:1 e 4:1. Col sistema appena illustrato (oculare $10 \times$, fattore di camera $0,5 \times$), si possono ottenere ingrandimenti fotografici da 5:1 a 20:1. Con un oculare “a pupilla alta”, che si può auto-costruire (vedi, sempre nel sito www.funsci.com, l’art. n° 13 della sezione “Approfondimenti di microscopia ottica”, [“Fotografia al microscopio con fotocamere digitali”, pag. 3] oppure l’art. “Oculare a pupilla alta” di G. Carboni, nella sezione “Microscopia”), si può scendere ancora.

Tutto questo discorso vale per le tradizionali microcamere a mirino separato, come quella visibile nella figura seguente, ripresa dall’art. n° 12 citato all’inizio di questo articolo.

(Fig. 3 dell’art. n° 12) – Un qualunque tubo porta-oculare (TD), munito di oculare, può portare la classica “microcamera” (MC), munita di telescopio laterale (T) contenente un reticolo per la messa a fuoco e l’inquadratura. Sopra, un opportuno raccordo per la fotocamera (FC) priva di obiettivo.

Nella microcamera, una debole lente convergente (“lente di camera”, con focale di 125 mm, di solito, situata subito sopra l’oculare) assicura il “fattore di camera” di $0,5 \times$.



Ma oggi è difficile trovarle e comunque è molto più semplice poggiare direttamente la fotocamera, munita di obiettivo, sull’oculare del microscopio. Nel citato art. n° 13 si sono affrontati alcuni dei problemi ottici relativi ma comunque, scegliendo un oculare con un indice di campo di circa 18 mm (un normale oculare $10 \times$ o $6 \times$, possibilmente “per portatori d’occhiali”), con un obiettivo fotografico “medio”, oppure variando la focale di un normale zoom, è possibile riprendere sul sensore (CCD o quello che sia) l’intera immagine intermedia del microscopio. A questo punto, con un obiettivo del microscopio molto debole, si può scendere ad un ingrandimento fotografico fino ad 1:1.

Questi obiettivi, d’ingrandimento proprio inferiore a 4:1, hanno in genere una distanza di lavoro di almeno un centimetro e quindi consentono di illuminare dall’alto (anche con un normale “faretto”) qualunque oggetto opaco.

Esaminiamo alcuni di questi obiettivi, anche se sono difficilmente reperibili.

Obiettivo Zeiss Oberkochen “Plan **1,0/0,04** 160/– Carl Zeiss Germany” – semi-apocromatico

n° di catalogo 46 20 10.

È l’obiettivo di più basso ingrandimento che sembra sia mai stato commercializzato. In realtà, tale sistema è stato descritto a lungo nei cataloghi della casa, ma spesso dichiarato “non disponibile”.

La ricetta è quella del “inverted telephoto”, vale a dire un elemento divergente frontale ed uno convergente successivo, l’inverso di quello che si fa nei tele-obiettivi fotografici.

Questa ricetta consente di ottenere una “distanza frontale” (fra l’oggetto e la prima lente) assai minore della focale che competerebbe ad un ingrandimento così basso. Infatti, per avere un

valore di $M = 1:1$ occorrerebbe che la seconda coniugata di un obiettivo semplice (fra lente ed immagine intermedia = circa 150 mm) fosse simile alla prima: l'obiettivo dovrebbe avere una lunghezza di parfocalità $Lo = 150$ mm circa. Impraticabile.

L'obiettivo in questione è previsto per una "seconda coniugata finita" con lunghezza meccanica di tubo (Lm) pari al classico valore di 160 mm. Utilizzato in queste condizioni, esso mostra un ingrandimento lineare (M_{obb}) pari a 1:1 (valore misurato). Esso però non risulta parfocale con gli altri della sua categoria: la sua lunghezza di parfocalità, benché assai inferiore a 150 mm, risulta pari a: $Lo = 62$ mm; distanza di lavoro: $WD = 23$ mm circa.

Un elevato valore di Lo può creare problemi con stativi a corsa macrometrica ridotta. Ma c'è una scappatoia: con un'apertura così ridotta (0,04) ed una focale così elevata è possibile variare notevolmente le coniugate del sistema senza provocare apprezzabili residui di aberrazioni. La cosa non sarebbe pensabile con obiettivi medio-forti, ma qui si può fare.

Ecco infatti come si comporta l'obiettivo in questione variando la lunghezza di tubo Lm .

$Lm = 160$; $Lo = 62$; $WD = 23$ mm ; $M_{obb} = 1:1$.

$Lm = 173$; $Lo = 52$; $WD = 13$ mm ; $M_{obb} = 1,5:1$.

$Lm = 190$; $Lo = 47$; $WD = 10$ mm ; $M_{obb} = 2:1$.

È quindi possibile variare largamente i parametri geometrici dell'obiettivo semplicemente variando la lunghezza del tubo. Alzando l'oculare di 30 mm, la lunghezza di parfocalità scende a 47 mm, di poco superiore a quella a norme DIN (45 mm).

Se si opera su uno stativo con lunghezza di tubo fissa, come avviene quasi sempre, non è difficile tornare un tubo di raccordo per tenere sollevato l'oculare.

Ma c'è una tassa da pagare: allungando il tubo, l'ingrandimento cresce e può superare 2:1.

La correzioni dell'obiettivo in questione sono buone al centro del campo; la cromatica laterale (CVD) è sottocorretta ed esige l'uso di un oculare compensatore classico, come i **Kpl** della stessa casa.

Fra le aberrazioni extra-assiali c'è però un notevole residuo di astigmatismo simmetrico, abbastanza forte da provocare una perdita apprezzabile di definizione sui bordi del campo (vedi la fig. 3).

Anche la planeità di campo è ridotta (nonostante la notazione) e copre un indice di campo (diametro d'immagine intermedia) pari ad appena 9 mm.

Questo obiettivo, come accade spesso con i prodotti della casa Zeiss W., non si può smontare poiché i singoli elementi meccanici sono bloccati da un adesivo resistente ai normali solventi. Si possono smontare solo la camicia esterna ed il diaframma superiore (fig. 2).



Fig. 1



Fig. 2

Nelle figure seguenti si mostrano le immagini fornite da questo obiettivo con un oculare compensatore con indice di campo $s' = 17,5$ mm, con tre diversi valori di lunghezza di tubo L_m (valori arrotondati). L'oggetto è costituito da un reticolo quadrettato con passo 1 mm.

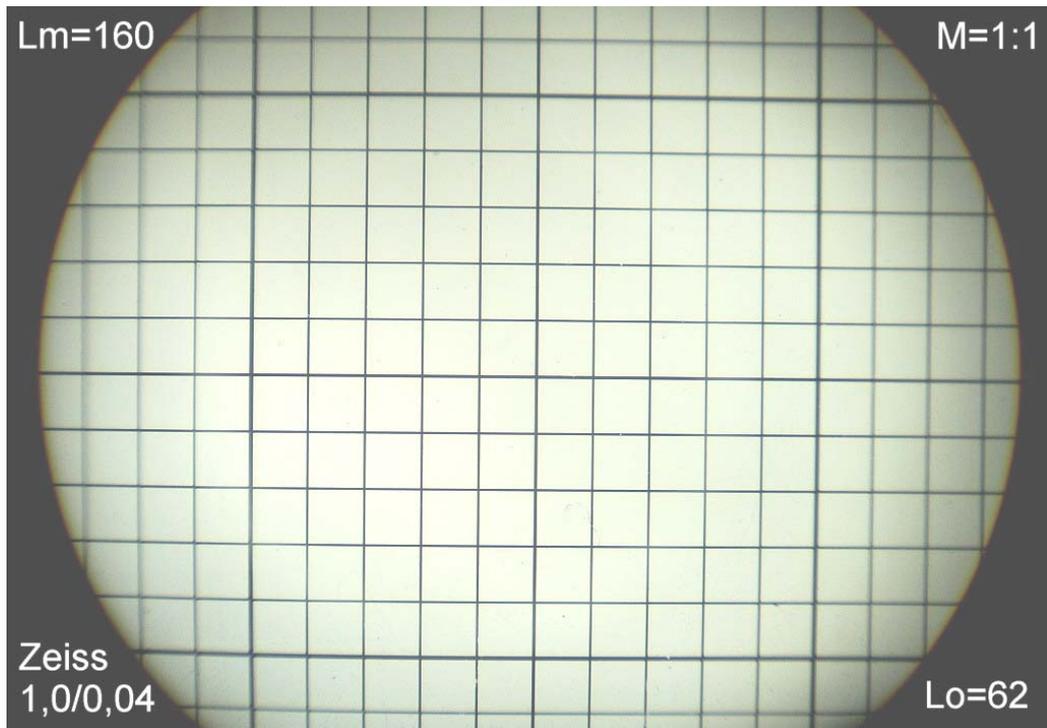


Fig. 3 – In condizioni normali di lavoro, questo obiettivo denuncia una perdita di definizione ai margini del campo sia a causa dell'astigmatismo sopra citato, sia per lo scarso spianamento dell'immagine.

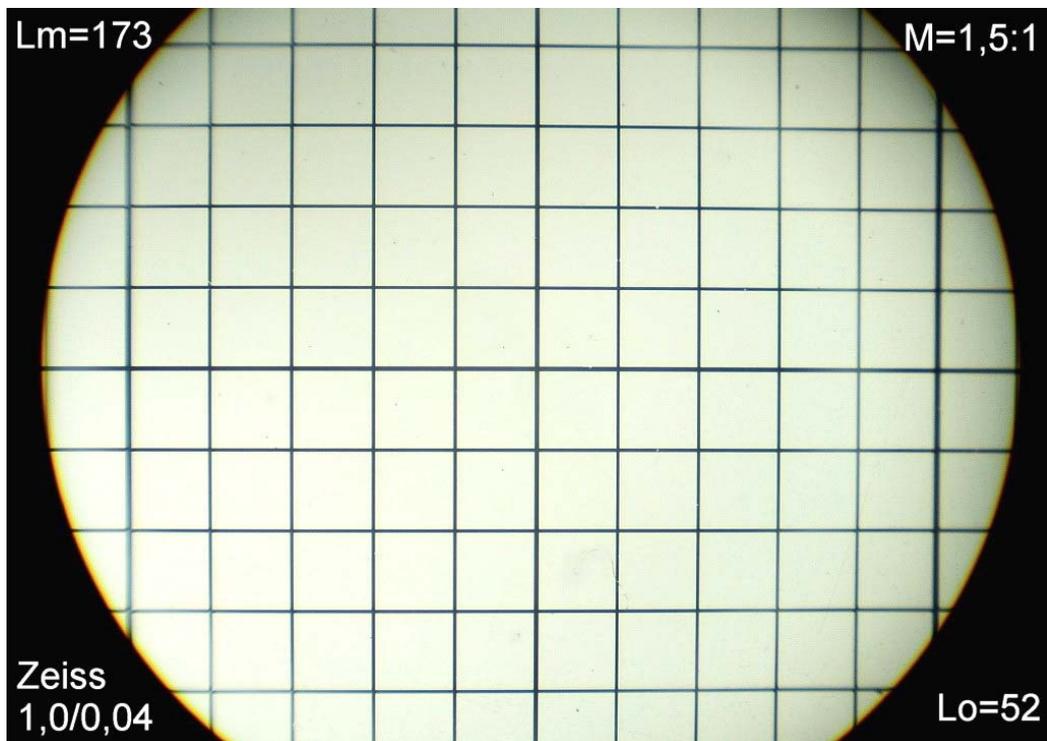


Fig. 4 –Allungando il tubo (o sollevando l'oculare) di 13 mm, l'ingrandimento aumenta del 50%, ma la lunghezza di parafocalità dell'obiettivo scende a 52 mm e la definizione marginale migliora.

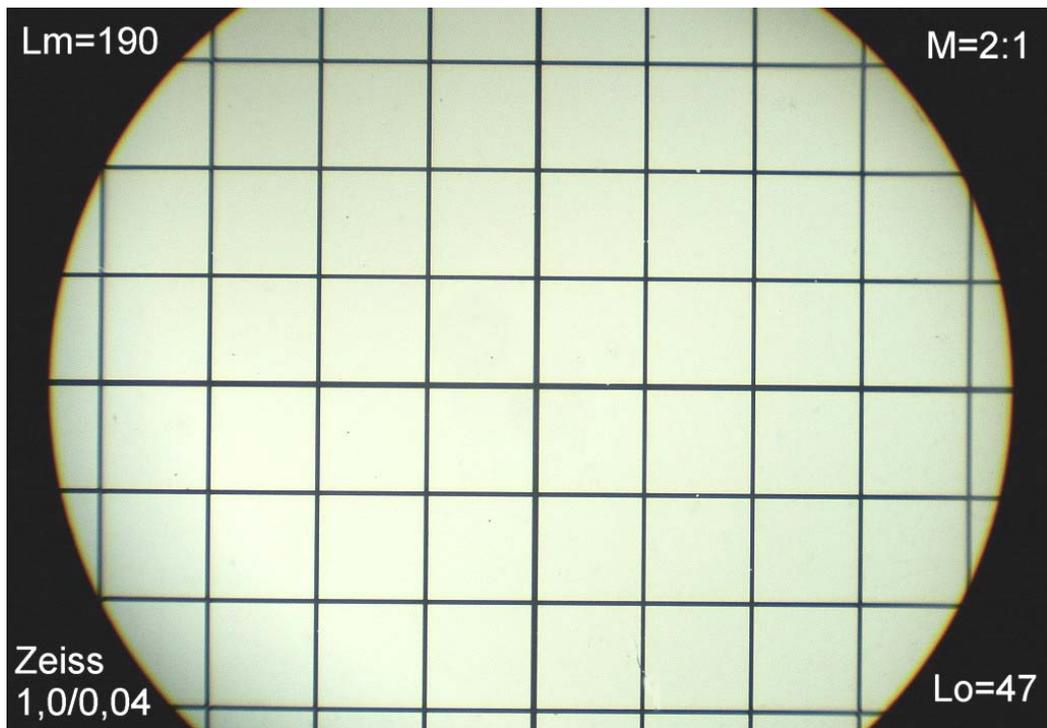


Fig. 5 – Allungando il tubo di 30 mm, l’ingrandimento diviene 2:1 ma la lunghezza dell’obbiettivo diviene quasi uguale a quella normale (45 mm per le norme DIN) e la definizione migliora ancora.

