

Collana
I TALENTI

*metodologie, tecniche e formazione
nel mondo del restauro*

Collana diretta da Paolo Cremonesi

Luciano Residori

con contributi di
Giovanni Ettore Gigante
Matteo Placido
Maura Zacchi

FOTOGRAFIE
MATERIALI FOTOGRAFICI
PROCESSI E TECNICHE
DEGRADAZIONE
ANALISI E DIAGNOSI



il prato

A mio padre

*L'ombra, nominata per il proprio suo vocabolo, è da esser chiamata
alleviazione di lume applicato alla superficie de' corpi, della quale il principio
è nel fine della luce, ed il fine è nelle tenebre*

Leonardo Da Vinci, *Trattato della pittura*



INDICE

Prefazione	p. 9
<i>Capitolo I.</i>	
<i>Struttura e composizione (L. Residori)</i>	<i>p. 11</i>
<i>Capitolo II.</i>	
<i>Processi ad annerimento diretto e a sviluppo (L. Residori)</i>	<i>p. 59</i>
<i>Capitolo III.</i>	
<i>Sensitometria, qualità dell'immagine ed effetti fotografici (G. E. Gigante, L. Residori)</i>	<i>p. 91</i>
<i>Capitolo IV.</i>	
<i>Procedimenti e tecniche</i>	<i>p. 117</i>
ESEMPLARI UNICI (L. Residori, M. Zacchi)	p. 117
- Dagherrotipo	p. 117
- Ambrotipo	p. 127
- Ferrotipo	p. 130
NEGATIVI SU CARTA (L. Residori)	p. 132
LASTRE DI VETRO (L. Residori)	p. 135
- Lastre di vetro all'albumina	p. 135
- Lastre di vetro al collodio	p. 137
- lastre di vetro alla gelatina	p. 142
PELLICOLE (L. Residori)	p. 147
- Pellicole in bianco e nero	p. 147
- Pellicole diazo e vescicolari	p. 155
STAMPE (L. Residori)	p. 157
- Stampe su carta salata	p. 157
- Sarte all'albumina	p. 159
- Carte da stampa emulsionate ad annerimento diretto	p. 162
- Carte gas-light	p. 164
- Carte da stampa a sviluppo emulsionate con gelatina	p. 165
FOTOGRAFIE A COLORI	p. 169
- Il colore (G. E. Gigante)	p. 169
- Fotografie a colori (L. Residori)	p. 184
- Autocromie (L. Residori)	p. 188
- Negativi a colori (L. Residori)	p. 190
- Diapositive a colori (L. Residori)	p. 193
- Stampe a colori (L. Residori)	p. 197

Capitolo V.

Fattori e processi di degradazione chimici e fisici (L. Residori) p. 205

Capitolo VI.

Analisi, diagnosi e ricerca scientifica (M. Placido) p. 235

Appendice I. La carta (L. Residori) p. 265

Appendice II. Materie plastiche (L. Residori) p. 279

Appendice III. Processi di degradazione della carta (L. Residori) p. 283

Tavole a colori p. 287

Prefazione

Nel 2000 si concretizzò il progetto del Centro di fotoreproduzione legatoria e restauro degli Archivi di Stato CFLR relativo alla pubblicazione del volume “Chimica e biologia applicate alla conservazione degli archivi”, Pubblicazioni degli Archivi di Stato, saggi 74. Alcuni articoli trattavano delle tecniche fotografiche, della struttura e composizione dei loro materiali, delle loro caratteristiche, dei processi di degradazione e degli aspetti conservativi. Una certa esperienza su questi argomenti era del resto maturata da tempo, sia grazie all'attività del Laboratorio di fotoreproduzione del CFLR per la ripresa, il trattamento ed il controllo di qualità delle pellicole microfilm prodotte ai fini della sicurezza, sia grazie alle numerose richieste di consulenza da parte di archivi e soprintendenze archivistiche in tema di conservazione delle fotografie storiche.

Questo rinnovato interesse di allora degli istituti archivistici per le fotografie storiche è stato fondamentale per la promozione di numerose iniziative avviate dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali, tra cui un “Corso sperimentale sulla fotografia” articolato in 10 moduli, con parti teoriche e pratiche, grazie alla collaborazione di diversi Istituti del Ministero per i Beni e le Attività Culturali MIBAC (CFLR, ICCD, ICPL, ING) e quella dell'Università degli Studi di Roma 1, “La Sapienza” (Dip. Fisica).

Il Programma SEPIA (Safeguarding European Photographic Images for Access), coordinato dall' ECPA (European Commission on Preservation and Access), ha avuto una edizione seminariale (Roma, 27-29 ottobre 2003) organizzata dal Centro di fotoreproduzione legatoria e restauro e dall'Associazione Nazionale Archivistica Italiana, in collaborazione con Fondazione italiana per la fotografia, l'Istituto centrale per il Catalogo e la Documentazione, l'Istituto Nazionale della Grafica e l'Università degli Studi di Roma 1 “La Sapienza” (Dip. Fisica). Gli atti del seminario sono stati pubblicati nel volume “La digitalizzazione per la salvaguardia degli archivi e delle collezioni fotografiche”, Roma, ANAI, 2005.

Personalmente, la collaborazione con l'Università “La Sapienza” di Roma, Corso di laurea in Conservazione per i Beni Culturali e la Diagnostica per la loro Conservazione, mi ha permesso di maturare, con l'insegnamento di “Tecniche e conservazione delle fotografie” e l'attività di tirocinio finalizzata alle tesi di laurea (alcune sui materiali fotografici), di rivedere quanto fatto a suo tempo nel volume citato “Chimica e biologia...” cambiando, integrando, aggiungendo parti o argomenti per realizzare questo primo volume aggiornato dedicato alle fotografie, con un punto di vista prevalentemente scientifico, dato il contesto in cui l'insegnamento si tiene (Facoltà di Scienze M.F.N.). Per la realizzazione di questo volume devo molto alla disponibilità della d.ssa

Patrizia Ferrara della Direzione Generale per gli Archivi - Dirigente Servizio I, la quale ringrazio per avermi concesso l'autorizzazione a riutilizzare quanto da me già scritto nel volume "Chimica e biologia..."; diversamente, il mio lavoro sarebbe stato certamente più gravoso ed avrebbe richiesto tempi decisamente più lunghi. Voglio qui ringraziare il Prof. Giovanni Ettore Gigante per il suo prezioso contributo sulla sensitometria, la qualità dell'immagine ed il colore, ma non solo per questo. Considero, infatti, quanto ha voluto fare un segno di amicizia che mi è servito da stimolo costante in tutto il periodo dedicato a queste scritture. Ringrazio vivamente il dr. Matteo Placido per essersi dedicato a scrivere la sezione sull'analisi e la diagnostica. Ringrazio, inoltre, la d.ssa Maura Zacchi per avere collaborato con me nella scrittura della parte relativa agli esemplari unici (dagherrotipi, ambrotipi, ferrotipi), arricchendo l'argomento con dettagli importanti. Ringrazio il Prof. Camillo La Mesa dell'Università degli Studi di Roma I "La Sapienza" (Dip. Chimica) per alcune necessarie verifiche, per le quali ha voluto trovare il tempo necessario, nonostante i suoi pressanti impegni. Non posso dimenticare che quanto è stato prodotto è dovuto anche alla tranquillità che i miei colleghi Sig.ra Lorena Botti, dr. Matteo Placido e dr. Daniele Ruggiero hanno saputo darmi liberandomi da molte preoccupazioni diverse da queste. Ringrazio il sig. Antonino Magliolo ed il dr. Daniele Ruggiero per la revisione puntuale del testo.

Sinceraente ringrazio la d.ssa Cecilia Prosperi per il suo sostegno concreto nello svolgimento di questo lavoro.

Con tanto affetto e gratitudine ringrazio la d.ssa Gigliola Fioravanti la quale, durante il periodo della sua direzione del CFLR, ha saputo efficacemente stimolare le attività di ricerca e formazione, in particolare sui materiali di archivio non tradizionali tra cui, appunto, le fotografie.

Il volume vede la luce oggi, quando, in seguito all'ultima riorganizzazione del Ministero per i beni e le Attività Culturali MIBAC, l'Istituto centrale per la Patologia del Libro ed il centro di Fotoriproduzione Legatoria e Restauro degli Archivi di Stato si sono fusi in un unico istituto denominato Istituto Centrale per la Conservazione e il Restauro del patrimonio Archivistico e Librario (ICCRPAL) con sede in via Milano 76, Roma. L'ICCRPAL è oggi diretto dalla d.ssa Armida Batori (peraltro già direttrice dell'ICPL), la quale, nonostante le difficoltà derivanti dalla ristrutturazione, ha cercato di rendere la nostra attività quanto più serena possibile. La ringrazio vivamente per questo e per quanto ancora potrà e vorrà fare.

Infine, voglio ringraziare l'Editore per l'opportunità e la fiducia; il rapporto sincero e cordiale ha reso, inoltre, il lavoro più facile e più bella questa esperienza.

Luciano Residori

Capitolo III

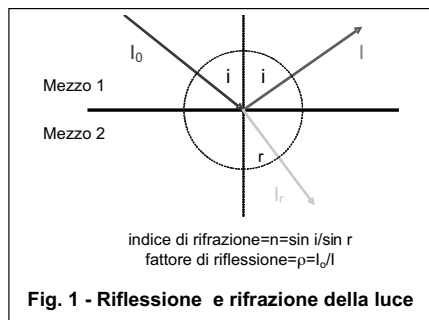
Sensitometria, qualità dell'immagine ed effetti fotografici

Giovanni E. Gigante, Luciano Residori

LUCE E MATERIA

Per poter meglio affrontare la discussione sulle caratteristiche fisiche dei materiali fotografici è necessaria la conoscenza di qualche elemento fondamentale sulla luce, le sue interazioni con la materia, le grandezze e le unità di misura fotometriche.

La luce è una radiazione elettromagnetica di frequenza relativamente elevata in quanto si colloca al centro dello spettro elettromagnetico; essa è anche una forma di energia. La natura di questa radiazione elettromagnetica è ben espressa dal fatto che la sua propagazione può essere ben rappresentata da segmenti, approssimazione dell'ottica geometrica, che permettono la schematizzazione dei fenomeni di interazione più caratteristici cioè la riflessione e la rifrazione⁶⁴ (fig. 1).



È opportuno sottolineare che la radiazione visibile è una sua piccola frazione quella che ha la proprietà di poter essere percepita dall'occhio umano: essa va da 380 a 750 nm. Lo spettro visibile va dal rosso al

⁶⁴ L'indice di rifrazione è relativo, cioè è quello del secondo mezzo rispetto al primo; soltanto nel caso in cui il primo mezzo è il vuoto l'indice di rifrazione del secondo mezzo si dice assoluto.

violetto per cui la radiazione con lunghezza d'onda maggiore del rosso viene chiamata infrarosso e quella con minore del violetto ultravioletto.



Tav. VII - Spettro del visibile

Come lo spettro del visibile può essere suddiviso in varie bande, sulla base dei colori ad esse associate, la radiazione infrarossa viene comunemente suddivisa in infrarosso vicino e lontano. Anche la radiazione ultravioletta è suddivisa in bande. In fig. 2 è riportato in schema lo spettro elettromagnetico. A seconda delle loro caratteristiche i materiali fotografici sono più o meno sensibili alla luce dei vari intervalli dello spettro dall'infrarosso all'ultravioletto.

