



SENSITOMETRIA A COLORI

Sommario

| | |
|---|----|
| Sensitometria in b/n ed a colori..... | 2 |
| Coloranti ideali | 3 |
| Trasmittanza dei filtri densitometrici | 4 |
| Densità analitica dei coloranti ideali | 5 |
| Densità cromatica integrale di coloranti reali in emulsioni multistrato | 7 |
| Sensibilizzazione del materiale a colori..... | 8 |
| Sensitometria delle maschere colorate | 11 |
| Sensitometria nel processo invertibile a colori | 14 |
| Sensitometria nel processo negativo-positivo | 18 |
| Doppi strati delle pellicole a colori..... | 21 |
| Effetto Schwarzschild..... | 22 |
| Effetto “interimage” | 23 |

Sensitometria in b/n ed a colori

Nella sensitometria delle immagini colorate si ritrovano i medesimi termini, principi e problemi riscontrabili nella sensitometria della fotografia in bianco e nero. La conoscenza di questi fondamenti è quindi la premessa indispensabile per la comprensione delle successive sezioni. L'unico elemento nuovo è il colore.

Lo scopo della fotografia a colori consiste nel dare una corretta riproduzione tonale dei grigi, dal bianco al nero passando per tutte le gradazioni intermedie, e nel riprodurre fedelmente saturazione e luminosità dei colori. Nascono quindi due problemi:

- 1) Da ogni materiale a colori si esige un'immagine priva di imperfezioni cromatiche (dominanti). L'occhio umano reagisce ad esse in modo particolarmente critico quando devono essere riprodotti colori senza tono, vale a dire grigi. Questo compito che si pone la sensitometria delle immagini colorate è definito, come già avviene nella fotografia in bianco e nero, **sensitometria della scala dei grigi**. La riproduzione corretta di toni grigi dal bianco al nero, compresi nell'intervallo di luminosità del soggetto, richiede un notevole impegno tecnico da parte sia del produttore sia dell'utilizzatore dei materiali a colori. Infatti, osservando da un punto di vista critico un'immagine a colori, sono più facilmente tollerabili le imperfezioni nei colori piuttosto che nei grigi.
- 2) La riproduzione dei colori è il punto centrale nella sensitometria delle immagini colorate; importanti caratteristiche dei materiali fotografici sono, in questo contesto, la saturazione o purezza cromatica (imbianchimento o annerimento) e la corretta tonalità dei colori. Esse dipendono dal tipo di sensibilizzazione cromatica, dal potere assorbente dei coloranti usati, da fenomeni di diffusione fra i vari strati e dal processo di stampa. Questo secondo compito, posto alla sensitometria delle immagini colorate, è indicato come **sensitometria della tavola cromatica**. Anche se i due problemi sono strettamente collegati, è sufficiente, per un controllo sia delle condizioni di lavorazione sia del processo di sviluppo e stampa, limitarsi alla sensitometria della scala di grigi.

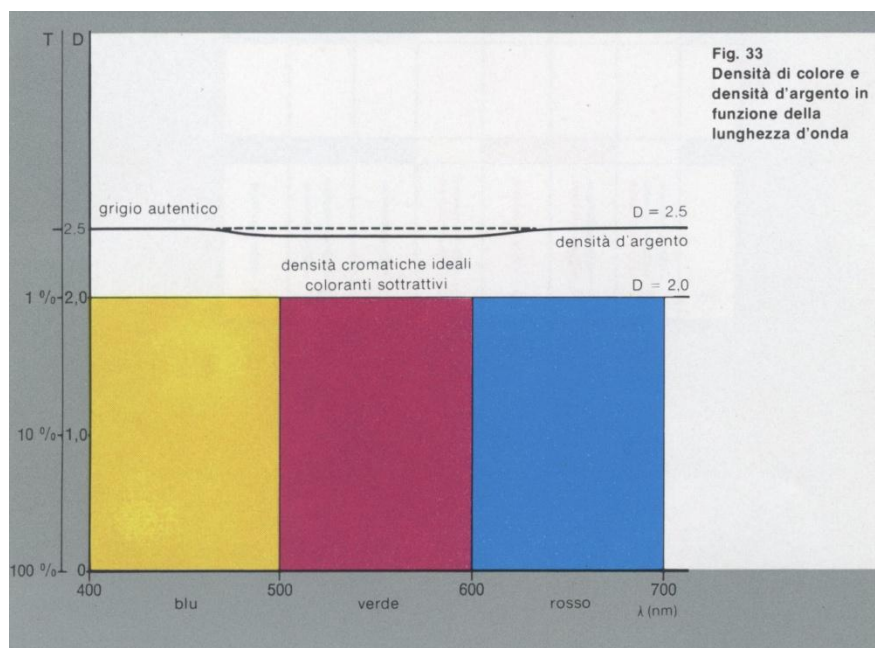
Coloranti ideali

Uno dei compiti della sensitometria delle immagini colorate consiste nella misurazione della densità cromatica, funzione della lunghezza d'onda della radiazione luminosa con cui la densità stessa è misurata.

All'occhio umano, sensibile solo alle radiazioni di una zona limitata dello spettro elettromagnetico (spettro visibile), una sostanza può apparire scura, anche se si lascia attraversare dai raggi Roentgen (fotoni con lunghezza d'onda di 0,005-0,25 nm) ed ha quindi densità nulla. Solo nel caso di sostanze fluorescenti (schermi Roentgen), che hanno la proprietà di rendere visibili i raggi X emettendo energia sotto forma di luce con frequenza inferiore a quella della radiazione incidente, le densità Roentgen assumono valori superiori a zero.

Nella fotografia a colori interessa solo la gamma di lunghezze d'onda dello spettro visibile. Visualizzando la correlazione fra densità e lunghezza d'onda (λ) mediante un grafico, si ottiene nell'emulsione in bianco e nero un valore di densità pressoché costante per tutte le lunghezze d'onda da 400 a 700 nm. Misurando le densità dei grigi non occorre quindi precisare il tipo di radiazione utilizzato.

Si definisce come **grigio vero** quel grigio che, analogamente a quanto accade nelle pellicole in bianco e nero, porta per tutte le lunghezze d'onda dello spettro visibile a un valore di densità uguale. Viceversa, un **grigio non vero** è caratterizzato da differenti valori di densità. Per i coloranti nella fotografia a colori valgono altri principi, che saranno esaminati in seguito.

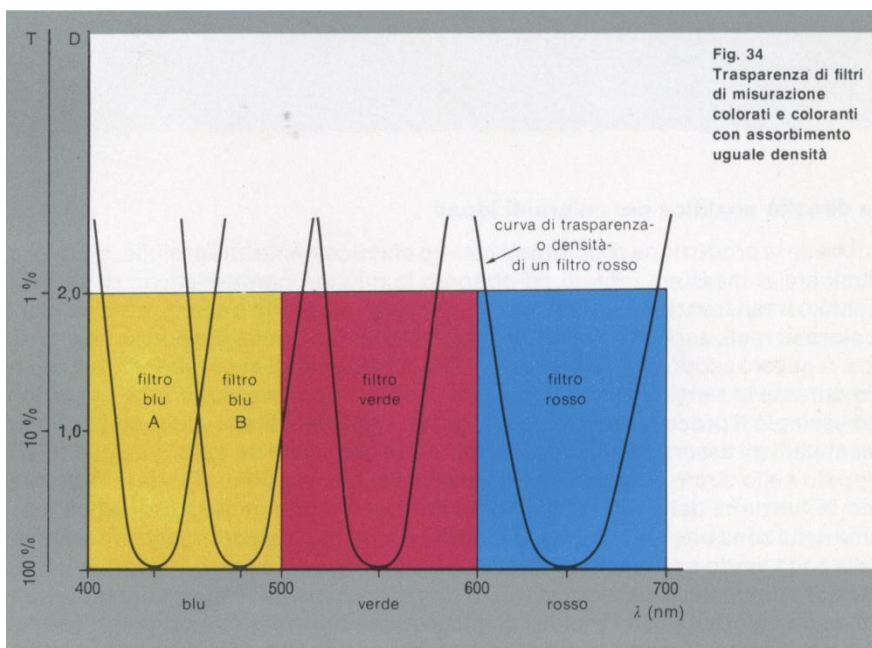


Un colorante ideale giallo deve avere un forte assorbimento, o densità, nel blu ed essere completamente trasparente ($D = 0$) nelle altre zone spettrali. Ciò significa che, se illuminato con luce verde, non è visibile all'occhio umano, poiché nei confronti di radiazioni di questo colore la sua trasparenza è del 100% e la sua densità è nulla. Analogo discorso si può ripetere per i coloranti magenta e ciano.

Trasmittanza dei filtri densitometrici

Per misurare le densità cromatiche nelle tre zone spettrali, si colora la luce bianca del densitometro mediante filtri trasparenti a una delle tre luci primarie ed opachi invece alle altre due. In teoria il colorante in esame è giallo se il filtro è blu (poiché con questo filtro si misura l'assorbimento o la densità di un colorante nella porzione di spettro del suo colore), magenta se il filtro è verde e ciano se il filtro è rosso.