Come si è visto sopra, anche con un ingrandimento di 2:1, la distanza di lavoro è sempre superiore a 10 mm e ciò consente l’episcopia per illuminazione laterale con un qualunque “faretto”.

In passato è stato descritto anche un obbiettivo 1,6:1, sempre della Zeiss W., ma anch’esso praticamente non disponibile.

La casa Zeiss Jena ha prodotto fino al 1990 circa un obbiettivo $1\times/0,03$ destinato allo stativo Jenaval della serie 250 CF (sistemi a grande campo totalmente corretti di CVD). Si tratta di un sistema con seconda coniugata infinita, a campo grande ($s' = 32$ mm, il massimo valore mai realizzato), planare, parfocale cogli altri obbiettivi della stessa serie. Esso però era, in un certo senso, un mezzo obbiettivo, in quanto doveva venire accoppiato con un’altra lente da inserire sopra all’obbiettivo con apposita levetta sporgente sotto al tubo bioculare (freccia in fig. 6).

La notazione originale era:

“GF-PA $1\times / 0,03 \infty / - A$ ”. Numero di catalogo 300430:900.21/7.

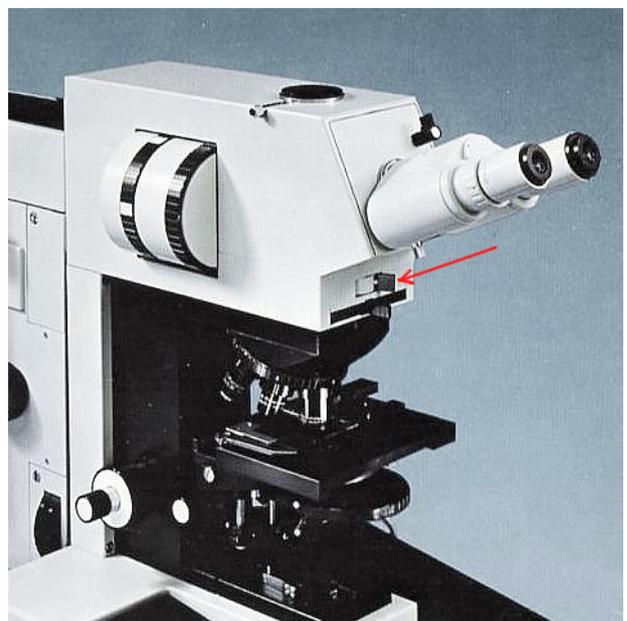
Passo di vite M 25. Lo = 45 mm.

Fig. 6 – Lo stativo Jenaval della Zeiss Jena corredato del “tubo Contrast” che permette l’attuazione di tutte le tecniche di contrasto con obbiettivi normali.

La freccia indica una levetta che inserisce una lente addizionale, necessaria all’obbiettivo $1\times$.

(da catalogo aus Jena – 30-0020-3 Ag. 29/202/82)

(vedi anche l’articolo n° 33 “Le tecniche di contrasto”, in questo stesso sito).



Nei cataloghi Leitz degli ultimi decenni sono stati presentati altri obbiettivi deboli, calcolati per una lunghezza di tubo di 170 mm e da usare con oculare acromatico:

Obbiettivo Leitz **PI 1/0,04** Planare a grande campo (28 mm), planacromatico. Focale 33,3 mm; distanza di lavoro 29,7 mm, con diaframma ad iride. Distanza di parfocalità: 65,6 mm.

Obbiettivo Leitz **PI 2,5/0,08** Planare a grande campo (28 mm), planacromatico. Focale 56 mm; distanza di lavoro 11 mm. Distanza di parfocalità: 45 mm.

Obbiettivo Leitz **2,5/0,05**, acromatico, focale 32,6 mm; distanza di lavoro = 20 mm.

Su questi non è stato possibile eseguire un esame tecnico.

Obbiettivo Wild “**2/0,06** Wild Heerbrugg Switzerland” – acromatico
n° di catalogo 175 090.



Fig. 7 – Due obbiettivi deboli della Wild: un acromatico ed un semi-apocromatico planare.

L’obbiettivo è previsto per una lunghezza di tubo normalizzata ($L_m = 160$), ma la sua lunghezza di parfocalità è anomala: $L_o = 70$ mm, col solito problema della possibile insufficienza della corsa macrometrica. La lunghezza di parfocalità di tutti gli altri sistemi di quel fabbricante non è a norme DIN ($L_o = 37$).

La ricetta è semplice. un doppietto acromatico biconvesso. In questo modo la CVD è ben corretta e vanno usati oculari acromatici.

Anche qui, data la piccola apertura, è possibile alterare la lunghezza del tubo e ridurre la lunghezza di parfocalità.

Ecco infatti come si comporta l’obbiettivo in questione variando la lunghezza di tubo L_m .

$L_m = 160$; $L_o = 70$; $WD = 48$ mm ; $M_{obb} = 2:1$.

$L_m = 201$; $L_o = 62$; $WD = 40$ mm ; $M_{obb} = 3:1$.

Vedere anche le figure seguenti.

Con un oculare normale ($s' = 18$ mm), il campo oggetto è di circa 9 mm o, rispettivamente, 6 mm.

Le sue correzioni sono quelle di un normale acromatico; l’unico appunto va fatto su un piccolo residuo di astigmatismo simmetrico (circa 2 u.d.). Naturalmente, la planarità dell’immagine è modesta e rimane all’interno di un indice di campo di 10-12 mm.

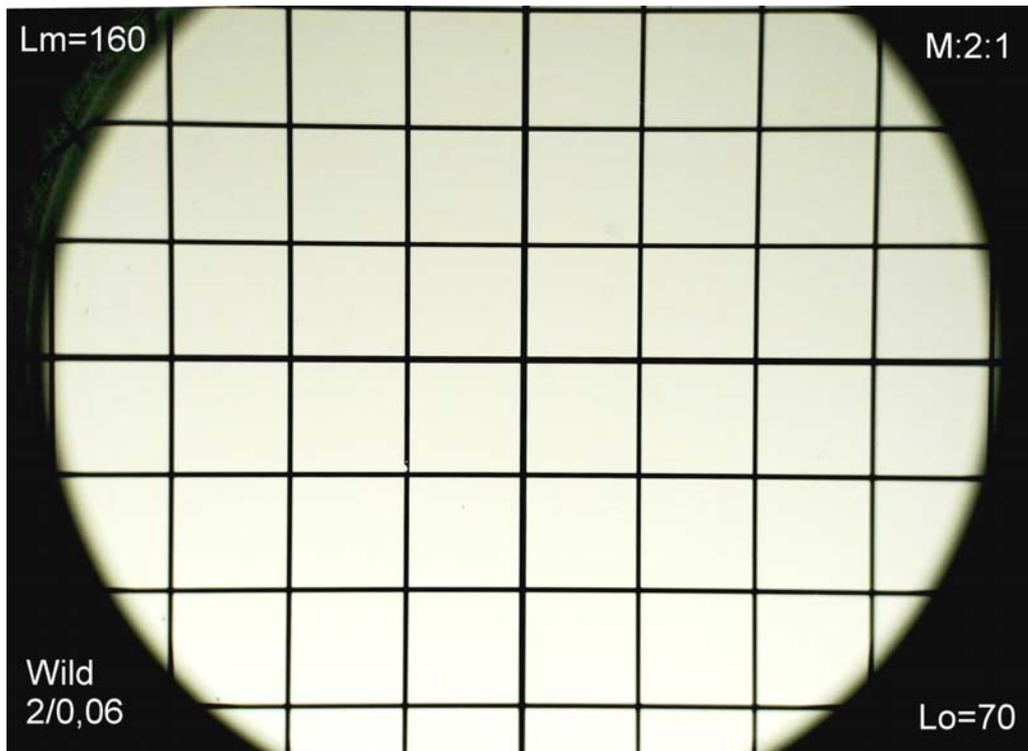


Fig. 8 – L'obiettivo acromatico Wild 2:1 utilizzato in condizioni nominali ($L_m = 160$ mm) con un oculare acromatico con indice di campo pari a 17,5 mm. A parte una leggera distorsione ed una lieve curvatura di campo, il risultato è ottimo.

La lunghezza di parfocalità di 70 mm può dare problemi di messa a fuoco, specialmente con oggetti di spessore superiore ad un normale porta-oggetti.



Fig. 9 – L'obiettivo di cui sopra, utilizzato con un tubo di lunghezza $L_m = 201$ mm. La lunghezza di parfocalità si è ridotta ($L_o = 62$ mm) e l'ingrandimento è salito a 3:1. L'immagine è ancora ottima.

NB: sulla sinistra dell'immagine si nota un riflesso creato dalla superficie interna dell'oculare, che non è bene annerita.

Obiettivo Wild “**PI. Fluotar 3/0,10** Wild Heerbrugg Switzerland”– semi-apocromatico planare

n° di catalogo 106 017.

L’obiettivo è previsto per una lunghezza di tubo normalizzata ($L_m = 160$), ma la sua lunghezza di parfocalità, come quella di tutti gli altri sistemi di quel fabbricante, non è a norme DIN ($L_o = 37$).

La ricetta è la stessa dell’obiettivo Zeiss 1,0 sopra descritto: “inverted telephoto”, con lente frontale divergente. In questo modo la CVD non è ben corretta e vanno usati oculari compensatori.

Anche qui, data la piccola apertura, è possibile alterare la lunghezza del tubo e ridurre la lunghezza di parfocalità.

Ecco infatti come si comporta l’obiettivo in questione variando la lunghezza di tubo L_m .

$L_m = 160$; $L_o = 37$; $WD = 8$ mm ; $M_{obb} = 3:1$.

$L_m = 226$; $L_o = 34$; $WD = 6$ mm ; $M_{obb} = 4:1$.

Il campo oggetto è, rispettivamente, $s = 6$ e 4,4 mm.

Le sue correzioni sono quelle di un normale semi-apocromatico e quindi va usato con un oculare compensatore; anche qui si nota un piccolo residuo di astigmatismo simmetrico (circa 3 u.d.). In questo caso, la planarità dell’immagine è ottima e tale rimane all’interno di un indice di campo di 18 mm.

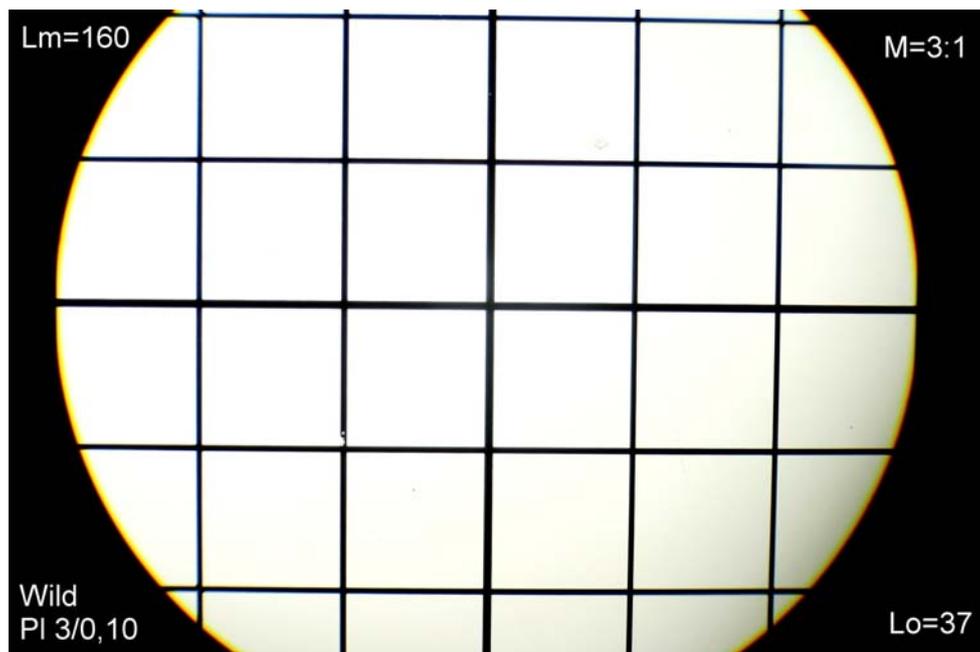


Fig. 10 – L’obiettivo Wild PI 3/0,10, con un tubo di lunghezza normale ed un oculare compensatore con indice di campo $s' = 17,5$. L’immagine è impeccabile.

