



SENSITOMETRIA IN B/N

Sommario

Significato e scopi della sensitometria.....	2
Esposizione graduata	2
Parametri operativi.....	3
Curva caratteristica di annerimento.....	4
Contrasto, gamma e gradiente medio.....	9
Influenza dello sviluppo sulla curva caratteristica	11
Latitudine di posa	14
Sensibilità di un'emulsione alla luce.....	16
Diffusione della luce nella stampa e nella proiezione.....	18
Sensitometria del processo di stampa	20
Sensitometro	23

Significato e scopi della sensitometria

Compito generale della sensitometria è la **misurazione della sensitività**; nel campo specifico della fotografia, è la **misurazione della sensibilità di emulsioni e di materiali fotochimici**.

La sua origine risale al processo di annerimento diretto, in cui i toni di grigio erano generati dall'azione immediata della luce, evitando così la fase di sviluppo. Oggi, questo termine è usato in modo più esteso e comprende la descrizione di una pluralità di caratteristiche ed effetti.

La sensitometria non è altro che lo studio del rapporto fra causa ed effetto. Nei procedimenti fotochimici di riproduzione la luce emessa dal soggetto fotografato corrisponde alla causa. L'effetto di questa luce, che va ad impressionare l'emulsione sensibile, consiste nell'annerimento raggiungibile mediante lo sviluppo. Si ottiene un buon risultato quando i rapporti tra la luminosità delle varie parti del soggetto (distribuzione della luminosità) sono tradotti in equivalenti rapporti di annerimento o densità del materiale sensibile.

La sensitometria ci dà la possibilità di definire e descrivere le proprietà fotografiche in termini matematici ed in modo riproducibile e quindi non è importante unicamente per la ricerca scientifica. Nell'industria, infatti, rende possibile un severo ed efficace controllo qualitativo; nei laboratori di sviluppo e di stampa permette di verificare la regolarità della lavorazione e di determinare le migliori condizioni di stampa, traendo i massimi vantaggi dagli impianti tecnici. Inoltre, facendo risparmiare tempo e mezzi, facilita un miglioramento della qualità ed un abbassamento dei costi.

Esposizione graduata

In sensitometria si utilizza come originale una scala di grigi, con un incremento di densità costante e regolare di gradino in gradino e con un gradiente normalmente di $D = 0,30 - 0,15 - 0,10$. In alternativa, si possono utilizzare scale di grigi in cui la variazione di densità per ogni cm lineare è costante.



I **cunei densitometrici** o **cunei fotometrici** permettono di ottenere una luce di intensità variabile, ma non danno ragguagli sull'intensità stessa o sulla durata dell'esposizione; sono un'astrazione della reale distribuzione di densità e servono ad ottenere i dati necessari per lo studio delle caratteristiche dell'emulsione fotografica.

La formazione degli annerimenti è dovuta non solo allo sviluppo, in cui l'alogenuro di argento è ridotto ad argento metallico, ma anche al prodotto dell'illuminamento per il tempo di posa. La scala di esposizioni crescenti si realizza quindi in due modi: con una sorgente di luce di intensità costante eseguendo esposizioni di diversa lunghezza, oppure con luce di intensità variabile esponendo con un tempo di posa costante.

In genere si preferisce il secondo metodo, realizzabile mediante l'uso di un cuneo sensitometrico e gli apparecchi che basano il loro funzionamento su questo principio sono chiamati **sensitometri**.

Il tipo di esposizione, determinato in base alla temperatura di colore della sorgente luminosa, e il tempo di posa vengono adattati all'uso cui è destinato il materiale in esame.

Parametri operativi

L'applicazione della sensitometria è condizionata di caso in caso da specifiche norme.

Un prodotto fotochimico, pellicola o carta sensibile, deve essere qualificato secondo genere, tipo e numero di emulsione. Per l'esposizione occorre stabilire illuminamento, durata e temperatura di colore; per lo sviluppo il tempo di permanenza nello sviluppatore e negli altri bagni, come pure temperatura, tipo di agitazione e composizione chimica dei bagni stessi. In genere è consigliabile attenersi alle istruzioni per l'uso del prodotto in esame indicate dal fabbricante.

Per determinare la densità, sono importanti il tipo di densitometro usato, il suo schema di funzionamento nei confronti della luce (riflessione diffusa o selezionata) ed i filtri per la misurazione. Inoltre è necessaria una descrizione quantitativa della curva di annerimento; ciò consiste nel determinare sensibilità, gradazione, ecc.

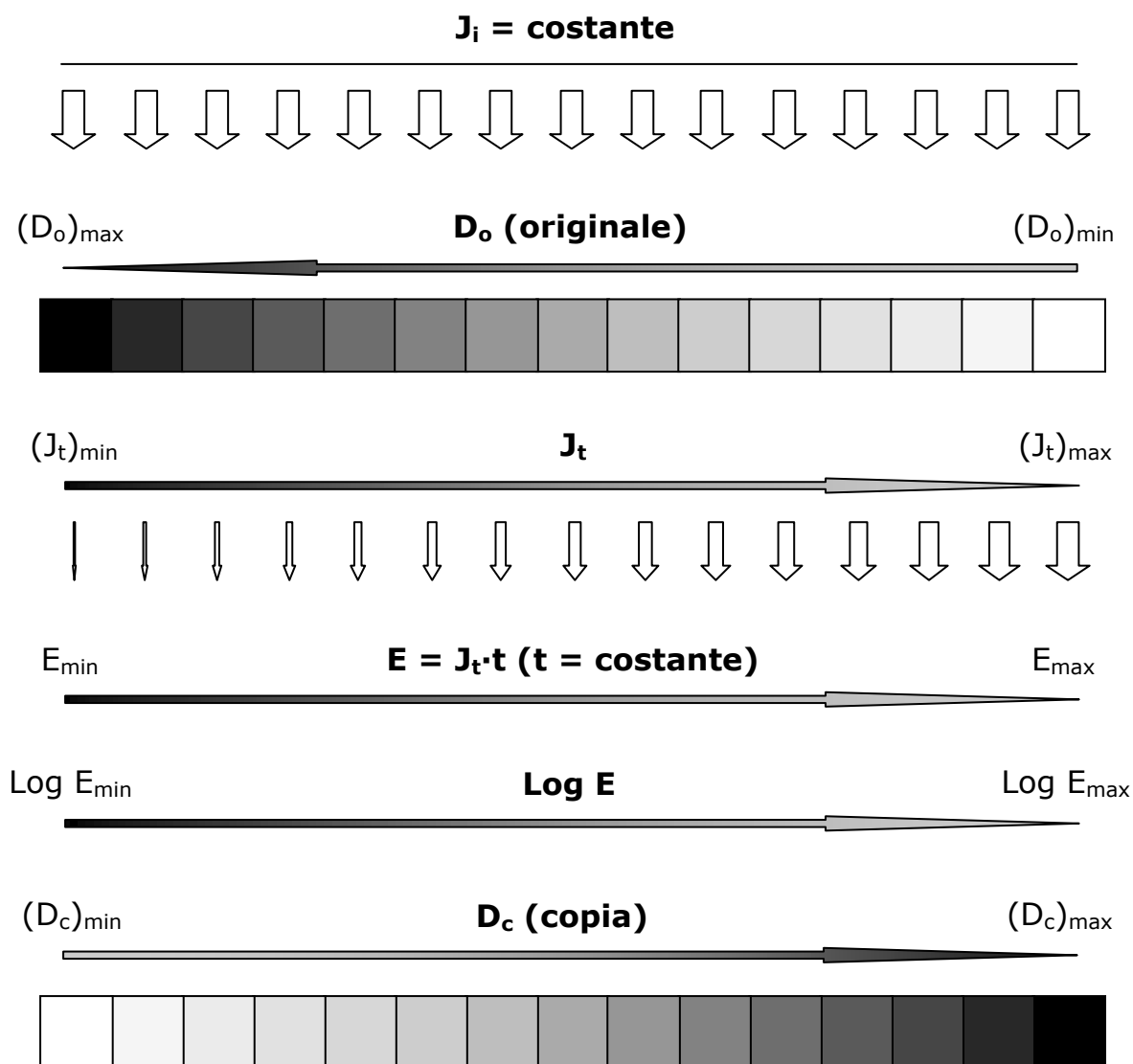
L'enumerazione delle condizioni da prefissare comprende quindi parametri che influenzano formazione, misurazione e descrizione della densità e di altre caratteristiche fotografiche. Dati riguardanti, ad esempio, il contrasto di una pellicola risultano pressoché inutili se non si danno indicazioni sulle