La luce è composta di quanti elementari (fotoni) di energia crescente con la frequenza dell'onda elettromagnetica ($E=h\nu$). Questo ha un notevole significato in fotografia in quanto spiega come avviene l'esposizione della pellicola: il meccanismo di interazione coinvolge un atomo di argento ed un singolo fotone che lo modifica nell'interazione. In una zona più scura della fotografica sono avvenute un numero maggiore di singole interazioni tra fotoni e atomi, appartenenti ai grani sensibili presenti nell'emulsione fotografica. Il processo con cui i fotoni incidono sulla pellicola è casuale per cui non è possibile sapere con assoluta precisione quanti grani di argento saranno coinvolti, in quanto, per la stessa quantità di energia radiante che incide sulla pellicola, vi potrebbe essere una variazione di tale numero.

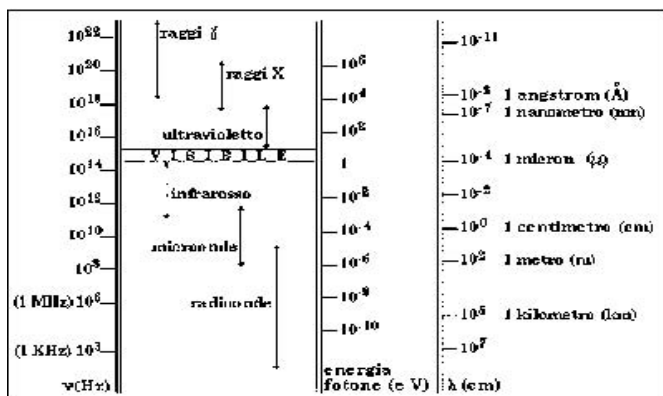


Fig. 2 - Spettro elettromagnetico

Ovviamente tale numero è costante in media per una stessa esposizione della pellicola. Un altro aspetto interessante è che fotoni di energia diversa hanno differente probabilità di interagire. Se definiamo l'efficienza⁶⁵ della pellicola di intercettare un fotone di una certa energia come il rapporto tra numero di fotoni che interagiscono con la pellicola (N_{riv}) su quelli totali che su di essa incidono (N_{inc})

$$\hat{a}(\lambda) = \frac{N_{riv}}{N_{inc}}$$

una conseguenza di questo fatto è che, per una data intensità di luce, vi è un annerimento della pellicola differente a seconda dello spettro della radiazione incidente. Ad esempio, supponiamo che l'efficienza per fotoni nel verde sia maggiore di quella dei fotoni nel rosso, allora la stessa quantità complessiva di luce avrà maggior effetto se verde piuttosto che rossa. Questa proprietà delle pellicole, come anche dell'occhio umano, produce la possibilità di discriminare i colori. Infatti un oggetto colorato apparirà, anche in una fotografia in bianco e nero, caratterizzato da diverse tonalità in quanto cambierà l'efficienza quantica dei diversi fotoni di luce. Naturalmente questo fenomeno è fortemente amplificato nelle pellicole a colori con l'uso di pigmenti che rendono alcuni strati dell'emulsione più sensibili a fotoni di una certa banda di colore e per nulla sensibili a quelli delle altre bande.

GRANDEZZE FOTOMETRICHE

Le grandezze fotometriche sono delle misure definite a partire dalle grandezze radiometriche mediante pesatura con la curva di risposta spettrale dell'occhio umano (detta funzione di efficienza luminosa fotopica spettrale relativa). Vengono impiegate al posto delle grandezze radiometriche in quanto quest'ultime non sono direttamente utilizzabili in scienza del colore, mentre le grandezze fotometriche quantificano l'emissione luminosa in termini della risposta del sistema visivo umano, il quale presenta sensibilità non uniforme alle diverse lunghezze d'onda.

⁶⁵ Nel caso di conteggio di singole particelle si tratta di efficienza quantica.

Energia luminosa (luminous energy): lumen per secondi (lm s)
Flusso luminoso (luminous flux): lumen (lm); 1 watt = 683 lumen
Emittanza luminosa (luminous exitance): lux (lx) che è 1 lumen/m²
Illuminamento (illuminance): lumen al metro quadrato (lm/m²)
Intensità luminosa (luminous intensity): candela (cd)
Luminanza (luminance): candela al metro quadrato (cd/m²)

La *candela* (cd = lm/sr) è definita come l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz (lunghezza d'onda nel vuoto 555 nm) e ha un'intensità radiante in quella direzione di 1/683 W/sr.

Nel caso dei materiali fotografici la grandezza che interessa per quantificare la luce che incide, e quindi agisce sull'emulsione, è l'esposizione che si ottiene dal prodotto dell'illuminamento per il tempo di apertura dell'obiettivo:

$$Esp = E t$$

(esposizione = illuminamento x tempo)

L'equivalenza tra le diverse unità di misura con cui può essere espressa l'esposizione è la seguente:

$$Esp = lux \ sec = (lm/m^2) \ sec = (watt/m^2) \ sec = joule/m^2 = metro \ candela \ sec$$

Il risultato dell'esposizione sul materiale fotosensibile è una densità ottica (D) più o meno elevata; per un determinato materiale e, a parità di altre condizioni, è sufficiente per ottenere una determinata D , che sia costante il prodotto $E t$. Questo comportamento, è noto come "legge di reciprocità": si può ad esempio aumentare l'intensità e diminuire il tempo rispetto a valori già utilizzati in modo tale da ottenere il valore desiderato di D :

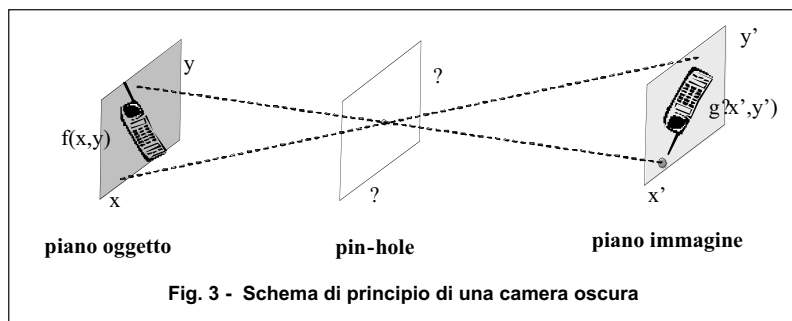
$$(1/10 \ lux) (1/10 \ sec) = (1 \ lux) (1/100 \ sec) = (1/100 \ lux) (1 \ sec)$$

La legge di reciprocità presenta, per alti e per bassi livelli di esposizione, deviazioni dal comportamento descritto delle quali si farà cenno più avanti.

PROCESSI DI FORMAZIONE DELL'IMMAGINE: CONTRASTO E RISOLUZIONE

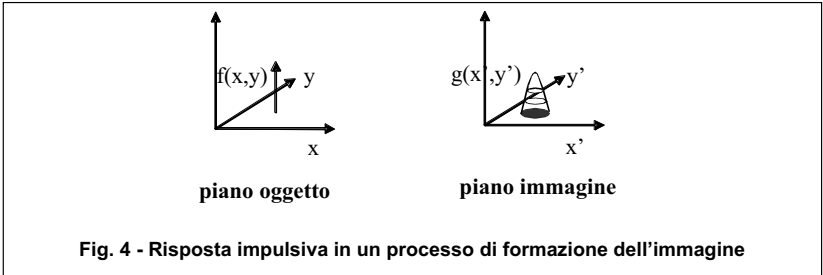
La natura dell'immagine fotografica è poliedrica, avendo aspetti relativi ai materiali che la compongono e dei meccanismi che sono alla base del suo funzionamento. In questo capitolo si discuterà di questi ultimi, partendo dalla necessaria premessa sul modo di formazione dell'immagine stessa da un punto di vista del processo fisico che la produce. Il processo fisico di formazione dell'immagine fotografica può essere analizzato sotto diversi punti di vista che ne mettono in luce le caratteristiche che poi si riflettono in termini positivi e negativi sull'immagine prodotta. Cerchiamo di discuterli in maniera sintetica.

Un processo di formazione di un'immagine può essere quasi sempre ricondotto al classico modello della camera oscura (in inglese *pin-hole*). Allo scopo di produrre un'immagine è necessario creare una corrispondenza biunivoca tra i punti del piano oggetto (ovviamente approssimando la realtà esterna ad un piano) e quelli del piano immagine, come mostrato in fig. 3.



Per fare ciò è necessario che i raggi (approssimazione dell'ottica geometrica) passino per un unico punto prima di arrivare al piano immagine. In un certo senso questo meccanismo può essere visto come quello di dare una direzionalità alla luce proveniente dall'oggetto. A questo principio possono essere ricondotti molti sistemi ottici, come ad esempio le lenti che sono costruite in modo da produrre un fuoco, attraverso il quale devono necessariamente passare i raggi che poi vanno a formare l'immagine. Questa semplice modellazione del processo di formazione fa comprendere anche quale sia una delle sue principali caratteristiche: l'impossibilità di realizzare

una reale corrispondenza biunivoca tra punti coniugati dei due piani (oggetto ed immagine) fa sì che l'immagine presenti una risoluzione finita. Per esemplificare questo fatto è utile far riferimento alla fig. 4.

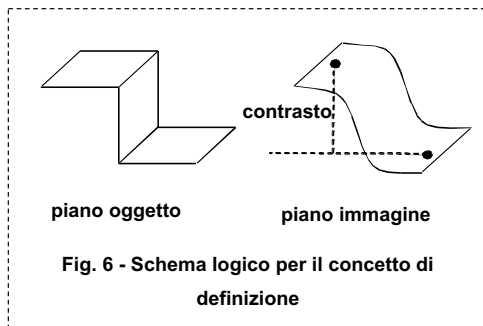


Supponiamo che la luce provenga da un solo punto del piano oggetto, allora l'immagine prodotta sarà una piccola macchia con una luminosità maggiore al centro e degradante verso i bordi. La conseguenza è che due punti luminosi vicini potrebbero creare una macchia complessiva che non ci permetterebbe di individuare con certezza la distanza dei punti nell'oggetto: in altri termini la capacità di risoluzione dell'immagine è limitata. Spesso nel linguaggio fotografico questa caratteristica del processo di formazione dell'immagine fotografica è chiamata definizione che ha, come conseguenza, il fatto che l'immagine risulta più o meno nitida (vedi fig. 5). Il concetto di definizione è più complessivo, ma meno esatto di quello di risoluzione in quanto fa riferimento anche alla qualità, soggettivamente definibile, di un'immagine (vedi fig. 5).