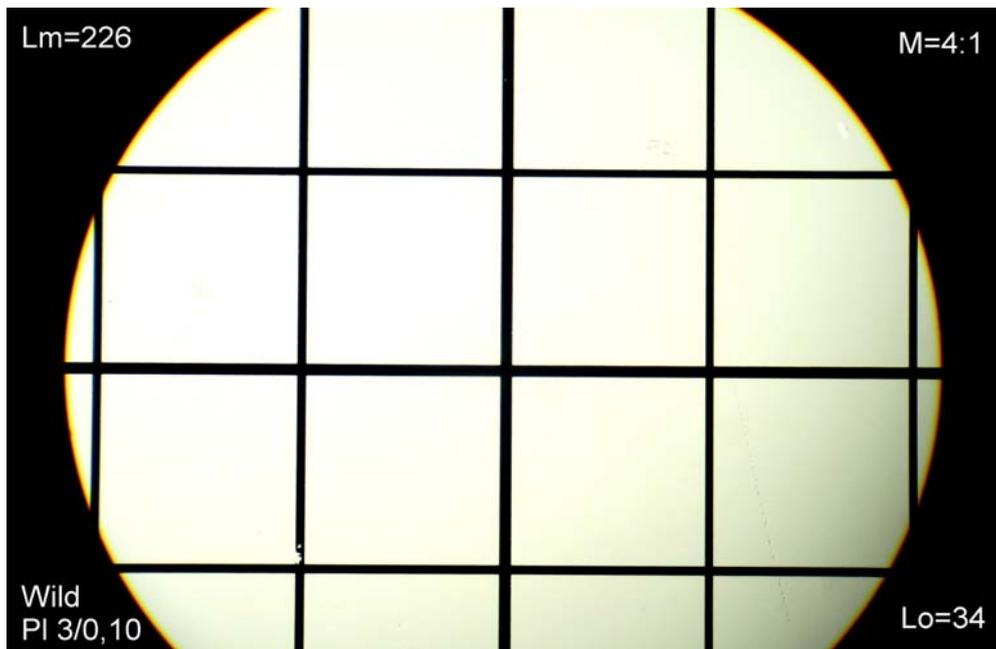


Fig. 11 – Lo stesso obiettivo con una lunghezza di tubo maggiorata ($L_m = 226$ mm). Risultati ancora ottimi.

Obiettivo Zeiss Jena “Semiplan 3,2/0,10 160/ – Carl Zeiss Jena”, acromatico.

Quest’obiettivo è a norme DIN ($L_o = 45$ mm) ed è parfocale cogli altri della stessa serie. Richiede un oculare acromatico.

La ricetta è la stessa del Wild 2/0,06 sopra descritto: un doppietto acromatico, in grado di correggere del tutto la CVD. La pretesa “semi-planarità” corrisponde ad un indice di campo ragionevolmente a fuoco di circa 8 mm.

Fig. 12 – L’obiettivo acromatico Zeiss Jena 3,2:1. Il doppietto è alloggiato nella parte superiore della montatura, presso il filetto di fissaggio. Il cilindro cromato con le notazioni, con un foro terminale, è vuoto e serve solo da protezione. Qualcosa di simile si trova nell’obiettivo Wild 2:1 di fig. 7.

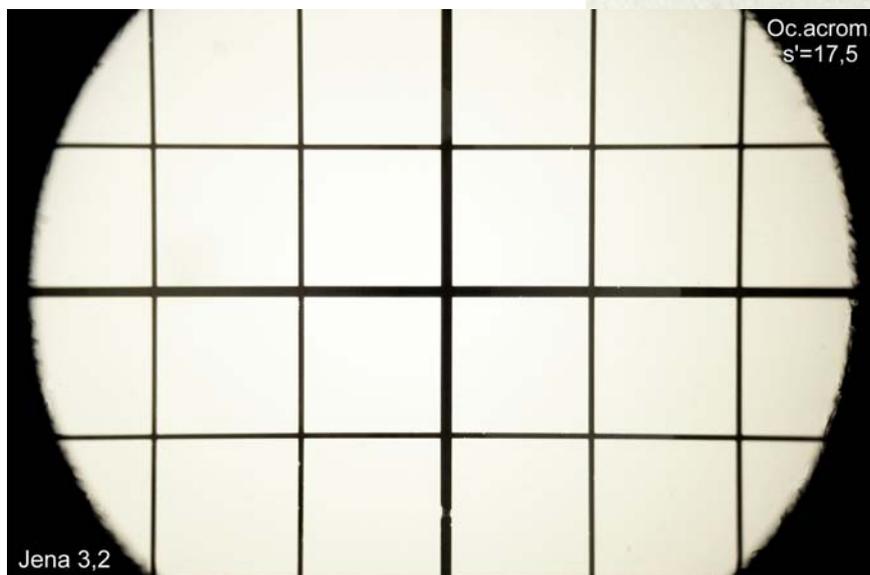


Fig. 13 – Discreta planarità, buon contrasto. Accettabile.

I CONFRONTI QUANTITATIVI

Ora vogliamo mettere a confronto le varie soluzioni accennate sopra per la foto a basso ingrandimento: fotocamera tradizionale – stereomicroscopio – microscopio composto con obbiettivi deboli.

Ci serviremo a questo fine di un reticolo speciale, appositamente progettato per la misura obbiettiva della risoluzione di qualunque sistema ottico e la valutazione della sua definizione.

Un tale reticolo è reperibile presso fabbricanti specializzati, per es.:

Heidenhein (Traunstein, Germania); Standard, mod. 2

Ealing Electro-Optics (USA); “Three Bar Test Chart”, sez. Targets

Edmund Optics (USA, Europa); “Resolution targets”, sez. Targets.

Quello che è stato usato per le misure che seguono, è un prodotto Heidenhein, costituito da un deposito in cromo su supporto di vetro $38 \times 38 \times 2$ mm.

Esso comporta una serie di figure, ognuna composta di tre barre verticali e tre orizzontali, con un passo (distanza fra i centri delle barre) diverso da figura a figura.

Le figure sono ordinate in 8 serie numerate da 0 a 7. Le serie, al fine di ridurre le dimensioni della regione utile del reticolo, sono avvolte l’una sull’altra partendo dall’esterno con quelle a passo maggiore, fino a quelle centrali, a passo minore.

In ogni serie vi sono 6 figure, numerate da 1 a 6. Totale: $(8 \times 6 = 48$ figure).

Nella fig. 14 si vede il reticolo nel suo insieme. Con un trattino rosso è segnato il numero della serie (da 0 a 3); i segmenti gialli indicano i numeri delle figure della serie 0 (da 1 a 6); i segmenti celeste indicano i numeri delle figure della serie 1 (sempre da 1 a 6).

Nella fig. 15 è rappresentata la parte centrale del reticolo, con le serie da 4 a 7 (trattini rossi); i numeri delle figure (segmenti gialli per le figure da 1 a 6 della serie 4; segmenti celeste per le figure da 1 a 6 della serie 5) seguono la stessa disposizione delle serie precedenti. Per le serie 6 e 7 si ripete, più in piccolo, la stessa disposizione.

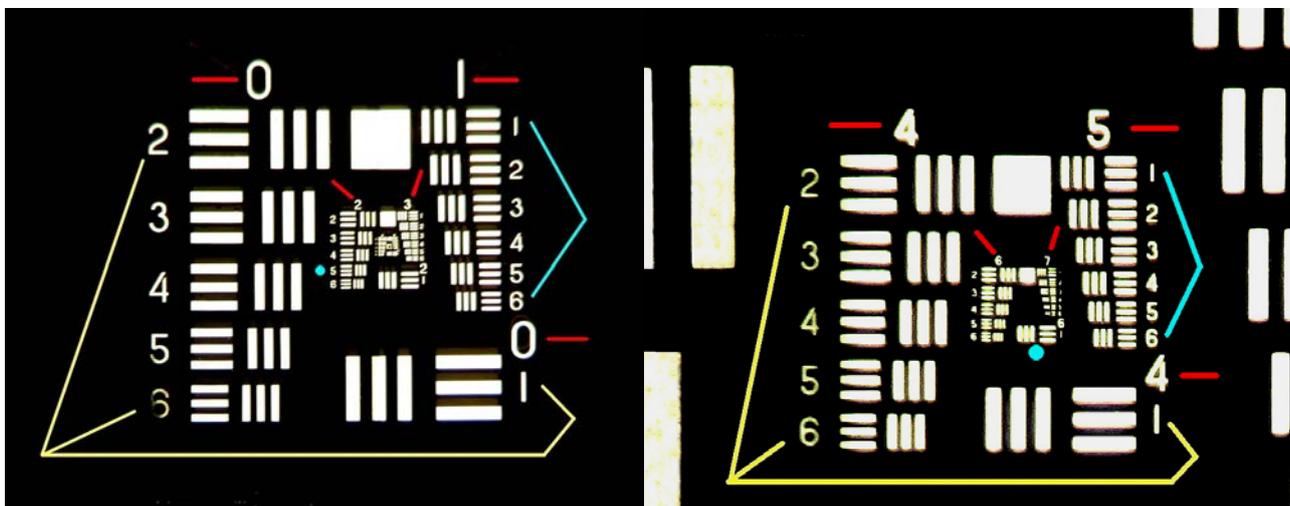


Fig. 14 – Il centro del reticolo, ingrandito 4 volte circa.

Fig. 15 – Il centro della figura precedente, ingrandito 40 volte circa.

Ora occorre conoscere il passo delle singole figure: osservando la figura più piccola risolta in una data foto, è possibile conoscere la risoluzione globale del sistema ottico-fotografico utilizzato per ottenere quella certa foto. Per es, nella foto 14 sembra risolta al massimo la figura 5 della serie 2; nella foto 15, al massimo la figura 1 della serie 6 (NB: in queste e nelle foto che seguono, un bollino verde indicherà la figura più piccola che sembra ancora risolta).

Per conoscere il passo, espresso in micron, di ogni singola figura, occorre consultare un’apposita tabella, come quella che segue, riferita al reticolo utilizzato per le nostre prove.

Tab. 1 – RETICOLO HEIDENHEIN standard n° 2
Passo delle figure, espresso in micron

SERIE 0						
Figura	1	2	3	4	5	6
Passo	1020	902	805	715	640	570
SERIE 1						
Figura	1	2	3	4	5	6
Passo	510	452	405	358	320	285
SERIE 2						
Figura	1	2	3	4	5	6
	253	224	200	178	159	147
SERIE 3						
Figura	1	2	3	4	5	6
Passo	126	112	99,5	88	78,5	69,5
SERIE 4						
Figura	1	2	3	4	5	6
Passo	60,8	54,8	48,6	43	38,3	34
SERIE 5						
Figura	1	2	3	4	5	6
Passo	30,5	27,2	24,1	21,5	19,2	17
SERIE 6						
Figura	1	2	3	4	5	6
Passo	15,1	13,7	12,2	10,7	9,6	8,4
SERIE 7						
Figura	1	2	3	4	5	6
Passo	7,4	6,9	6,0	5,5	4,9	4,4

Il passo più piccolo (4,4 micron) è ancora utile per obiettivi fotografici o macrofotografici, oppure per sistemi a basso ingrandimento, come quelli di cui ci stiamo occupando, ma è troppo elevato per un microscopio normale. Purtroppo, è difficile reperire in commercio reticoli di questo tipo con passi minori in quanto essi sono destinati all'esame di sistemi ottici fotografici o simili.

Come esempio, in base alle foto 14 e 15 si può dedurre che la loro risoluzione massima (nel piano oggetto, ovviamente) è, rispettivamente, di 160 micron (figura 5 della serie 2) e 15 micron (figura 1 della serie 6), circa.

Il fatto che ogni figura comprenda due terne di righe, a 90° l'una dall'altra, consente di apprezzare l'eventuale presenza di aberrazioni extra-assiali, l'inclinazione della coda di coma o delle focaline astigmatiche, ecc. Inoltre, essendo lo spazio fra le figure perfettamente opaco, è possibile apprezzare visivamente il contrasto dell'immagine o, con opportuno microfotometro, misurarlo obiettivamente. Un apprezzamento della definizione è facile.

Nelle foto seguenti, riprese con vari strumenti e vari obiettivi, l'immagine del reticolo verrà presentata senza manipolazione e senza compressioni per consentire una migliore valutazione del sistema. Ogni immagine verrà presentata *in toto*, come si vede nell'oculare³, ed accanto ad essa la sola parte centrale, opportunamente ingrandita, per consentire una migliore valutazione "della figura più fine risolta". In base a questa, verrà in ogni caso misurata obiettivamente la risoluzione del sistema, sempre intesa "nel piano oggetto".

³ Quando l'ingrandimento del sistema fotografico è piccolo, il reticolo nel suo complesso occupa solo la parte centrale del campo fotografico e tale parte è stata "ritagliata" in modo da mettere in evidenza solo la parte utile del reticolo (circa 14 × 14 mm contro 38 × 38 mm del supporto).