condizioni di lavorazione, sul tempo di posa, sulle modalità di misurazione e sul metodo adottato per determinare il valore gamma.

Si richiama l'attenzione su un'elementare norma di sperimentazione: variare o cambiare sempre e solo un parametro alla volta, e cioè quello la cui influenza è oggetto di studio. Più costanti si manterranno le rimanenti variabili operative, tanto più attendibili saranno i risultati ottenuti. Se invece si cambiano contemporaneamente più parametri o se, in seguito ad un insufficiente controllo, alcuni di essi variano casualmente, allora anche la relazione fra un effetto ed una determinata causa sarà dovuta al caso.

Curva caratteristica di annerimento

Se si assegnano valori diversi di esposizione ad una striscia di pellicola si otterranno, dopo lo sviluppo, opacità e, quindi, densità diverse.

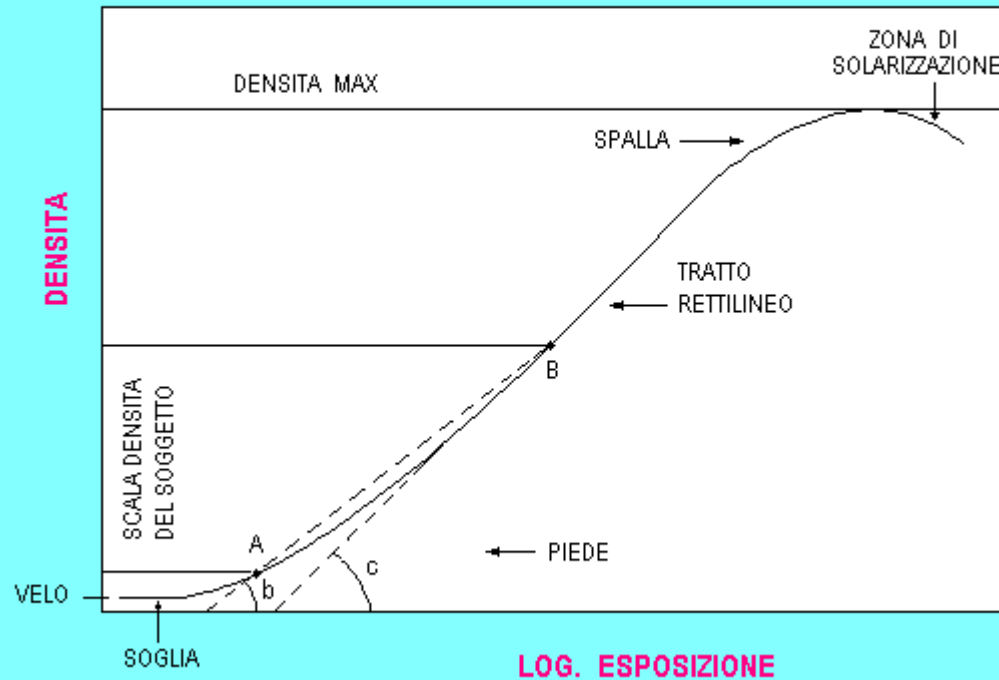


È importante conoscere il valore di densità ottenuto per ogni esposizione. Per avere un grafico con unità di misura omogenee è pertanto necessario riportare sulle ascisse il $\text{Log}E$, anziché il valore aritmetico di E , poiché anche la densità è logaritmica ($D = \text{Log}O$). In tal modo il grafico assume un aspetto semplificato; la curva che ne risulta si definisce **curva caratteristica** o **curva H-D**, dalle iniziali dei nomi dei due primi ideatori, Hurter e Driffield.

Dall'esame della curva emergono tutte le caratteristiche della pellicola (da cui il nome) che, correttamente interpretate, forniranno un gran numero di informazioni.

Nella curva caratteristica si possono distinguere le seguenti zone:

CURVA CARATTERISTICA



Zona di velo o densità minima

Il tratto orizzontale della curva, nella parte sinistra. Le esposizioni date in questa zona non sono sufficienti ad impressionare la pellicola: l'annerimento ottenuto dopo lo sviluppo è dovuto, in minima parte, all'opacità propria della pellicola e, per il resto, all'azione chimica del rivelatore sull'emulsione (velo chimico), cioè allo sviluppo di particelle non esposte. Questa **densità di velo (D_v)** esisterebbe anche sviluppando una pellicola non esposta alla luce e il suo valore dipende dai seguenti parametri: stato di maturazione dell'emulsione, durata e temperatura dello sviluppo, concentrazione e tipologia degli antivelelo presenti nel bagno di sviluppo.

Zona di sottoesposizione o soglia

In questa zona, detta anche **piede**, l'aumento dell'annerimento ottenuto va man mano crescendo, vale a dire che ad un aumento costante dell'esposizione corrisponde un incremento crescente, ma ancora insufficiente, della densità; questo fatto si ripercuote

nella pratica fotografica con un'inesatta riproduzione delle singole densità del soggetto. Proprio qui si ritrovano i dettagli di ombra della riproduzione fotografica. Risulta quindi opportuno determinare la sensibilità del materiale basandosi su questa zona della curva.

Zona di corretta esposizione o tratto rettilineo

In questa zona, a un aumento costante del logaritmo dell'esposizione, corrisponde un aumento costante (direttamente proporzionale) della densità. Vi è quindi proporzionalità tra i logaritmi delle esposizioni e le densità ottenute. Se l'incremento di densità nella riproduzione (ΔD_c) è superiore all'incremento di esposizione ($\Delta \text{Log}E$), si ha una copia più contrastata dell'originale; viceversa, se è minore, sarà meno contrastata o, come si dice, più morbida.

Zona di sovraesposizione o spalla

L'incremento di annerimento, ottenuto in seguito ad incrementi costanti dell'esposizione, in questa zona va man mano diminuendo. Dunque le densità del soggetto non vengono riprodotte correttamente. La curva di annerimento si appiattisce fino ad avere pendenza nulla in corrispondenza della densità massima. Questa non è di alcuna importanza per pellicole negative, ma per i materiali invertibili oppure per quelli positivi indica invece il massimo annerimento ottenibile che contribuisce all'impressione dell'immagine.