Fig. 5 - Esempio di un'immagine nitida (a sinistra) e sfocata (a destra)

Il modello di formazione dell'immagine che abbiamo ora introdotto può indurci nell'errore di semplificazione che il risultato ottenibile sia dovuto unicamente al sistema di ripresa fotografico. Il processo di formazione è infatti composto da una prima fase in cui un'immagine virtuale viene proiettata sulla pellicola fotografica ed una seconda in cui si forma la vera e propria immagine fotografica (anche a seguito del processo di sviluppo). Il problema della definizione è proprio anche della pellicola stessa che tende a sfocare, a sua volta, l'immagine proiettata. Le cause di questo fenomeno sono molteplici e spesso molto complesse; per evidenziarne alcune basta ricordare che i grani che formano l'emulsione sensibile hanno dimensioni finite, che vi può essere un accidentale estensione del segnale determinato dalla luce incidente a grani vicini, che fenomeni di diffusione e di aggregazione possono far crescere le dimensioni delle macchie sulla pellicola. In questo caso si parla di potere risolutivo della pellicola che può essere misurato a prescindere dal processo fotografico. Per comprendere meglio questo concetto occorre partire da un punto di vista completamente diverso. Prendiamo una macchina fotocopiatrice su cui adagiamo una lametta da barba, in questo caso l'oggetto risulta piano. Se osserviamo attentamente la fotocopia ci accorgiamo che il bordo della lametta non risulta del tutto nitido. Quello che accade è sinteticamente rappresentato in fig. 6.



Questo fenomeno può essere studiato in diversi modi, uno tra essi risulta particolarmente interessante perché ci porta a comprendere la *Modulation Transfer Function* (MTF), che è un eccellente strumento per valutare la risoluzione. Supponiamo ora di mettere sulla fotocopiatrice il foglio di test di fig. 7, in cui tutti i gruppi di linee, di spessore sempre più piccolo, sono disposti a distanza decrescente tra loro.

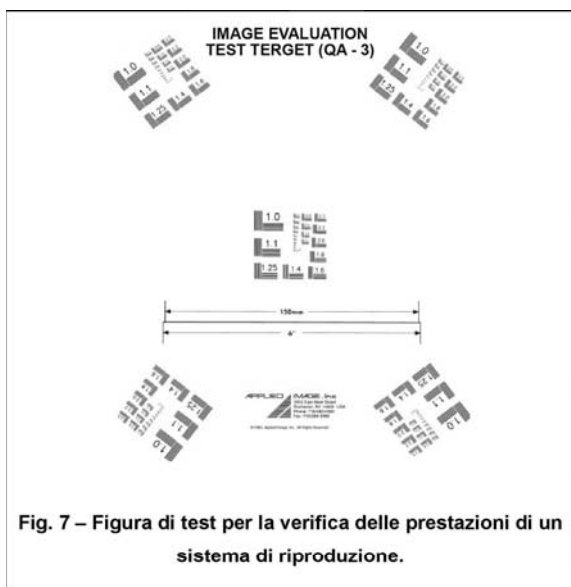


Fig. 7 – Figura di test per la verifica delle prestazioni di un sistema di riproduzione.

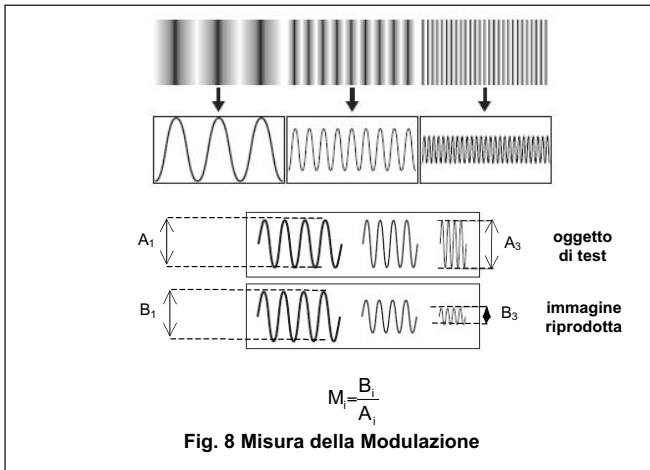
Osservando il risultato si noterà che alcuni gruppi sono ancora visibili in maniera ben distinta nell'immagine⁶⁶, quando la distanza tra le linee diminuirà troppo essi non appariranno ben distinti tra loro. In effetti, i gruppi in cui le linee sono troppo ravvicinate non saranno visibili. Leggiamo ora i numeri che sono posti in corrispondenza a vari gruppi: ci accorgiamo che essi aumentano con il diminuire della distanza tra le linee. Essi sono il numero di linee per unità di lunghezza, in particolare le coppie di linee per millimetro⁶⁷. Abbiamo quindi introdotto quella che è chiamata la frequenza spaziale, che può essere misurata anche in termini di punti per pollice (*dpi*) o di campioni per pollice (*spi*) o di pixel per pollice (*ppi*) nei diversi contesti in cui viene utilizzata. È così possibile quantificare quale è l'intervallo di frequenze spaziali che è possibile riprodurre con il sistema impiegato: la fotocopiatrice. Se disponessimo degli strumenti appropriati si potrebbe osservare che il fenomeno di

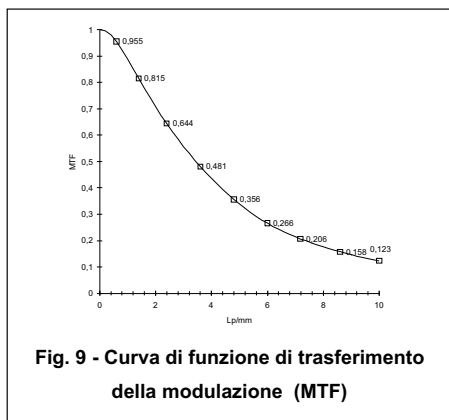
⁶⁶ Quello che state vedendo è ovviamente una stampa della figura di test, quindi non tutti i gruppi saranno ben visibili in quanto il sistema di stampa è limitato in risoluzione in modo analogo alla fotografia.

⁶⁷ La frequenza spaziale può anche essere misurata in cicli per mm e Lp/cm invece che mm. Sfortunatamente occorre stare attenti alle unità di misura per interpretare correttamente un grafico di MTF.

perdita della definizione è progressivo, quantificabile in termini di diminuzione della modulazione. La modulazione è il rapporto tra la differenza di luminosità che le linee hanno nell'oggetto (foglio di test) e quella nell'immagine riprodotta; essa è misurabile per ogni gruppo di linee e permette di mettere in evidenza che diminuisce progressivamente all'aumentare della frequenza (vedi fig. 8).

Quindi il fenomeno della perdita di risoluzione può essere quantificato producendo un grafico in cui la modulazione è riportata in funzione della frequenza spaziale, come mostrato in fig. 9. Si può dimostrare che in questa maniera si è fatta una stima della MTF che, sulla base di considerazioni fondate sulla "Optical System Theory", permette una precisa valutazione delle caratteristiche di un sistema di formazione.





Torniamo ora all'immagine fotografica (ci limitiamo per il momento ad una foto in bianco e nero): è facile notare come la sua superficie risulti più o meno scura, e che i diversi oggetti che la compongono siano ben visibili in quanto risaltano sullo sfondo. L'informazione contenuta in un'immagine è quindi portata dal contrasto, cioè dalla diversa tonalità che hanno gli oggetti osservabili sullo sfondo che li circonda. Per meglio discutere questo aspetto fondamentale del problema occorre, però, comprendere meglio le caratteristiche fisiche di un'immagine fotografica mediante una loro breve descrizione.

DENSITOMETRIA

I supporti fotografici sono opachi (ad esempio una stampa fotografica), oppure trasparenti (è il caso di una pellicola fotografica). Nel primo caso la superficie è più o meno riflettente (le zone più chiare dell'immagine riflettono più luce di quelle più scure); nel secondo la luce attraversa lo spessore dell'emulsione e del supporto, di più in corrispondenza delle zone a maggiore trasparenza (superfici più scure della scena originale riprodotta fotograficamente), di meno in corrispondenza di quelle meno trasparenti (superfici più chiare della scena originale). In ogni caso parte della luce viene assorbita dai materiali.

Il flusso di luce che incide sulla superficie di una fotografia corrisponde, quindi, all'espressione seguente:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

(flusso incidente = flusso riflesso + flusso assorbito + flusso trasmesso)

e di conseguenza, dividendo tutti i membri dell'uguaglianza per il valore del flusso incidente, si ha:

$$(\Phi_r/\Phi_i) + (\Phi_a/\Phi_i) + (\Phi_t/\Phi_i) = 1$$

Il primo termine a sinistra dell'uguaglianza è detto "riflettanza" (ρ), il secondo "rapporto di assorbimento" (α) ed il terzo "trasmissanza" (τ). Pertanto si può scrivere:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

(riflettanza + rapporto di assorbimento⁶⁸ + trasmissanza = 1)

La riflettanza e la trasmissanza possono essere espresse in percentuale ponendo uguale a 100 il valore del flusso incidente. Consideriamo ad esempio diverse zone di una pellicola fotografica, esposte e trattate in modo da ottenere superfici attigue di "annerimento" via via crescente.

Un punto di vista molto utile per studiare le caratteristiche di risposta del materiale fotografico, e misurare così la qualità di una fotografia, è quello di individuare delle grandezze fisiche della pellicola che possono essere misurate in maniera oggettiva. Questo elimina la dipendenza dall'intero processo di produzione dell'immagine (del resto in parte discusso in precedenza). Per fare ciò è opportuno introdurre la densità ottica (D) così definita:

$$D = \log_{10} 1/T = -\log_{10} T$$

Analoga definizione può essere introdotta nel caso di un supporto riflettente

$$D = \log_{10} 1/R = -\log_{10} R$$

⁶⁸ Non può essere usato il termine assorbanza che è dato, come vedremo, dal \log dell'inverso della trasmissanza.

L'impiego di una scala logaritmica può essere giustificata in molte maniere, forse la più intuitiva è quella che prende in esame una tipica scala di grigi (vedi fig. 10). Si noterà che dalla tonalità più chiara a quella più scura la D cresce in maniera quasi lineare. Questo è dovuto alla risposta dell'occhio che permette di osservare un intervallo di luminosità molto ampio (anche utilizzando meccanismi di adattamento molto sofisticati), richiedendo che il materiale sensibile faccia altrettanto. Ovviamente tutto questo non è chiaramente visibile nell'immagine stampata che non ha una dinamica tale da permettere la formazione di toni di grigio che vanno dai più bassi (quasi bianchi) a quelli più scuri (neri). Anche il materiale fotografico presenta una limitazione di questo genere essendo finito, anche per lui, l'intervallo di D riproducibile. Del resto è difficile supporre che vi siano materiali idonei a produrre intervalli così ampi, per cui il tono più chiaro sia una riflessione totale della luce incidente e quello più scuro rifletta un fotone ogni 10000, quindi sia quasi totalmente opaco.

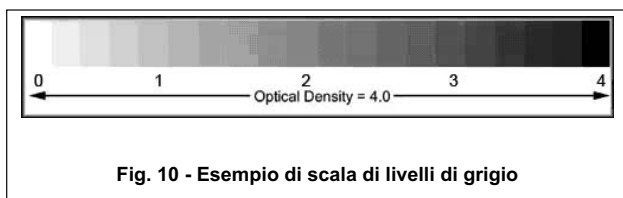


Fig. 10 - Esempio di scala di livelli di grigio

La misura della D si effettua con strumenti chiamati densitometri, alcuni dei quali sono prodotti soltanto per l'analisi di materiali fotografici con supporto trasparente (pellicole), altri invece permettono di effettuare misure anche su materiali opachi (stampe). Il risultato per un determinato materiale⁶⁹ e per una data esposizione dipende da numerosi fattori, quali il tipo di sviluppo, la temperatura ed il tempo di trattamento.