I filtri colorati per la densitometria differiscono fra loro, per quanto riguarda la trasparenza, non solo in base alle tre zone fondamentali dello spettro. La trasparenza massima è limitata ad una zona spettrale ristretta e corrisponde quindi ad una sola lunghezza d'onda. La misurazione delle densità cromatiche mediante linee spettrali sarebbe ideale, ma non sufficientemente ricca di energia. Diminuendo la trasparenza o aumentando la densità, la zona spettrale si allarga e la curva assume una forma a imbuto, con un andamento ai lati più o meno ripido.



Nel caso di coloranti con assorbimento ideale, si ottengono gli stessi valori di densità con tutti i tipi di filtri. Volendo determinare separatamente le tre densità sottrattive, occorre usare filtri di colore complementare.

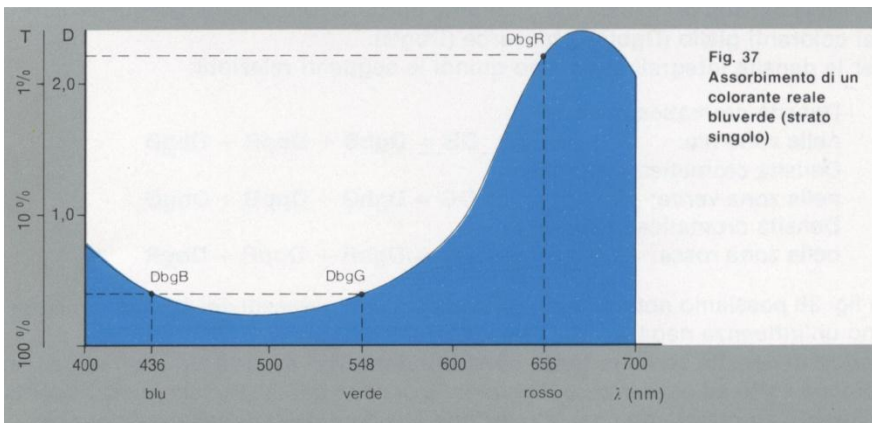
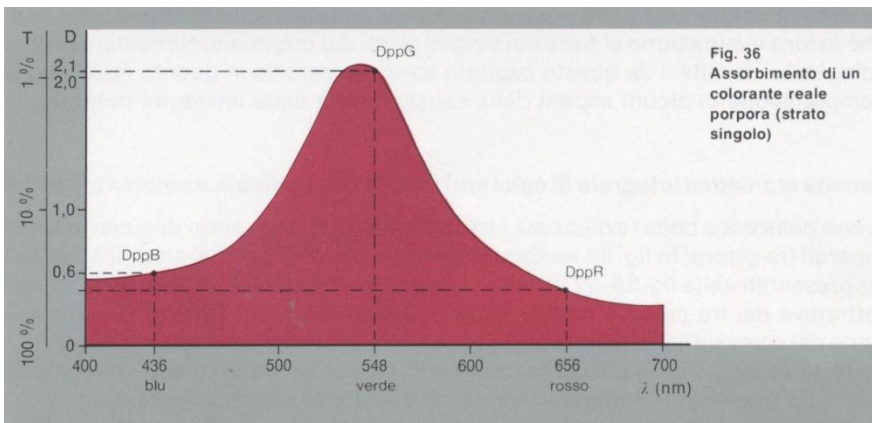
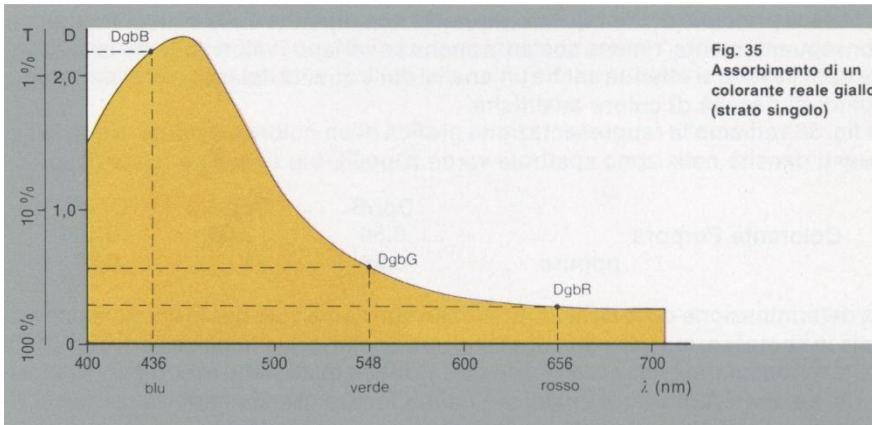
La lunghezza d'onda caratteristica per la trasparenza massima di un filtro è molto importante per l'esame di un colorante. L'assorbimento di quest'ultimo, infatti, varia in funzione della lunghezza d'onda della radiazione. È quindi impossibile indicare valori di densità assoluti senza prima stabilire la zona spettrale di misurazione.

| Filtri per sensitometria a colori | | | |
|--|------------|--------------|--------------|
| | Filtro blu | Filtro verde | Filtro rosso |
| 1. AGFA-GEVAERT | G 67002 | G 67003 | G 70012 |
| trasmissione massima per luce a 3000 °K | 436 nm | 548 nm | 656 nm |
| 2. KODAK WRATTEN | N. 94 | N. 93 | N. 92 |
| trasmissione massima per luce a 2854 °K | 460 nm | 545 nm | 646 nm |

Densità analitica dei coloranti ideali

Anche se la produzione di coloranti ideali è chimicamente impossibile, si cerca di limitare al massimo i loro difetti e di ottenere le migliori caratteristiche di assorbimento o trasparenza. I risultati forniti dalla fotografia a colori provano come i coloranti reali, anche se imperfetti, permettono una buona riproduzione cromatica. A questo scopo è necessario prevedere opportuni accorgimenti ed apportare correzioni (ad esempio, il procedimento di mascheratura) in grado di eliminare o ridurre a valori accettabili gli assorbimenti indesiderati.

Se si riportano su grafico le densità di un colorante giallo (sviluppato nello strato dell'emulsione sensibile al blu) in funzione della lunghezza d'onda, si nota una densità cromatica massima nella zona blu, ma allo stesso tempo anche la presenza di assorbimenti indesiderati nella zona verde e in quella rossa. In questo caso si parla di **assorbimento o densità principale** e **assorbimento o densità parassita**. Determinando le densità di un colorante con i tre filtri di misurazione, si ottengono tre differenti risultati che stabiliscono il rapporto fra assorbimento principale e assorbimenti parassiti.



In base al principio di Beer, questo rapporto non dipende dalla concentrazione e rimane quindi costante anche variando i valori delle densità. Inoltre, le tre letture consentono di procedere ad un'analisi delle qualità del colorante: si parla quindi di densità di colore analitiche.

La determinazione delle densità analitiche non serve solo per lo studio del materiale in se stesso, ma anche a conoscere le sue imperfezioni in rapporto alla riproduzione cromatica; si può così stabilire quali siano le correzioni necessarie. Le densità di colore analitiche hanno inoltre grande

importanza per la riproduzione dei grigi (densità cromatiche grigio-equivalenti).

È possibile determinare le densità di colore analitiche solo in laboratorio, poiché la loro misurazione si basa sui singoli strati del materiale.

Densità cromatica integrale di coloranti reali in emulsioni multistrato

In una pellicola a colori sviluppata, i tre coloranti sottrattivi sono disposti in strati separati fra loro. L'effetto della sintesi sottrattiva dei tre colori è chiaramente riconoscibile nelle zone di sovrapposizione dei coloranti. Per misurare le densità cromatiche in una zona spettrale occorre sommare, a causa degli inquinamenti, i valori di assorbimento di tutti e tre i coloranti. Si parla quindi di densità di colore integrale.

Ad esempio, il valore di densità del magenta (D_M) viene determinato sommando la sua densità principale nel colorante magenta ($D_{M \text{ in } M}$) e le sue densità parassite nei coloranti giallo ($D_{M \text{ in } Y}$) e ciano ($D_{M \text{ in } C}$).

