

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica



Laurea triennale in Ottica e Optometria

**Effetti dell'illuminazione artificiale su
soggetti discromatici ed utilizzo di filtri
ColorLite**

Relatori:

Prof. Laura Bellia
Prof. Paolo Carelli

Candidato:

Alessandro Pensosi
Matricola M44/198

A.A. 2017/2018

" Ogni nuovo mattino, uscirò per le strade cercando i colori "
Cesare Pavese

INDICE

INTRODUZIONE.....	5
--------------------------	----------

CAPITOLO 1: LUCE E CARATTERISTICHE DELLE SORGENTI LUMINOSE ARTIFICIALI

1.1 LA LUCE.....	6
1.2 CARATTERISTICHE DELLE SORGENTI LUMINOSE ARTIFICIALI.....	6
1.2.1 LAMPADA AD INCANDESCENZA.....	7
1.2.2 LAMPADA AD INCANDESCENZA ALOGENA	8
1.2.3 LAMPADA FLUORESCENTE.....	8
1.2.4 LED.....	9

CAPITOLO 2 : FISIOLOGIA E PSICOFISICA DEL COLORE

2.1 L'OCCHIO UMANO, LA RETINA E I FOTORECETTORI.....	10
2.1.1 VISIONE FOTOPICA, SCOTOPICA E MESOPICA.....	11
2.2 DEFINIZIONE E TIPI DI COLORE.....	11
2.3 COLORIMETRIA E COLORE.....	12
2.3.1 GLI ATTRIBUTI DEI COLORI E LA LORO RAPPRESENTAZIONE GRAFICA.....	12
2.3.1.1 DIAGRAMMA CIE.....	13
2.3.2 SINTESI CROMATICHE (ADDITIVA E SOTTRATTIVA).....	14
2.3.3 CENNI SUL RAPPORTO COLORE-MATERIA.....	14
2.3.4 FENOMENI DELLA PERCEZIONE CROMATICA.....	15
2.3.5 METAMERISMO.....	16

CAPITOLO 3 : ANOMALIE NELLA VISIONE DEI COLORI E TEST

3.1 CLASSIFICAZIONE DELLE ANOMALIE CROMATICHE.....	18
3.1.1 INCIDENZA ED EREDITARIETA'.....	19
3.2 DISCROMATOPSIE ACQUISITE.....	20
3.2.1 CLASSIFICAZIONE DELLE DISCROMATOPSIE ACQUISITE.....	20
3.3 TEST PER LA VALUTAZIONE DELLE ANOMALIE CROMATICHE.....	21
3.3.1 ANOMALOSCOPIO DI NAGEL.....	22
3.3.2 TEST DI FARNSWORTH.....	22
3.3.3 CITY UNIVERSITY COLOR TEST.....	23
3.3.4 TEST DI ISHIHARA	24
3.3.5 TEST COLORLITE.....	25

CAPITOLO 4 : CARATTERIZZAZIONE DELLA SCENA LUMINOSA

4.1 RADIOMETRIA E FOTOMETRIA.....	28
4.2 STRUMENTI UTILIZZATI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA SCENA LUMINOSA: LUXMETRO.....	29
4.2.1 SPETTROFOTOMETRO E SPETTRORADIOMETRO.....	29
4.3 MESSA A PUNTO SCENA LUMINOSA.....	31
4.4 I CASI.....	32
4.4.1 ANALISI DATI DEI SOGGETTI.....	40

CONCLUSIONI.....	42
-------------------------	-----------

APPENDICE.....	43
-----------------------	-----------

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	45
---------------------------------------	-----------

RINGRAZIAMENTI.....	46
----------------------------	-----------

INTRODUZIONE

In questo lavoro di tesi esaminerò 7 soggetti affetti da discromatopsia in 5 diverse condizioni di illuminazione (scenari luminosi). In queste scene luminose utilizzerò 3 tipi di sorgenti di illuminazione artificiale (Led panel, lampada ad incandescenza e lampade fluorescenti), a varie temperature di colore e ad una specifica intensità di illuminamento. Ad ogni settaggio luminoso verranno misurati i vari parametri che caratterizzano l'ambiente.

Lo scopo di questo lavoro sarà quello di valutare gli effetti di ogni sorgente di illuminazione artificiale per ogni tipo di soggetto e valutare i filtri ColorLite.