Non sempre l'immagine che si forma ha un tono neutro: in alcuni casi, infatti, grane molto fini possono produrre toni tendenti al marrone con conseguente maggiore assorbimento della luce blu rispetto a quella rossa. Normalmente, tuttavia, per le misure della D risultante sui materiali fotografici in bianco e nero, ad esempio nel controllo di qualità delle riproduzioni in microfilm, è sufficiente l'impiego di densitometri il cui

⁶⁹ Sono qui esclusi i materiali fotografici ad annerimento diretto.

sistema ottico non prevede la selezione di filtri, che sono necessari, invece, per l'analisi di immagini a colori.

Il densitometro permette di quantificare la risposta dei materiali fotografici all'esposizione e al successivo trattamento; il suo impiego, è pertanto indispensabile in sensitometria, tecnica che consiste nell'esporre il materiale fotosensibile in modo noto ed ordinato.

Questi strumenti trovano, inoltre, impiego anche per prove tecnologiche finalizzate alla verifica dello sbiadimento nel tempo delle fotografie (in condizioni naturali, in ambienti inquinati o durante prove di invecchiamento accelerato in celle climatiche) e della conseguente diminuzione del contrasto.

SENSITOMETRIA⁷⁰

Il materiale fotografico ha una sua consistenza materiale, ampiamente studiata in altri capitoli, ma è caratterizzato anche dalla sua risposta all'esposizione alla luce. Esso è un rivelatore di luce che presenta diverse caratteristiche molto interessanti:

- a) risponde in maniera diversa (come già accennato in precedenza) alla luce di differente lunghezza d'onda
- b) è un rivelatore d'area, quindi composto da una moltitudine di microscopici elementi sensibili, che permettono la rivelazione di un'immagine
- c) presenta delle limitazioni nella quantità di luce che riesce a rivelare; è quindi caratterizzato da un intervallo dinamico finito
- d) ha una risposta non lineare in quanto variazioni di esposizione non producono sempre un eguale incremento della D .

Per spiegare le caratteristiche di questo particolare rivelatore di luce occorre comprenderne meglio il funzionamento. Per valori elevati di esposizione la frequenza delle eccitazioni è tale che gli elettroni liberati hanno difficoltà a trovare trappole libere per fissarsi alla superficie del cristallo e gli ioni Ag^+ migrano troppo lentamente per combinarsi immediatamente con i fotoelettroni liberati dalla radiazione incidente. Per valori bassi, invece, la formazione dei fotoelettroni è meno frequente, il numero di atomi di Ag formati non è sufficiente per dare la stabilità richiesta all'immagine latente, che si disintegra per effetto

⁷⁰ G. L. WALKFIELD, *Practical Sensitometry*, London, Fountain Press Ltd, 1970.

dell'agitazione termica prima di aver avuto il tempo di stabilizzarsi. Questi fattori determinano la non linearità di risposta dell'emulsione fotografica:

- a) il numero di grani d'argento per unità di superficie è finito, i fotoni che incidono hanno quindi una probabilità progressivamente decrescente di impressionare un grano d'argento quando cresce il flusso luminoso
- b) vi è una più bassa probabilità che sia possibile rivelare una variazione di D quando l'esposizione è bassa.

Il modo migliore per discutere, in modo quantitativo, tutti questi importanti fattori è quello di studiare la curva caratteristica.

Curva caratteristica

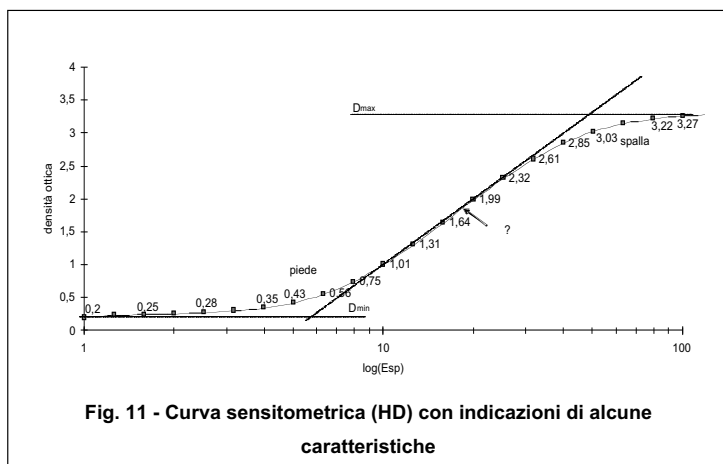
Incrementando progressivamente l'esposizione di un'emulsione fotografica, mantenendo però rigorosamente costanti tutte le altre variabili (sorgente di luce, emulsione, prodotti e modalità di trattamento) e registrando per ogni valore di esposizione l'annerimento ottenuto in termini di D , è possibile costruire la "curva caratteristica"⁷¹.

Usualmente si procede nel modo seguente:

1. esposizioni progressivamente crescenti;
2. trattamento dell'emulsione in condizioni normalizzate;
3. misura della densità risultante in corrispondenza di ogni diversa esposizione;
4. registrazione dei risultati ottenuti (D) in funzione dell'esposizione.

Il grafico che ne risulta è la curva caratteristica dell'emulsione fotografica (detta anche HD dai nomi di coloro che l'introdussero, Hurter e Driffield). Un esempio di curva ricavata da ipotetiche misure di D su una pellicola esposta a flussi di luce crescenti è rappresentata in fig. 11.

⁷¹ La curva caratteristica è detta anche sensitometrica, o di annerimento oppure, ancora, di gradazione.



Come si può facilmente notare il grafico è semilogaritmico in quanto sull'asse delle ascisse vi è il logaritmo dell'esposizione. Questo è facilmente spiegabile con il fatto che, come abbiamo visto in precedenza, la densità ottica è il logaritmo della riflettanza, che è a sua volta proporzionale all'esposizione. Infatti la riflettanza dipende dal numero di grani di argento per unità di area che vengono fissati sul supporto della pellicola a seguito dell'esposizione. Siamo in pratica in presenza di un grafico *log-log*, apparentemente complesso da leggere, che invece non lo è. Per usi diversi dalla determinazione della sensibilità o rapidità nominale dell'emulsione, per praticità si ricorre ad una scala arbitraria dell'esposizioni.

La curva sensitometrica cresce regolarmente solo nella parte centrale, che può essere approssimata, almeno nella zona centrale, con una retta. Nelle due zone laterali la curva cresce molto meno; vi è quindi un incremento della *D* minore per gli stessi incrementi di esposizione rispetto alla zona centrale della curva. In pratica queste due zone, quella a esposizioni minori detta "piede" quella a maggiori "spalla", non sono utilizzabili. Quando per casualità il fotografo finisce per usarle accade il fenomeno della sotto o sopraesposizione che rende tutta l'immagine, o la zona del fotogramma interessata dal fenomeno, poco contrastata. Osservando la zona centrale del grafico, tra il piede e la spalla, si noterà che possono essere facilmente individuati due intervalli di valore, uno sull'asse delle ascisse e l'altro su quello delle ordinate, che ben caratterizzano la risposta

della pellicola. Dell'intervallo di D abbiamo già in parte discusso, esso è il “range” dinamico che permette di definire quanti toni di grigio sarà possibile riprodurre sul fotogramma, utilizzando questo particolare tipo di film fotografico. Questa caratteristica è di grande interesse per chi conserva il materiale fotografico, sapendo infatti di questa limitazione inerente non si andranno a cercare valori di D superiori al massimo. Se malauguratamente venissero trovati si dovrebbe ipotizzare un inconveniente o l'effetto di un degrado. È possibile valutare l'intervallo dinamico di una pellicola fotografica utilizzando un apposito strumento che permette di impressionare una serie di quadratini posti al lato del film a valori crescenti di esposizione.

Latitudine di esposizione

Il secondo intervallo è molto interessante per il fotografo, un po' meno per chi la fotografia la conserva. Tale intervallo è detto anche latitudine dell'esposizione; esso individua i valori di esposizione che potranno essere correttamente registrati dall'emulsione. Rammentando la legge di reciprocità discussa in precedenza, è possibile osservare che ciò che si registra sulla fotografia è il risultato di una esposizione controllata, in quanto riducendo i tempi di esposizione si potrà sempre ottenere un buon risultato (cioè che l'esposizione dell'emulsione rientri nell'intervallo giusto di valori). Questo non permette di sapere con esattezza quanta luce vi fosse nella scena, se non in maniera indiretta. Guardando la fotografia ci si potrà rendere solamente conto di quanto sia stato bravo il fotografo nel controllare l'esposizione. Una latitudine maggiore dell'emulsione consente al fotografo di riprendere una scena in cui vi siano forti variazioni di luminosità (ad esempio una finestra vista da una stanza o una sorgente luminosa in un ambiente più scuro). Come osservato in precedenza le tonalità di grigio visibili sono un numero limitato, in pratica nel caso della emulsione fotografica la cui curva caratteristica è presentata in fig. 10, i toni di grigio che saranno visibili sono quelli che rientrano nell'intervallo 0,2-3,29, cioè, osservando la fig. 10, 15 livelli di grigio.

Contrasto

Quando abbiamo parlato del contrasto è stato introdotto il concetto che esso dipende sia dalle modalità con cui viene scattata la foto che dalle caratteristiche dell'emulsione fotografica impiegata. Si può quindi parlare

di un contrasto dell'emulsione che è facilmente definibile come la pendenza della curva sensitometrica. In pratica esso cambia con il flusso di luce incidente, ciò crea una serie di effetti indesiderati, che i grandi fotografi possono avere sfruttato a loro vantaggio. La pendenza della curva sensitometrica cresce monotonamente fino ad arrivare ad un punto di flesso dal quale decresce sistematicamente. Tale punto è quello di massima pendenza, cioè di più elevato contrasto. Essa è definita con la lettera greca gamma ed è anche la misura del contrasto tipico dell'emulsione.

$$\gamma = \frac{dD}{d \log E_{sp}}$$

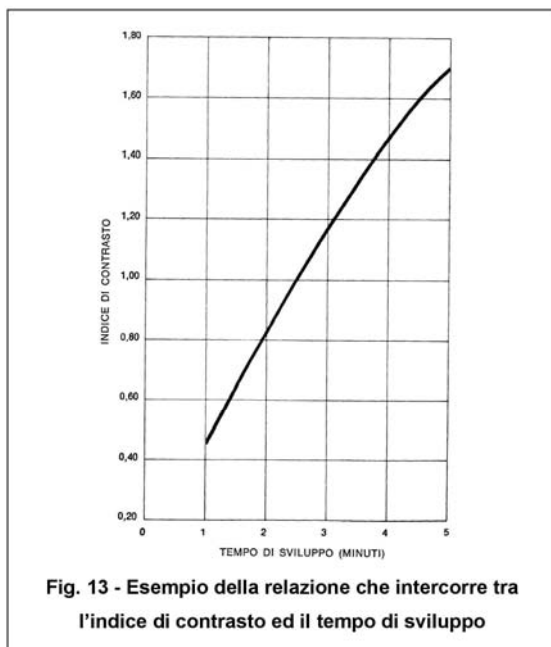
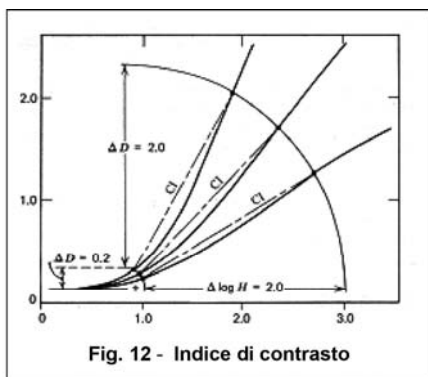
Il gamma della curva sensitometrica di una emulsione fotosensibile dipende da diversi fattori esterni all'emulsione stessa, ovvero, ad esempio, dalla natura e composizione del tipo di sviluppo impiegato nel trattamento, dal tempo del trattamento stesso, dalla sua temperatura e dalle condizioni di agitazione (continua, intermittente ecc.). Tra due qualsiasi punti della curva può, inoltre, essere calcolato il *gradiente medio*⁷² che è dato dal rapporto incrementale.