Zona di solarizzazione o inversione

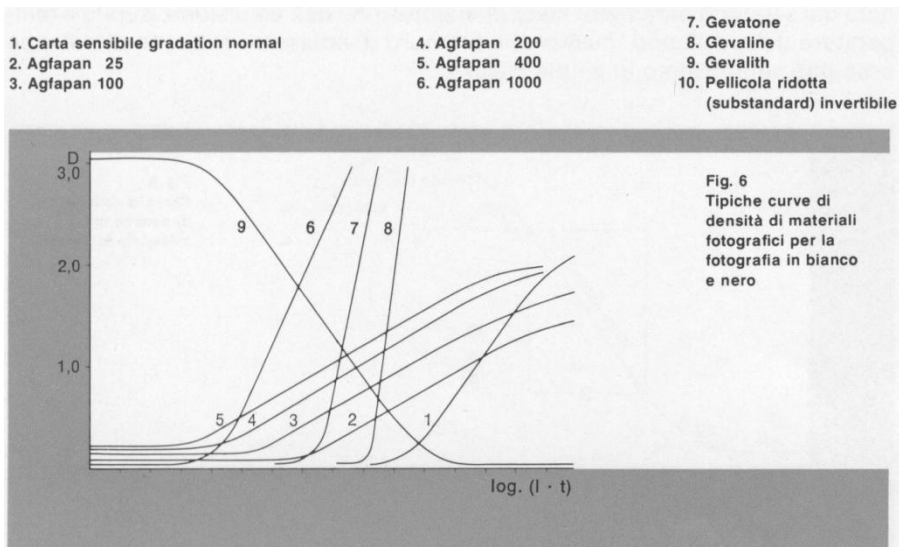
Segue la spalla della curva. In questa zona si ha la distruzione dell'immagine latente formata dai precedenti illuminamenti, con conseguente sbianca dell'immagine. Nelle moderne emulsioni questo fenomeno (effetto Herschel) è difficilmente riscontrabile; viceversa, in passato ed in casi particolari, è stato talmente esaltato da poter essere utilizzato per la preparazione di emulsioni con le quali ottenere direttamente un positivo

da un positivo (pellicole autopositive), grazie all'esposizione preventiva fino alla soglia della solarizzazione. Nelle moderne diapositive, l'inversione dell'immagine si ottiene esponendo regolarmente, sviluppando e quindi distruggendo l'immagine negativa che si forma; in seguito si espone l'alogenuro rimasto, che quindi viene ridotto con formazione di immagine positiva.

Come noto, l'effetto ottico con cui si percepisce la grana dell'emulsione è detto granulosità. La granulosità di un'emulsione si percepisce in modo differenziato nelle diverse zone della curva:

- nei toni chiari, data la scarsa pendenza e quindi il ridotto contrasto, la grana è poco percepibile, anche se l'occhio distingue fino a $D = 0,02$;
- nei toni scuri, l'occhio distingue $D = 0,20$ quando la densità è circa 2;
- nei toni medi la pendenza della curva, e quindi il contrasto, sono massimi, perciò la grana risulta più evidente.

Ordinariamente sulle ascisse del diagramma cartesiano della curva caratteristica, in sostituzione di $\text{Log}E$, si usa porre la densità dell'originale (D_o). In effetti, esponendo attraverso un originale trasparente, negativo o positivo, questo modulerà l'esposizione in relazione alla densità delle sue varie zone (esiste una perfetta reciprocità). Onde non modificare la posizione della curva nel diagramma, se $\text{Log}E$ è crescente da sinistra verso destra, le densità dell'originale dovranno essere crescenti in senso opposto, per cui l'orientamento dell'ascissa che riporta D_o sarà da destra verso sinistra. Sulle ordinate, pertanto, si riporterà la densità della copia o riproduzione (D_c) anziché semplicemente D .



Contrasto, gamma e gradiente medio

La curva caratteristica ci informa anche sul contrasto (differenza di densità) prodotto dalla combinazione pellicola-rivelatore. Più ripida è la curva, più energica è l'azione di questi due fattori.

Anche il contrasto, come gli altri parametri densitometrici, deve essere esprimibile in termini matematici. La grandezza usata per misurarlo è detta **gamma (γ)**.

Il γ di un'emulsione è la tangente trigonometrica dell'angolo formato dalla parte rettilinea della curva con l'asse delle ascisse. L'equazione del gamma (detta anche equazione sensitometrica) è così espressa:

$$\gamma = \Delta D_c / \Delta \text{Log} E$$

da cui si ricava:

$$\Delta \text{Log} E = \Delta D_c / \gamma$$

$$\Delta D_c = \Delta \text{Log} E \cdot \gamma$$

Poiché ad ogni ΔD_o corrisponde un analogo valore di $\Delta \text{Log} E$, si può calcolare il γ anche dai seguenti rapporti:

$$\gamma = \Delta D_c / \Delta D_o = DR_c / DR_o$$

dove la notazione **DR (Density Range, intervallo di densità)** è utilizzabile in alternativa a ΔD .

Queste formule permettono di trovare, conoscendo gli altri fattori, l'esposizione necessaria per ottenere una certa densità o di calcolare l'incremento di densità ottenibile modificando gli altri fattori.

Può verificarsi che il soggetto, per una sua particolare estensione tonale, esca dalla zona rettilinea della curva caratteristica, per entrare, ad esempio, nella zona di sottoesposizione.

Per tale motivo si usa sempre di più, in sostituzione del γ , il **gradiente medio (\bar{G})**.

Quest'ultimo si ottiene unendo con un segmento i due punti limite della posizione del soggetto sulla curva e prendendo poi, come valore del contrasto, la tangente dell'angolo formato da questo segmento con l'ascissa.

L'espressione che rappresenta il gradiente medio è la seguente:

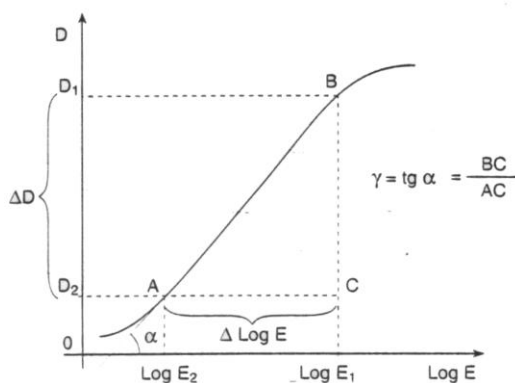
$$\bar{G} = (D_1 - D_2) / (\text{Log} E_1 - \text{Log} E_2)$$

Ricordando le convenzioni precedenti, si potrà scrivere:

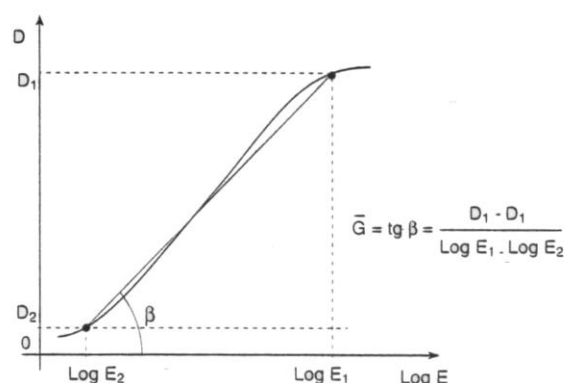
$$\bar{G} = \Delta D_c / \Delta \text{Log} E$$

\bar{G} e γ sono coincidenti nei casi in cui i valori di densità dell'originale si mantengano nella zona rettilinea della curva caratteristica.

Nelle carte fotografiche, \bar{G} sostituisce γ a causa dell'irregolarità della curva caratteristica; ciò si verifica anche nelle moderne pellicole.