Presenterò a 7 casi campione il test di Ishihara e il sistema ColorLite composto dal Color Vision Test e dieci coppie di filtri, per capire se è presente o meno il difetto, di che tipo e che filtro è più adatto al miglioramento per ogni singolo soggetto.

Molte informazioni riguardo la costruzione dei filtri e al funzionamento sono contenute nel brevetto dell'azienda, infatti per questo motivo mi è stato molto difficile analizzare tecnicamente alcune parti dell'argomento. La motivazione che mi ha spinto a scegliere questo argomento è stata quella di avere un amico discromate.

Quindi mi ha spinto la curiosità nel capire come potrà distinguere i vari test con diversi tipi di illuminazione e grazie a questi particolari filtri se ci potranno essere dei miglioramenti, quindi nel caso saperlo consigliare per il futuro, sia mediante l'utilizzo di questi eventuali filtri e sia mediante l'utilizzo di qualche sorgente particolare in modo tale da poter migliorare la vita quotidiana.

Le informazioni e i dati che ho raccolto creano una base di partenza per lo sviluppo di ulteriori ricerche, nella speranza che ci siano persone curiose ed interessate in questo ambito. Nella prima parte di questo lavoro parlerò in generale della luce, delle varie sorgenti di illuminazione artificiale e di come lo stimolo luminoso venga trasformato in sensazione visiva, dall'occhio al cervello. Per quanto riguarda la parte centrale, essendo la discromatopsia un difetto della percezione del colore andrò a trattare la colorimetria e le varie sfaccettature del colore. In seguito verranno descritti i vari tipi di discromatopsie, descrivendo le possibili cause e i vari test per determinarne la gravità e il tipo. Nell'ultima parte andrò ad esaminare vari soggetti con diverse sorgenti descrivendoli nelle varie tabelle per valutarne e commentare le risposte dei soggetti in diverse condizioni di illuminazione.

CAPITOLO 1

LUCE E CARATTERISTICHE DELLE SORGENTI LUMINOSE ARTIFICIALI

1.1 LA LUCE

Il termine **luce**, dal latino lux, è un insieme di radiazioni che suscitano una sensazione visiva. E' importante differenziare la radiazione visibile e la luce stessa, poiché non sempre le radiazioni visibili sono anche luce, cioè capaci di stimolare l'occhio ed essere viste, tutto ciò dipende anche dalle particolari condizioni del sistema visivo.

Per le esigenze psicofisiche è sufficiente definire lo spettro visibile (Fig.1) con due parametri fisici:

- Lunghezza d'onda compresa tra 380 e 760 nm e frequenza, quantificata in Hz, che sono inversamente proporzionali.
- Caratteristiche fotometriche;

Per il primo parametro corrisponde la sensazione psichica del colore invece per il secondo sensazione di brillantezza (non cromatica) e quelle ad essa correlate, come il contrasto.

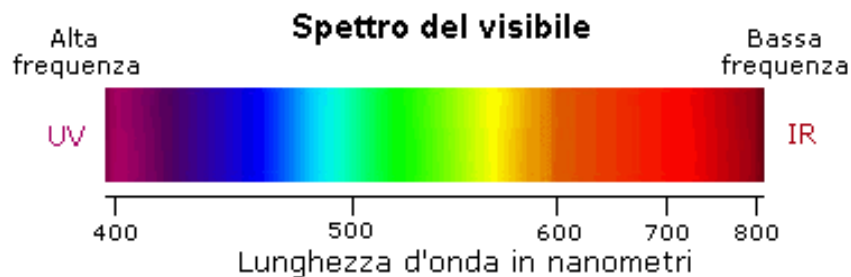


FIG.1 Spettro del visibile

1.2 CARATTERISTICHE DELLE SORGENTI LUMINOSE ARTIFICIALI

Le sorgenti d'illuminazione artificiali primarie, chiamate lampade sono alimentate da energia elettrica, esse inserite nel dispositivo di controllo formano quello che viene denominato apparecchio illuminante, quest'ultimo è formato da materiale riflettente e/o rifrangente utile per il controllo in intensità (attenuazione) e direzionalità del flusso luminoso emesso dalla lampada.