Nel confrontare tra loro diverse emulsioni (pellicole fotografiche, carte da stampa fotosensibili e così via) è necessario, pertanto, mantenere invariate le condizioni sopra indicate; d'altra parte la possibilità di ottenere risultati diversi al variare delle condizioni consente di realizzare intenzionalmente risultati diversi, aumentando o diminuendo il contrasto dell'immagine ottenibile con una determinata emulsione (fig. 13).

Si presentano casi in cui negativi aventi lo stesso *gamma* forniscono, in fase di stampa (anche se questa avviene sullo stesso tipo di carta fotografica in condizioni predefinite e controllate di trattamento della stessa), positivi non identici tra loro. Per ovviare a tale inconveniente e per compensare le differenze di forma delle curve caratteristiche (soprattutto nella parte più bassa, quella prossima o corrispondente al "piede") è stato definito un nuovo parametro che esprime la pendenza media relativa alla parte più di frequentemente utilizzata della curva caratteristica: l'*indice di contrasto* (fig. 12). In fig. 13 si riporta in grafico la relazione che intercorre tra l'indice di contrasto ed il tempo di sviluppo;

⁷² Il gradiente è la pendenza in un determinato punto della curva caratteristica; ad esso si ricorre per tanto nell'analisi di pareti non rettilinee della curva caratteristica.

in fig. 14 il grafico mostra come varia il gamma della curva sensitometrica con il diminuire del tempo di sviluppo.



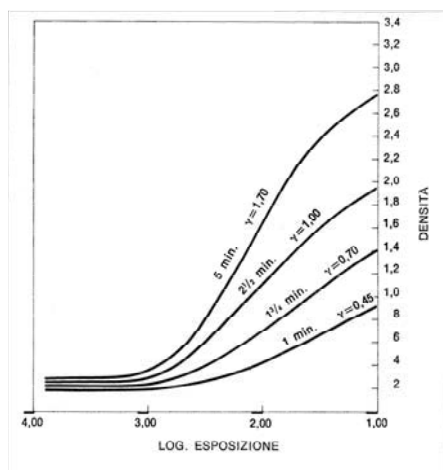


Fig. 14 - Effetto del tempo di sviluppo sul gamma

Il gradiente medio, il gamma e l'indice di contrasto sono misura oggettiva del contrasto di una emulsione fotografica negativa o positiva che sia. Diverso è il termine di gradazione: esso si riferisce ad un concetto (non è quindi un numero) relativo alla curva caratteristica nel suo insieme. La gradazione è più spesso utilizzata per indicare il contrasto dei diversi tipi di carte fotografiche (molto morbida, morbida, media, dura, molto dura, extra dura).

Rapidità

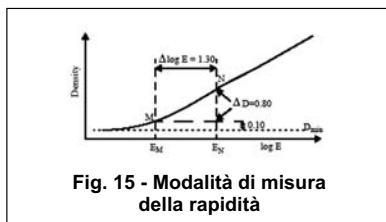
La rapidità di una emulsione è associata alla sua capacità di poter essere utilizzata in condizioni di illuminamento diverse. Una emulsione rapida è utilizzabile anche in condizioni di scarso illuminamento, essa è caratterizzata da una grana più grande (cioè da grani di argento di dimensione maggiore). Al contrario una emulsione lenta ha una grana più fine.

I diversi toni di grigio in una fotografia sono prodotti dall'aumento del numero di grani di argento per unità di superficie che sono impressionati; una loro maggiore dimensione fa così che sono sufficienti un minor numero di fotoni per ottenere lo stesso livello di grigio. Vi è quindi un intrinseco fattore di amplificazione di una emulsione dato dalle dimensioni dei grani d'argento, se essi sono più grandi l'emulsione

risulterà più sensibile. Una misura della rapidità di una emulsione fotografica può essere effettuata prendendo come indice l'inverso dell'esposizione cui corrisponde il minimo valore di D rivelabile (incrementato di 0,1 per rendere la misura più facilmente eseguibile). Per l'esattezza l'unità ISO corrisponde a

$$\text{ISO} = \frac{0,8}{\log(E(D_{\min} + 0,1))}$$

Un esempio di quest'ultimo è riportato in fig.15, secondo quanto raccomandato dall'ISO⁷³.



La rapidità, oltre che dall'emulsione, dipende dalla “temperatura di colore” della luce alla quale la pellicola fotosensibile è esposta, dall'esposizione, dal tipo di sviluppo, dalla sua temperatura, agitazione e durata. I metodi normalizzati permettono di determinare oggettivamente la sensibilità di diverse emulsioni fotografiche, permettendone così il commercio con un'indicazione certificata.

QUALITÀ DELL'IMMAGINE

La qualità di una fotografia può essere valutata sia da un punto di vista oggettivo che soggettivo. Quello soggettivo che valuta le capacità dell'immagine di riprodurre tutti gli elementi significativi che erano presenti nella scena, è sicuramente più vicino al significato stesso di qualità, essendo la finalità del fotografo quello di saper trasferire nella

⁷³ ISO 6:1993 *Photography -- Black-and-white pictorial still camera negative film process systems -- Determination of ISO speed.*

ISO 2240:1994 *Photography -- Colour reversal camera films -- Determination of ISO speed.*

ISO 5800:1987 *Photography -- Colour negative films for still photography -- Determination of ISO speed.*

fotografie quello che lui ha individuato nella realtà. Vi sono stati numerosi interessanti tentativi di valutare la qualità soggettiva; essi hanno avuto successo solo quando è possibile definire con esattezza quali siano i segni presenti nella scena che vanno trasferiti, come accade nel caso di un testo, in cui è chiaro che occorre saper riprodurre con esattezza le lettere che compongono le parole. In generale ciò non è possibile per cui ci si deve affidare quasi sempre a valutazioni soggettive come quelle che analizzano statisticamente la frequenza con cui un determinato segno, presente nella scena, è realmente riconosciuto osservando la fotografia. Nella valutazione dell'immagine hanno quindi prevalso i metodi oggettivi di valutazione della qualità che fanno riferimento alle caratteristiche fisiche dell'immagine stessa: contrasto, definizione ed rumore. Vi è un quarto fattore che va considerato ed è la capacità di riprodurre il colore. Le prime due caratteristiche sono state in gran parte esaminate in precedenza, per esse sono stati sviluppati metodi di valutazione della qualità soddisfacenti. Spesso si fa uso di immagini di test, come la ISO *test chart* n. 2 (fig. 19), che permettono di quantificare sia il contrasto che il dettaglio dell'immagine prodotta. L'osservazione al microscopio della riproduzione su pellicola della *test chart* viene normalmente fatta al microscopio a circa 50 - 100 ingrandimenti. In tabella è riportato il potere risolutivo espresso in linee/mm di alcune pellicole e la relativa classificazione. Anche nel caso di fotografie di archivio è possibile valutare tali caratteristiche, utilizzando allo scopo un densitometro, per la misura dei toni di grigio, ed un microscopio per esaminare i bordi di oggetti ben contrastati e dedurre così la definizione. Il rumore è una caratteristica molto importante per una fotografia; è opportuno quindi trattare questo argomento.

Rumore

Come è stato fatto osservare all'inizio il processo di formazione di un'immagine fotografica è intrinsecamente casuale; questo determina variazioni nel numero di grani di argento che vengono impressionati. In qualche misura la presenza del rumore è una sorta di impronta digitale della fotografia. Osservando con un microdensitometro una porzione uniforme dell'immagine, si noteranno piccole fluttuazioni della D che ci permettono di quantificare il rumore presente in essa. Supponiamo di esaminare un centinaio di punti successivi di una linea, facendo attenzione che la D media rimanga costante nel percorso, allora sarà

possibile calcolare la deviazione standard (s) che è una prima misura del rumore. In pratica è meglio valutare il rapporto segnale rumore (S/N) che è dato da:

$$\frac{S}{N} = \frac{D_{\text{medio}}}{\sigma}$$

In una immagine vi sono diverse sorgenti di rumore, in particolare è utile distinguere quelle che originano del processo di formazione dalle altre, che si manifestano solo al momento della rivelazione dell'immagine, quindi nel processo di esposizione e sviluppo della fotografia. È facile dimostrare che quanta più luce è presente tanto meno rumorosa sarà l'immagine prodotta. In un certo modo si può affermare che il rapporto S/N cresce con la quantità di luce presente sulla scena. Questo non è del tutto vero in quanto, come abbiamo discusso in precedenza, occorre esporre l'emulsione in maniera controllata, per cui, anche se nella scena vi è una gran quantità di luce, quella che incide sull'emulsione rimane circa la stessa (in quanto vengono ridotti i tempi di esposizione). La rumorosità è quindi in gran parte determinata da quella prodotta nell'emulsione che è opportuno discutere più dettagliatamente.

Grana

Grande parte delle fluttuazioni che abbiamo osservato in precedenza sono dovute alla presenza della grana, che è dovuta alla presenza dei grani di argento e di loro aggregazioni. Il fatto che l'elemento sensibile sia discreto è la causa principale delle fluttuazioni di D , infatti è assai difficile che i grani siano tutti eguali da un punto di vista della rivelazione della luce. Alcuni di essi potrebbero essere un po' più grandi o più sensibili. Anche le successive fasi di conservazione dell'immagine latente e di sviluppo possono determinare variazione nel numero di grani che vengono fissati nell'immagine finale. I fotografi esperti sono in grado di riconoscere la qualità del materiale fotografico impiegato e la bravura del fotografo proprio analizzando al microscopio la grana.

Ovviamente anche le immagini digitali sono caratterizzate da rumore, come le fotografie tradizionali, ovviamente presentano una grana regolare in quanto gli elementi sensibili, al contrario di una emulsione fotografica, sono disposti regolarmente. Utilizzando i valori di D campionati in precedenza per calcolare la deviazione standard ed avendo preso nota dell'apertura utilizzata dal microdensitometro nel

campionamento (che non può essere infinitesima) è facile introdurre quella che viene chiamata la legge di Selwyn che afferma che il prodotto di s con la radice quadrata di A è una costante. In altre parole, se viene diminuita troppo l'area osservata con il microdensitometro le fluttuazioni aumentano. Questo è vero per le emulsioni in bianco e nero tradizionali, per le altre vi sono degli scostamenti dovuti alla maggiore tendenza dei grani ad aggregarsi.

EFFETTI FOTOGRAFICI

I più comuni effetti fotografici sono riportati qui di seguito e, successivamente, in breve descritti:

- effetto di reciprocità
- effetto di intermittenza
- effetto Clayden
- effetto Villard
- solarizzazione
- effetto Herschel.