Per le densità integrali sussistono quindi le seguenti relazioni:

- Densità colorante ciano (filtro rosso):

$$D_C = \mathbf{D}_{C \text{ in } C} + D_{C \text{ in } M} + D_{C \text{ in } Y}$$

- Densità colorante magenta (filtro verde):

$$D_M = D_{M \text{ in } C} + \mathbf{D}_{M \text{ in } M} + D_{M \text{ in } Y}$$

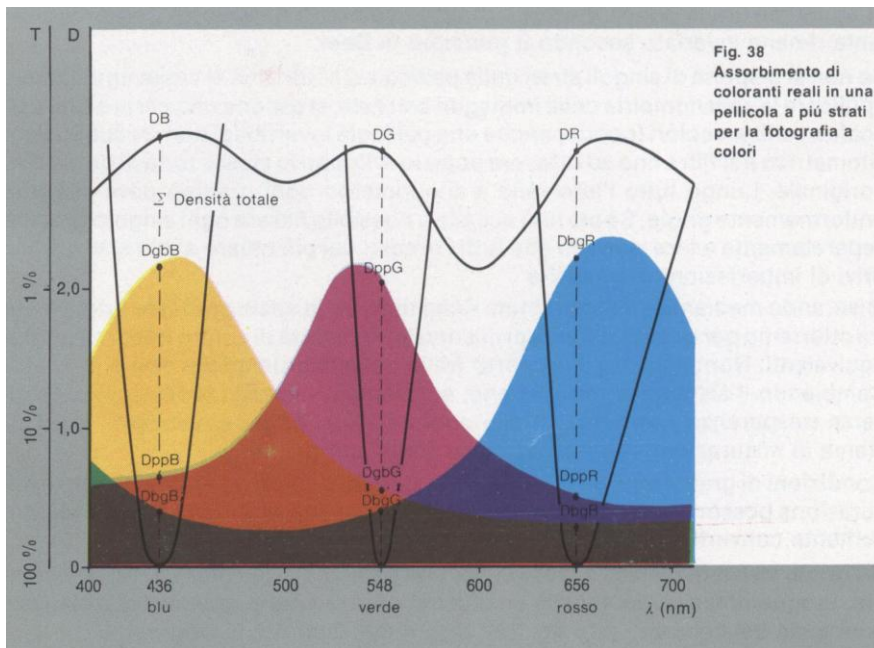
- Densità colorante giallo (filtro blu):

$$D_Y = D_{Y \text{ in } C} + D_{Y \text{ in } M} + \mathbf{D}_{Y \text{ in } Y}$$

dove i valori di densità in grassetto corrispondono agli assorbimenti principali e quelli in corsivo corrispondono agli assorbimenti parassiti.

Gli assorbimenti parassiti dei coloranti, ottenuti dalla reazione tra il rivelatore ossidato ed i copulanti, comportano una serie di svantaggi. In teoria, alla riproduzione cromatica ideale di un oggetto blu dovrebbe contribuire solo il colorante giallo formatosi nello strato sensibile al blu; in pratica però, entrano in gioco anche le densità parassite degli altri due coloranti negli strati sensibili alle luci verde e rossa. Nel processo di stampa

non ha alcuna importanza per il materiale positivo quale strato del negativo determini, durante l'esposizione, l'assorbimento del blu: un'alterazione del tono di colore e un calo della saturazione risulteranno quindi inevitabili. Conoscendo le densità analitiche dei tre coloranti di un materiale e inserendo questi valori nel precedente sistema di equazioni, si determina l'effetto quantitativo delle densità integrali nella riproduzione dei colori e dei grigi.



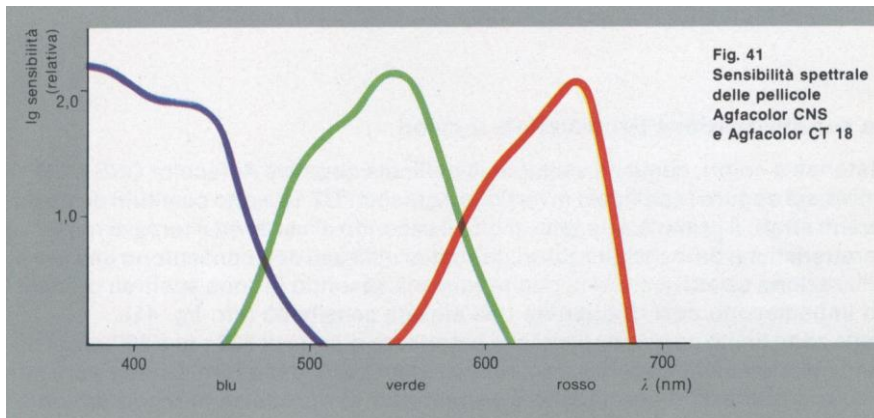
Le densità integrali prese a sé sono solo una misura dell'azione assorbente di una pellicola sulla luce incidente. Nel caso di pellicole invertibili o positive a colori, valgono invece quale misura dell'effetto cromatico durante la proiezione e conseguentemente sull'occhio umano; mentre, nelle pellicole negative a colori, valgono quale misura dell'effetto della luce trasmessa sulla sensibilizzazione del positivo.

Sensibilizzazione del materiale a colori

I materiali a colori sono costituiti da tre differenti strati: il primo è sensibile al blu, il secondo al verde ed il terzo al rosso. Le caratteristiche dei sensibilizzatori cromatici utilizzati non consentono una sensibilizzazione selettiva o divisa con precisione secondo le zone spettrali primarie e impediscono così di ottenere un'elevata sensibilità.

Nelle zone limite corrispondenti alle lunghezze d'onda di 500 nm e 600 nm si notano nella sensibilità spettrale sovrapposizioni più o meno intense.

Queste però non causano alterazioni cromatiche e permettono di riprodurre in modo armonico colori chiari dovuti a miscela di altri colori.



Le suddette sovrapposizioni si rendono assolutamente necessarie nella riproduzione di determinati colori. Ad esempio un giallo a banda stretta (linea gialla del sodio) si troverebbe, nel caso di sensibilizzazione ideale, esattamente sulla linea di confine fra sensibilizzazione al rosso e sensibilizzazione al verde; conseguentemente, sarebbe riprodotto come rosso oppure come verde.

Mentre nella zona spettrale rossa è possibile limitare la sensibilizzazione alle radiazioni visibili, non accade altrettanto nella zona del violetto (onde corte). Le emulsioni fotografiche sono, infatti, sensibili anche all'ultravioletto. In genere la luce UV è assorbita dagli obiettivi e non ha quindi alcun effetto sulla pellicola. Al mare e in montagna la radiazione UV è più forte; per questa ragione si consiglia di usare un filtro UV incolore.

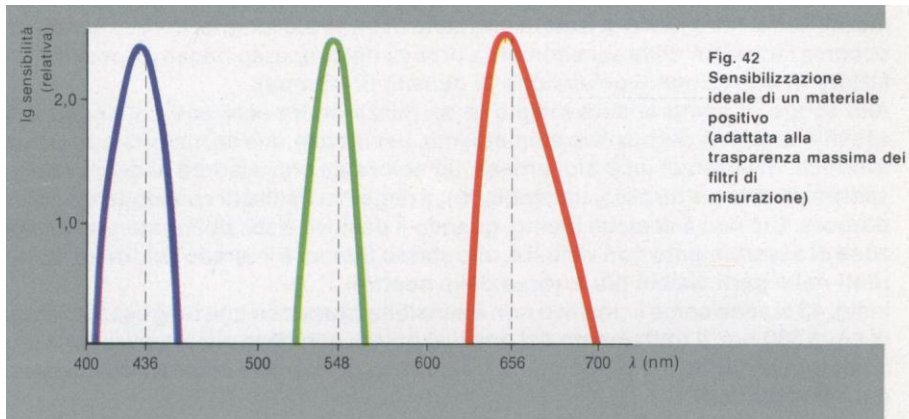
Dopo l'esposizione e lo sviluppo si formano in ogni strato della pellicola negativa determinati coloranti di colore complementare a quello cui è sensibile lo strato in cui si trovano. Mediante il processo di stampa si ottengono nuovamente i colori originali sul positivo. Nel caso di materiali invertibili invece i colori positivi si formano nello sviluppo cromogeno, che segue il primo sviluppo b/n e l'inversione (per via chimica) dell'immagine latente.

Le premesse necessarie per la sensibilizzazione del materiale positivo sono determinate dalle caratteristiche spettrali dei coloranti del negativo.

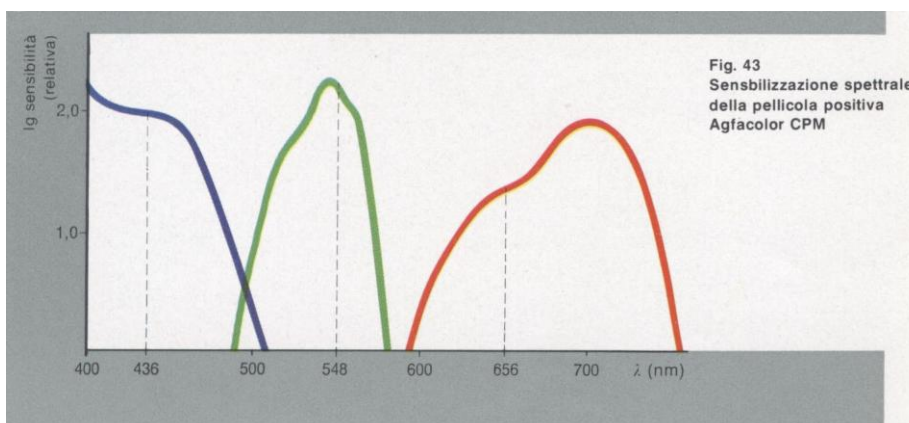
Gli assorbimenti parassiti dei tre coloranti causano un'alterazione cromatica e un calo di saturazione. Nelle zone di sovrapposizione delle densità spettrali dei tre coloranti sottrattivi ciò avviene in modo più accentuato che nelle zone di assorbimento principale (campi di misura del densitometro). Per determinare le densità spettrali del negativo che durante la stampa producono un effetto sul materiale positivo e per rendere inefficaci le zone

di sovrapposizione indesiderate, è necessaria una sensibilizzazione selettiva, con i massimi situati nei campi di misura sensitometrici.