Nella prassi, queste valutazioni vengono effettuate “a occhio”, osservando la foto di qualche oggetto noto e confrontandola mentalmente con l’immagine dello stesso oggetto ripresa con altri sistemi. Questo metodo però comporta molti elementi soggettivi di valutazione (stato fisiologico dell’occhio, esperienze recenti, condizioni d’illuminazione, ecc.) ed inoltre difficilmente si trova un oggetto che contenga dettagli piccoli e di dimensioni decrescenti, con lo stesso valore di contrasto, vicini fra loro, e così via. Meglio diffidare quindi dell’occhio e dell’esperienza. Ogni valutazione deve essere ripetibile ed obbiettiva.

La “MACROFOTO”

Cominciamo da una serie di foto ottenute con una fotocamera digitale reflex, con un obiettivo zoom 18 – 55 mm (Canon, EOS 350D). In ogni foto viene indicata l’apertura relativa dell’obiettivo fotografico, come è indicata dall’apposita graduazione o sul display, e come è intesa normalmente, cioè “lato immagine”. Dal nostro punto di vista interessa però la risoluzione e l’apertura dal lato oggetto. Questo per due motivi: 1) – in microscopia l’apertura dell’obiettivo è sempre intesa fra obiettivo ed oggetto, ed è bene per i nostri fini usare lo stesso criterio; 2) – anche se l’apertura di un obiettivo fotografico (convenzionalmente riferita al lato immagine) resta fissa, l’apertura lato oggetto varia in funzione della distanza dell’oggetto (che può essere piccola nella fotografia a distanza ravvicinata), in funzione della manovra dello zoom ed in funzione della focale di eventuali lenti addizionali (“close-up”).

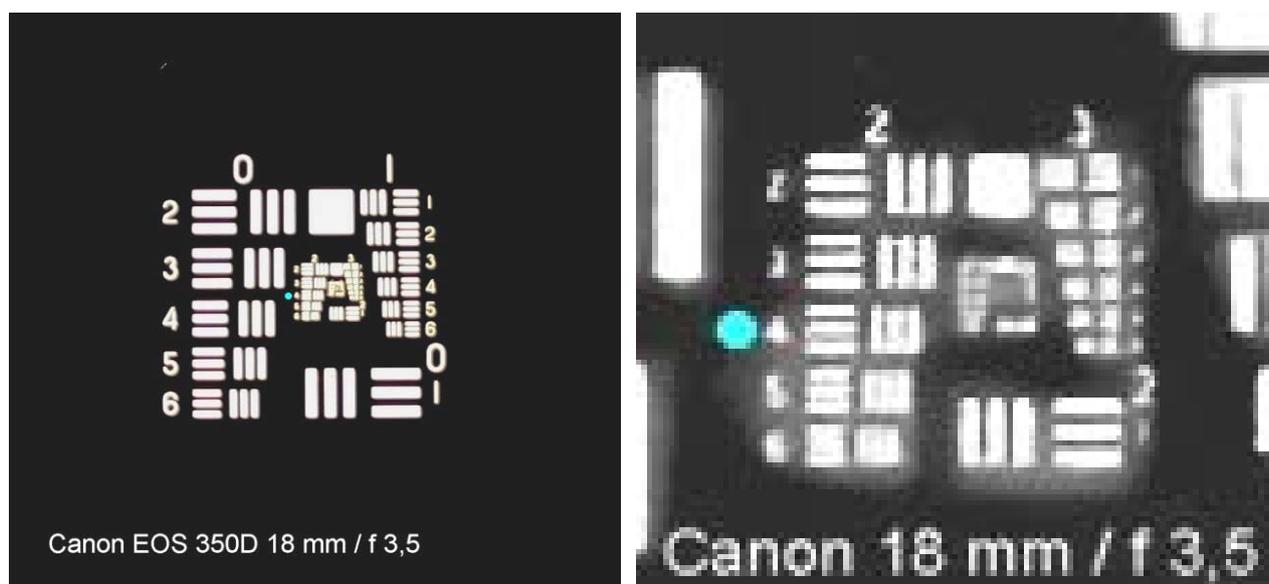


Fig. 16 a/b – Risulta sicuramente risolta la figura 4 della serie 2 (passo = 178 micron = 5,6 lp/mm). Si tratta di un normale obiettivo fotografico, con lo zoom nella posizione di focale minima (18 mm) e la massima apertura del diaframma (f 3,5).

Come nelle foto seguenti, la figura minima risolta è indicata con un pallino verde. La foto a destra è solo un ingrandimento di quella a sinistra.

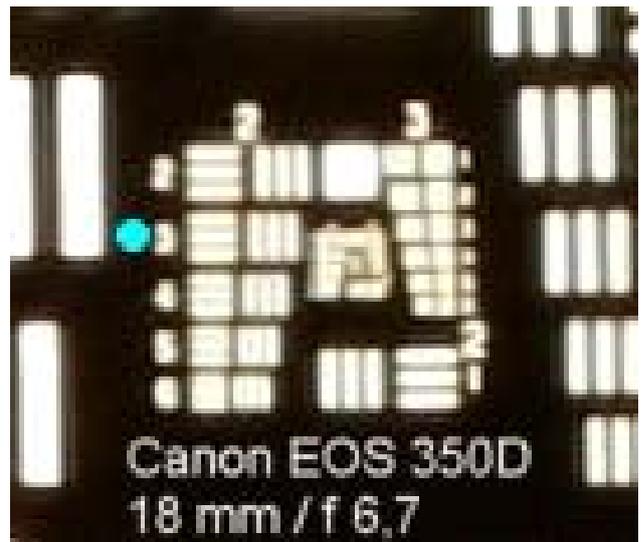
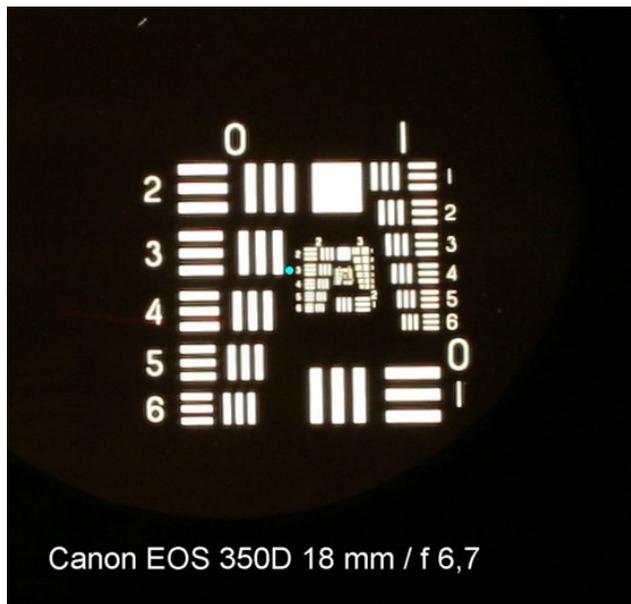


Fig. 17 a/b – Chiudendo un poco il diaframma (f 6,7 invece di 3,5 della figura precedente) la risoluzione è leggermente diminuita (figura 3 della serie 2 = 200 micron). Sono però diminuiti anche gli aloni che si vedono in basso nella foto 16b. Questo fatto è spiegabile in base ai fenomeni delle aberrazioni e della diffrazione: alcune aberrazioni “del punto” crescono in proporzione (anche al cubo) dell’apertura, e quindi la definizione (quella che i fotografi definiscono “micro contrasto”) non può che peggiorare perché i margini degli oggetti saranno sovrapposti ai “cerchi di confusione” provocati dalle aberrazioni stesse. Invece l’effetto della diffrazione, la “figura di Airy” o “centrica”, diminuisce aumentando l’apertura e quindi migliora la risoluzione. L’effetto dell’apertura quindi è duplice: quando aumenta peggiorano la aberrazioni e la definizione, mentre migliora la risoluzione. Viceversa quando diminuisce.

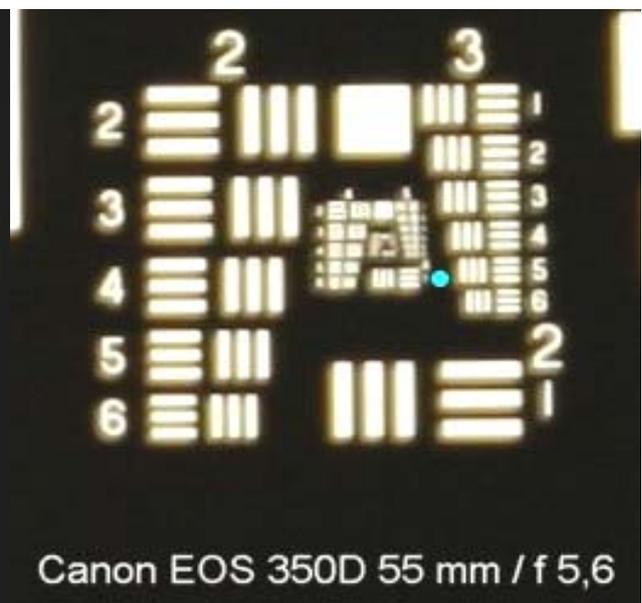
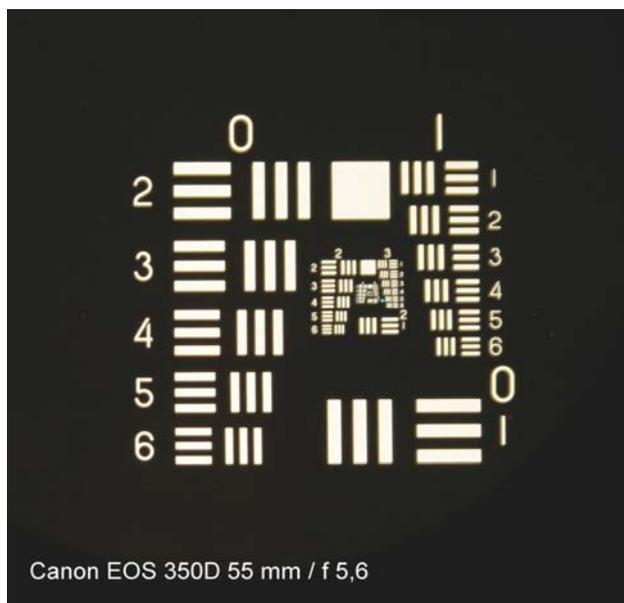


Fig. 18 a/b – Aumentando la focale dell’obiettivo zoom (da 18 a 55 mm), la sua pupilla d’ingresso si allarga (anche se il valore nominale dell’apertura è minore rispetto alla foto 16) e la risoluzione aumenta. Si risolve la figura 1 della serie 4 (circa 61 micron).

Nella foto di destra si cominciano a notare dei lievi aloni attorno alle righe bianche.

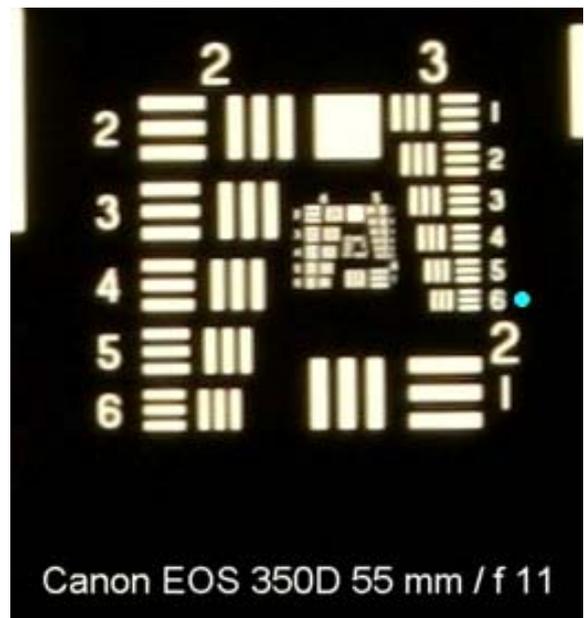
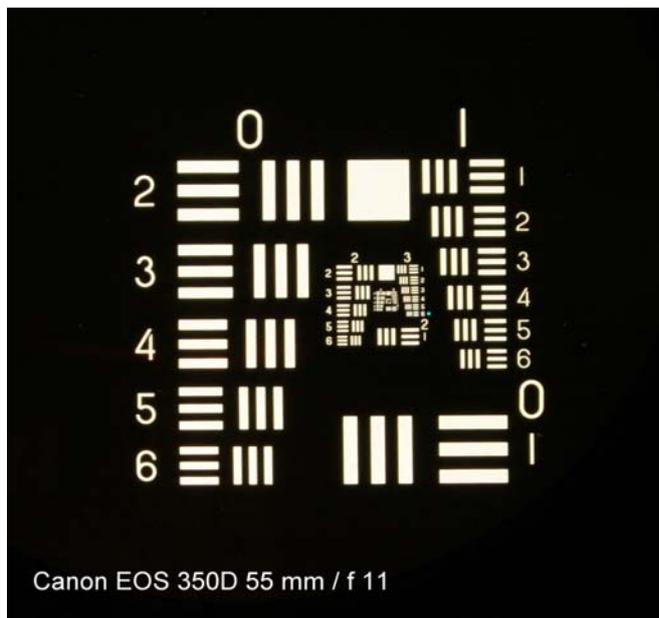


Fig. 19 a/b – Qui però, sempre collo zoom alla massima focale, è stato chiuso il diaframma al valore nominale $f 11$ e la risoluzione è diminuita (figura 6 della serie 3 = 70 micron). Rispetto alla foto precedente, la definizione è però migliorata (meno aloni attorno alle righe chiare)

Ancora una volta, la diminuzione dell'apertura aumenta il diametro della centrica e quindi peggiora la risoluzione, ma le aberrazioni sono più deboli e migliora la definizione.