Effetto di reciprocità

L'effetto di reciprocità è stato ampiamente descritto sopra, così come le cause che ne limitano l'impiego, soprattutto a basse ed alte esposizioni della pellicola. Il difetto della legge di reciprocità dipende anche dalla temperatura durante l'esposizione :

- per alti valori di esposizione, l'efficienza dell'esposizione stessa diminuisce con la temperatura a causa della bassa migrazione ionica;
- per bassi valori dell'esposizione l'efficienza prima aumenta con il diminuire della temperatura e quindi diminuisce di nuovo; l'aumento è dovuto al fatto che, pur diminuendo la migrazione ionica con il diminuire della temperatura, prevale su questo effetto quello positivo della più bassa disintegrazione termica dell'immagine latente;
- diminuendo ulteriormente la temperatura, la minore migrazione ionica determina una riduzione dell'efficienza;
- a -186°C la reciprocità è osservata, a condizioni di esposizione naturalmente maggiori e alla temperatura ambiente. L'immobilità ionica durante l'esposizione è il fattore di controllo predominante, il livello di energia del flusso è senza incidenza.

FOTOGRAFIE A COLORI

Il colore¹³⁰

Giovanni Ettore Gigante

Il colore è una sensazione che si genera nel processo percettivo di alcuni animali superiori tra cui l'uomo. Come tutte le sensazioni, che sono a cavallo tra il mondo esterno e la sfera individuale, hanno degli elementi di oggettività e di soggettività che ne rendono difficile lo studio. Da qualunque punto di vista si veda il problema, sia quello di privilegiare gli aspetti psicofisici che quello, alternativa, di ricondurre tutto alle proprietà dei materiali, si rischia di fornire un quadro del tutto parziale. Il colore ha origine nella visione a causa della diversa sensibilità che hanno le cellule fotosensibili dell'occhio, cioè i coni ed i bastoncelli, per la luce al variare della sua lunghezza d'onda. In particolare solo i coni sono coinvolti nella percezione del colore, essi sono di tre differenti tipi con una sensibilità alle diverse lunghezze d'onda della luce incidente che ne definisce il ruolo nel processo di percezione. I tre tipi di cono sono infatti uno maggiormente sensibile a luce monocromatica nella banda del rosso, il secondo del verde ed il terzo del blu. I tre tipi di cellule non sono egualmente sensibili alla luce, in particolare i coni del blu sono molto meno efficienti; in fig. 14 è mostrato un diagramma che mostra le diverse sensibilità dei coni.

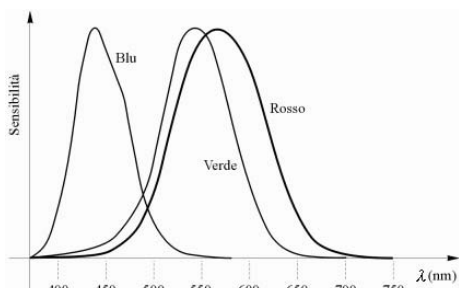
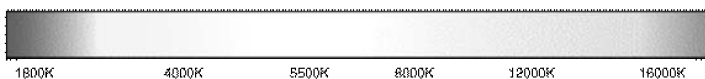


Fig. 14 - Curve di sensibilità dei tre tipi di coni (le curve sono normalizzate)

¹³⁰ Vedi: G. WYSZECKI, W.S. Stiles: *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, Wiley, 1982 (II ed.); C. OLEARI (a cura di), *Misurare il colore*, Hoepli, 1998; R.W.G. HUNT, *Measuring Color*, Fountain Press, 1998 (III ed.); G.A. AGOSTON, *Color Theory and Its Application in Art and Design*, Springer, 1987 (II ed.); M.D. FAIRCHILD, *Color Appearance Models*, Addison Wesley, 1998; CIE, *International Lighting Vocabulary*, 1970 (III ed.)

La percezione avviene in tre fasi successive la prima in cui il fotone è rivelato sulla retina, la seconda in cui i diversi segnali che provengono dalle cellule sensoriali sono elaborati in modo da inviare l'informazione al cervello e l'ultima fase, a livello del cervello, in cui avviene l'identificazione del colore. Nella seconda fase si generano tutti gli effetti, come quello della complementarietà dei colori, che determinano successivamente la più o meno corretta identificazione del colore da parte del cervello. La prima fase è strettamente fisica, le successive sono quelle in cui si produce la sensazione del colore e sono legate alla psicofisica. Risulta quindi evidente che la psicofisica ha un ruolo determinante nella identificazione del colore, questo non deve però far pensare che i colori percepiti non possano essere misurati con buona precisione. Scopo della colorimetria è appunto quello di rendere oggettiva la misura del colore.

La colorimetria si occupa principalmente della identificazione del colore e dei meccanismi fisici e psichici che ne sono alla base. Le sorgenti di luce più comuni, a partire dal Sole, sono in genere policromatiche, cioè composte da fotoni di diversa lunghezza d'onda, esse quindi sono caratterizzate da un colore che dipende dallo spettro della sorgente stessa. Una sorgente che emette fotoni in tutta la banda del visibile produce una sensazione di un colore bianco. Se lo spettro non è uniforme, vi sono cioè bande di colore che sono più intense di altre, anche la sorgente apparirà colorata; da questa semplice osservazione nasce il concetto di temperatura di colore che spiega il fatto che una sorgente ad incandescenza, che emette il tipico spettro del corpo nero, genera nell'uomo una sensazione di colore che, al crescere della temperatura della sorgente, va dal rosso, al giallo per arrivare al viola a temperature che sono molto al disopra di quella del sole che è di 5400 K. In Tav. XI sono mostrati i colori di una sorgente ad incandescenza al crescere della temperatura. Il concetto di temperatura di colore ha una notevole importanza in fotografia, sia nella fase di cattura dell'immagine, in cui occorre illuminare l'oggetto con una sorgente opportuna, che in quella di sviluppo che, infine, in quella di accesso in cui la presenza di sorgenti luminose non adeguate può alterare la visione dei colori.



Tav. XI - Colori che vengono percepiti al crescere della temperatura di una sorgente di luce ad incandescenza.

Questa breve introduzione ci permette di affrontare meglio il problema della misura del colore, infatti è ora chiaro che ciò che va misurato e quindi classificato è la sensazione di un colore da parte dell'uomo. Il più generale e intrigante problema di come i colori si generino in natura, può per il momento essere lasciato in secondo piano. Questo non sarebbe vero se si trattasse ad esempio il problema delle sostanze coloranti e delle modalità con cui sono state impiegate dall'uomo per colorare oggetti e nella produzione artistica. Nel caso della fotografia, potremmo dire fortunatamente, la strada intrapresa per produrre immagini a colore è quella di stimolare la sensazione del colore in una maniera che può essere detta fisiologica: cioè utilizzando tre pigmenti come fa l'occhio. Premettiamo che questo approccio, pure se tecnologicamente utile, non è del tutto soddisfacente, in quanto vi sono colori che in questa maniera non è possibile generare, vi sono inoltre gamme di colori che vengono in una certa misura preferite rispetto ad altre. I pittori sanno quanto sia difficile riprodurre un colore con i pigmenti disponibili, che sono in numero decisamente superiore a tre.

Il punto di partenza è quello di osservare quali sensazioni di colore generino nell'occhio le lunghezze d'onda del visibile, la risposta è semplice sono quelle tipiche dell'arcobaleno o per essere più precisi generate in tutti quei casi in cui avviene un fenomeno di dispersione della luce solare. Di qui nasce la definizione di bande di colore di cui è composto lo spettro del visibile: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto. I colori generati dalle lunghezze d'onda dello spettro del visibile sono prese come riferimento nella classificazione degli altri colori. Essi sono definiti colori puri o saturi.

Misura del colore

Modello di colore CIE-X,Y,Z

La misura del colore passa necessariamente dalla definizione di un modello di rappresentazione. Vi sono diversi modelli che permettono di identificare univocamente un colore, in genere viene utilizzata allo scopo una tripletta di numeri; il significato dei numeri nella tripletta può essere diverso. Se si volesse seguire la strada di imitare il procedimento di individuazione del colore da parte della psiche, dovrebbero essere definiti tre pigmenti primari in modo da poter identificare su questa base tutti i co-

lori. Questo è quanto viene fatto dal sistema CIE-XYZ in cui vengono definite tre funzioni (vedi fig. 15) che forniscono la sensibilità spettrale dell'occhio, questo è l'Osservatore Standard CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*). Ogni coordinata cromatica si calcola integrando su tutto lo spettro del visibile tre funzioni: a) $I(\lambda)$ lo spettro della luce incidente sul campione, $R(\lambda)$ la funzione di riflessione del campione e una delle tre funzioni standard CIE. Ciascuna delle tre coordinate è quindi definita da:

$$X = k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

k è un fattore di normalizzazione scelto in modo tale che Y abbia valore 100 per un campione perfettamente bianco (0 per uno perfettamente nero). Quindi, con questa convenzione, Y viene ad assumere il significato di una misura della luminosità.

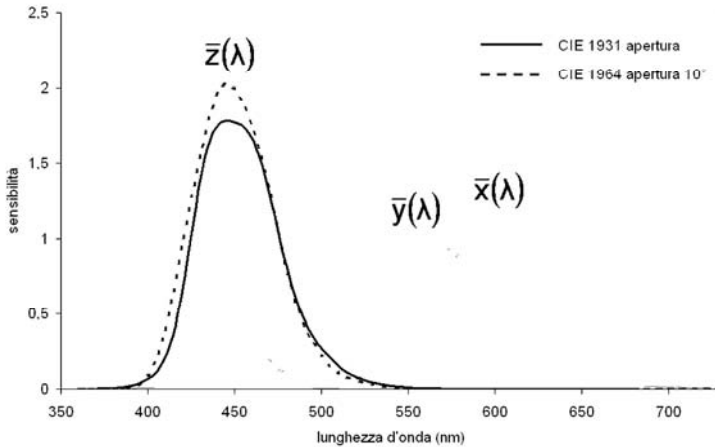


Fig. 15 - Funzioni di colore dell'Osservatore Standard CIE, in tratto pieno con un angolo di visione di 2° e tratteggiate con uno di 10°

Illuminanti standard

Per rendere precisa la misura delle coordinate cromatiche è necessario definire degli illuminanti standard, che abbiano cioè uno spettro $I(\lambda)$ co-

nosciuto. Una normale sorgente luminosa ha infatti uno spettro che è legato, come abbiamo visto, a diversi fattori che non possono essere controllati in condizioni normali. La CIE ha definito i tre primi illuminanti standard, onde eliminare le differenze che possono avere varie sorgenti nelle concrete condizioni sperimentali; essi sono chiamati A, B e C che rappresentano, rispettivamente, le curve di emissione (i) di una lampada ad incandescenza opportunamente tarata (A), (ii) della luce diretta del sole verso mezzogiorno (B), e (iii) della luce solare a mezzogiorno nelle condizione del cielo uniformemente coperto dalle nuvole (C). In seguito sono stati aggiunti gli illuminanti della serie D, o illuminanti diurni, gli spettri dei quali contengono tutto lo spettro dell'illuminante C e una certa componente ultravioletta della luce solare. Gli illuminanti della serie D possiedono un sottoindice indicante quanta è la parte dello spettro ultravioletto in essi inclusa. Con un pedice di due cifre si indica la temperatura di colore apparente dell'illuminante, misurata in centinaia di gradi Kelvin. Ad esempio, D₅₀ corrisponde al corpo nero riscaldato a 5000 K e quindi emette una definita porzione della radiazione ultravioletta. Per la sorgente D₆₅ la temperatura è 6500 K e lo spettro di emissione è ancora più esteso nell'ultravioletto.