La sensibilizzazione ideale del positivo comporta una sensibilità massima dei tre strati coincidente con le tre zone spettrali di maggiore trasparenza dei filtri del densitometro; le zone di sovrapposizione dei coloranti negativi sono quindi eliminate.



Nella sensibilizzazione reale di un film positivo si nota che le sensibilità al blu e al verde sono adattate in modo pressoché ottimale all'assorbimento massimo dei corrispondenti coloranti del negativo. Solo per quanto riguarda la sensibilizzazione del positivo al rosso il massimo si trova, rispetto alla trasparenza massima del filtro di misurazione del colorante ciano del negativo, in una zona di onde più lunghe. Mentre per una pellicola invertibile l'assorbimento del rosso è opportunamente limitato allo spettro visibile, l'assorbimento del colorante ciano del negativo raggiunge la zona dell'infrarosso quando il materiale positivo è sensibile a queste radiazioni e, a sua volta, è in grado di formare un colorante che assorbe esclusivamente nella parte visibile dello spettro.



Volendo misurare le densità cromatiche ciano del negativo che, per una determinata sensibilizzazione del positivo al rosso, producono un effetto durante la stampa (densità di stampa del negativo), è necessario che la trasparenza massima del filtro rosso si trovi in una zona di onde più lunghe. In caso contrario occorre includere nella sensitometria pratica del processo negativo-positivo un fattore di correzione (conversione di densità di stampa).

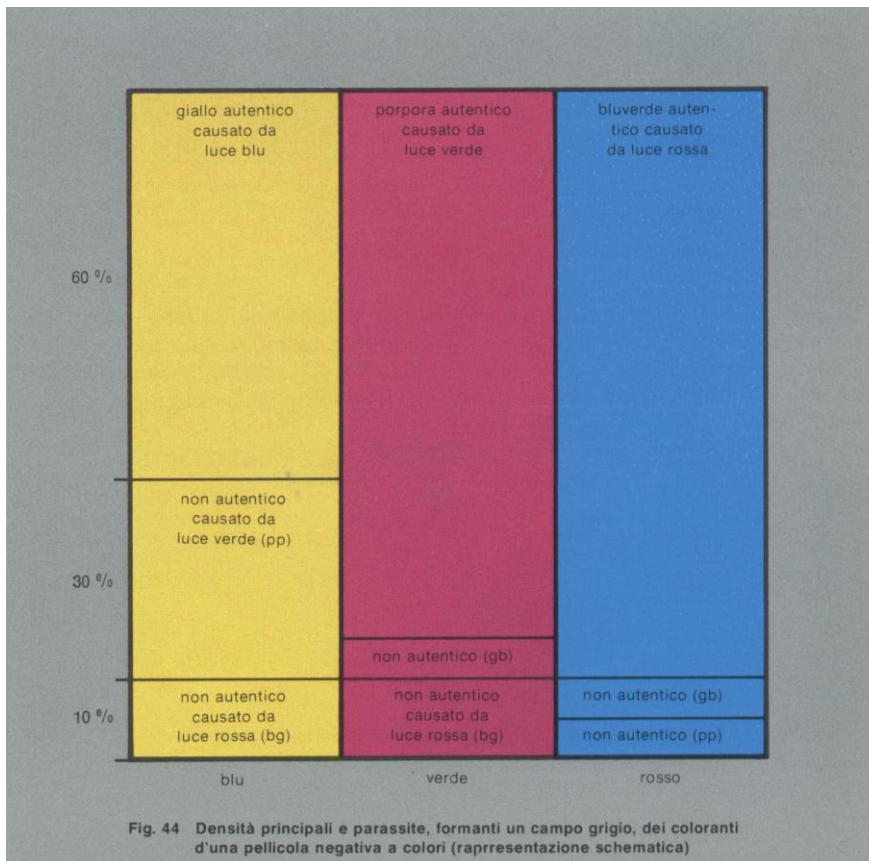
Allo scopo di comprendere meglio la correlazione fra coloranti del negativo e sensibilizzazione del positivo si supponga che un materiale negativo produca, nel caso di luce blu o rossa, un colorante in grado di assorbire al di fuori dello spettro visibile (infrarosso, ultravioletto); il negativo risulta di conseguenza colorato in magenta. Ciò non è di alcun danno, quando il positivo è sensibilizzato per queste zone di assorbimento non visibili e, allo stesso tempo, è in grado di formare coloranti nelle bande blu e rossa dello spettro visibile.

Sensitometria delle maschere colorate

Come già visto, i coloranti sottrattivi usati nella pratica si scostano dalle necessità della sintesi tricromatica e assorbono nelle zone spettrali attigue, in cui dovrebbero essere completamente trasparenti. Per questo accade frequentemente che, nonostante un'accurata lavorazione, la luminosità, la purezza e il tono dei colori non corrispondano all'originale.

Per l'assorbimento del blu, ad esempio, si ha solo il 60% di giallo autentico causato dalla luce blu, mentre gli assorbimenti parassiti gialli del magenta e del ciano, formati mediante le luci verde e rossa, apportano il 30% e il 10%. Aumentando la componente di giallo autentico si riuscirebbe apparentemente ad evitare l'influenza indesiderata degli assorbimenti parassiti. Ciò purtroppo non è possibile, poiché si turberebbe l'equilibrio del grigio. Riproducendo una scala di grigi si otterrebbero, infatti, il blu nelle zone di maggiore densità ed il giallo in quelle di minore densità.

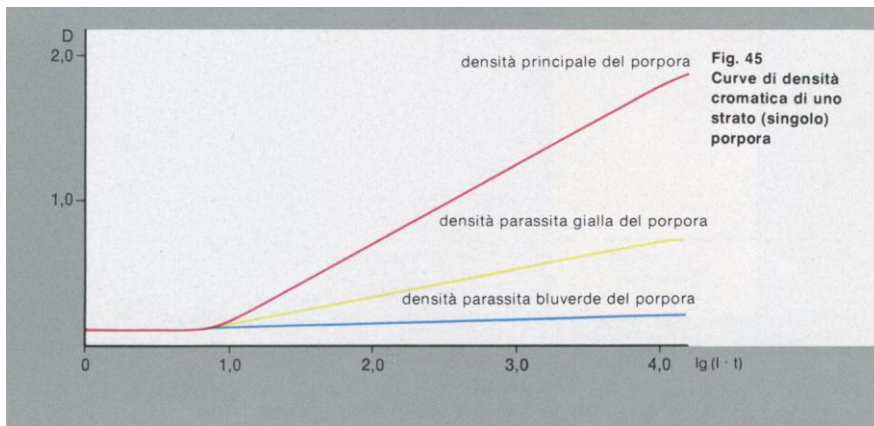
Quando l'occhio umano o il materiale positivo percepiscono un colore, non sono in grado di distinguere in quale strato o mediante quale colorante avviene l'assorbimento del blu che serve a far apparire la pellicola grigia. Per quanto riguarda la resa dei colori però, questo particolare è di estrema importanza.



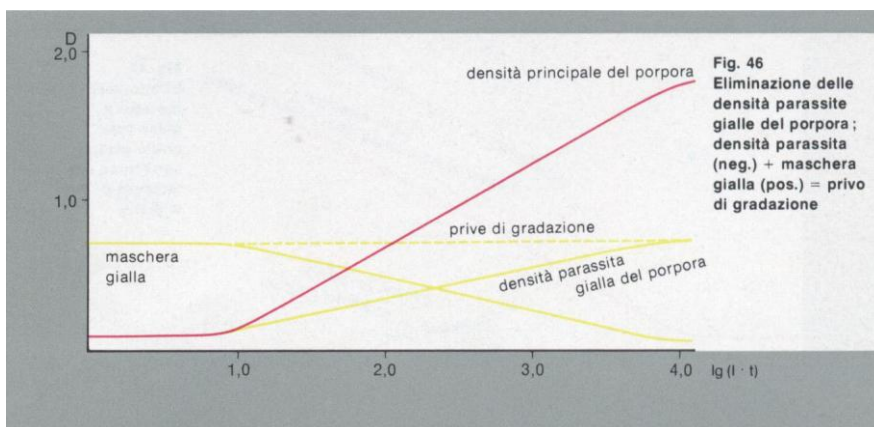
Per eliminare l'influenza indesiderata degli assorbimenti parassiti sono necessarie delle maschere colorate. In teoria ne occorrono in totale sei, cioè due per ogni colorante, ma l'assorbimento parassita giallo del magenta nella zona spettrale blu è quello con il maggiore effetto; seguono poi gli assorbimenti parassiti gialli e magenta del ciano nelle bande spettrali blu e verde. Nella pratica ci si limita ad eliminare queste imperfezioni mediante due sole maschere; gli effetti dei restanti assorbimenti parassiti invece sono minimi e vengono quindi del tutto ignorati.

Ogni negativo, in particolare se non mascherato, richiede ulteriori correzioni allo scopo di migliorare la resa dei colori. Si tratta però di procedimenti complicati ed impegnativi. Per questa ragione le pellicole negative contengono maschere completamente integrate che eliminano automaticamente i tre assorbimenti parassiti. Si evita così una dispendiosa mascheratura supplementare.