Nelle foto che seguono, il reticolo è stato fotografato con la stessa fotocamera e lo stesso obiettivo, ma ponendo davanti ad esso una forte "lente addizionale" ("close-up") da 8 diottrie (focale = 125 mm). Data la potenza di questa lente, non è stata usata una lente semplice, ma un doppietto acromatico, ricavato da un obiettivo da binocolo prismatico 8×30 .

In entrambe le posizioni dello zoom (focale minima e massima), la risoluzione è decisamente aumentata, sempre con apertura nominale $f 5,6$: la lente addizionale crea un'immagine ingrandita della pupilla d'ingresso dell'obiettivo e quindi aumenta la sua apertura lato oggetto.

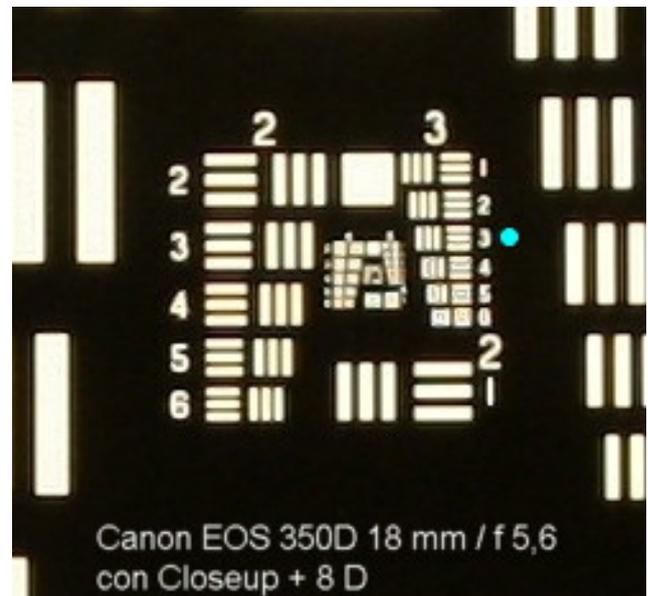
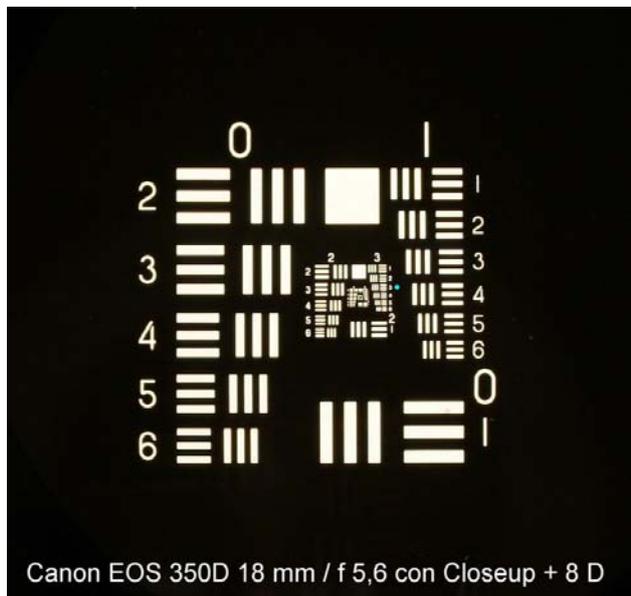


Fig. 20 a/b – Aggiungendo all'obiettivo fotografico una forte lente addizionale, la risoluzione, indicata dalla figura 3 della serie 3 diventa circa 100 micron (contro i 178–200 micron delle foto 16/17). La definizione appare ancora buona. Abbiamo già visto che, con lo zoom alla focale minima, la risoluzione non è al massimo.

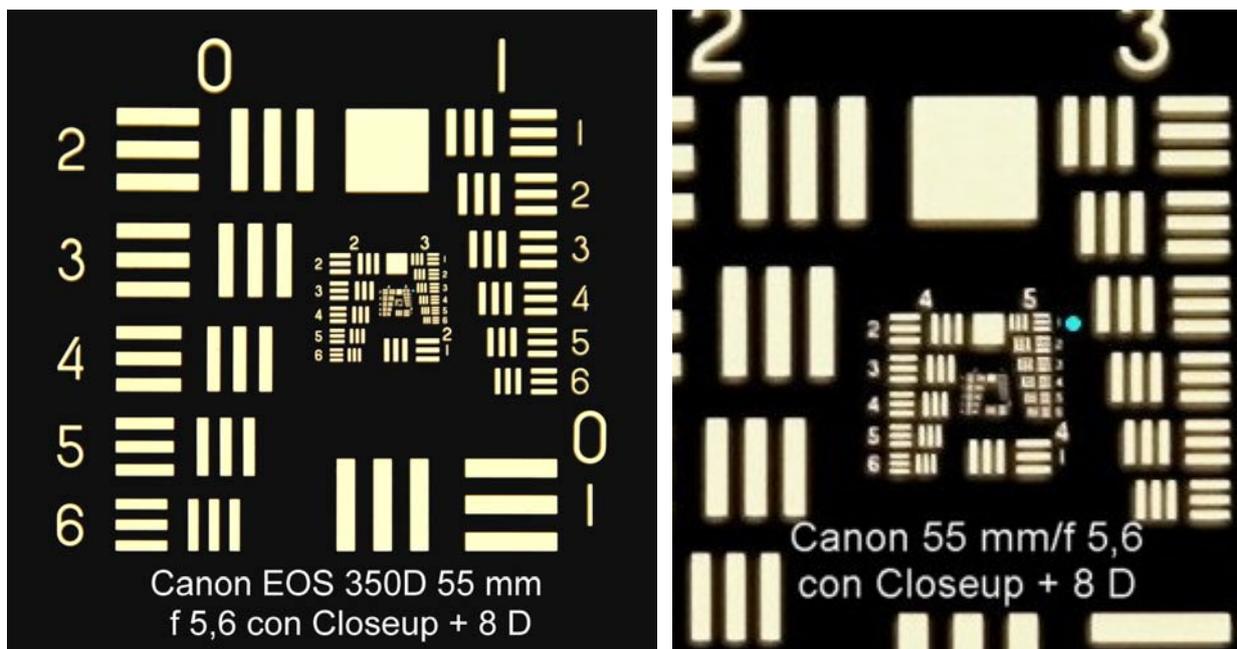


Fig. 21 a/b – Aumentando al massimo la focale dello zoom, la risoluzione migliora ancora: figura 1 della serie 5 = 30 micron circa. Definizione buona.

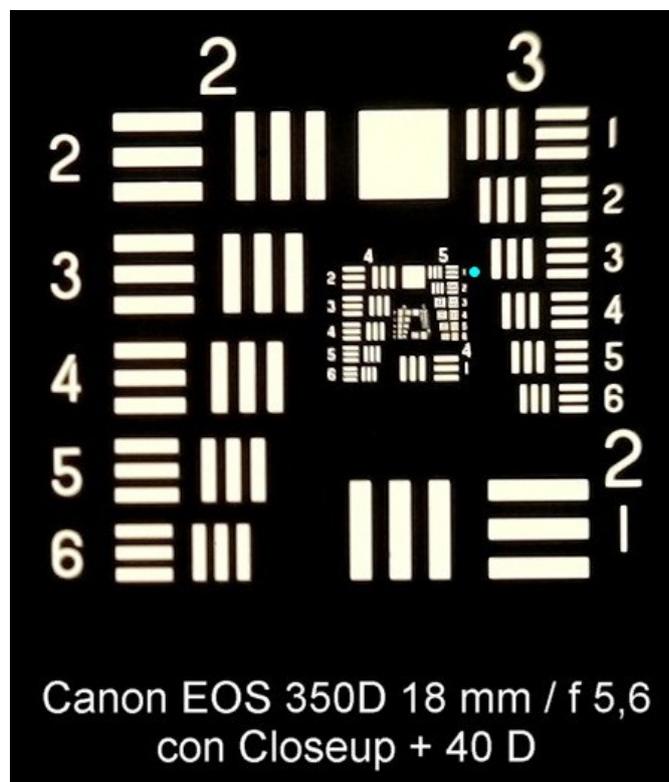
Un tentativo azzardato di procedere nella direzione delle “lenti addizionali” è stato fatto usando un oculare acromatico TURI 10 × a pupilla alta: 25 mm di focale = 40 diottrie. Ovviamente, questa disposizione aumenta la dimensione della pupilla d’ingresso dell’obiettivo (la lente addizionale funziona da lente d’ingrandimento per la stessa) ed aumenta la risoluzione. Ci limitiamo per questo caso a mostrare solo la parte centrale del reticolo, dove si può valutare bene la risoluzione.

Fig. 22 – Finché lo zoom “è al minimo” (focale = 18 mm) le cose vanno discretamente: la lente addizionale ha una focale di poco superiore a quella dell’obiettivo fotografico, ed il sistema è quasi simmetrico rispetto al proprio centro (condizione ottimale per molte aberrazioni). Se poi l’obiettivo è focalizzato all’infinito, lavora con coniugate corrette poiché riceve dalla lente addizionale ancora un fascio focalizzato all’infinito (si suppone che l’oggetto si trovi nel primo piano focale della lente stessa).

Qui la risoluzione è di circa 30 micron (figura 1 della serie 5): molto migliore di quella indicata dalla foto 20 (100 micron) ripresa nelle stesse condizioni, ma con la lente addizionale da + 8 D. E la definizione risulta buona.

Sembrerebbe che una lente addizionale molto forte porti solo vantaggi. L’ingrandimento fotografico è circa 1:1 (per l’esattezza: 25 / 18: il rapporto delle due focali)

Ma ...



Ma c’è un prezzo da pagare: se si sposta lo zoom verso le maggiori focali (55 mm), il sistema non è più simmetrico e non è stato certamente progettato per questo uso. Le foto 23/24 mostrano dei forti aloni di aberrazione sferica.

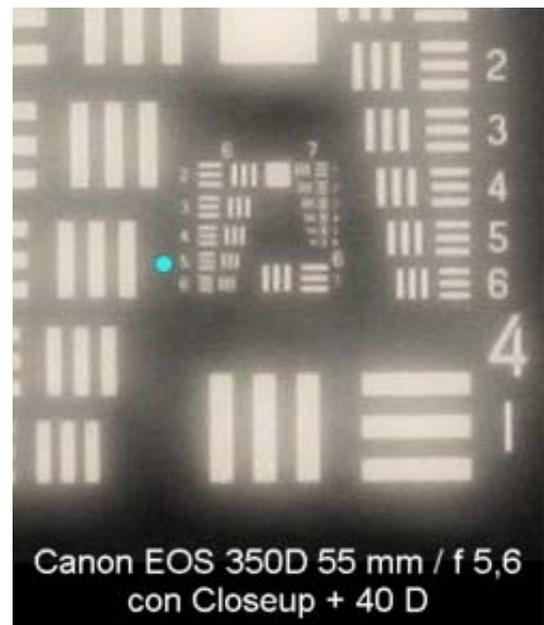
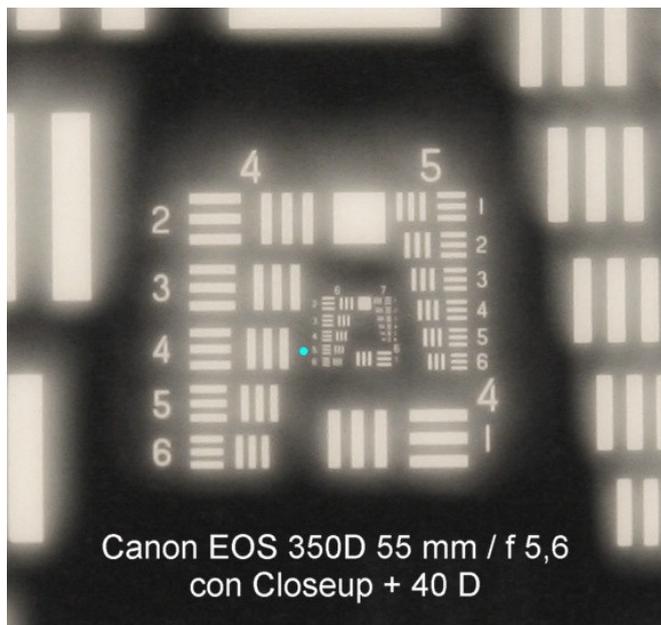


Fig. 23 a/b – Con lo zoom “tirato al massimo”, il sistema obiettivo + lente addizionale non è più simmetrico e qualcosa deve succedere: un mare di sferica ed una cattiva definizione. Ma la risoluzione è sempre ottima: figura 5 della serie 6 = 9,6 micron circa.