I parametri caratteristici di una lampada sono:

- Tensione di alimentazione: indica la tensione di alimentazione elettrica misurata in Volt.
- Potenza elettrica: indica la potenza necessaria al funzionamento della lampada, misurata in watt.
- Flusso luminoso: rappresenta, in lumen, la quantità di luce emessa dalla lampada.
- Efficienza luminosa (η): esprime il rapporto tra il flusso luminoso emesso dalla lampada e la potenza elettrica necessaria al funzionamento di quest'ultima ($\frac{lm}{W}$).
- Tonalità di luce: questo parametro rappresenta il "colore" della luce per definirlo introduciamo "la temperatura di colore".

La quantificazione in temperatura, espressa in kelvin (K), e la definizione di temperatura di colore nascono dal paragone della sorgente radiante con un corpo nero: il corpo nero converte in energia radiante tutta l'energia che assorbe e in corrispondenza alle differenti

temperature raggiunte, emette in modo differente. Al diminuire della temperatura colore, l'illuminazione assume un aspetto rossastro comunemente definito "caldo", mentre al suo aumentare l'aspetto diventa bluastrò cioè "freddo". (Fig.2)

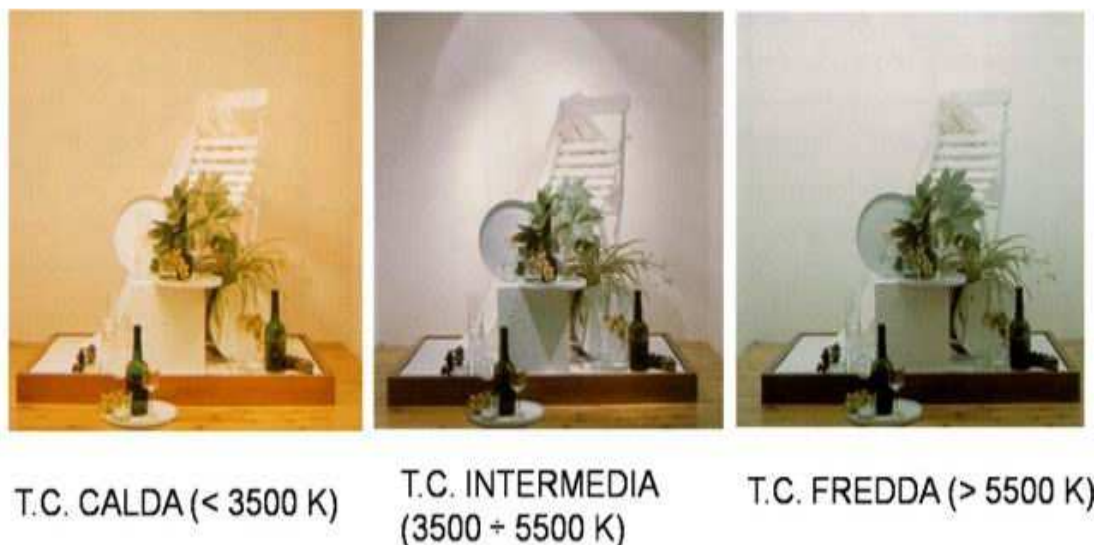


FIG.2 Temperatura di colore

- Indice di resa cromatica (Ra): rappresenta la capacità di una lampada di rendere i colori. L' indice di resa cromatica massimo è posto pari a 100.

1.2.1 LAMPADE AD INCANDESCENZA

L'elemento incandescente è un sottilissimo filamento metallico (tungsteno o altri materiali), contenuto in un'ampolla (bulbo), attraversato da corrente elettrica, continua o alternata, che ne provoca, per effetto Joule, il surriscaldamento fino a circa 2800 k e la conseguente irradiazione nello spettro visibile. La luce ha una tipica tonalità "calda" e un ottimo valore di resa cromatica. Modesta invece l'efficienza luminosa, pari in media a 12 lm/W per una lampadina da 100 W.(Fig.3)

Caratteristiche	Valori
Efficienza luminosa	10-25 lm/W
Temperatura di colore	2800-3000 K
Vita media	1000h
Resa cromatica	100



Fig.3 lampada ad incandescenza con annessa tabella rappresentativa

1.2.2 LAMPADA AD INCANDESCENZA ALOGENA

La lampada alogena è una particolare lampada ad incandescenza, la differenza sta nell'aggiunta di iodio o di altri alogeni che permette un riscaldamento del filamento fino ad oltre i 3000k, provoca anche una reazione col tungsteno che evapora. Il composto entrando in contatto con il filamento incandescente si decompone, facendo depositare di nuovo il tungsteno sul filamento creando così un ciclo continuo che ne allunga la vita media, il ciclo alogeno. La durata di questo tipo di lampada è quasi il doppio rispetto a quella tradizionale, circa 2000h. L'efficienza luminosa è pari a $16-30 \frac{lm}{W}$. La temperatura di colore è circa 2900-3500k, hanno un costo più elevato e sono molto più delicate.