Si vedrà ora, in dettaglio, il principio e il modo di operare di una maschera gialla per l'eliminazione dell'assorbimento parassita del magenta nella zona spettrale blu.



Esponendo con un cuneo densitometrico uno strato magenta sensibile al verde, si possono determinare quantitativamente, dopo lo sviluppo, gli assorbimenti principali mediante il filtro di misurazione verde, quelli parassiti invece mediante i filtri blu (assorbimento parassita giallo) e rosso (assorbimento parassita ciano). Per ogni concentrazione o densità il rapporto fra assorbimenti principali e parassiti rimane costante. Mentre l'assorbimento parassita giallo ha, come previsto, un andamento ripido, l'assorbimento parassita ciano ha una pendenza minima e viene quindi del tutto ignorato.



Sovrapponendo in modo adeguato un negativo ed un positivo, si può annullare ogni traccia d'immagine ed ogni gradazione di densità (ciò naturalmente se negativo e positivo hanno uguale intervallo di densità o uguali gradazioni).

Si elimina l'effetto indesiderato della densità parassita gialla del magenta ponendo su di essa una curva di densità, con caratteristiche esattamente opposte, di un positivo con un colorante giallo. Per i valori di misurazione riguardanti l'assorbimento del blu si otterrà una curva priva di gradazione e con un velo più alto. Questo procedimento di mascheratura avviene automaticamente in una pellicola quando, ad esempio, durante lo sviluppo,

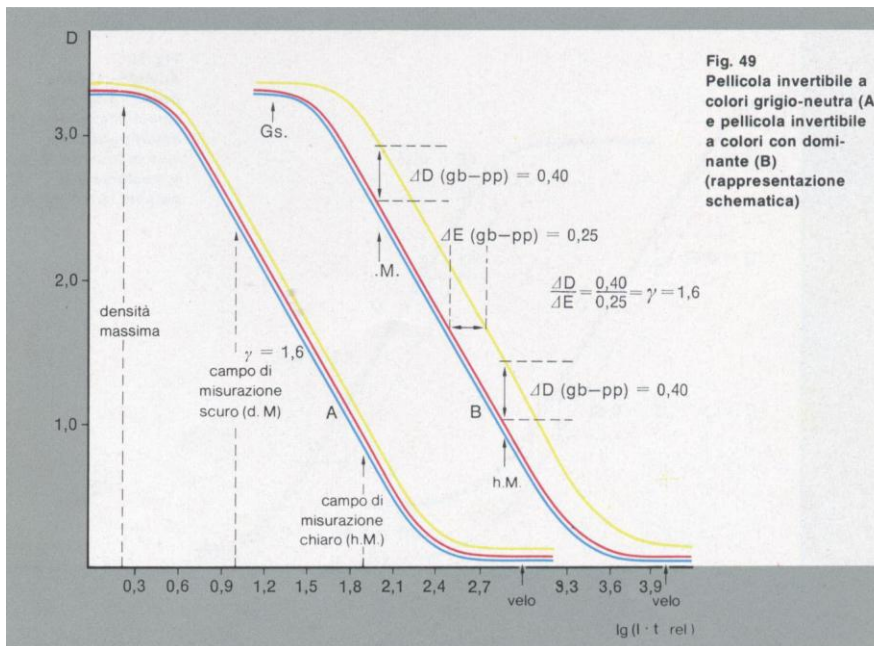
un colorante giallo è distrutto nella stessa misura con cui il copulante magenta forma un colorante magenta.

Eliminando l'effetto dell'assorbimento parassita giallo del magenta che, assieme al giallo autentico, forma un grigio visivo, ne consegue che il giallo autentico risulterà insufficiente ed avrà quindi una curva di densità troppo piatta. Per questo si noterà uno squilibrio cromatico caratterizzato da un eccesso di blu nelle ombre e di giallo nelle luci. Aumentando la concentrazione di colorante giallo nello strato sensibile al blu e rendendo così la curva di densità del giallo più ripida, il giallo autentico raggiunge il 100%. Ciò corrisponde al vero scopo di una maschera gialla, e cioè ottenere il 100% di colorante autentico; contemporaneamente viene anche ristabilita la grigio-equivalenza.

La forte dominante gialla può essere eliminata durante la stampa mediante un'opportuna filtratura. In questo caso però è necessario un tempo di stampa molto lungo. Convien quindi utilizzare materiali positivi adattati in modo ottimale ai negativi mascherati, e cioè con una forte sensibilità al blu ed al ciano.

Sensitometria nel processo invertibile a colori

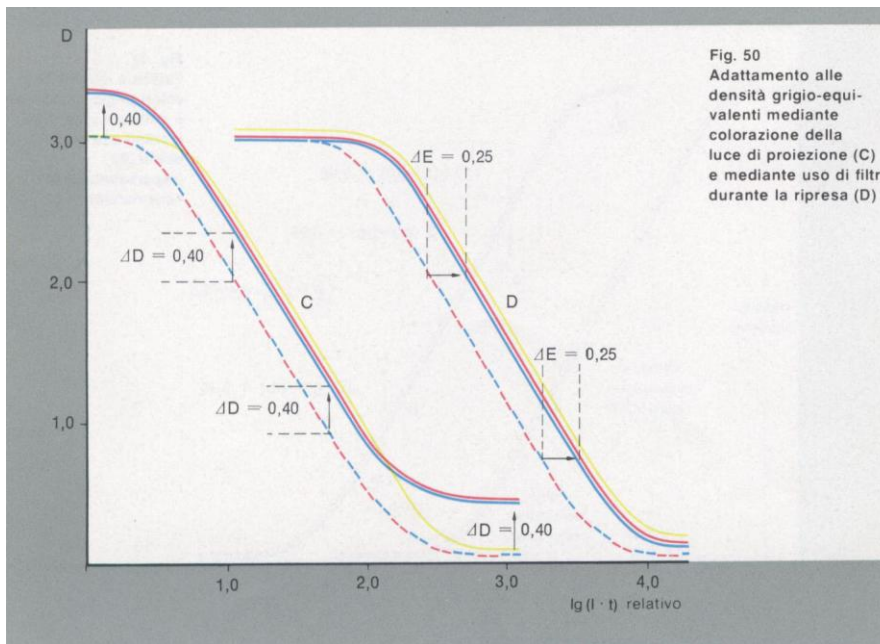
Qui di seguito si riportano le curve di densità di una pellicola invertibile a colori (A) che, fra velo e densità massima, risulta grigia. È da notare che, soprattutto per il controllo dello sviluppo, è sufficiente conoscere anziché l'intero andamento delle tre curve soltanto quattro dati: velo, densità massima, densità più chiara e densità più scura.



Se il cuneo fotometrico della pellicola A è visibilmente grigio, la pellicola B avrà delle punte di colore. Nel campo di misurazione più scuro ed in quello più chiaro, infatti, otteniamo per il giallo densità relativamente maggiori di quelle per il ciano ed il magenta; la curva di densità del giallo risulta quindi spostata parallelamente. Il velo e la densità massima non subiscono cambiamenti e rimangono grigi, la soglia e la spalla invece diventano progressivamente più gialli fino a raggiungere nel tratto rettilineo la punta di colore massima. La distanza sulle ordinate fra i valori di densità può quindi essere considerata, per quanto riguarda la grigio-equivalenza, quale misura per la dominante.

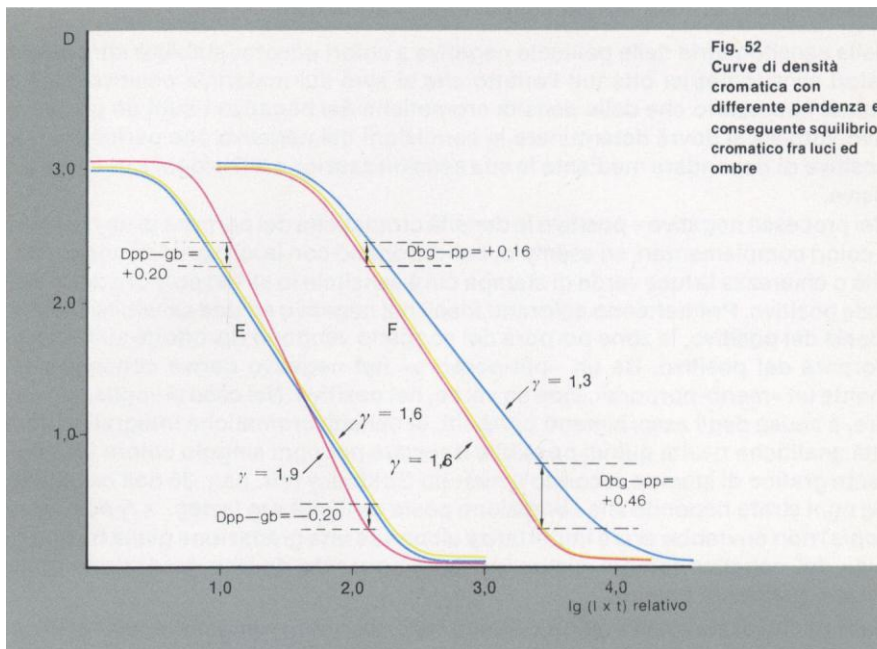
La distanza sulle ascisse indica la sensibilità relativa dei tre strati. Nel caso della pellicola B, ad esempio, lo strato giallo sensibile al blu è di 2,5 DIN meno sensibile del magenta e del ciano e causa quindi la differenza di densità di $\Delta D = 0,40$ sulle ordinate. La dominante gialla potrebbe essere stata causata da luce troppo gialla durante la ripresa (componente di luce blu relativamente minore), da un filtro giallo di densità 0,25 oppure da uno sviluppo difettoso.