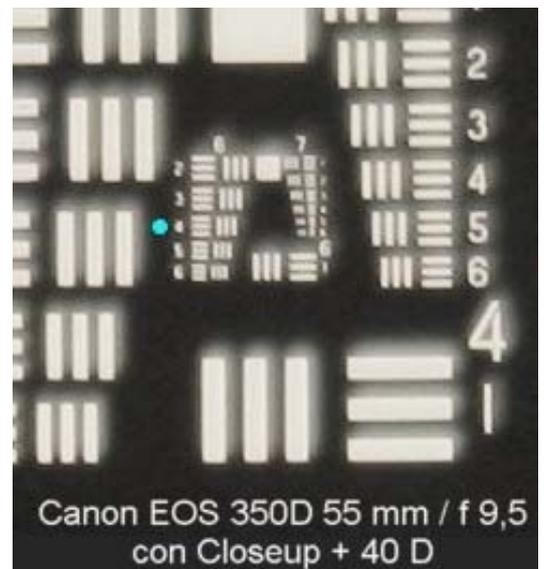
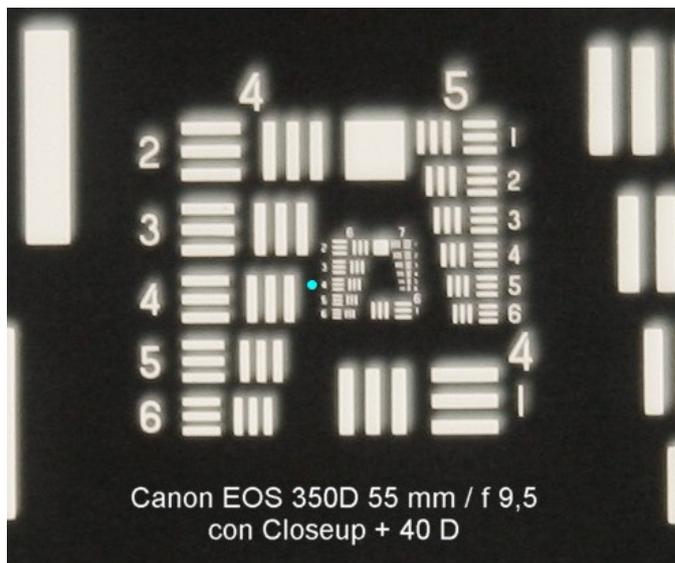
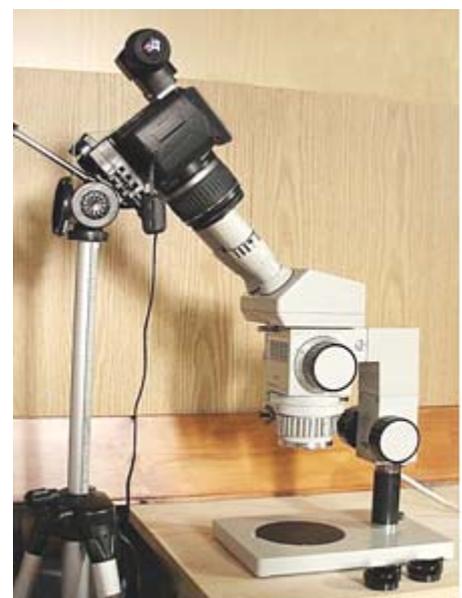


Fig. 24 a/b – Ora proviamo ad abbassare l’apertura nominale dell’obiettivo da f 5,6 ad f 9,5, senza alterare il sistema. L’apertura diminuisce e con essa le aberrazioni; la definizione è visibilmente migliore, ma la risoluzione è diminuita (figura 4 della serie 6 = 10,7 micron circa, invece di 9,5 della foto precedente). Era previsto.

Per usi normali, la forte lente addizionale è ancora utilizzabile, ma solo al centro del campo: ai margini dell’immagine sorgono forti aberrazioni extra-assiali e qualche vignettatura.

Lo STEREOMICROSCOPIO

Abbandoniamo ora questa lunga digressione: potrebbe essere utile per orientarsi nella foto a distanza ravvicinata e nell’uso degli obiettivi zoom, ma è meglio tornare alla microscopia e, prima di tutto, alla fotografia allo stereomicroscopio.



L'esame obiettivo con il reticolo usato finora è stato applicato ad uno "stereo" classico, sistema CMO, "ad obiettivo comune", della Zeiss Jena, Mod. Technival 2. Esso dispone di un cambiatore d'ingrandimento a tamburo con ingrandimento proprio di 0,5 – 1 – 1,6 – 2,5 – 5. Per ognuna di queste posizioni è indicata l'apertura relativa lato oggetto dell'obiettivo comune, calcolata misurando il diametro della pupilla d'ingresso dell'obiettivo stesso e dividendola per la distanza focale, come si fa per gli obiettivi fotografici. Questo valore è utile per eseguire confronti con gli altri sistemi esaminati.

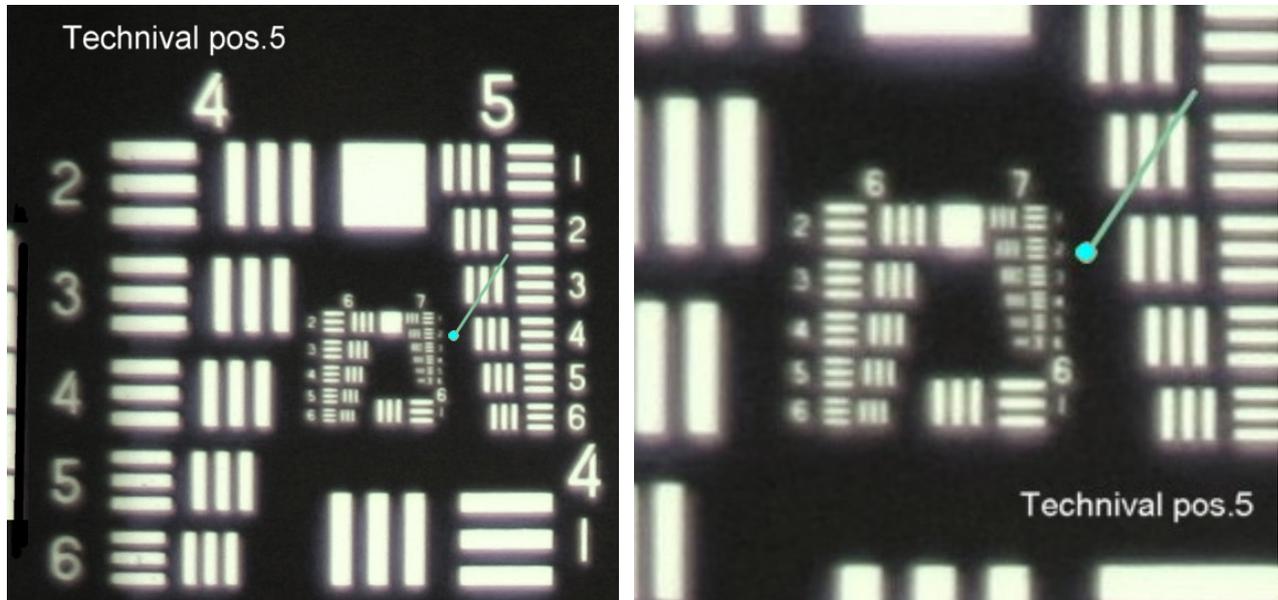


Fig. 25 a/b – Anche qui, le foto sono state "ritagliate" per facilitare la valutazione della parte centrale dell'immagine del reticolo.

Nella posizione di massimo ingrandimento (posizione 5 del tamburo, ingrandimento visuale 50 ×) la risoluzione è decisamente buona (figura 2 del gruppo 7 = 7 micron circa), ma la definizione è modesta. Si noti che gli aloni non sono simmetrici poiché l'obiettivo comune di questi strumenti lavora in due regioni non assiali e si presentano alcune aberrazioni extra-assiali (coma, astigmatismo e cromatica laterale).

L'apertura utile lato oggetto dell'obiettivo, in questa posizione, è pari a $f = 4,9$. Parliamo naturalmente di apertura relativa, valore misurato ($NA = 0,10$). La risoluzione teorica sarebbe di circa 3,34 micron.

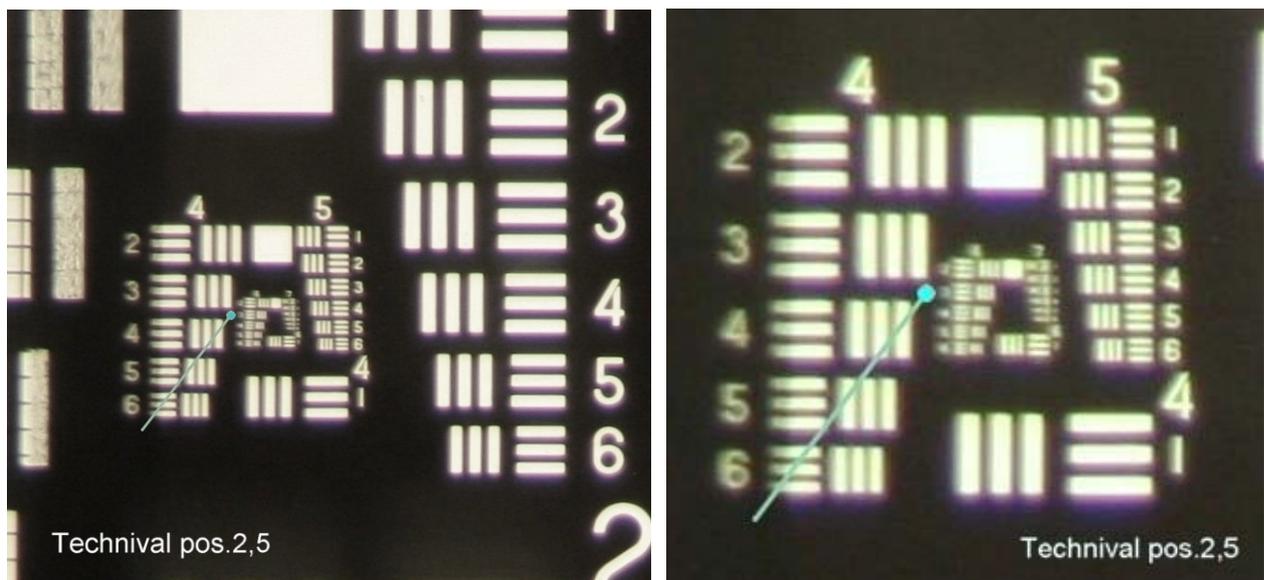


Fig. 26 a/b – Posizione 2,5 del tamburo (ingrandimento visuale = 25 ×). Definizione modesta, per gli stessi motivi sopra descritti, e risoluzione ridotta (figura 3 della serie 6 = 12,2 micron).

In questa, come in alcune altre delle foto seguenti, appare sulla sinistra un fine reticolato quadrettato: si tratta di un reticolo con passo = 100 micron, che è stato sovrapposto al reticolo principale per dare un'indicazione delle dimensioni reali delle varie figure.

L'apertura relativa dell'obiettivo, lato oggetto, è $f 5,5$; $NA = 0,09$. Risoluzione teorica = 3,73 micron.

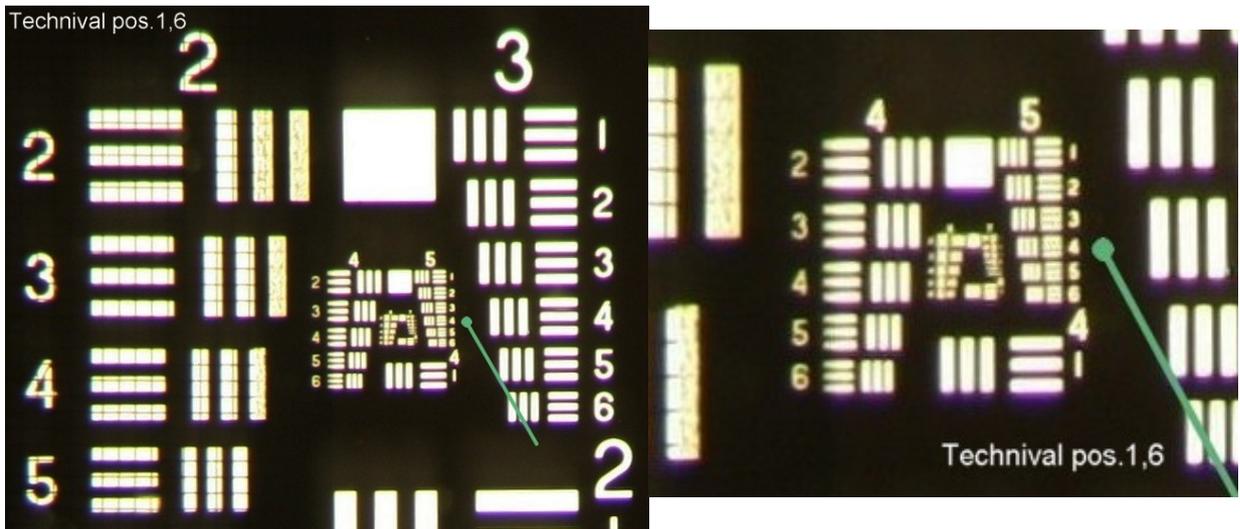


Fig. 27 a/b – Posizione del tamburo 1,6. Migliore definizione, ma la risoluzione si riduce, in parallelo all'apertura utile (figura 4 della serie 5 = 21 micron). Apertura relativa lato oggetto: $f\ 6,5$; $NA = 0,077$. Risoluzione teorica = 4,36 micron.