Il contrasto massimo (γ) di una curva caratteristica.



Gradiente medio (\bar{G}).

Influenza dello sviluppo sulla curva caratteristica

Per ottenere una variazione della pendenza della curva caratteristica occorre agire sullo sviluppo ovvero sui suoi parametri chimico-fisici.

Parametri fisici:

- tempo,
- temperatura,
- agitazione.

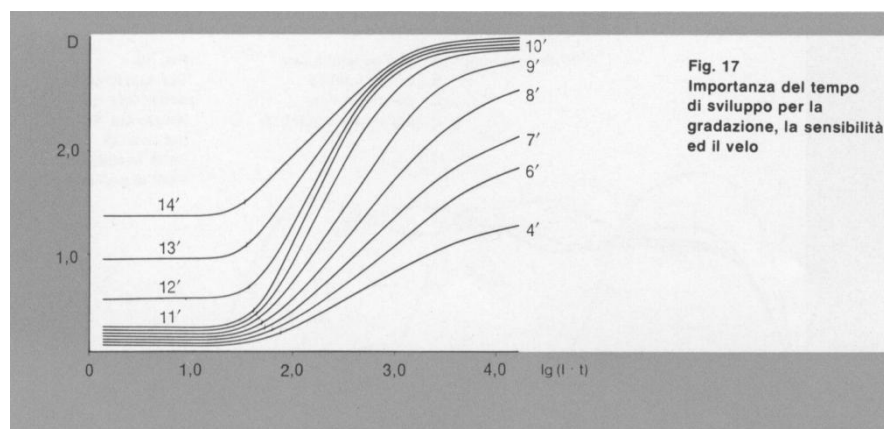
Parametri chimici:

- rivelatore,
- concentrazione,
- pH.

Gli effetti di questi parametri sul γ si possono così riassumere:

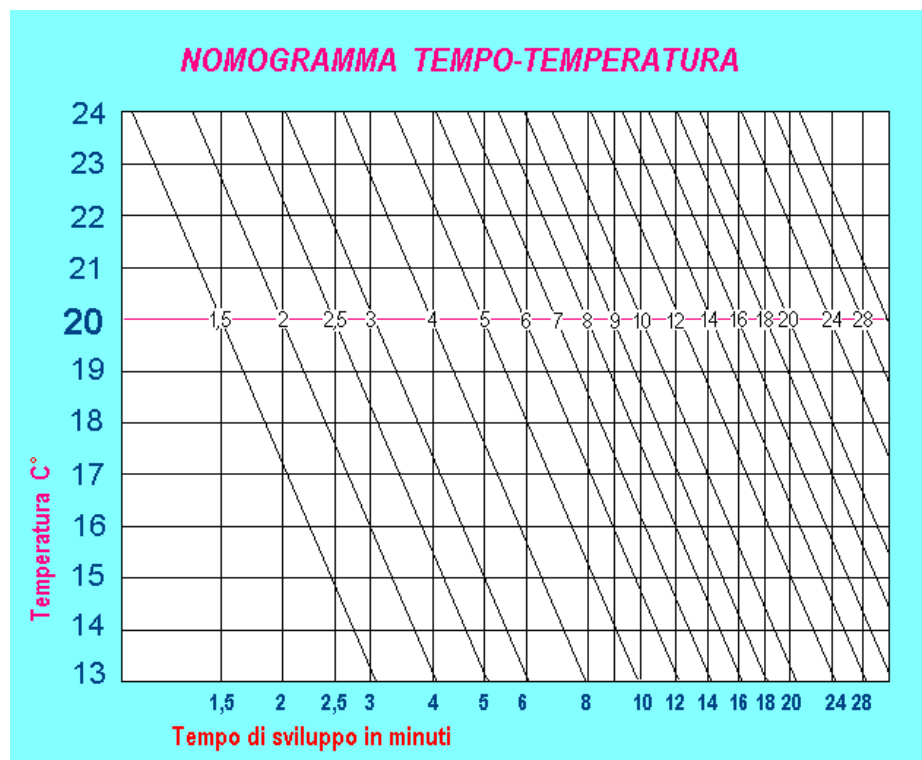
Tempo

Al crescere della durata dello sviluppo, aumenta la quantità di Ag metallico ridotto dal rivelatore in corrispondenza dei cristalli di AgX esposti e quindi la curva diventa più ripida; il γ non varia però proporzionalmente al tempo di sviluppo.



Temperatura

Al crescere della temperatura, aumenta la cinetica dello sviluppo dell'Ag metallico e quindi la curva diventa più ripida; un incremento di 8-10 °C comporta un raddoppio della velocità di reazione rispetto a quella che si ha a temperatura ambiente. Il grafico seguente permette di determinare il tempo di sviluppo in funzione della temperatura del bagno, al fine di mantenere invariato il contrasto; la temperatura di riferimento è pari a 20 °C:



Agitazione

Al crescere dell'agitazione, aumenta il ricambio delle molecole di riducente nella gelatina fotografica e quindi la curva diventa più ripida; l'agitazione può essere manuale (poco precisa e quindi scarsamente affidabile) o meccanica (a elica, per ricircolo, per trascinarsi della pellicola/carta, per insufflazione di azoto, ma non per insufflazione di aria).

Rivelatore

Mentre il fenidone e il metolo sono riducenti a basso contrasto, l'idrochinone è un riducente ad altissimo contrasto, in grado di sviluppare immagini al tratto e quindi con curva estremamente ripida; le miscele di

fenidone e metolo con idrochinone danno contrasti intermedi.

Concentrazione

Al crescere della concentrazione, aumenta la cinetica dello sviluppo dell'Ag metallico e quindi la curva diventa più ripida; il γ non varia però proporzionalmente alla concentrazione del riducente.

pH

Al crescere della basicità della soluzione riducente, aumenta la cinetica dello sviluppo dell'Ag metallico e quindi la curva diventa più ripida; il valore del pH dipende però in una certa misura dal tipo di riducente e non deve essere così elevato da danneggiare l'emulsione.

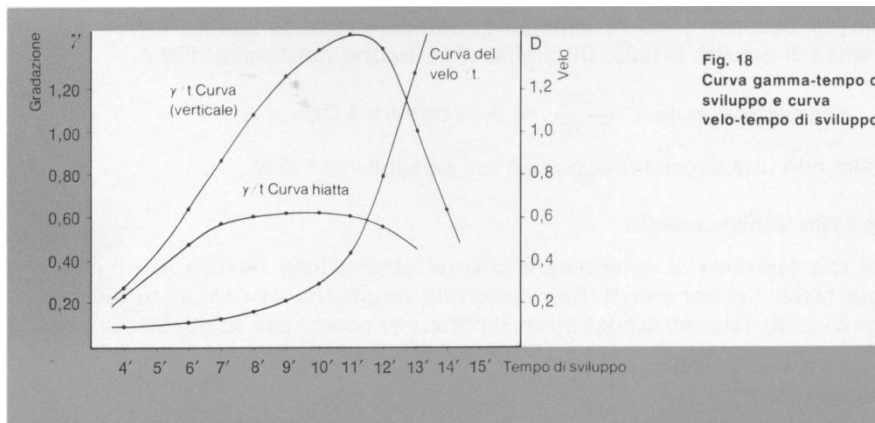
Per controllare l'azione del bagno di sviluppo, e quindi il γ , si preferisce agire sul tempo di sviluppo, mantenendo costanti le altre variabili, in quanto è quello che presenta maggiore tolleranza e più facilità di attuazione, soprattutto in manuale.