Conoscendo le cause si possono sapere quali sono le correzioni necessarie. Mediante determinati accorgimenti durante la ripresa oppure ristabilendo le condizioni di lavoro conformi all'esemplare in esame, si riporteranno le tre densità cromatiche allo stato di grigio-equivalenza.



Colorando di blu la luce di proiezione (filtro blu $D = 0,40$) si dovrebbero ottenere densità grigio-equivalenti. In realtà ciò avviene, come si può riscontrare nel caso della pellicola C, solo nella zona di densità media; lo spostamento di densità sulle ordinate causa, infatti, una coloritura di blu troppo forte nella zona della densità massima ed in quella del velo. Per correggere una dominante gialla causata da luce troppo gialla durante la ripresa occorre adattare le densità sulle ascisse utilizzando un filtro blu di densità 0,25 durante la ripresa. In questo modo si modificherà solo la sensibilità relativa degli strati magenta e ciano.

Si parla di squilibrio cromatico quando le zone di luci e di ombre sono caratterizzate da differenti aberrazioni di densità dal grigio; luci ed ombre hanno abitualmente punte di colore complementari fra loro (ad esempio, rosso - ciano).



Nel caso della pellicola E la curva di densità del magenta è più ripida di quelle del giallo e del ciano ($\gamma = 1,6$); le aberrazioni di densità nelle zone di luci e di ombre sono grandi uguali, ma in opposte direzioni. Risultano quindi ombre magenta ($D_M = +0,20$) e luci verdi ($D_M = -0,20$). La densità media invece è riprodotta come grigio. Con un adattamento delle densità sulle ascisse, mediante l'uso di filtri durante la ripresa, si ottiene uno spostamento della zona con una corretta resa dei colori (densità media), ma non elimina lo squilibrio cromatico.

La pellicola F ha uno squilibrio cromatico causato da una curva di densità del ciano relativamente troppo piatta. In questo caso l'imperfezione cromatica non è facilmente identificabile, in quanto l'intera curva, con eccezione della zona estrema di ombre, è caratterizzata da un eccesso di ciano. Con un'opportuna filtratura durante la ripresa però, la densità media diviene grigio-equivalente e contemporaneamente si può notare un eccesso di magenta nella zona di ombre ed un eccesso di ciano nella zona di luci. Per rappresentare graficamente gli squilibri cromatici si procede come per le dominanti, riportando però nel grafico le differenze dei valori gamma in confronto al grigio anziché quelle di densità.

Per la proiezione di diapositive dal formato 24x36 mm al formato 6x6 cm, una $D_{max} \geq 3,30$ permette di ottenere una saturazione cromatica ed un intervallo di contrasto ottimali.

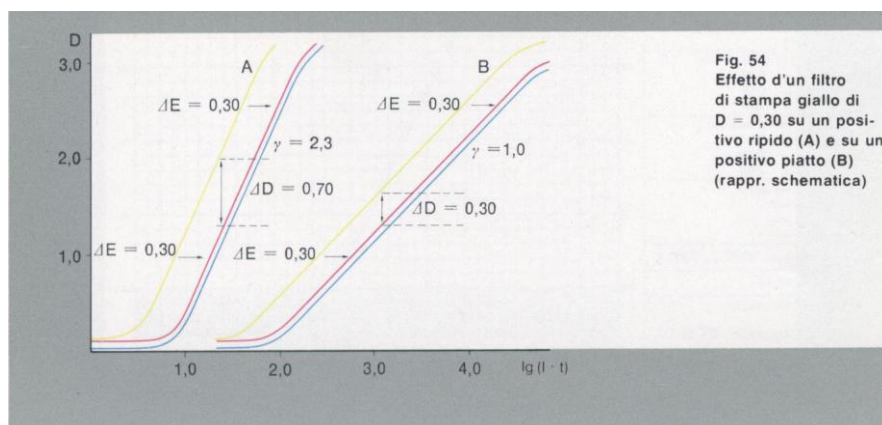
Sensitometria nel processo negativo-positivo

Nella sensitometria delle pellicole negative a colori occorre stabilire, attraverso i valori sensitometrici ottenuti, l'effetto che si avrà sul materiale positivo. Non è quindi necessario che dalle densità cromatiche del negativo risulti un grigio visivo, tuttavia si dovranno determinare le condizioni del negativo che permettono al positivo di rispondere mediante la sua sensibilizzazione all'esigenza di un grigio visivo.

Nel processo negativo-positivo le densità cromatiche del magenta di un negativo a colori complementari, ad esempio, condizionano con la loro gradazione di densità o chiarezza la luce verde di stampa cui è sensibile lo strato magenta del materiale positivo. Premettendo coloranti ideali nel negativo ed una sensibilizzazione ottimale del positivo, le zone magenta del soggetto vengono riprodotte sullo strato magenta del positivo. Da un "più-magenta" nel negativo deriva conseguentemente un "meno-magenta", cioè un verde, nel positivo. Nel caso si vogliano convertire, a causa degli assorbimenti parassiti, le densità cromatiche integrali in densità analitiche, risulta quindi possibile tracciare per ogni singolo colore un differente grafico di stampa secondo il metodo Goldberg. Se ogni strato risponde alla condizione posta da Goldberg ($\gamma_{neg} \cdot \gamma_{pos} = \gamma_{copia}$) non dovrebbe avere alcuna importanza se una gradazione gialla troppo ripida del negativo (ombre gialle) è compensata da una gradazione gialla troppo piatta nel positivo.

I fabbricanti di materiali a colori cercano però di produrre negativi e positivi di per sé neutri (senza squilibri cromatici) in modo da permettere uno scambio di materiali. Nel processo negativo-positivo è possibile eliminare le dominanti regolando l'esposizione del positivo mediante filtri cromatici sottrattivi oppure ricorrendo alla stampa con metodo additivo.

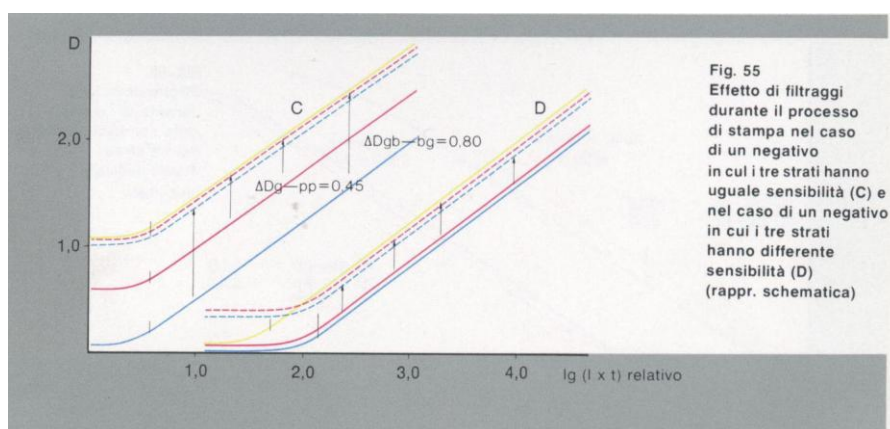
La figura sottostante illustra l'effetto della filtratura durante la stampa su un materiale positivo. Il positivo A con $\gamma = 2,3$ ha una dominante gialla caratterizzata da una differenza di densità sulle ordinate di 0,70.



Per ottenere un grigio visivo occorre adattare le densità sulle ascisse in modo tale da diminuire la densità dello strato giallo sensibile al blu. Ciò avviene indebolendo la componente blu della luce bianca di stampa fino ad ottenere, con le densità del magenta e del ciano, un grigio visivo. Non considerando gli assorbimenti parassiti del filtro giallo, occorre in questo caso un filtro giallo di $D = 0,30$ ($0,70 / 2,3 = 0,30$).

Per eliminare la dominante gialla del positivo B con $\gamma = 1,0$ si deve usare un filtro giallo di uguale densità, anche se in questo caso la dominante ($\Delta D = 0,30$) è di metà valore in confronto a quella del positivo A. Una determinata filtratura ha quindi maggior effetto su un positivo ripido che su un positivo piatto; un positivo ripido richiede quindi una particolare precisione di filtratura.