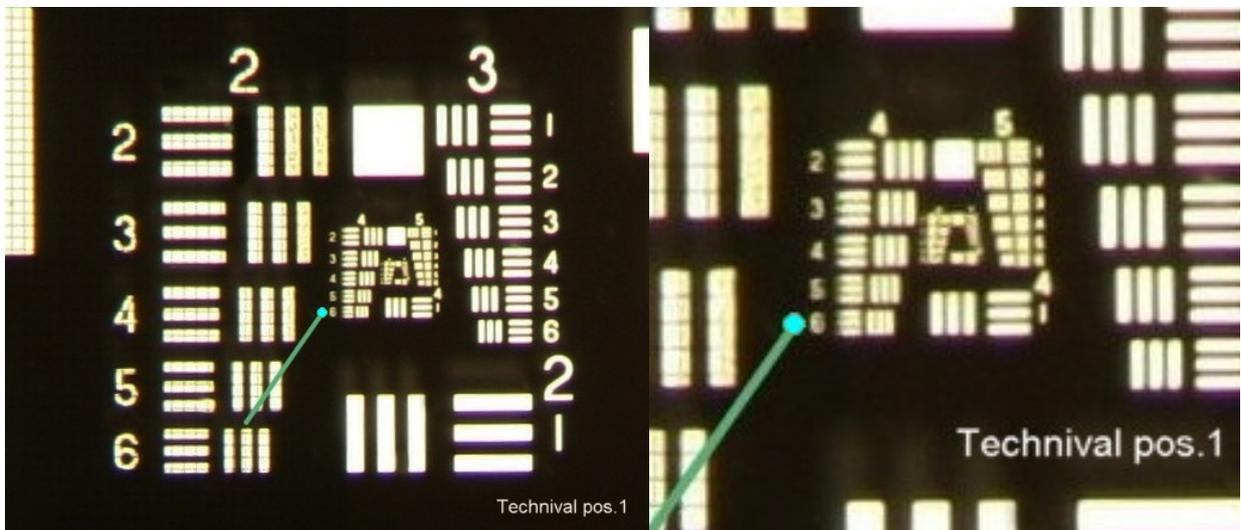


Fig. 28 a/b – Posizione 1 del tamburo. Risoluzione ancora minore (figura 6 della serie 4 = 34 micron). La definizione è sempre modesta. Apertura relativa dell'obiettivo: $f\ 9,2$. $NA = 0,054$. Risoluzione teorica = 6,2 micron.

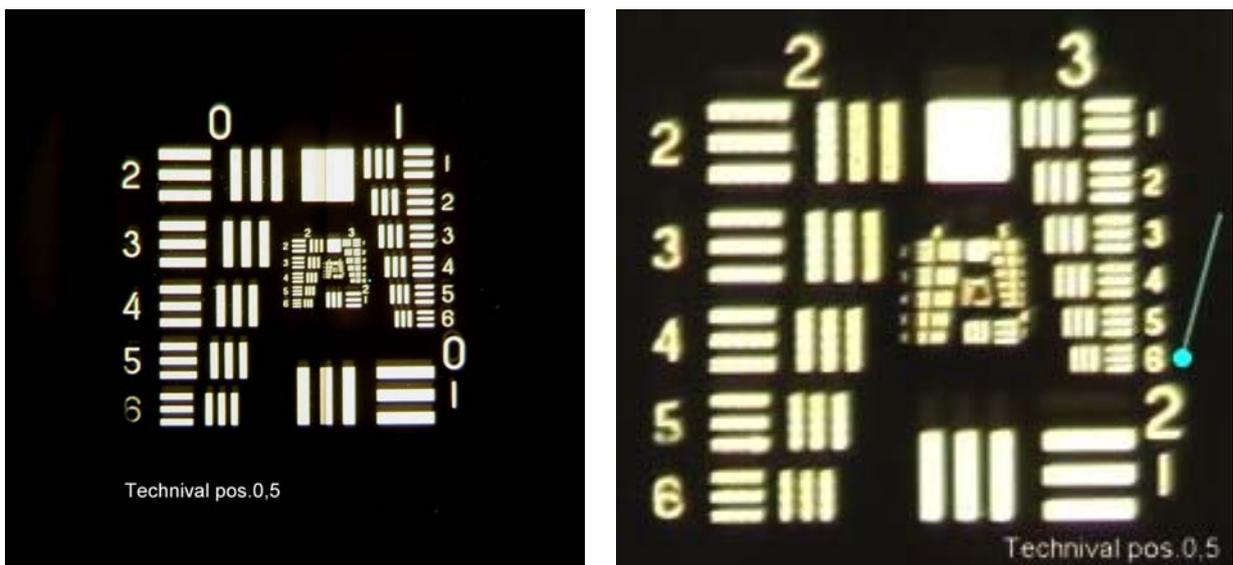


Fig. 29 a/b – Posizione 0,5 del tamburo. Crollo della risoluzione (figura 6 della serie 3 = 70 micron). Apertura relativa lato oggetto: $f = 16,4$. $NA = 0,03$. Risoluzione teorica = 11,2 micron.

IL MICROSCOPIO COMPOSTO

Occupiamoci finalmente degli obiettivi deboli per microscopio composto, quei quattro che abbiamo descritto all'inizio, e potremo fare i confronti con lo stereoscopico e con l'obiettivo fotografico.

Per le riprese è stato usato un semplice stativo biologico, sempre della Zeiss Jena, mod. Laboval, con tubo $L_m = 160$ mm (tutti gli obiettivi a basso ingrandimento esaminati qui sono progettati per un tubo appunto di quella lunghezza).

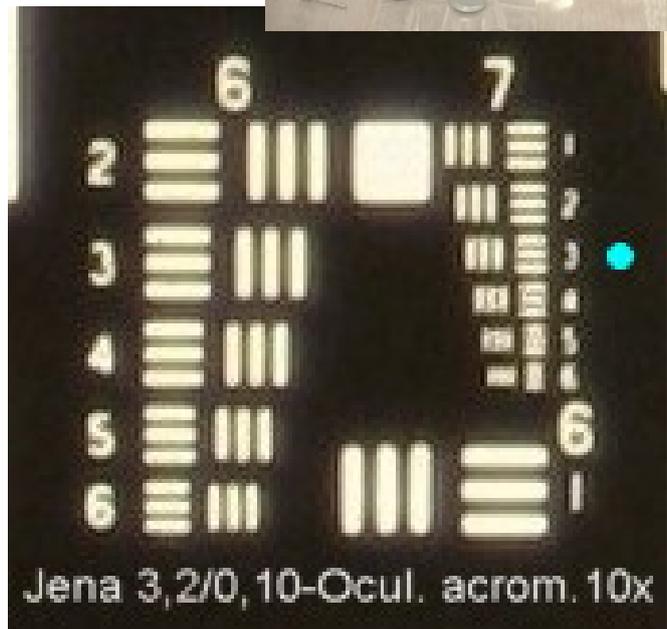
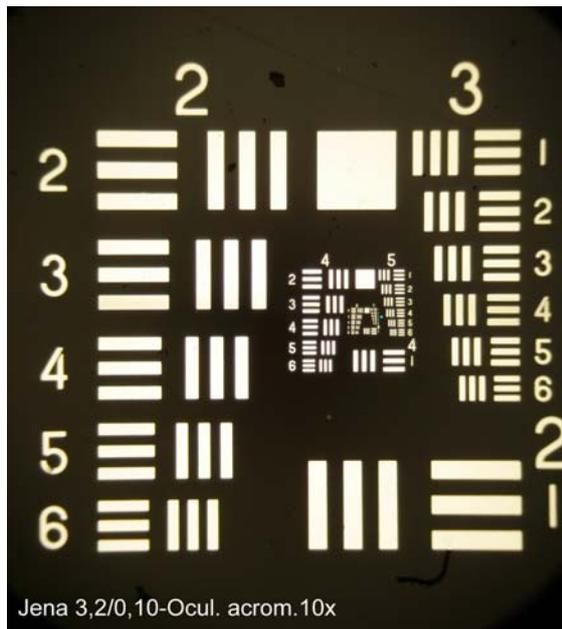


Fig. 30 a/b – Obiettivo acromatico Zeiss Jena 3,2 / 0,10. Risoluzione teorica $d = 0,61 \lambda / 0,1 = 3,4$ micron circa. Risoluzione misurata (figura 3 del gruppo 7 = 6 micron). Di questa discrepanza ci occuperemo alla fine.

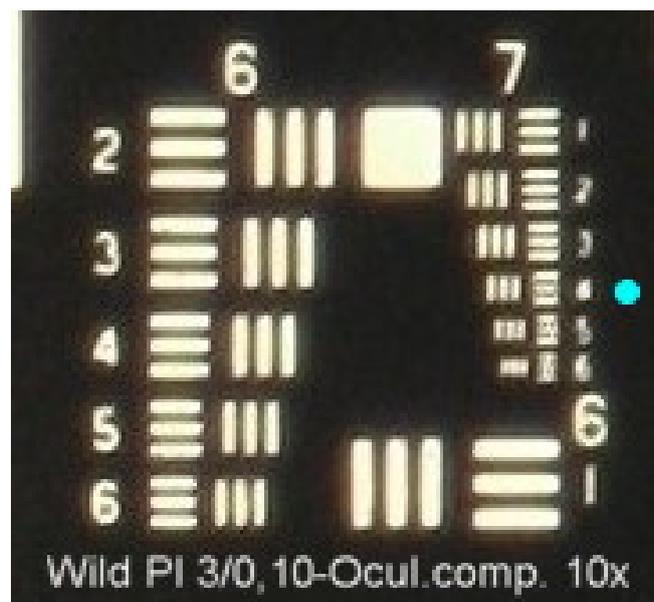
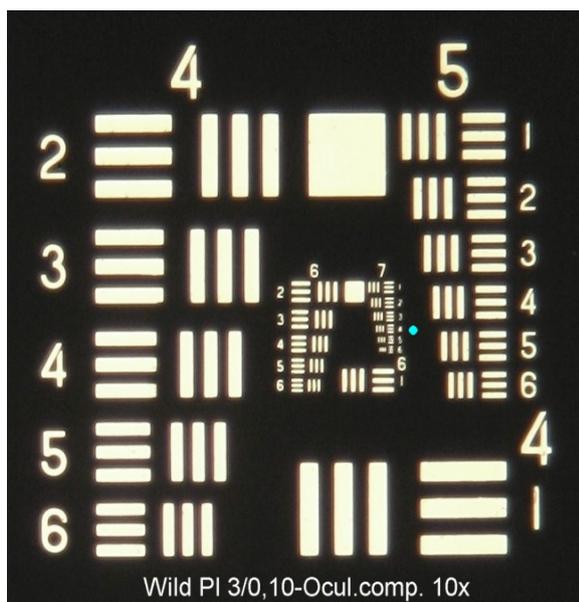


Fig. 31 a/b – Obiettivo semi-apocromatico PI Fluotar Wild 3 / 0,10. Risoluzione teorica $d = 0,61 \lambda / 0,1 = 3,4$ micron circa. Risoluzione misurata (figura 4 del gruppo 7 = 5,5 micron).

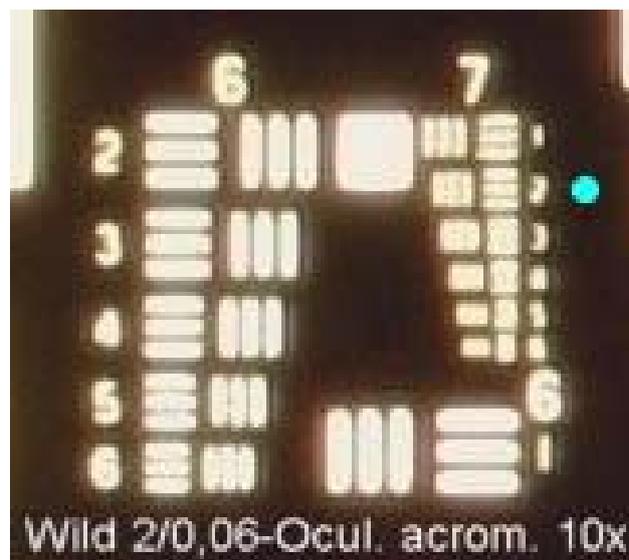
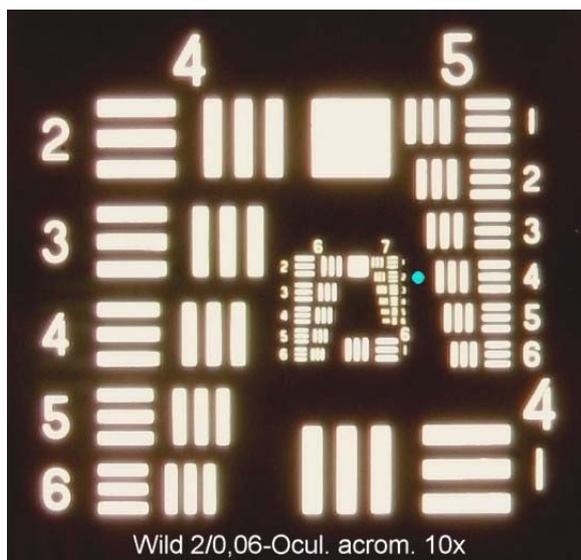


Fig. 32 a/b – Obiettivo acromatico Wild 2 / 0,06. Risoluzione teorica $d = 0,6 \lambda / 0,06 = 5$ micron circa. Risoluzione misurata (figura 2 del gruppo 7 = 6,9 micron). Rispetto ai due obiettivi precedenti, la definizione è modesta. Gli aloni rossastri indicano un residuo di cromatica longitudinale.