1.2.2 LAMPADE FLUORESCENTI

Le lampade fluorescenti sono costituite da un tubo in vetro, sagomato in diverse forme, al cui interno prima viene praticato il vuoto e poi si introduce un gas nobile (argon, xeno, neon o Kriptone) a bassa pressione ed una piccola quantità di mercurio liquido, che evaporando in parte si mescola al gas nobile. Appartengono alla famiglia delle lampade a scarica. L'emissione del vapore di mercurio a bassa pressione è costituita da radiazioni ultraviolette e grazie alla polvere di fosforo vengono convertite in radiazioni visibili. L'efficienza luminosa più alta rispetto alle lampade ad incandescenza è circa 45-100 lm/W ma con il passare delle ore di funzionamento essa può cambiare, stessa cosa vale per la vita media, fortemente influenzata da accensioni e spegnimenti, oscilla tra 5000-10000 ore. La resa cromatica varia tra 60-95, a seconda dei modelli, mentre la temperatura di colore dipende dai fosfori.

1.2.4 LED

I led, Light Emitting Diode, sono costituiti da diodi a giunzione p-n, formati da un sottile strato di semiconduttore drogato. Sottoposti ad una tensione, rilasciano energia sotto forma di fotoni. Essi sono tipicamente formati da composti di germanio o silicio.

Le radiazioni emesse da un LED (Fig.4) sono raccolte attorno a un picco (la cui lunghezza d'onda determina il colore della luce prodotta) e che la potenza è praticamente tutta contenuta in un intervallo di lunghezze d'onda di circa 40nm: si può quindi affermare che il LED è una sorgente di luce a banda stretta.

Questa caratteristica può essere sfruttata al meglio in tutte quelle applicazioni che richiedono luce monocromatica, come ad esempio le luci posteriori delle automobili o le lampade dei semafori (nei quali invece che usare lampade a incandescenza da 140W e filtrare i colori necessari, spreco di tutta la potenza nella parte restante dello spettro emesso, si possono usare LED di colore appropriato che hanno consumi dell'ordine della decina di watt). Tuttavia abbiamo visto come per l'illuminazione sia necessaria una luce bianca, cioè con potenze distribuite in tutta la banda del visibile, per garantire una elevata resa dei colori.

Per arrivare a produrre luce eterocromatica bianca partendo dalla radiazione emessa dai LED esistono varie strategie, ognuna con pregi e difetti.

Il LED può avere un'emissione:

- continua : emissione costante di luce
- intermittente : emissione di luce ad intervalli di tempo regolari

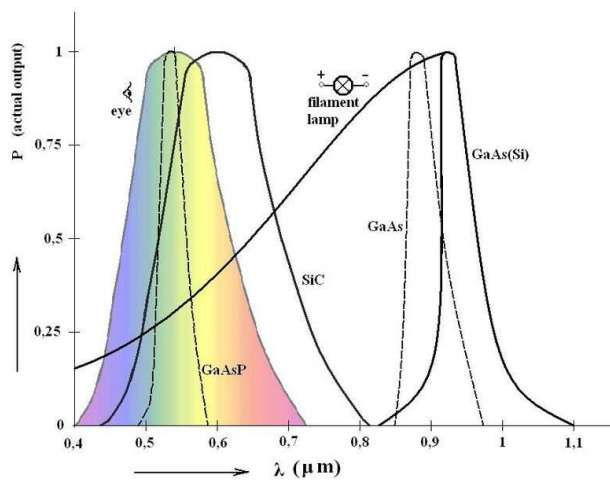


Fig.4 Spettro luminoso di vari LED messi a confronto con lo spettro visibile e quello della lampada ad incandescenza

CAPITOLO 2

FISIOLOGIA E PSICOLOGIA DEL COLORE

2.1 L'OCCHIO UMANO, LA RETINA E I FOTORECETTORI

Se l'occhio non esistesse, la parola luce sarebbe priva di significato. Per poter comprendere il meccanismo della visione è necessario descrivere l'organo preposto alla traduzione del segnale visivo in stimolo nervoso : l'occhio.