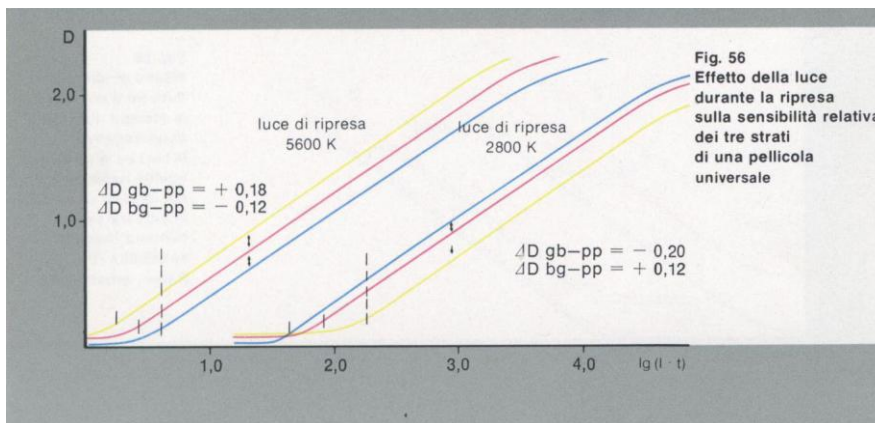
L'effetto della filtratura durante il processo di stampa è spiegabile anche dal punto di vista della sensitometria del negativo. Riproducendo le densità cromatiche di un negativo su un determinato materiale positivo che, a sua volta, risulta visibilmente grigio con una data luce di stampa e senza filtratura (n° base - - -), occorre rendere neutre le densità negative adattando i valori di densità sulle ordinate.



Le densità cromatiche dei filtri di stampa si sommano con quelle del negativo fino a quando la densità totale nelle tre zone di assorbimento risulta grigio-neutra al positivo (sensibilizzazione). Nel caso di coloranti ideali e di un'ideale sensibilizzazione del positivo si otterrà quindi un grafico con tre curve coincidenti. Ciò accade per il negativo C in cui le sensibilità dei tre strati sono uguali fra loro. Nel negativo D invece lo strato giallo sensibile al blu è di 4 DIN più sensibile del magenta e del ciano. Sommando le tre densità del negativo con le densità correttive dei filtri di stampa, risulta una sovrapposizione delle curve solo nelle zone di esposizione normale e di sovraesposizione; nel caso di sottoesposizione invece si ottengono ombre gialle e luci blu, poiché è compreso anche il velo del

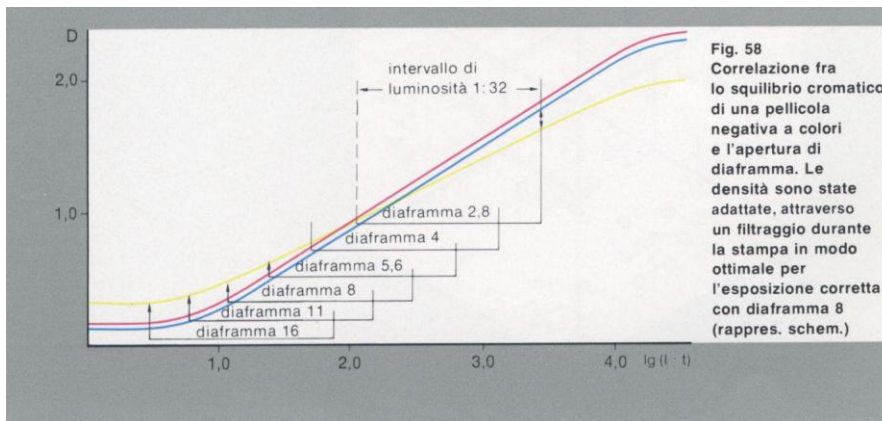
negativo. Questo fatto non comporta però alcuno svantaggio, in quanto fotografie sottoesposte sono inutilizzabili in generale solo in particolari condizioni. Il negativo C che, a causa dell'elevato velo giallo e magenta, è mascherato, richiede, per il suddetto positivo, una forte filtratura magenta-ciano. Utilizzando invece un positivo con una sensibilità relativa al blu ed al verde adeguatamente elevata (ad esempio numero base 150 100 -) non sarà più necessaria alcuna filtratura.

Esponendo alla luce artificiale una pellicola negativa, le sensibilità relative dei tre strati saranno differenti da quelle risultanti da un'esposizione alla luce del giorno. La luce emessa dalle lampade a incandescenza presenta, infatti, una riduzione della componente blu e un aumento della componente rossa.



La sensibilità effettiva è determinata in base allo strato meno sensibile (giallo). In quest'ultimo si riscontrano, sopra al punto di riferimento per la misurazione della sensibilità (0,10 sopra al velo), densità molto elevate per il magenta e per il ciano. Una pellicola esposta alla luce artificiale in modo corretto, cioè evitando dominanti, risulta così più coperta di una pellicola dello stesso tipo esposta alla luce diurna. Densità magenta e ciano appaiono all'occhio più scure di densità gialle di uguale valore.

Mediante le differenze di densità sulle ordinate bg-pp e gb-pp misurate nella zona di densità media di una riproduzione fotografica esposta correttamente e con un contrasto normale di 1:32 ($\text{Log } 32 = 1,51$), si possono determinare le filtrature necessarie durante la stampa. Si ottengono così misure sensitometriche che caratterizzano il comportamento dei negativi a colori durante la stampa.



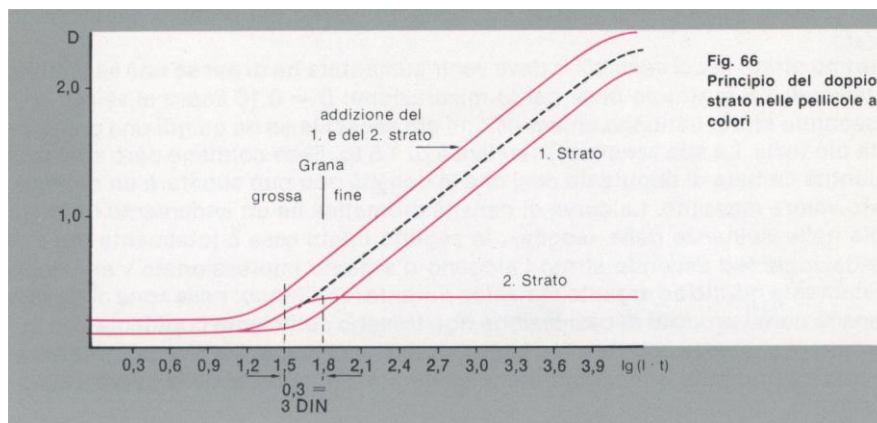
Lo squilibrio cromatico avrà maggiore importanza per soggetti con un ampio intervallo di luminosità che per soggetti poco contrastati. Sovra e sottoesposizione possono essere riportate, mediante opportuna filtratura durante la stampa, allo standard di corretta esposizione; lo squilibrio cromatico in un'immagine non è invece correggibile.

Nelle pellicole a colori negative gli squilibri cromatici sono in genere causati da superamento della scadenza di validità o da sviluppo difettoso. La causa di uno squilibrio fra luci ed ombre in un'immagine può ritrovarsi anche nello sviluppo erraneo o nella suddetta scadenza di validità del materiale positivo.

Doppi strati delle pellicole a colori

Gli strati fotosensibili sono sovente doppi, permettendo così di aumentare la sensibilità evitando un peggioramento della granulosità. Quest'ultima, infatti, disturba nelle parti dell'immagine caratterizzate da una densità media, ma non in quelle dove si trovano le ombre più scure. La granulosità è un elemento disturbante nei tratti di cielo, nei toni della pelle ed in altre superfici piatte di densità media o scarsa. Nel negativo le densità elevate dovranno essere quindi a grana molto fine, le densità minori invece potranno avere una forte granulosità.

La figura seguente riporta, oltre alle curve di densità del magenta corrispondenti ai due singoli strati, la curva che si ottiene mediante addizione del primo e del secondo strato.



Il primo strato la cui sensibilità deve essere aumentata ha di per sé una sensibilità relativa di $\text{Log } E = 1,8$ (punto base per la misurazione: $D = 0,10$ sopra al velo). Il secondo strato contiene un'emulsione più sensibile ed ha quindi una granulosità più forte. La sua sensibilità relativa è $\text{Log } E = 1,5$. Esso contiene però solo una quantità limitata di copulante, così che la densità non può superare un determinato valore massimo. La curva di densità cromatica ha un andamento normale solo nelle vicinanze della soglia; in seguito, infatti, è totalmente priva di gradazione. L'alogenuro d'argento impressionato di questo secondo strato è completamente ridotto ad argento metallico durante lo sviluppo; nelle zone di elevate densità però i prodotti di ossidazione non trovano sufficiente copulante con cui formare la sostanza colorata. Nel bagno di sbianca l'immagine d'argento, caratterizzata da una forte granulosità, viene eliminata.

Ponendo oppure stendendo uno strato sopra all'altro, si avrà per la luce traversante un effetto che corrisponde all'addizione delle densità cromatiche dei due strati. Risulta quindi una curva di densità del magenta con un velo leggermente più alto ed un aumento di sensibilità di 3 DIN. La forte granulosità causata dalla seconda emulsione è riscontrabile solo nella zona di ombre più scure ove non risulta elemento disturbante. Le densità basse e medie del positivo sono invece a grana fine in quanto si basano unicamente sul primo strato.

Effetto Schwarzschild

L'azione fotochimica sui materiali a colori, derivante dall'effetto Schwarzschild è, in linea di principio, analoga a quella sui materiali in bianco e nero.