Curva tempo-gamma

Per tempi brevi di sviluppo, si osserva che la curva caratteristica si presenta con bassi valori di γ . Ma, all'aumentare del tempo di sviluppo, il piede della curva si sposta verso sinistra (sensibilità più alta), con un leggero aumento del velo e, contemporaneamente, l'andamento della curva diventa più ripido. Il fascio di curve, che risulta in seguito alla variazione della durata dello sviluppo, mostra come la gradazione aumenta dapprima in modo costante tendendo ad un valore massimo γ_{∞} . Anche l'incremento della sensibilità è costante, mentre quello del velo è moderato e discontinuo. Prolungando la durata dello sviluppo oltre la misura necessaria per raggiungere il massimo valore γ si nota come il velo aumenta in modo sproporzionato senza un corrispondente incremento della sensibilità. La gradazione diviene sempre più piatta. Da un punto di vista fotografico un superamento del massimo valore γ appare inutile, poiché si ottengono gradazioni già raggiungibili, con un velo più basso, mediante tempi di sviluppo più brevi. La gradazione ottimale determina come sfruttare la sensibilità in modo ottimale.

Se si pongono in un diagramma i tempi di sviluppo e i valori di γ corrispondenti, si ottiene, per ogni tipo di emulsione, una curva che dà utili

indicazioni sui tempi di sviluppo necessari per raggiungere i γ desiderati per le riproduzioni.



Con le attuali tecniche di trattamento si evita di variare il tempo di sviluppo, poiché ciò porterebbe a complicazioni costruttive e gestionali delle sviluppatrici automatiche; variando invece il γ mediante l'esposizione, le macchine possono funzionare con velocità e tempi di sviluppo costanti.

Latitudine di posa

La curva caratteristica ci fornisce anche informazioni sul comportamento della pellicola nei riguardi dell'esposizione e quindi della riproduzione dei toni dell'originale. Il tratto rettilineo, proiettato sulle ascisse, dà un segmento che rappresenta la capacità della pellicola di vedere in modo corretto la luce. Gli estremi del segmento costituiscono i limiti di esposizione, oltre i quali il materiale non agisce più proporzionalmente; questi due punti estremi rappresentano l'ampiezza o latitudine di posa.

Tale definizione richiede però una precisazione. Teoricamente il valore della latitudine di posa si ottiene tenendo conto sia della proiezione orizzontale del tratto rettilineo sia della gamma tonale del soggetto:

$$LP = \Delta \text{Log} E_{\text{tratto rettilineo}} - \Delta D_o$$

Questa relazione esprime di quanto si può esattamente sovraesporre o sottoesporre la scena ripresa nell'ambito di una corretta riproduzione tonale; nella pratica si opera normalmente un confronto tra due o più tipi di emulsioni a parità di soggetto e quindi si ragiona solo in base al termine $\Delta \text{Log} E_{\text{tratto rettilineo}}$.

Quanto maggiore è la zona di esposizione corretta, tanto maggiore è la latitudine di posa. Nella pratica si sfruttano ampiamente sia la zona di sottoesposizione sia quella di sovraesposizione; talvolta i migliori effetti nelle alte luci e nelle ombre profonde sono possibili solo giocando su dette zone. La latitudine pratica dell'emulsione è quindi notevolmente più ampia della latitudine teorica.

In caso di sottoesposizione, la posizione del soggetto è spostata verso il piede della curva: le zone di ombra non presentano più alte differenze di densità e ciò significa quindi una perdita di dettaglio nelle ombre. In caso di sovraesposizione, sempre con tempo di sviluppo costante, la posizione del soggetto è situata verso la spalla della curva: in questa condizione vengono a mancare i dettagli nelle alte luci.

Molti fattori possono contribuire a determinare la latitudine di esposizione, però la considerazione più importante da fare è che risulta quasi sempre impossibile collocare un'immagine nella zona utile della curva senza sacrificare i dettagli nelle ombre o, in alternativa, i dettagli nelle luci.

La curva ci dice anche i limiti di densità raggiungibili con una data combinazione pellicola-rivelatore. Basta esaminare il segmento che la parte rettilinea proietta sulle ordinate: l'estremo superiore di questo segmento ci informa sulla massima densità ottenibile; se fosse necessaria una densità superiore, occorrerebbe cambiare sviluppo o addirittura pellicola e sviluppo. Il DR non fornisce tutte le indicazioni necessarie per individuare le caratteristiche di una riproduzione.

Un'informazione completa è ottenibile solo utilizzando il gradiente medio (\bar{G}). In pratica, nella maggior parte dei casi, l'intervallo di densità (DR) è un dato sufficiente a far da guida per i vari controlli fotografici. Esso, dando per scontata la proporzionalità di resa dei toni intermedi, ci permette di valutare il gamma della riproduzione:

$$\gamma = DR_c / DR_o$$

In genere la latitudine di posa di pellicole negative è, soprattutto nella zona di sovraesposizione, piuttosto ampia, quella di pellicole invertibili invece è estremamente limitata, poiché per esse – diversamente dal materiale negativo – non è possibile alcuna correzione dei difetti durante la stampa.

Sensibilità di un'emulsione alla luce

Si può definire sensibilità di un'emulsione la sua capacità di produrre annerimenti nelle parti colpite dalla luce. Un'emulsione è tanto più sensibile quanto più è bassa l'esposizione con la quale si cominciano ad ottenere annerimenti crescenti. Un materiale si può definire più sensibile di un altro quando, per un medesimo soggetto, consente un eguale risultato densitometrico con un'esposizione minore. Per ogni sorgente luminosa si deve distinguere l'effetto prodotto sull'occhio umano (effetto luminoso) e quello prodotto su un'emulsione fotografica (effetto attinico).

La sensibilità aumenta con l'aumentare del tempo di sviluppo, però il segmento di ascissa del diagramma della curva caratteristica (compreso tra l'origine degli assi e il punto di inerzia), detto **inerzia**, non varia sostanzialmente con i tempi di sviluppo e pertanto può essere preso come punto di riferimento per misure di sensibilità.

I sistemi di misura della sensibilità delle emulsioni sono: DIN, ASA e °ISO.

Sistema DIN (Deutsches Institut für Normung)

La norma DIN definisce la sensibilità alla luce per pellicole negative in bianco e nero e determina un sistema di misurazione; inoltre, stabilisce le condizioni per indicare la sensibilità alla luce in DIN (tempo di esposizione = 1/50 s; DR = 0,60). I dati DIN indicati dalla casa produttrice valgono quando la pellicola è pronta per l'uso (9 mesi dopo la fabbricazione).

Con il sistema DIN, la sensibilità di una pellicola si calcola attraverso la conoscenza dell'esposizione capace di provocare sulla pellicola in esame un annerimento di 0,1 superiore alla densità di velo. Basterà quindi, nota la curva caratteristica dell'emulsione, leggere sulle ascisse il $\text{Log}E$ corrispondente alla densità sulle ordinate, data da **$D_{\text{velo}} + 0,1$** . Per calcolare la sensibilità DIN si applica la seguente formula (1962):

$$S_{\text{DIN}} = 10 \cdot \text{Log}(1/E) = -10 \cdot \text{Log}E$$

dove E rappresenta l'esposizione minima che garantisce una densità di 0,1 superiore a quella del velo.