Negli apparecchi per la misura colorimetrica non ci sono sorgenti luminose che siano l'uno o l'altro illuminante standard, si usa perciò una sorgente con spettro noto ed agli illuminanti standard si risale attraverso la calibrazione.

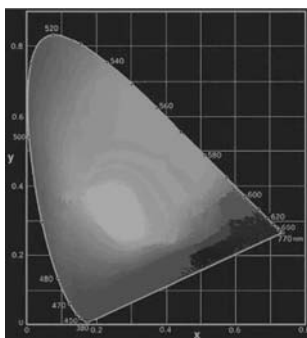
Modello di colore Y, x, y

La coordinata Y è detta anche luminanza in quanto la funzione colorimetrica relativa è la risposta spettrale dell'occhio umano in regime fotopico. Questa coordinata compare in diversi altri sistemi di rappresentazione del colore. Se si pone Z=0 è possibile definire le coordinate :

$$x = \int X/(X+Y+Z), \quad y = \int Y/(X+Y+Z), \quad x + y + z = 1.$$

In questa maniera è possibile disegnare il diagramma di cromaticità che fornisce sinteticamente tutta l'informazione contenuta nelle coordinate. Infatti il valore Z risulta preso in considerazione nelle nuove coordinate x e y. Chiaro però, che per conservare l'informazione sulla luminosità, ai valori x e y si deve aggiungere la terza dimensione, che non può essere z (da com'è definita) ma X, Y, o Z. La coordinata

Y è la scelta naturale per tale ruolo di coordinata in uno spazio tridimensionale con x e y . Di conseguenza, il piano x,y (la cromaticità) e l'asse Y (la luminanza) sono sufficienti per dare una rappresentazione del colore in termini direttamente legati alla percezione visiva. Queste tre *coordinate di cromaticità* formano lo spazio Y,x,y . Per tracciare il diagramma di cromaticità occorre individuare le coordinate x e y della luce nell'intervallo del visibile e tracciare la relativa curva. Fatto questo si devono connettere con una retta i due punti estremi, si individuerà in questo modo l'area in cui vengono necessariamente a trovarsi tutti i colori percepibili sulla base delle funzioni di colore introdotte dalla CIE; il risultato è mostrato in Tav. XII.



**Tav. XII - Diagrammi di cromaticità per CIE 1931 e CIE 1964
(10° di angolo)**

I colori bianchi si trovano al centro del diagramma (così come gli illuminanti standard definiti in precedenza, che sono bianchi). Occorre ricordare che la coordinata Y (appunto la luminosità) va considerata a parte. Questo può generare qualche confusione, infatti i gialli e i marroni occupano la stessa posizione nel diagramma di cromaticità, essi si differenziano solo sulla base della luminosità (i gialli hanno una luminosità maggiore). Ovviamente anche i neri si sovrappongono ai bianchi da cui si differenziano solo per la minore luminosità.

Sistema CiELab

Le coordinate Y_x, y non rispondono alla richiesta di avere una corrispondenza univoca tra il colore percepito e il punto sul diagramma. Si vede infatti che la zona del verde sul diagramma di cromaticità è caratterizzata da una separazione tra i punti spettrali notevolmente maggiore rispetto a quella agli estremi dello spettro. Per ovviare a questo problema, dal punto di vista matematico, è necessario deformare lo spazio in modo tale che tutti i punti percepiti come equidistanti da un punto scelto lo siano effettivamente. Così si perde la linearità dello spazio e quindi la corrispondenza univoca coi valori tristimolo, ma si acquisisce in compenso una buona linearità delle nuove coordinate. Di fatto si perde anche il concetto del diagramma di cromaticità, visto che bisogna arrendersi al fatto che, per l'occhio, nel verde sia più importante la tinta e nel rosso e blu invece la saturazione.

In pratica lo spazio più utilizzato tra quelli omogenei è indubbiamente il CiELab. Le sue tre coordinate L^* , a^* e b^* sono definite in modo seguente. Sia l'illuminante scelto individuato dal vettore tristimolo $(X_n, Y_n=100, Z_n)$ e il vettore tristimolo corrispondente all'oggetto illuminato sia valutato come (X, Y, Z) , allora:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \text{ per } (Y/Y_n) > 0.008856 \\ L^* &= 903.3 (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \text{ per } (Y/Y_n) \leq 0.008856 \\ a^* &= 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \\ b^* &= 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}], \end{aligned}$$

dove, se uno dei rapporti (X/X_n) , (Y/Y_n) e (Z/Z_n) risulta minore o uguale a 0.008856, la sua radice cubica viene sostituita da $[7.787 F + 16/116]$, dove F è il rapporto stesso.

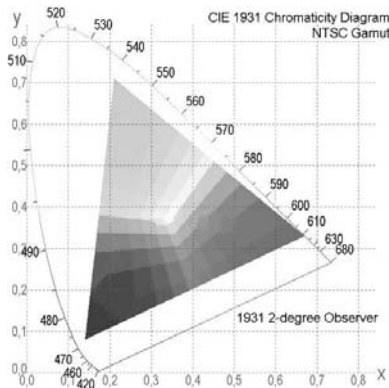
La forma risultante che prende lo spazio è molto semplice visivamente: se immaginiamo i colori principali disposti lungo un cerchio, sui due diametri del cerchio, che si intersecano perpendicolarmente in corrispondenza dell'asse L^* , si trovano i valori positivi e negativi di a^* e b^* . La linea a^* è 'rossa-verde' e la b^* 'giallo-blu': $a^* > 0$ è la componente rossa, $a^* < 0$ la componente verde. Analogamente $b^* > 0$ è la componente gialla e $b^* < 0$ quella blu. L^* è sempre non negativo e rappresenta la luminosità. La sua retta 'bianco-nero' attraversa il centro del piano $a^* b^*$, perpendicolarmente al piano stesso.

Tale costruzione dello spazio CiELab, basata sulla contrapposizione di opposti, ha grande utilità per gli specialisti che sono abituati a pensare il colore in percentuale dei composti di blu-giallo e di rosso-verde. Si crea un colore aggiungendo o togliendo da una miscela percentuali di questi colori primari. In effetti, esistono programmi specifici che permettono di sviluppare delle ricette per le miscele di pigmenti impostandole grazie alle coordinate nello spazio cromatico CiELab.

Sottolineiamo di nuovo che la trasformazione valori tristimolo => CiELab è possibile in una sola direzione: alle coordinate L^* , a^* e b^* non è possibile ottenere in modo univoco quelle X , Y e Z . In pratica spesso servono tutti e due i tipi di coordinate, e la scelta dello spazio cromatico dipende dal tipo dell'applicazione colorimetrica.

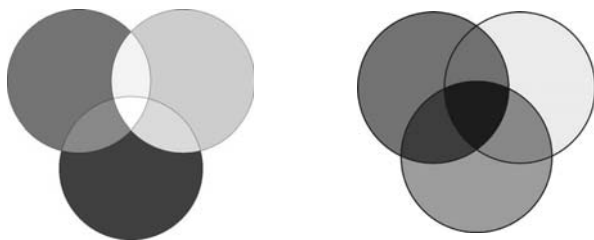
Lo spazio di colore RGB e sRGB

Attualmente il sistema più utilizzato, anche per il preponderante peso che hanno i programmi di grafica gestita da computer, è quello RGB (rosso (R), verde (G) e blu (B)) che ha il merito di essere una estrema semplificazione del problema. Si parte da tre colori base, vedi Tav. XIII, che possono essere mescolati in maniera opportuna per ottenere tutti i colori che sono presenti all'interno del triangolo che viene formato congiungendo i tre punti nel piano x,y . Tale triangolo è detto GAMUT.



Tav. XIII - Schema che esemplifica il concetto di GAMUT.

Un aspetto che va considerato con attenzione è quello del significato di miscelazione, la modalità con cui avviene fa sì che il risultato cambi notevolmente. Se l'operazione che immaginiamo è quella di somma, scelta intuitiva, siamo in presenza di una sintesi additiva, ottenibile dalla sovrapposizione lineare dei contributi dei tre colori base. Questo avviene quando si proiettano fasci luminosi su una superficie o si osserva la luce proveniente da uno schermo di un televisore. Come mostrato in Tav. XIV in cui vengono poste a confronto le due modalità di miscelazione dei colori, vi è un'altra possibilità che è data dalla sintesi sottrattiva, in cui tre strati successivi di colore si sommano. In questo caso occorre tenere presente che lo strato sovrastante filtra quello sottostante, producendo un effetto molto diverso da quello descritto nella sintesi additiva. In pratica sovrapponendo uno strato giallo ad uno magenta si ottiene un colore rosso. Per comprenderlo occorre avere presente che un colore complementare si ottiene per sintesi sottrattiva sovrapponendo ad uno strato bianco un dato colore. Ad esempio sovrapponendo uno strato rosso si ottiene il ciano che è quindi il colore complementare. Come vedremo queste considerazioni hanno notevole rilevanza pratica, anche per la fotografia.

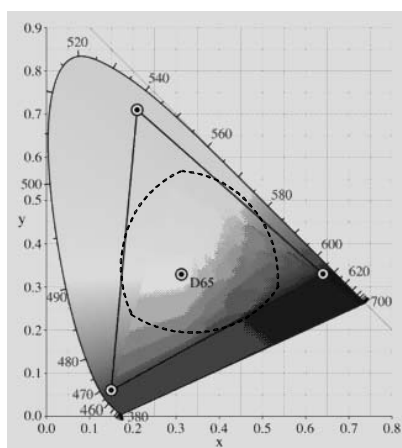


Tav. XIV - Sintesi additiva (a sinistra) e sottrattiva (a destra) dei colori

Il modello RGB assegna, in un'immagine a colori, un valore di intensità ad ogni pixel compreso fra 0 (nero) e 255 (bianco) per ciascuna delle tre componenti. Ad esempio, un colore rosso luminoso può avere un valore R di 246, un valore G di 20 e un valore B di 50. Quando i valori di tutte le tre componenti sono uguali, si ottiene una sfumatura di grigio. Quando il valore di tutte le componenti è 255, si ottiene il bianco puro, mentre quando il valore di tutte le componenti è 0, si ottiene il nero puro. I colori additivi vengono utilizzati per l'illuminazione, i video e i monitor. Il

monitor, ad esempio, crea il colore emettendo la luce attraverso i fosfori rossi, verdi e blu.

Lo spazio dei colori Adobe RGB è stato sviluppato da Adobe Systems nel 1998 allo scopo di includere la maggior parte dei colori che potevano essere riprodotti sulle stampanti a colori, vedi Tav. XV. Tuttavia, questo spazio di colori deve essere usato con periferiche, come i monitor, che utilizzano i colori RGB. Lo spazio dei colori Adobe RGB comprende approssimativamente il 50% dei colori visibili specificati nello spazio dei colori $L^*a^*b^*$, ma offre una gamma superiore rispetto allo spazio dei colori sRGB, perché comprende un maggior numero di tonalità di ciano-verde.



