



**Sommario**

Trasparenza e riflettanza, opacità, densità ..... 2  
Effetto Callier ..... 5  
Legge di reciprocità e suoi limiti ..... 7  
Densitometro ..... 9

# Trasparenza e riflettanza, opacità, densità

---

I soggetti destinati alla riproduzione sono raggruppabili in due categorie:

- su supporto opaco;
- su supporto trasparente.

Nel primo caso, si tratta di fotografie su carta, in nero ed a colori, disegni, dipinti, stampe, campioni anche a tre dimensioni, ecc.

Nel secondo caso, si tratta di dianegative, diapositive, in nero ed a colori, vetrate e qualsiasi altro soggetto realizzato su materiale trasparente.

Differenze nell'assorbimento e nella riflessione della luce generano gradazioni di densità.

Quando il flusso luminoso colpisce un corpo trasparente (ad esempio una pellicola, una diapositiva, un filtro), viene più o meno assorbito; la parte restante invece lo attraversa. Il rapporto fra quantità di luce trasmessa e quantità di luce incidente è chiamato trasmissione.

Nel caso di corpi opachi oppure di riproduzioni fotografiche su carta, si parla invece di riflessione ed il rapporto fra quantità di luce riflessa e quantità di luce incidente è calcolato in conformità ad un determinato angolo solido.

Gli annerimenti dell'immagine fotografica sono quindi valutabili studiandone la trasmissione o la riflessione.

La trasmissione o **trasmittanza (T)** è il rapporto percentuale tra l'illuminamento trasmesso ( $J_t$ ) e l'illuminamento incidente ( $J_i$ ):

$$T = (J_t / J_i) \cdot 100$$

La riflessione o **riflettanza (R)** è il rapporto percentuale tra l'illuminamento riflesso ( $J_r$ ) e l'illuminamento incidente ( $J_i$ ):

$$R = (J_r / J_i) \cdot 100$$

La trasmissione e la riflessione possono quindi assumere valori compresi tra 0% (assorbimento assoluto) e 100% (trasparenza o riflessione assoluta).

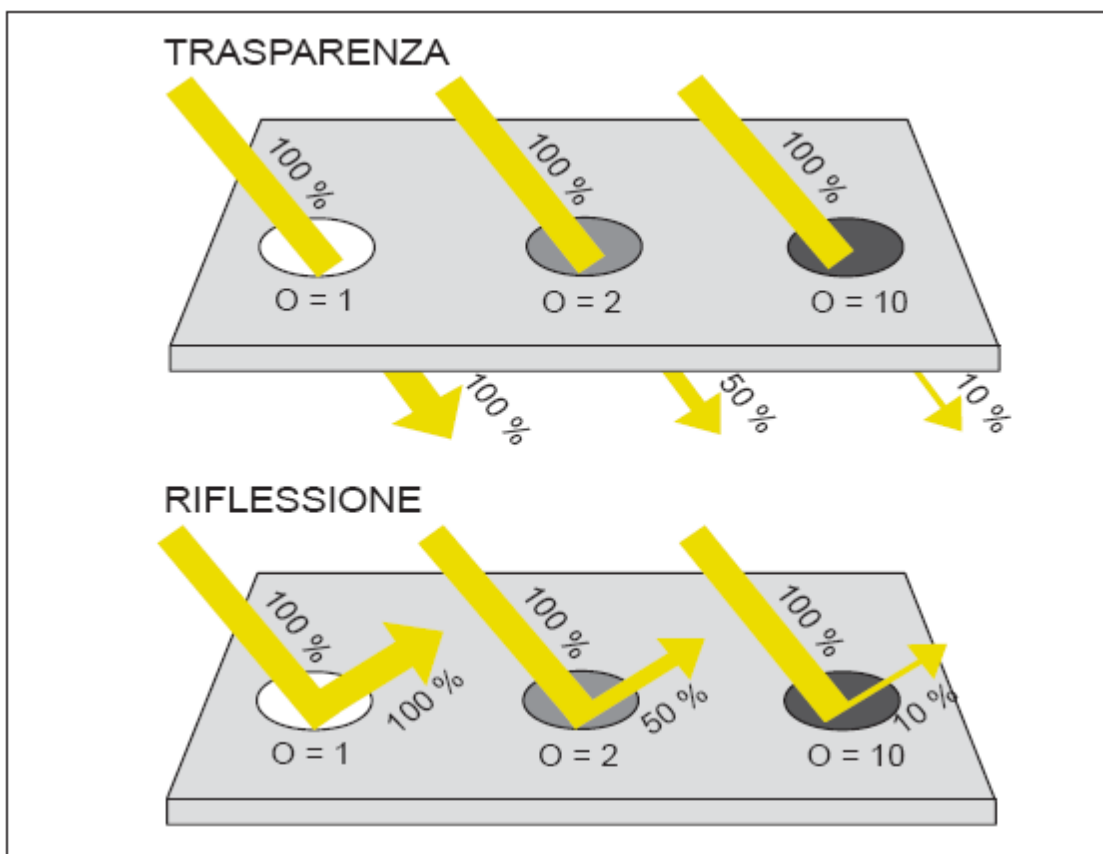
Ad incrementi di esposizione costanti, corrispondono annerimenti crescenti, ma con incrementi sempre minori. Come sarà evidente più avanti, la trasmissione e la riflessione non sono però grandezze più adatte ad esprimere il grado di annerimento dell'immagine fotografica.