Sistema ASA (American Standards Association)

Nel 1960 l'ASA impose ai fabbricanti di materiale sensibile un nuovo metodo di misura della sensibilità. Si assume come base della misura il

valore di esposizione E necessario per ottenere una densità di 0,1 sul velo in una curva caratteristica in cui si abbia un $\Delta D_c = 0,8$ per un intervallo di esposizione $\Delta \text{Log} E = 1,5$. La sensibilità è data dalla relazione:

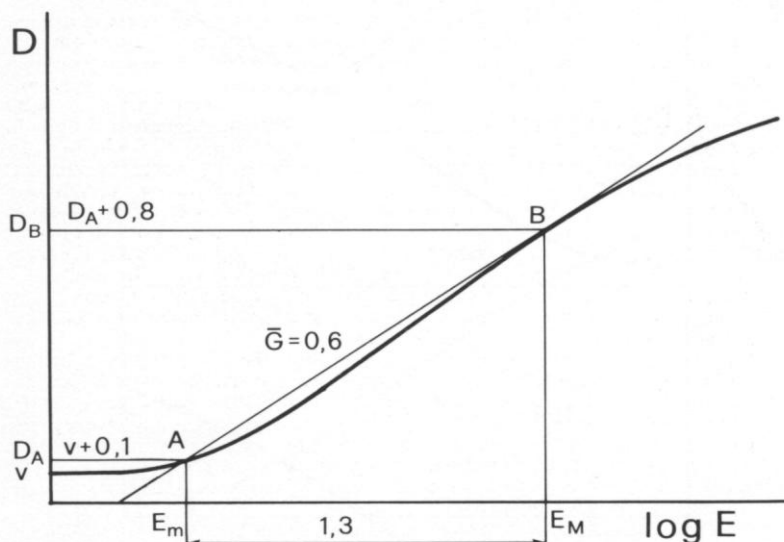
$$S_{ASA} = 0,8 / E$$

Sistema ISO (International Organization for Standardization)

La sensibilità è calcolata in base all'esposizione E minima necessaria per avere una densità di 0,1 sopra il velo, come nelle norme DIN. Però lo sviluppo, con un bagno al metolo-idrochinone, deve essere condotto in modo che la densità in corrispondenza del punto E_{max} (tale che $\text{Log} E_{\text{max}} = \text{Log} E_{\text{min}} + 1,3$), sia superiore di 0,8 alla densità corrispondente a E_{min} . Questo assicura che la densità minima dell'ombra più profonda sia ben al di sopra del velo e che l'intervallo di densità fra l'ombra più profonda e la massima luce in un soggetto di contrasto normale sia non superiore a 0,8.

La scala ISO riunisce i valori ASA e DIN. Per esempio, una pellicola di sensibilità 100 ASA, cioè 21 DIN, si esprime, nella nuova convenzione, in questo modo: 100/21 °ISO.

Dalla tabella si può rilevare che ad ogni raddoppio di ASA corrisponde un aumento di 3 unità DIN.



Corrispondenza tra le scale di sensibilità					
DIN	ASA	°ISO	DIN	ASA	°ISO
1	1	1/1	19	64	64/19
2	1,2	1,2/2	20	80	80/20
3	1,6	1,6/3	21	100	100/21
4	2	2/4	22	125	125/22
5	2,5	2,5/5	23	160	160/23
6	3	3/6	24	200	200/24
7	4	4/7	25	250	250/25
8	5	5/8	26	320	320/26
9	6	6/9	27	400	400/27
10	8	8/10	28	500	500/28
11	10	10/11	29	650	650/29
12	12	12/12	30	800	800/30
13	16	16/13	31	1000	1000/31
14	20	20/14	32	1250	1250/32
15	25	25/15	33	1600	1600/33
16	32	32/16	34	2000	2000/34
17	40	40/17	35	2500	2500/35
18	50	50/18	36	3200	3200/36

Diffusione della luce nella stampa e nella proiezione

Nelle fasi della ripresa, dell'ingrandimento o della proiezione la luce diffusa causa un'attenuazione dei contrasti. Le pareti interne della macchina, la superficie della pellicola e degli obiettivi, i filtri sporchi, una schermatura insufficiente nel caso di controllo (rimedio: parasole) sono tutte cause di diffusione della luce. L'intervallo di densità dell'immagine viene ridotto, poiché l'intervallo di luminosità (misurato sul piano dell'immagine all'interno dell'apparecchio fotografico) sarà minore di quello reale (misurato davanti allo stesso apparecchio). Anche migliorando la trasmissione luminosa

attraverso le lenti degli obiettivi non si potrà mai avere meno del 2% di luce diffusa.

Il contenuto stesso dell'immagine ha grande importanza per la diffusione della luce durante la ripresa, la proiezione e la stampa, poiché le parti più luminose del soggetto rischiarano quelle più scure.

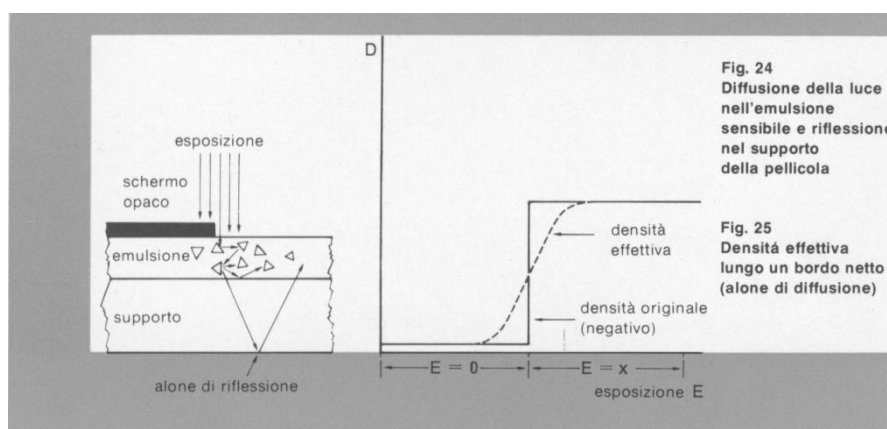
In genere, nelle riprese in esterni (mare, montagna, ecc.), la luce diffusa ha un'influenza maggiore che nella ripresa di interni.

Nel caso delle pellicole negative il fenomeno si manifesta durante l'ingrandimento (ma non nella stampa a contatto) provocando un appiattimento delle luci. Mediante un ingranditore a condensatore per la luce e mediante obiettivi puliti e di buon rendimento si ottiene un'immagine più contrastata di quella che si ha utilizzando un ingranditore a diffusore. Inoltre si possono coprire nel piano della carta sensibile o nel piano del negativo le parti secondarie dell'immagine con una maschera nera così da evitare sovrailluminazioni.

Rapporto fra nitidezza e diffusione della luce e del rivelatore

La diffusione della luce sulla superficie dei cristalli di alogeno di argento all'interno dell'emulsione sensibile causa una separazione sfumata fra due zone di diversa densità. Se esponiamo una pellicola alla quale è sovrapposto uno schermo con bordo netto, otteniamo dopo lo sviluppo un'immagine con margine diffuso.