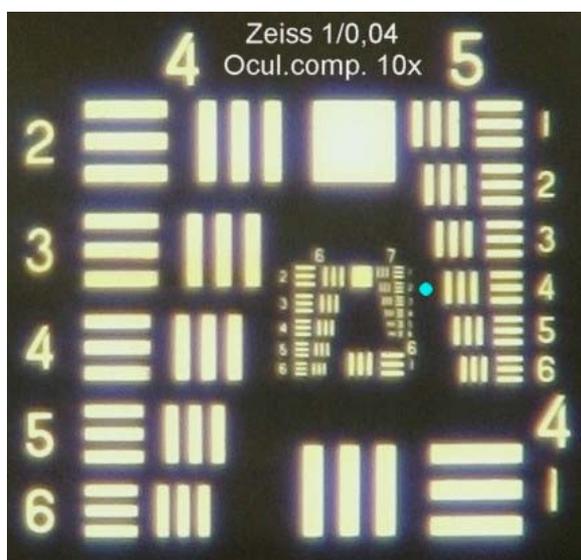


Fig. 33 a/b – Obiettivo Zeiss 1 / 0,04. Risoluzione teorica $d = 0,6 \lambda / 0,04 = 7,5$ micron circa. Risoluzione misurata (figura 2 del gruppo 7 = 6,9 micron). Va notata la pessima definizione (aberrazione sferica), inaccettabile in un obiettivo che dovrebbe essere planare e semi-apocromatico (e non è né l'uno né l'altro).

CONCLUSIONI

Nella tabella 2 che segue, riassumiamo le misure ottenute dalle foto di cui sopra. In essa, indicheremo la fotocamera semplicemente con “CANON”, seguito da “18 mm” oppure “55 mm” per ricordare che l'obiettivo zoom è stato usato a focale minima o massima. Poi, con “f#” indicheremo l'apertura relativa impostata per l'obiettivo della fotocamera. Si badi: l'apertura considerata nella fotografia normale si riferisce al lato immagine (quella lato oggetto ha generalmente valori molto bassi), mentre in microscopia ci si riferisce proprio all'apertura “lato oggetto”. Abbiamo già accennato a questa precisazione, che non va dimenticata per evitare equivoci.

Con “+ 8 D” oppure “+ 40 D” indicheremo l'eventuale lente addizionale (“close-up”) avvitata sull'obiettivo.

Indicheremo con “Stereoscopico CMO” il classico stereoscopico sopra descritto e, vicino alla posizione dell'ingranditore, indicheremo l'apertura relativa utile, misurata, naturalmente lato oggetto.

Con “Composto biologico” indicheremo un semplice stativo biologico, sempre della Zeiss Jena, mod. Laboval, con tubo $L_m = 160$ mm (adatto a tutti gli obiettivi esaminati qui).

Le cifre per la risoluzione sono date in valori arrotondati e sono espresse in micron: esse indicano il passo minimo delle righe che si possono ancora risolvere nella foto del reticolo Heidenhein. Naturalmente, il valore assoluto di risoluzione è inversamente proporzionale a questo valore del passo. Per es, una risoluzione di 40 micron si può indicare anche come 25 linee per mm (25 lp/mm, in cui “lp” indica “line pairs” = coppie di una linea chiara ed una scura); una risoluzione di 20 micron corrisponde al valore di 50 lp/mm.

Nella valutazione delle “righe più fini ancora risolte” entrano naturalmente fattori contingenti (luminosità dell’immagine, difetti di vista, luce diffusa nell’ambiente, ecc.) nonché fattori soggettivi. Se il lettore vorrà dare valutazioni diverse da quelle esposte, lo faccia senza timore di ritorsioni.

TABELLA 2

N°	SISTEMA OTTICO	Figura del reticolo Heidenhein	Risoluzione (in micron)	N° foto
1	CANON 18 mm, f 3,5	Serie 2, fig. 4	178	16
2	CANON 18 mm, f 6,7	Serie 2, fig. 3	200	17
3	CANON 55 mm, f 5,6	Serie 4, fig. 1	60	18
4	CANON 55 mm, f 11	Serie 3, fig. 6	70	19
5	CANON 18 mm, f 5,6 + 8 D	Serie 3, fig. 3	100	20
6	CANON 55 mm, f 5,6 + 8 D	Serie 5, fig. 1	30,5	21
7	CANON 18 mm, f 5,6 + 40 D	Serie 5, fig. 1	30,5	22
8	CANON 55 mm, f 5,6 + 40 D	Serie 6, fig. 5	10	23
9	CANON 55 mm, f 9,5 + 40 D	Serie 6, fig. 4	11	24
10	Stereoscopico CMO, pos. 0,5 f 16,4	Serie 3, fig. 6	70	29
11	Stereoscopico CMO, pos. 1 f 9,2	Serie 4, fig. 6	34	28
12	Stereoscopico CMO, pos. 1,6 f 6,5	Serie 5, fig. 4	22	27
13	Stereoscopico CMO, pos. 2,5 f 5,5	Serie 6, fig. 3	12,2	26
14	Stereoscopico CMO, pos. 5 f 4,9	Serie 7, fig. 2	7	25
15	Composto Biologico, obb. Zeiss Pl 1/0,04	Serie 7, fig. 2	7	33
16	Composto Biologico, obb. Wild 2/0,06	Serie 7, fig. 2	7	32
17	Composto Biologico, obb. Wild Pl 3/0,10	Serie 7, fig. 4	5,5	31
18	Composto Biologico, obb. Jena 3,2/0,10	Serie 7, fig. 3	6	30

Ora è bene commentare questi dati per ricavarne alcune conclusioni utili alla valutazione del sistema disponibile.

Per cominciare, si distingue bene fra risoluzione e definizione, la prima come capacità di vedere distinti punti o linee vicini, la seconda come “micro contrasto” o nitidezza dei bordi delle strutture dell’oggetto.

Per es., nella foto 23, si osserva la risoluzione della figura 5 della serie 6 del nostro reticolo, ma con evidenti aloni e basso contrasto.

Nella foto 24, invece, il contrasto è maggiore, la definizione è migliorata, ma la risoluzione è diminuita (figura 4 della serie 6). Tutto effetto della semplice chiusura del diaframma.

Tutti i dati di risoluzione esposti nelle didascalie delle foto e nella tabella 2 vanno letti con riferimento al piano dell’oggetto, come si fa in microscopia. Per conoscere la risoluzione lato immagine (cioè nel piano della foto) occorre tener conto dell’ingrandimento totale, ingrandimento lineare trasversale (M), esistente fra piano oggetto e piano immagine. Ed allora ci si accorge che, agli ingrandimenti maggiori, in genere, pur essendo l’apertura e la risoluzione (lato oggetto) maggiore, l’immagine finale appare assai meno definita. Tutti sanno che, a parità

di ogni altra condizione, un obiettivo 10:1, ad es., produce un'immagine finale assai più "nitida" di un 40:1. Per spiegare questo, occorre tener conto del rapporto fra apertura ed ingrandimento: si verifica in genere che, aumentando l'ingrandimento di un obiettivo o di altro sistema simile, l'apertura cresce pure, ma in misura minore. La risoluzione nell'immagine finale cresce linearmente con l'apertura, ma diminuisce, sempre linearmente, con l'ingrandimento totale.

Alla fine, i sistemi di maggiore ingrandimento soffrono generalmente di un ammanco d'apertura, e quindi di risoluzione (nell'immagine finale).

Esempio: in un normale obiettivo acromatico 10/0,25, il rapporto apertura/ingrandimento è pari a $NA/M = 0,25/10 = 0,025$. Nel suo parente stretto 40/0,65, il rapporto scende a $0,65/40 = 0,016$.

Altro esempio concreto di questo fatto si riscontra esaminando le righe (per es.) 11 e 14 della tabella 2, che mettono a confronto due posizioni dello stereoscopico CMO con diverso ingrandimento: nella posizione 1, che produce un ingrandimento visuale $10 \times$, l'apertura lato oggetto è 9,2. Nella posizione 5, invece, che corrisponde ad un ingrandimento 5 volte maggiore ($50 \times$ visuali), l'apertura è solo il doppio (il numero $f\#$ è circa la metà). Tutti sanno che uno "stereo" spinto a $50 \times$ produce immagini pessime: l'apertura utile (e quindi la risoluzione nel piano oggetto) dell'obiettivo aumenta, ma l'ingrandimento totale aumenta in misura maggiore e la risoluzione nell'immagine finale diminuisce.

La contraddizione si risolve tenendo conto proprio dell'ingrandimento totale.

Una seconda considerazione porta al confronto, che è adombrato in molte didascalie, fra:

– risoluzione teorica, calcolata in base al semplice valore dell'apertura con la classica formula:

$$d = 0,61 \lambda / NA^4 \quad e:$$

– risoluzione misurata a mezzo del reticolo, che risulta sempre inferiore.

Questa discrepanza nasce dal fatto che la risoluzione teorica si riferisce al limite superiore della possibilità di separare due punti nell'immagine, secondo il classico criterio di Lord Rayleigh (raggio del disco di Airy della centrica), mentre i valori di risoluzione, valutati in base alle fotografie del reticolo di cui sopra, cercano una ragionevole visibilità delle righe, che è influenzata anche dalla definizione. Per intenderci, quando il contrasto è basso ed i dettagli dell'immagine sono circondati da aloni, l'occhio stenta a riconoscere le strutture più fini, anche se sono ancora risolvibili.

Sempre a proposito di quella discrepanza, nelle didascalie delle foto 25 – 29 si è notato quanto essa sia forte e soprattutto quanto il suo valore sia diverso a seconda della posizione del cambiatore d'ingrandimento: trattandosi di uno stereoscopico CMO, fra obiettivo ed oculare è interposto un sistema afocale ("galileiano") che complica la valutazione delle aperture utili.

Si veda la tab. 2: dalle righe 10 a 14 si osserva la variazione dell'apertura dell'obiettivo, dal valore 16,4 al valore 4,9 (rapporto 3,35:1), mentre la risoluzione varia da 70 a 7 micron, secondo un rapporto di 10:1. La presenza del sistema galileiano intermedio complica le cose.

Nel caso della fotocamera reflex, la risoluzione è legata alla regolazione dello zoom (che influisce sull'apertura lato oggetto) ma anche alla distanza dell'oggetto (che influisce anch'essa sulla medesima apertura). La regolazione dello zoom fa variare la posizione ed il diametro delle pupille d'ingresso e d'uscita dell'obiettivo e quindi il valore utile dell'apertura, sia lato oggetto che lato immagine e, alla fine, la risoluzione.

Più semplice è la situazione nel caso del normale microscopio composto: apertura, posizione e dimensioni delle pupille sono costanti. Il rapporto fra risoluzione misurata col reticolo e

⁴ Con un po' di approssimazione, in questi calcoli si adopera per λ il valore di $0,55 \mu$, il che corrisponde più o meno al centro dello spettro ottico. La formula diventa allora: $d = 0,61 \times 0,55 / NA = 0,33 / NA$ (espressa in micron).

risoluzione teorica si fa più ... tranquillo.

Rimane il fatto che la risoluzione cresce sempre al crescere dell'apertura, in qualunque sistema, mentre la definizione, più o meno, diminuisce.

Ma la tesi che volevamo dimostrare con questo studio è un'altra: risulta abbastanza ovvio che la risoluzione di uno stereoscopico CMO, al massimo ingrandimento (nel nostro caso 50×, risoluzione misurata 7 micron)(riga 14 della tabella 2) raggiunge un valore appena uguale a quello di un obiettivo scadente da microscopio composto (lo Zeiss 1/0,04; riga 15 della tabella, sempre 7 micron), mentre un obiettivo acromatico normale, anche con ingrandimento totale inferiore (per es. lo Jena 3,2/0,10, ultima riga della tabella, ingrandimento totale 32× con un oculare sempre 10×, risoluzione 6 micron), lo supera già, e la definizione è migliore.

Abbiamo visto infine che un normale obiettivo fotografico, sempre nel piano oggetto, non permette una risoluzione elevata, ma può migliorare, almeno al centro del campo, con lenti addizionali forti, purché con adeguata correzione delle aberrazioni. Va poi ricordato che una lente addizionale forte difficilmente potrà avere un diametro utile superiore a 30 mm per via della sua curvatura, e pertanto si presenta il pericolo imminente delle vignettature.

È possibile anche usare come lente addizionale forte un altro obiettivo fotografico di focale non troppo diversa, montato alla rovescia sul principale. Esistono, o almeno esistevano, apposti "anelli per l'inversione dell'ottica" da avvitare nella filettatura porta-filtro dei due obiettivi. Ma il pericolo delle vignettature rimane.

Così abbiamo dimostrato alla fine che un microscopio composto, purché munito di obiettivi molto deboli, può dare ingrandimenti simili a quelli di uno stereoscopico o di un sistema fotografico "macro", ma con alcuni vantaggi:

- la risoluzione e la definizione, almeno nel piano oggetto, sensibilmente superiori;
- il microscopio composto dispone di varie prestazioni che difficilmente si trovano in uno stereoscopico o soprattutto in un sistema fotografico normale: movimenti fini per la messa a fuoco e lo spostamento dell'oggetto; stabilità meccanica; sistemi d'illuminazione vari e facilmente regolabili; facile cambiamento dell'ingrandimento; pratici accessori per la luce polarizzata, l'episcopia, ecc.; possibilità (soprattutto in diascopia) di svariate tecniche di contrasto, ecc.