È quindi conveniente introdurre il concetto di **opacità (O)**, definita come rapporto tra l'illuminamento incidente e l'illuminamento trasmesso o riflesso, che bene esprime l'annerimento di oggetti sia opachi sia trasparenti:

$$O = 1 / T = J_i / J_t$$

$$O = 1 / R = J_i / J_r$$

Nei materiali fotografici l'opacità raggiunge valori elevati (anche superiori a 1.000).



Per la sensazione visiva dell'annerimento degli strati fotografici vale una legge fisica generale, formulata da Weber (1846) e Fechner (1898), che mette in relazione lo stimolo, cioè l'illuminamento, con la sensazione che lo provoca. Secondo tale legge, la differenza fra due sensazioni  $S_1$  e  $S_2$  è proporzionale alla differenza dei logaritmi dei rispettivi stimoli, cioè degli illuminamenti:

$$S_1 - S_2 \propto \text{Log } J_1 - \text{Log } J_2$$

In fotografia, quindi, non si usa l'opacità per descrivere la sensazione visiva dell'annerimento fotografico, ma il suo logaritmo, coerentemente con il meccanismo della visione. A tale valore si dà il nome di **densità (D)**:

$$D = \text{Log } O = \text{Log } (1/T) = \text{Log } (1/R)$$

$$O = 10^D$$

Misure degli annerimenti fotografici			
Trasparenza	Trasmittanza	Opacità	Densità
1,00	100	1,00	0,000
0,90	90	1,11	0,045
0,80	80	1,25	0,097
0,70	70	1,43	0,155
0,60	60	1,66	0,222
0,50	50	2,00	0,301
0,40	40	2,50	0,397
0,30	30	3,33	0,522
0,25	25	4,00	0,602
0,20	20	5,00	0,699
0,15	15	6,67	0,824
0,10	10	10,00	1,000
0,05	5	20,00	1,301
0,02	2	50,00	1,699
0,01	1	100,00	2,000
0,0075	0,75	133,33	2,125
0,0050	0,50	200,00	2,301
0,0025	0,25	400,00	2,602
0,0010	0,10	1000,00	3,000
0,0001	0,01	10000,00	4,000
0,00001	0,001	100000,00	5,000
0,000001	0,0001	1000000,00	6,000
0	0	$\infty$	$\infty$

La densità (grandezza logaritmica) presenta, rispetto all'opacità (grandezza aritmetica), i seguenti vantaggi pratici:

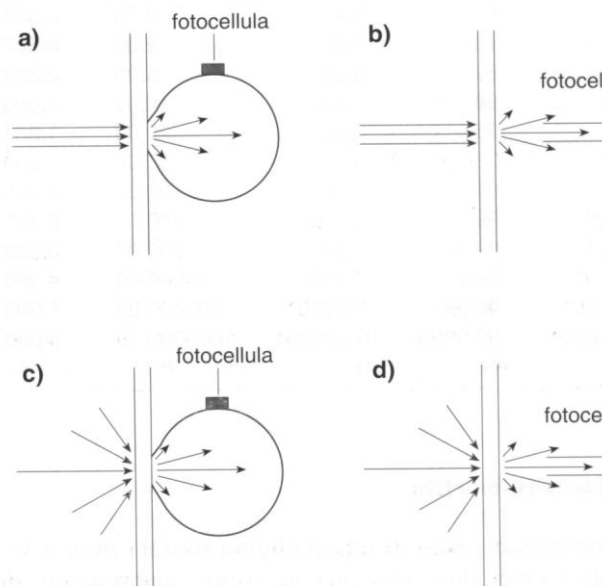
- L'occhio avverte le differenze di luminosità su base logaritmica poiché, secondo la legge di Weber-Fechner, quando lo stimolo cresce in progressione geometrica la sensazione visiva cresce in progressione aritmetica. In altri termini, una gradazione di densità appare all'occhio come caratterizzata da intervalli aritmetici regolari, quando le varie opacità formano invece una serie geometrica. Infatti, in una serie aritmetica si passa da un elemento al successivo aggiungendo una quantità costante, mentre in una serie geometrica si procede moltiplicando per un fattore costante. Confrontando fra loro i valori dell'opacità e quelli della densità, si nota che l'espressione logaritmica per la densità permette una migliore rappresentazione dei processi di annerimento: se da gradino a gradino la densità si riduce in modo costante, si avverte una diminuzione uniforme della trasparenza.
- La scala logaritmica permette di rappresentare concisamente opacità molto elevate, mentre l'opacità degli strati fotografici può aumentare indefinitamente.
- Le densità possono essere sommate e sottratte, mentre le opacità, richiedono tipi di calcolo immediatamente superiori: la moltiplicazione e la divisione.

## Effetto Callier

---

Lo stesso punto di una pellicola trattata può, secondo il metodo di misurazione, fornire valori diversi di densità. Questo fatto è una conseguenza del potere disperdente della luce, propria dello strato fotografico.

Esistono fondamentalmente quattro tipi di misura:



**Metodi di misurazione della densità:**

- a) densità diffusa ( $D^\ddagger$ )
- b) densità parallela ( $D^\bar{=}$ )
- c) densità doppiamente diffusa
- d) densità diffuso-parallela

Nel primo tipo (a), si fa cadere sulla pellicola un fascio di luce parallela e si misura la totalità della luce emergente immediatamente dietro la superficie dorsale dello strato. Si raccoglie così tutta la luce emergente dallo strato, per cui questa densità è definita come **densità diffusa ( $D^\ddagger$ )**: questo è il metodo usato nei normali densitometri per trasparenza.

Nel secondo metodo (b), si misura la radiazione emergente ad una distanza maggiore dalla superficie dello strato, per cui, della luce emergente dallo strato, si raccoglie soltanto quella approssimativamente parallela al fascio incidente. Questa densità è detta **densità parallela ( $D^\bar{=}$ )**. La densità parallela è quella misurata con microdensitometri, in genere impiegati nelle osservazioni scientifiche.

Quando la sorgente impiegata fornisce luce diffusa, sono possibili, analogamente, altri due casi: densità doppiamente diffusa (c) e densità diffuso-parallela (d).