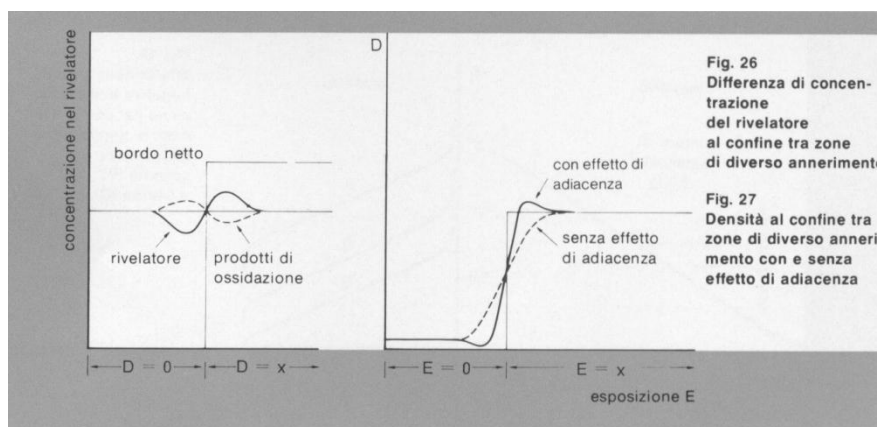
La scarsa nettezza della separazione dipende dalla granulosità, dalla concentrazione del bromuro di argento, dallo spessore dello strato sensibile e dalla lunghezza d'onda della luce. In pellicole a colori a più strati la nitidezza è minore negli strati inferiori e per questo si formano bordi colorati lungo tutti i contorni.



L'**effetto Eberhard**, o **effetto di adiacenza**, compensa almeno in parte la scarsa nitidezza causata dalla diffusione della luce; la sua azione è basata

sulla differenza di concentrazione del rivelatore al confine tra zone di diverso annerimento. Nella parte più esposta, infatti, il rivelatore è consumato più rapidamente ed è in difetto. Si ha quindi un immediato richiamo di rivelatore dalla zona meno esposta. I prodotti di ossidazione, in particolare gli ioni di bromuro percorrono il cammino inverso, poiché sono presenti in maggiore quantità nella parte più annerita.

Mentre la forte concentrazione di rivelatore incrementa la densità nella zona più esposta, la concentrazione di prodotti di ossidazione impedisce a tal punto lo sviluppo nelle parti meno annerite da abbassare anche il velo. L'aumento del contrasto lungo la linea di separazione delle due zone porta di conseguenza ad un'esaltazione dell'acutanza.



L'effetto di adiacenza dipende dal grado di sviluppo dell'emulsione, dallo spessore dello strato e della composizione del rivelatore. Un'opportuna agitazione della pellicola durante lo sviluppo porta ad un miglioramento della nitidezza, poiché anche questa variabile operativa influenza la differenza di concentrazione del rivelatore.

Nella fotografia a colori è di grande importanza l'effetto Eberhard verticale (o effetto interimmagine) il quale si manifesta tra gli strati, cioè in senso verticale, ed aumenta la saturazione dei colori.

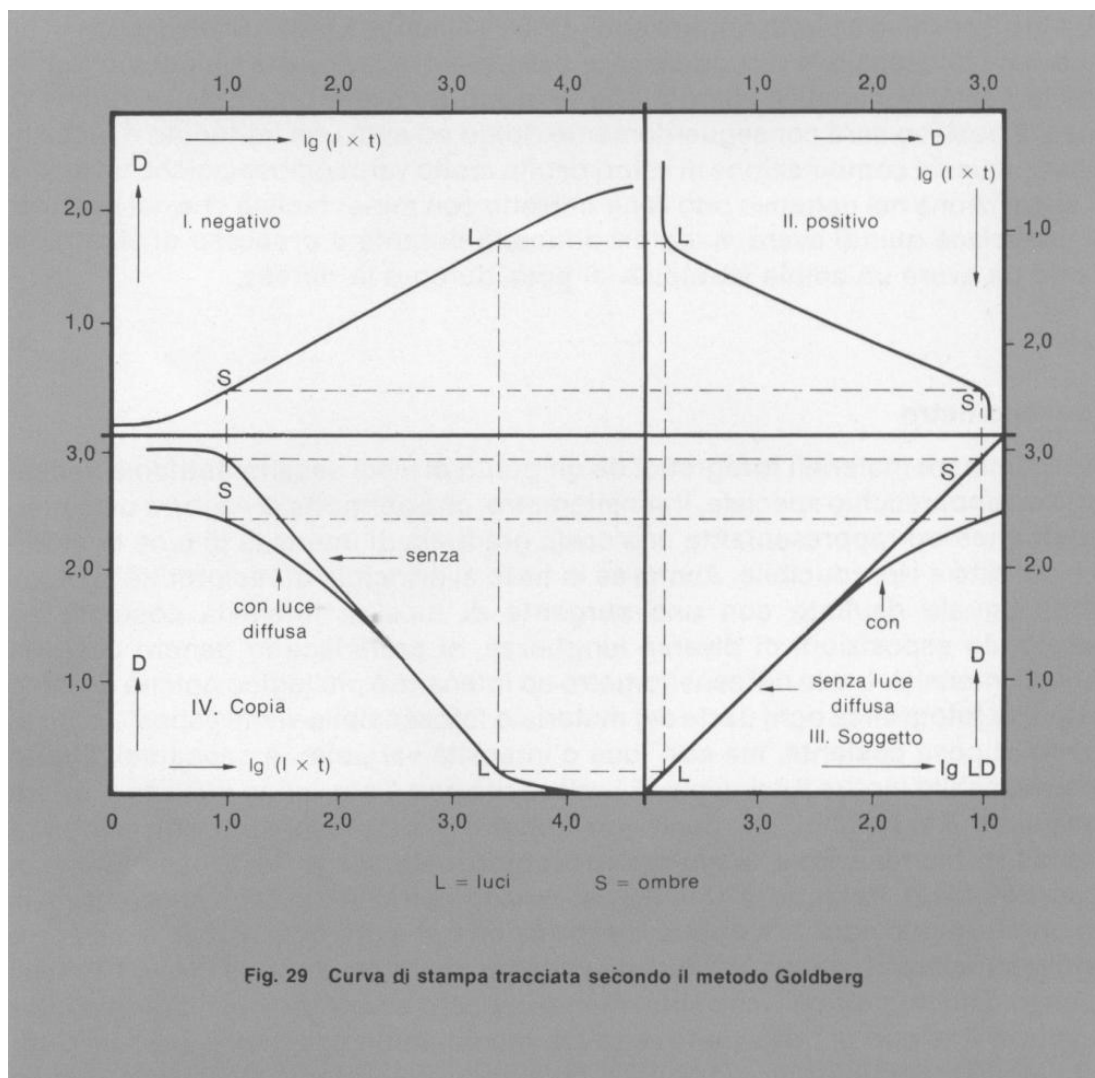
Sensitometria del processo di stampa

Tralasciando il fenomeno di diffusione luminosa, si può affermare che una gradazione della copia del processo negativo - positivo, oppure della diapositiva nel processo di inversione, con $\gamma = 1,0$ corrisponde ad una riproduzione corretta del contrasto di luminosità del soggetto. Studiando il processo di stampa da un punto di vista sensitometrico si espone il soggetto, cioè il cuneo fotometrico, a contatto con il negativo; quest'ultimo

a sua volta è stampato a contatto con una pellicola positiva. Durante questo procedimento l'effetto della luce diffusa è pressoché irrilevante.

L'immagine risultante dal processo di stampa è basata sulla combinazione fra materiale positivo e materiale negativo. Le densità di quest'ultimo determinano l'esposizione del positivo.

Conoscendo, per determinate condizioni di lavorazione, le curve caratteristiche di un negativo e di un positivo, si può stabilire matematicamente o graficamente la distribuzione di luminosità nell'immagine positiva. Conseguentemente, se si conosce il negativo (positivo), si riesce anche a determinare la forma della curva e la gradazione ottimale per il positivo (negativo), ottenendo la funzione di riproduzione ideale.