Nel caso dei materiali a colori, particolari problemi sorgono dal fatto che i tre strati possono reagire in modo diverso a causa delle differenti

emulsioni. Con esposizioni estremamente lunghe non diminuisce soltanto la sensibilità generale. Può, infatti, accadere che anche le sensibilità relative dei tre strati subiscano mutamenti.

Per i materiali invertibili, si rende necessario l'impiego di opportuni filtri durante la ripresa; per le pellicole negative o per i materiali positivi, occorre invece usare la filtratura idonea durante la stampa.

L'azione fotochimica dell'effetto Schwarzschild sui tre strati può inoltre differenziarsi nel caso di intensità luminose molto scarse (curva più ripida) e molto elevate (curva più piatta), con conseguente squilibrio cromatico fra luci e ombre.

A questo inconveniente, non rimediabile da parte dell'utilizzatore del materiale fotosensibile, i fabbricanti cercano di ovviare mediante un'accurata scelta e un opportuno adattamento delle emulsioni e, soprattutto nel caso delle pellicole invertibili, con la produzione di due differenti tipi di materiali: pellicole S (short-time, per luce diurna) e pellicole L (long-time, per luce artificiale a incandescenza).

Nel caso di riprese in interni accade facilmente che la luce diurna non risulti sufficiente. Alcune parti dell'ambiente, infatti, devono essere illuminate artificialmente mediante il lampo elettronico. Se la posa è molto lunga (con diaframma chiuso), si notano fra zone rischiarate e zone d'ombra differenze di colore che possono essere eliminate mediante filtri colorati per luce lampo oppure mediante filtri da applicarsi sull'obiettivo.

Effetto “interimage”

Con questo termine si indicano tutti gli effetti che si manifestano tra gli strati dei materiali a colori. Si tratta quindi di fenomeni in cui gli strati sovrapposti si influenzano a vicenda (**interimage = fra le immagini, fra gli strati**).

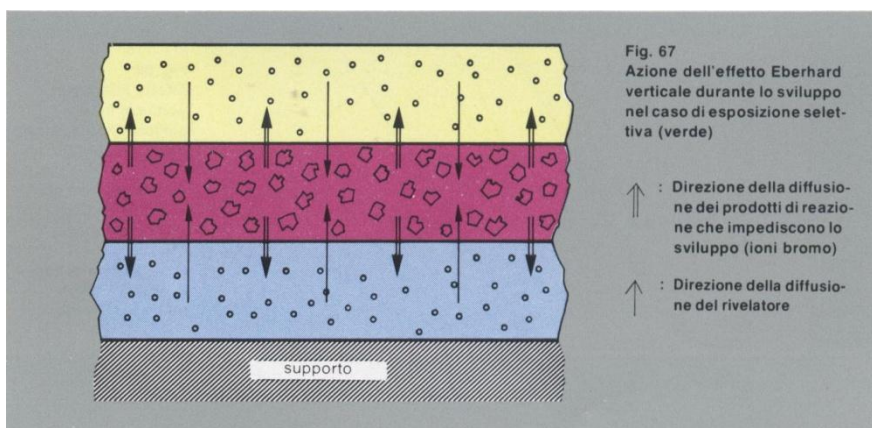
L'effetto Eberhard ha un'azione di grande importanza anche per il colore.

Nei materiali b/n questo fenomeno implica che zone di diverso annerimento confinanti fra loro si influenzano reciprocamente nell'unico strato d'emulsione. Nei pressi della linea di separazione delle due zone quella meno esposta rimane praticamente non sviluppata, quella più esposta invece ha una densità superiore alla media. Ciò è causato dal maggiore consumo di rivelatore e dalla più intensa produzione di bromuro di potassio nelle zone più annerite, con una conseguente differenza di concentrazione.

Nei materiali a colori a più strati l'effetto Eberhard in senso orizzontale causa bordi colorati, specialmente quando pellicola e rivelatore sono agitati in modo insufficiente.

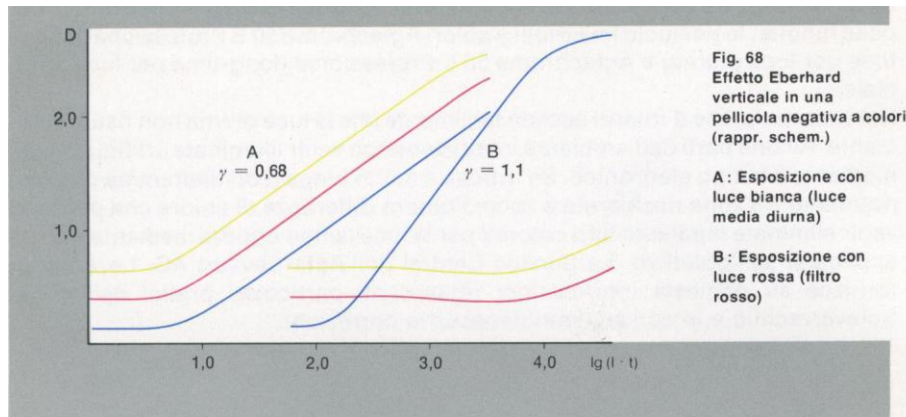
È di maggiore interesse però l'effetto di adiacenza in un senso verticale, che si manifesta quando uno strato viene esposto più degli altri, come nel caso di esposizione con luce colorata. Questo fenomeno, che riguarda solo i materiali a colori, è denominato **effetto Eberhard verticale** o, più generalmente, **effetto interimage**.

Nella figura sottostante si nota come i prodotti di reazione, che impediscono lo sviluppo, diffondono in senso verticale negli strati poco o per nulla esposti. In seguito all'elevata esposizione dello strato magenta sensibile al verde, tali prodotti si formano durante lo sviluppo attraverso la riduzione dell'alogenuro d'argento in argento metallico. Il rapido consumo di rivelatore impoverisce lo strato magenta e causa un fenomeno di diffusione in senso contrario, dagli strati meno impressionati verso lo strato più esposto.

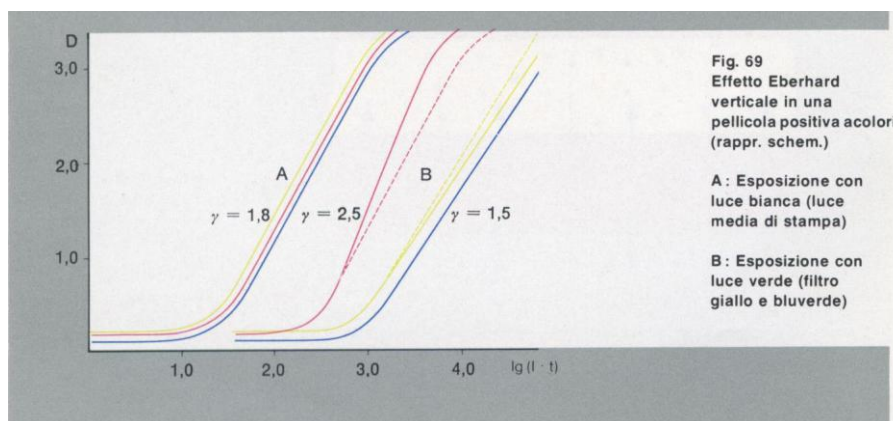


Questo processo chimico, che avviene durante lo sviluppo di materiali esposti in modo selettivo, rende più forte il contrasto verticale fra densità cromatiche aumentando così anche la saturazione dei colori. L'azione risulta positiva, poiché, esponendo in modo uniforme con luce bianca i tre strati di una pellicola a colori, si otterrà, per la riproduzione della scala di grigi dal bianco al nero, una gradazione più piatta che per la riproduzione dei colori nel caso di una corrispondente esposizione con luce colorata. L'utilizzatore non può in alcun modo influire sulla misura dell'effetto; è invece compito del materiale a colori permettere che il fenomeno possa manifestarsi. Sotto questo punto di vista sono perciò importanti le seguenti caratteristiche del materiale: spessore e sequenza degli strati, stato di saturazione delle emulsioni, rapporto fra componenti dell'alogenuro d'argento, grado di sviluppo e formula del trattamento. La figura sottostante illustra l'azione sensitometrica dell'effetto in esame. Il rapporto fra gradazione ciano

ottenuta con luce rossa e gradazione ciano ottenuta con luce bianca caratterizza l'azione dell'effetto Eberhard verticale per questo genere di pellicola nel caso di esposizione con luce rossa ($\gamma_{\text{rosso}} / \gamma_{\text{bianco}} = 1,10 / 0,68 = 1,6$).



L'effetto interimage si manifesta anche nei materiali positivi. Nel caso di cunei sensitometrici con forti punte di colore (B) si ottiene quindi per la densità cromatica dominante una gradazione più ripida e per le densità cromatiche minori invece una gradazione più piatta che nel caso di una filtratura grigio-neutra (A). Questo fatto va tenuto in considerazione durante l'esame sensitometrico di un eventuale squilibrio cromatico.



Nella pellicola a colori a più strati l'effetto Eberhard si manifesta sempre, anche con un'esposizione uniforme dei tre strati. In genere, si può dire che con strati stesi singolarmente si ottiene una curva di densità cromatica più ripida che mediante una stesura a più strati. In fase di produzione si tiene conto del fatto che sovrapponendo nuovi strati si causa, ad esempio, un appiattimento della gradazione dello strato inferiore ciano.