Per gli strati fotografici, a causa del loro potere disperdente, la  $D^\ddagger$  è minore della  $D^\bar{=}$ , in quanto nel caso di  $D^\ddagger$ , la quantità di luce che è raccolta dallo strumento è maggiore. Il fenomeno della diffusione, detto effetto Callier, si esprime con il seguente rapporto:

$$Q = (D^\bar{=} / D^\ddagger) > 1$$

Tale rapporto è definito quoziente di Callier; esso rappresenta indirettamente una misura della grana dello strato fotografico: quanto più i granuli sono grossi, tanto maggiore è il valore di Q, perché i granuli disperdono più luce e quindi ne aumentano la diffusione, con diminuzione

della luce parallela trasmessa e quindi aumento della  $D^{\circ}$ . I densitometri misurano la densità diffusa.

Nella fotografia a colori il quoziente Callier non ha alcuna importanza. L'imbianchimento dell'immagine di argento durante la lavorazione, infatti, porta a  $Q = 1,02$  e la misurazione può quindi basarsi sia su luce concentrata sia su luce diffusa. Mentre per l'ingrandimento di fotografie in bianco e nero si hanno notevoli differenze di contrasto operando con luce diffusa (vetro opalino) piuttosto che con luce concentrata (condensatore), ciò non si verifica per negativi a colori.

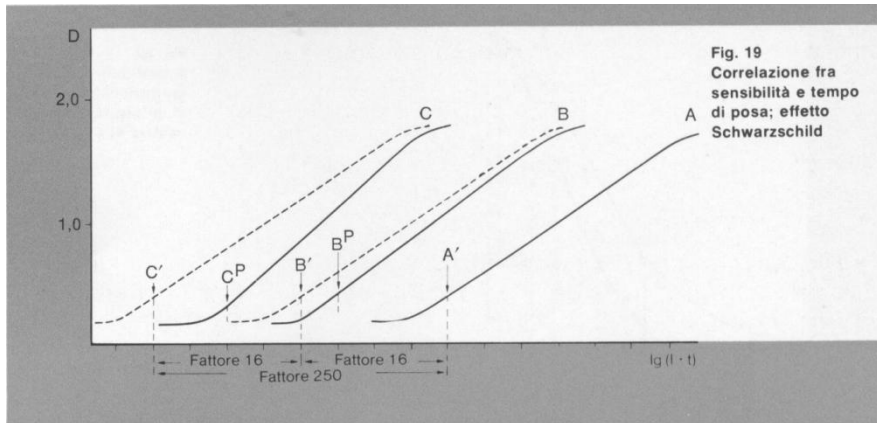
## Legge di reciprocità e suoi limiti

Secondo questa legge (Bunsen e Roscoe, 1862) l'annerimento di un'emulsione fotografica dipende dall'energia luminosa totale (E) impiegata nell'esposizione, mentre è indipendente, entro ampi limiti, dai valori dell'illuminamento (J) e del tempo (t). La relazione che intercorre tra i tre elementi è quella nota dalla fotometria ed è definita come **legge di reciprocità**:

Legge di reciprocità		
$E = J \cdot T$	$J = E / t$	$t = E / J$
	$J \propto 1/t$	$t \propto 1/J$

Quindi, a parità di condizioni di luce, si ottiene la stessa esposizione se aumentando un fattore si diminuisce l'altro della stessa quantità.

Ad esempio, portando il tempo da 1/250 a 1/500, quindi dimezzando l'esposizione alla luce, si può scegliere se raddoppiare il diaframma oppure aumentare la sensibilità della pellicola (o del sensore elettronico nelle fotocamere digitali). In entrambi i casi la quantità di luce che colpirà la pellicola sarà la stessa. Questa caratteristica permette un elevato controllo sul risultato fotografico. Modificando l'apertura del diaframma si ottiene una profondità di campo più o meno ampia, agendo sul tempo si controlla l'effetto mosso, mentre utilizzando una pellicola più o meno veloce, si interviene sulla granularità dell'immagine.