Nel grafico tracciato secondo il metodo Goldberg si riporta nel primo quadrante la curva di annerimento del negativo. L'asse orizzontale, cioè quello delle esposizioni, è determinato dal soggetto o, per meglio dire, dal

cuneo fotometrico. Poiché le densità del negativo condizionano l'esposizione del positivo, l'asse-esposizione di quest'ultimo è parallelo all'asse-densità del negativo e subisce quindi una rotazione di 90°. Anche questa seconda curva caratteristica nasce dallo stesso cuneo densitometrico usato per il negativo. Nel terzo quadrante si rappresenta il soggetto stesso che, in sensitometria, equivale al cuneo fotometrico. In densità e in luminosità, esso aumenta in modo lineare ed ha quindi il gradiente $\gamma = 1,0$.

Si proietti ora ogni punto di densità del negativo sui valori di densità del positivo, e questi ultimi sui valori di densità del soggetto. Si prolunghi quindi la perpendicolare dalle densità del negativo sull'asse orizzontale e si proietti ortogonalmente su di essa i valori di densità del soggetto. I punti così ottenuti corrispondono ai valori di densità nella copia, cioè la riproduzione della luminosità del soggetto. Se quest'ultimo ha il gradiente 1 allora anche la funzione di riproduzione, o la curva di stampa, dovrebbe avere lo stesso valore gamma.

Matematicamente ciò è possibile se:

$$\gamma_{\text{negativo}} \cdot \gamma_{\text{positivo}} \cdot \gamma_{\text{soggetto}} = 1,0$$

In genere, nel processo negativo-positivo, i materiali fotografici rispondono a questa esigenza solo nel tratto rettilineo della curva di annerimento. Nelle zone di sovraesposizione e di sottoesposizione l'appiattimento della curva, dovuto alla forma a S, causa, particolarmente nel caso di ampi intervalli di luminosità nel soggetto, una minore nitidezza nei dettagli. Pellicole positive consentono un intervallo di luminosità di 1:1.000 (corrispondente ad una latitudine di posa di 3,0 unità logaritmiche) e rispondono quindi meglio ai requisiti posti da Goldberg che non, le carte sensibili. Queste ultime, infatti, hanno una latitudine di posa di 1:50 (1,7 unità logaritmiche) e frequentemente non possono registrare l'intera gamma di toni del soggetto. Nel tracciato sensitometrico del grafico di stampa il soggetto, cioè il cuneo fotometrico, ha gradiente $\gamma = 1,0$; per questo si trascurava sovente questo fattore semplificando così la regola di Goldberg:

$$\gamma_{\text{negativo}} \cdot \gamma_{\text{positivo}} = \gamma_{\text{copia}}$$

Occorre però considerare i fattori che diminuiscono il contrasto del soggetto durante il processo fotografico. Nel terzo quadrante è stato incluso il fattore di diffusione della luce, che entra in gioco durante la ripresa e rischiarava gli

annerimenti più intensi. Durante l'ingrandimento la luce diffusa appiattisce le luci.

Poiché una riproduzione ottimale è principalmente determinata dal prodotto tra il γ negativo ed il γ positivo, non dovrebbe essere di alcuna importanza se il negativo è ripido quando il positivo è piatto oppure viceversa. La latitudine di posa di un materiale fotosensibile è condizionata dalla sua gradazione; è quindi più logico che le pellicole negative siano piatte in modo da avere un'ampia latitudine di posa. Il positivo sarà conseguentemente ripido ed avrà una latitudine di posa limitata. Questa combinazione di valori risulta molto vantaggiosa, poiché un errore di esposizione nel negativo può essere corretto con minor facilità che nel positivo. Si preferisce quindi avere maggiori difficoltà durante il processo di stampa in modo da avere un'ampia latitudine di posa durante la ripresa.

Sensitometro

Per esaminare materiali fotografici da un punto di vista sensitometrico è necessario un apparecchio speciale, il sensitometro, che permette di esporre un cuneo densitometrico rappresentante una scala graduata di intensità di luce in modo ben definito e riproducibile. Anche se in base al principio di reciprocità si otterrebbe uguale risultato con una sorgente di luce di intensità costante ed eseguendo esposizioni di diversa lunghezza, si preferisce in genere usare la scala di intensità. L'uso del sensitometro ad intensità è più logico, poiché durante la ripresa fotografica ogni parte del materiale fotosensibile è esposta con un tempo di posa costante, ma con luce di intensità variabile. A causa dell'effetto Schwarzschild inoltre il principio di reciprocità non è più valido quando si opera con pose molto lunghe. Solo per il sensitometro DIN si prescrivono con esattezza intensità di illuminazione, temperatura di colore della sorgente di luce e tempo di posa (DIN 4512). Per tutte le altre analisi sensitometriche è sufficiente adattare la temperatura di colore e la durata di esposizione al materiale in esame. Occorre però mantenere costanti tutte queste variabili operative durante l'intera analisi. Il cuneo densitometrico viene solitamente esposto a contatto con il materiale fotosensibile. Il tempo di posa è regolato mediante un otturatore a tendina oppure mediante una fessura che scorre assieme alla lampada sulla superficie del cuneo fotometrico scivolandovi sopra per tutta la sua lunghezza. Sono anche in uso apparecchi che fanno muovere il cuneo fotometrico ed il materiale in esame, tenendo immobili fessura e fonte luminosa.

Utilizzando la sensitometria solo per il controllo della qualità di sviluppo, si può far uso di strisce di controllo già esposte che vengono fornite dai produttori di materiale fotosensibile; non sarà così più necessario avere un proprio sensitometro e l'occorrente necessario per il suo impiego.

Struttura dell'apparecchio

I sensitometri sono costituiti essenzialmente da 4 parti:

- una sorgente luminosa ad intensità e a composizione spettrale nota;
- un supporto che regge il campione sensibile per l'esposizione per contatto;
- un modulatore di esposizione che consente l'esecuzione di esposizioni con illuminamenti regolarmente crescenti, mantenendo il tempo di esposizione costante; è costituito da un cuneo di cristallo grigio oppure da una pellicola fotografica riproducendo una scala di grigi (l'incremento di densità tra gradini adiacenti è detto **costante di gradino**),
- un eventuale densitometro integrato.





Il materiale sensibile manifesta un comportamento molto diverso, dipendente dal tipo di luce (sorgente ad incandescenza, a luminescenza, luce naturale, ecc.) utilizzato. Si usano come sorgenti lampade tarate ed accuratamente controllate, capaci di fornire un illuminamento costante.

Sviluppo della scala sensitometrica

Il campione di materiale sensibile esposto nel sensitometro deve essere sviluppato in un modo che sia il più vicino possibile a quello con il quale sarà trattato il materiale nelle condizioni di lavoro. Uno stesso materiale, sviluppato in soluzioni di composizione diversa, dà risultati diversi. Come noto, la composizione del rivelatore, il tempo di sviluppo, l'agitazione, la durata e la natura dell'arresto, le condizioni di essiccazione, ecc. influenzano il risultato dello sviluppo.

Mediante la misura delle densità ottenute sulla scala sensitometrica, per un certo tipo di materiale, in relazione alle esposizioni fornite, si costruisce la curva caratteristica, disponendo le densità nell'asse delle ordinate e il logaritmo dell'esposizione in quello delle ascisse.

In genere, le case produttrici forniscono queste informazioni per ogni tipo di pellicola.