**Tav. XV - Individuazione dei colori ottenibili con lo standard Adobe RGB.
L'area proiettata tratteggiata è il GAMUT di un dispositivo che lavora con sintesi sottrattiva, come una stampante.**

Modello CMYK

Tutti i precedenti modelli sono stati immaginati per una sintesi additiva dei colori, ne esiste però uno (CMYK) che è basato su quella sottrattiva; esso è preferito da tutti coloro che, come gli stampatori ed i tintori in genere, hanno familiarità con la sintesi sottrattiva per motivi di lavoro. Anche coloro che utilizzano materiale fotografico lo devono conoscere, anche se non è detto che lo usino.

Il modello CMYK si basa sulla capacità di un pigmento o di un inchiostro di assorbire la luce. Idealmente, i pigmenti puri di ciano (C, azzurro brillante), magenta (M, rosso porpora) e giallo (Y) dovrebbero combinar-

si per assorbire tutto il colore e produrre il nero; per tale motivo sono chiamati anche *colori sottrattivi*. Per la presenza di impurità, in realtà questi tre inchiostri producono un marrone scuro, mentre per dare luogo a un vero nero devono essere combinati con un inchiostro nero (K). Quindi occorre fornire quattro valori, per cui si parla di quadricromia. Se si operasse con una sintesi additiva non sarebbe necessario. I colori sottrattivi (CMYK) e additivi (RGB) sono colori complementari tra loro. Ogni coppia di colori sottrattivi crea un colore additivo, e viceversa. Assegnate piccole percentuali di colori di quadricromia si ottiene un colore chiaro (luci), mentre quelli scuri (ombre) vengono ottenuti assegnate percentuali alte. Ad esempio, un rosso brillante può contenere 2% di cyan, 93% di magenta, 90% di giallo e 0% di nero. Con le coordinate CMYK, il bianco puro si ottiene quando tutti e quattro i valori sono nulli.

La combinazione dei colori CMYK per riprodurre ogni altro colore viene chiamata stampa in quadricromia. Sul foglio bianco vengono depositati tre strati sovrapposti di inchiostro colorato, corrispondenti ai colori magenta, giallo e ciano, ognuno dei quali assorbe circa un terzo dell'intero spettro della luce bianca incidente. Pertanto, nelle zone dell'immagine in cui i tre strati sono presenti tutti con la massima intensità si ottiene il nero (tutta la luce viene assorbita); nelle zone in cui si riduce la presenza del magenta, del giallo o del ciano si ottengono i rispettivi colori complementari, ossia il verde, il blu-violetto e il rosso. Dosando in modo opportuno le tre inchiostrazioni si ottengono i colori compresi in un'area del piano di cromaticità, che non è un triangolo come per la sintesi additiva (vedi fig. 16); per aumentare il contrasto fra le parti scure dell'immagine e quelle chiare si aggiunge di solito un quarto strato di inchiostro nero. Anche nelle fotografie il colore si forma per sintesi sottrattiva, partendo da tre colori base, quindi il GAMUT di una pellicola fotografica ha caratteristiche simili a quelle descritte in precedenza.

Modelli di colore HSV, HLS

In alcuni casi, come quando si sta elaborando un'immagine, è opportuno dare un significato più preciso alle coordinate. Sono stati sviluppati modelli di colore che potremmo definire più logici, in quanto più vicini ad una logica separazione delle variabili del colore. Partiamo dai colori puri, come definiti in precedenza, essi occupano il bordo del diagramma di cromaticità. Supponiamo di muoverci da un punto del bordo verso il centro del diagramma (cioè verso il bianco). È possibile osservare che in

questo percorso si incontreranno colori sempre più luminosi che avranno però in comune una tinta di base, ossia una lunghezza d'onda dominante λ_D . Se definiamo quindi colori puri (o dominanti) quelli che occupano il bordo del diagramma (coordinata H come hue), la saturazione sarà il rapporto tra le distanze del punto occupato dal nostro colore con la dominante e l'illuminante (coordinata S). La terza coordinata è la luminosità, cui viene dato il nome di valore ed una scala diversa. In figura 8 è semplificata l'operazione di calcolo della saturazione, per cui viene utilizzato l'illuminante standard C.

La principale differenza tra il sistema HSV e HLS è nella scala di valori assegnata alla coordinata della luminosità (definita valore nel sistema HSV). In ambedue i casi alla tinta (hue) viene assegnato un valore angolare da 0° a 360° . La saturazione è maggiore quanto più il colore è vicino al bordo del diagramma.

Va notato che per i colori vicini alla parte bassa (rettilinea) del diagramma viene definita una lunghezza d'onda dominante complementare nella zona del verde (λ_c).

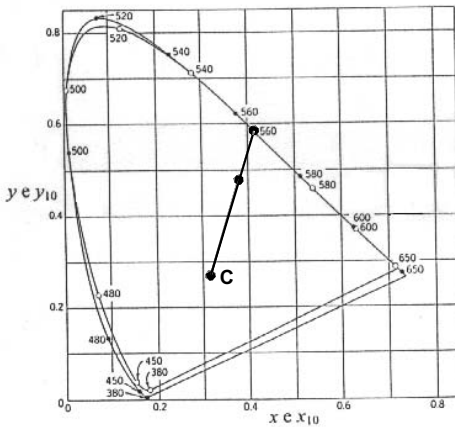
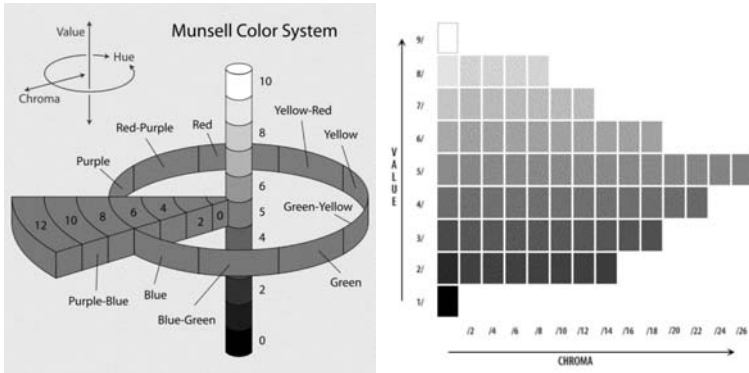


Fig. 16 - La saturazione si calcola dal rapporto delle distanze del punto colore dalla dominante (in questo caso un verde) e dall'illuminante standard (C).

Atlanti e cataloghi di colori

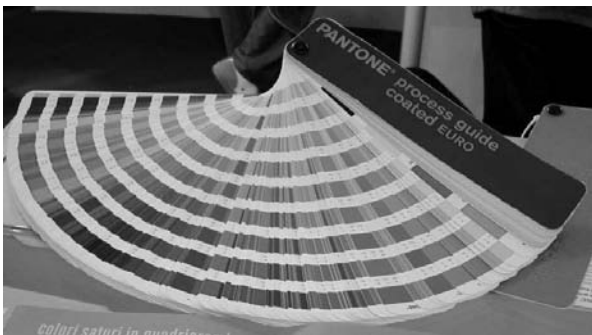
Un differente approccio al problema della identificazione dei colori è quello che è utilizzato nella costruzione degli atlanti o cataloghi di colori. Per comprendere il problema occorre riflettere sul perché si generano le bande del colore (o perché l'arcobaleno è composto di strisce colorate). La luce viene dispersa in tutte le direzioni e non vi è motivo di pensare che vi siano salti, allora, evidentemente, le bande nascono nel processo percettivo. Il problema potrebbe essere affrontato in altra maniera domandandosi quante sono le possibili sensazioni di colore. I colori sono in un numero infinito o finito? La risposta, senza ambiguità, è che il numero di colori è finito, esso è infinitamente inferiore a quello degli stimoli che li generano (metamerismo). Tornando alle bande di colore possiamo dire che tutte le lunghezze d'onda di un intervallo del visibile producono una stessa sensazione di colore: di qui nascono le bande del visibile. Avendo preso atto di ciò e facendo riferimento all'asserto che solo dal confronto diretto è possibile stabilire se due superfici hanno lo stesso colore, si arriva alla ovvia conclusione che occorre creare dei cataloghi di colore. In numerose professioni dai carrozzieri, ai tipografi fino ai venditori di vernici vi è l'abitudine di utilizzare tali cataloghi.

Il più significativo esempio è quello del "Munsell Book of Colors", redatto agli inizi del secolo scorso e tuttora usato come riferimento in diversi settori di applicazione. Per creare un atlante di colori occorre avere un valido sistema di classificazione. L'idea di Munsell è tra le migliori e parte da tre variabili che già conosciamo: la tinta, la saturazione e la luminanza (o valore). In Tav. XVI è schematicamente rappresentata tale classificazione, l'anello che trasla lungo l'asse centrale è suddiviso in cinque colori principali - rosso, giallo, verde, blu e porpora - più altri cinque intermedi, in direzione radiale sono riportati i colori al variare della loro saturazione. La traslazione dell'anello produce, infine, altri gruppi di colori con diversa luminosità (valore).



Tav. XVI - Rappresentazione schematica della classificazione dei colori proposta da Munsell

Vi sono numerosi altri esempi di catalogo dei colori come ad esempio la Scala Pantone che si presenta come un insieme di fogli di circa 15x5 cm sovrapposti rilegati in un solo angolo con un occhiello. In questo modo le pagine possono essere fatte ruotare fino a trovare il colore desiderato. Ogni "pagina" presenta dei quadrati colorati identificati da un numero stampati al vivo (cioè il colore arriva fino al bordo del foglio in modo da poter essere sovrapposto per un confronto diretto). Ad esempio una pagina può contenere 4 o 5 quadrati gialli con delle lievi variazioni di luminosità. Esistono anche versioni della guida formate da pagine rilegate ad anelli come un quaderno di formato A5.



Tav. XVII - Esempio di un catalogo della Pantone.

Alcune considerazioni conclusive

È sempre possibile trovare delle trasformazioni che permettano di passare da uno a l'altro dei sistemi di coordinate di colore. Ovviamente tra alcuni di questi la trasformazione è più semplice, come quando si passa dalle coordinate RGB alle HSV, e viceversa. Più complesso è il problema quando si cerca una trasformazione tra sistemi, come quello CiELab, intrinsecamente lineare e il più comunemente impiegato sistema RGB. Occorre tenere presente che i sistemi che si fondano su tre colori (che hanno quindi un GAMUT), come appunto quello RGB, non permettono di rappresentare tutti i colori possibili. Quei sistemi che sono più scientificamente corretti, soffrono spesso di una artificiosità che non ne facilita l'uso da parte di coloro che vogliono solo generare un colore su un video e non misurarlo con esattezza. Proporre quindi di riportare tutto, ad esempio, al sistema X,Y,Z è un errore, per generare un colore è sufficiente assegnare tre numeri da 0 a 255, questo è quanto si fa in un computer per semplificare il problema. Le conseguenze più gravi si osservano quando occorre tarare i diversi dispositivi che operano come periferiche di un computer, quelli che usano una sintesi additiva forniscono colori spesso molto differenti da quelli che impiegano quella sottrattiva. Il rischio di creare una babele del colore è forte, fortunatamente esistono i sistemi di calibrazione che permettono di rimediare agli errori. I principali programmi di elaborazione delle immagini e di grafica hanno comunque inseriti comandi che permettono di passare facilmente da un sistema all'altro.

Il problema del metamerismo, descritto in precedenza, va tenuto in debito conto nel caso che si voglia identificare un materiale dal suo colore.