Si può pertanto affermare che ad una certa  $E$  corrisponde una determinata  $D$  e che, viceversa, una determinata  $D$  è ottenibile (a parità di trattamento di sviluppo) solo con quella determinata  $E$  (corrispondenza biunivoca). Quando però i valori del tempo di esposizione diventano molto piccoli o molto grandi, la legge di reciprocità non è più attendibile e si rende necessario, per ottenere lo stesso annerimento della pellicola, un aumento dell'esposizione.

Nelle sue ricerche, l'astronomo Schwarzschild, poiché usava solo tempi di esposizione molto lunghi, trovò che, per ottenere lo stesso annerimento, occorreva aumentare i tempi di esposizione rispetto ai valori previsti dalla relazione  $E = J \cdot t$ :

$$t_t = (t_r)^p$$

$$E = J \cdot (t_r)^p$$

dove:

$t_t$  = tempo teorico, cioè il tempo di posa determinato che non tiene conto del difetto di reciprocità,

$t_r$  = tempo reale, cioè il tempo di posa effettivo che compensa il difetto di reciprocità.

La mancanza di reciprocità si verifica soprattutto in emulsioni per impieghi tecnico-scientifici che richiedono tempi di esposizione di minuti o di ore, e diviene anche apprezzabile quando le emulsioni sono utilizzate con flash elettronici e tempi di esposizione di 1/5000 di secondo od inferiori.



Più generalmente si è rilevato che esistono due tipi di deviazione rispetto alla legge di reciprocità.

1) **Errore nei tempi di esposizione brevissimi:**

Sperimentalmente si è verificato che occorre aumentare il tempo di esposizione totale per ottenere il risultato di annerimento prefissato come costante di riferimento. Per adeguare la legge di reciprocità ai casi di esposizione con tempi brevissimi, è dunque necessario che l'equazione dell'esposizione, per ottenere i risultati di annerimento prefissati, assuma la seguente forma:

$$E = J \cdot t^p \quad \text{con } p = 1,1 - 1,5.$$

2) **Errore nei tempi di esposizione lunghissimi:**

Anche in questo caso occorre aumentare il tempo di esposizione rispetto a quello ottenibile dall'equazione dell'esposizione. Per ricondurre il tempo sperimentale all'interno della legge di reciprocità, Schwarzschild propose, per il suo tipo di osservazioni scientifiche, la seguente modifica:

$$E = J \cdot t^p \quad \text{con } p = 0,8 - 1.$$

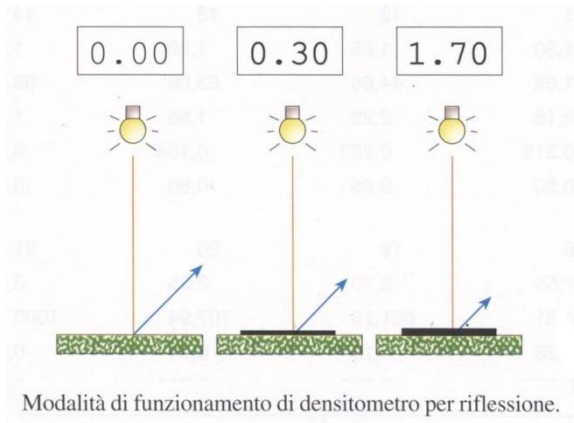
In alternativa, i produttori forniscono i fattori di correzione per le loro diverse pellicole sotto forma di grafici o di tabelle.

## Densitometro

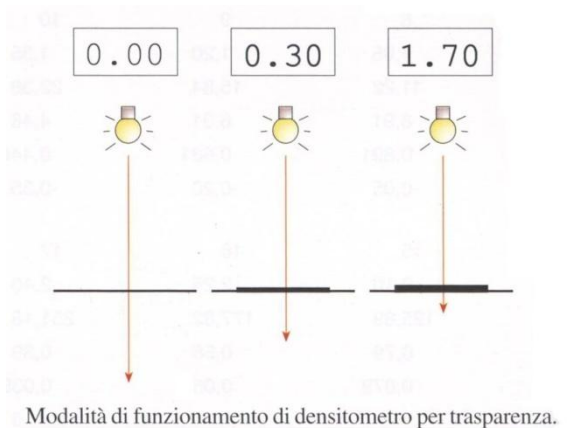
---

Per misurare la densità ottica (potere di assorbimento di luce) di un'immagine fotografica o stampata, sono stati messi a punto appositi strumenti di misurazione detti densitometri.

Per la valutazione della stampa (originali per riflessione) si usano i **densitometri per riflessione**.



Invece, per la valutazione dell'annerimento della pellicola (originali trasparenti), si usano i **densitometri per trasparenza**. Esistono inoltre densitometri per trasparenza che possono essere corredati di idonei accessori per effettuare anche misurazioni per riflessione.



Sono disponibili anche i microdensitometri, che effettuano la misurazione su zone molto ristrette e quindi misurano la densità all'interno del punto di immagini retinato. Tuttavia questi strumenti sono utilizzati di solito per l'analisi di risultati derivati da procedimenti di sviluppo e di trattamento; per l'uso tecnico, invece, il densitometro è sufficientemente preciso.

Gli apparecchi a trasparenza misurano densità elevate, da 0,0 a 4,0 (in casi eccezionali fino a 5,0 che corrisponde a:  $O = 10^{5,0} = 100.000$ ), mentre il campo di misura degli apparecchi per riflessione arriva a densità di circa 2,5 (negli stampati si può avere una densità massima di 2, mentre nelle pellicole si può raggiungere e superare 4). Ambedue i tipi di apparecchi sono idonei alla misura della densità dei colori se sulla traiettoria dei raggi si inseriscono dei filtri colorati che permettano il passaggio della banda spettrale complementare al colore da misurare. Con un adeguato equipaggiamento, i densitometri sono anche idonei alla misurazione della densità integrale (integrata) dei punti del retinato: in questo caso, si

misura non la densità dei singoli punti di retino, bensì la somma della densità di tutti i punti di retino e di tutti gli spazi intermedi all'interno della zona di misura, la quale ha un diametro di 2,5 – 5 mm. La densità integrale è convertita automaticamente in valori percentuali di punto.

### **Principio di funzionamento**

La luce, proveniente da una fonte luminosa stabilizzata, attraversa un sistema ottico, cade sulla superficie della pellicola/carta fotografica o dello stampato. Secondo lo spessore degli strati di emulsione attraversati e la quantità e la tipologia dell'argento metallico o del pigmento, una parte della luce viene assorbita. La parte di luce non assorbita viene trasmessa o riflessa in funzione del materiale esaminato.

In un densitometro per trasparenza, un sistema di lenti raccoglie i raggi luminosi che provengono dalla pellicola e li convogliano verso la fotocellula (fotoresistenza). La fotocellula, costituita da un semiconduttore (CdS, Si, GaAsP, ecc.), agisce da resistenza variabile, in funzione della quantità di luce che riceve, ed è inserito in un circuito elettrico con generatore di tensione costante. Tenendo presente la legge di Ohm ( $V = R \cdot I$ ), si ha:

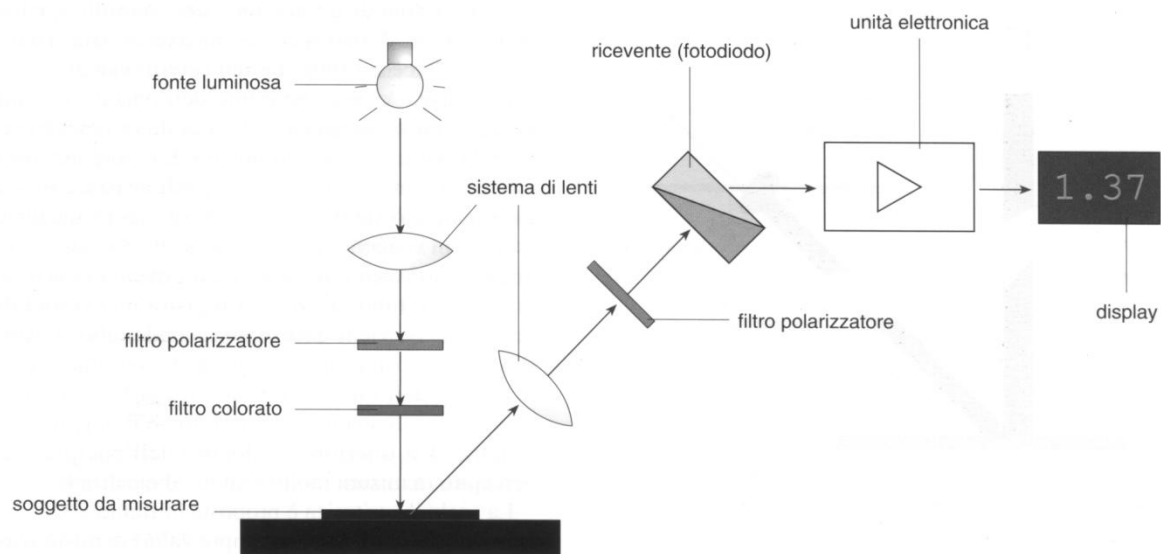
$$V = \text{costante} \quad \rightarrow \quad I \propto 1 / R$$

Di conseguenza:

- per elevati valori di illuminamento (luci dell'immagine su pellicola), la fotocellula riduce la propria resistenza da conduttore lasciando passare una corrente di intensità maggiore;
- per bassi valori di illuminamento (ombre dell'immagine su pellicola), la fotocellula aumenta la propria resistenza lasciando passare una corrente di intensità minore.

Il sistema elettronico confronta questa corrente con un valore di riferimento (trasmissione in assenza di pellicola).

In un densitometro per riflessione, un sistema di lenti raccoglie i raggi luminosi che provengono dallo strato inchiostato con un'angolazione di 45° rispetto al raggio di misurazione e li convogliano verso un fotodiode. La quantità di luce ricevuta dal fotodiode è convertita in energia elettrica. Il sistema elettronico confronta questa corrente con un valore di riferimento (riflessione di un bianco standard).



· Principio di funzionamento di un densitometro per riflessione.

In entrambi i tipi di densitometro la differenza tra le due correnti rappresenta la base per il calcolo della capacità di assorbimento dell'immagine. L'indicatore (display) visualizza il risultato della densità misurata.

Nella fotografia in bianco e nero non occorre precisare il colore della luce usata per la misurazione della densità dei grigi. Volendo determinare le densità assolute dei colori invece è necessario conoscere la trasparenza spettrale dei filtri di misurazione e la sensibilità cromatica del fotosensore. Nel caso di immagini a colori i filtri colorati previsti nel percorso dei raggi limitano la luce alle gamme d'onda importanti per gli specifici pigmenti in esame. Inoltre, nei densitometri per riflessione utilizzati per misure su stampati, sono previsti dei filtri polarizzanti situati nel percorso dei raggi che riducono le differenze dei valori misurati fra inchiostro stampato asciutto e umido.

I valori di densità sono sempre valori di misurazione relativi di un determinato densitometro. Date la diversa distribuzione spettrale delle fonti luminose e le differenze di assorbimento spettrale dei filtri (invecchiamento), le differenze di sensibilità dei fotosensori e le diverse geometrie di misurazione, i valori misurati, soprattutto negli apparecchi meno recenti, non sono confrontabili. Negli apparecchi nuovi, almeno in quelli dello stesso tipo, se la manovra è corretta e se la taratura è eseguita regolarmente, si può raggiungere una certa concordanza in un campo di tolleranza accettabile.

Prima della misurazione, i densitometri devono essere azzerati, per escludere che la colorazione e la superficie del materiale di supporto influiscano sulla valutazione della densità dell'argento o del pigmento. Allo

scopo, si misura la densità in assenza della pellicola o la densità del bianco della carta e la si azzerà: l'indicatore viene cioè impostato su  $D = 0,00$ .