L'occhio umano è un bulbo approssimativamente sferico di circa 24 mm di diametro.

E' un organo sensoriale complesso che converte l'energia luminosa in segnali elettrici che vengono elaborati dal cervello. La retina è la terza tunica del globo oculare; è una membrana sensoriale altamente differenziata negli elementi costituenti, nella quale , avvengono, per l'azione delle radiazioni luminose, delle trasformazioni chimiche, fisiche ed elettriche per mezzo delle quali si origina lo stimolo che, giunto ai centri nervosi, vi determina il fenomeno percettivo della visione. Nella retina sono presenti quattro tipi di **fotorecettori**: i **bastoncelli** (*rods*) e tre tipi di **coni** (*cones*) indicati rispettivamente con le lettere L,M e S dall'inglese *long, medium, short*).

Nel loro complesso, bastoncelli e coni sono le cellule che formano il mosaico retinico.

I bastoncelli sono circa 100 milioni e i coni circa 4 milioni: 60% di coni L, 30% di coni M, 10% di coni S.

Nella suddivisione semplificata i coni rappresentano i neuroni di primo grado o elementi di ricezione delle radiazioni luminose. Possono essere suddivisi in tre parti: la prima parte è costituita dal corpo della cellula dove si trova il nucleo della stessa ; la seconda parte è formata dalla porzione mediana della cellula, ricca di mitocondri; ed infine, la testa, o elemento finale dal caratteristico aspetto conico, che è costituita da molti sottili dischetti , sacculi, disposti uno sopra l'altro e formati da una sostanza birifrangente: la iodopsina.

I bastoncelli fanno sempre parte del primo neurone e possono essere suddivisi, come i coni, in tre parti: la prima, il corpo della cellula, con la presenza del nucleo; la seconda o parte centrale, dove si trovano i mitocondri in numero sostanzialmente inferiore che nei coni; ed infine, la terza parte, ovvero la testa che si presenta strutturalmente simile rispetto ai coni ma con due importanti differenze: la sostanza componente i dischetti impilati è la rodopsina e l'aspetto è caratterizzato da una forma allungata.

La disposizione dei due tipi di cellule risulta differente, come differente è il compito al quale i due tipi di recettori sono deputati. Infatti i coni sono presenti in assoluto nella fovea centrale e nella macula, e poi in quantità sempre decrescente man mano che ci si allontana da questa regione retinica; i bastoncelli sono invece dislocati principalmente nella regione periferica della retina. Per la differente costituzione delle due cellule e per la loro disposizione nella retina, si ha che i coni sono atti alla visione dei colori e dei particolari, mentre i bastoncelli sono preposti alla visione dei movimenti e sono stimolati soprattutto dalla luce crepuscolare.

2.1.2 VISIONE FOTOPICA, SCOTOPICA E MESOPICA

La principale distinzione tra bastoncelli e coni riguarda la loro risposta ai livelli di luminanza: i bastoncelli rispondono a bassi livelli di luminanza, anche inferiore ad 1 cd/m^2 ; i coni rispondono a livelli di luminanza superiori. Questo consente di distinguere tre tipi di visione: **visione scotopica, fotopica e mesopica**.

La visione scotopica è la visione monocromatica dovuta esclusivamente all'attività dei bastoncelli della retina. Si tratta del tipo di visione che si ha quando il livello di illuminazione è molto basso e consente di rilevare differenze di brillantezza ma non differenze di cromaticità. La visione è in scala di grigi.

La visione fotopica è la visione dovuta unicamente all'attività dei coni della retina. Negli esseri umani ed in molti animali, la visione fotopica mediante i coni della retina, consente la percezione del colore, in particolare l'occhio umano utilizza 3 tipi di coni per percepire la luce nelle rispettive tre bande di colore. L'occhio umano non è in grado di captare le onde luminose di lunghezza superiore al *rosso* (infrarosse) ed inferiore a quella del *viola* (ultraviolette).

La visione a livelli di illuminazione intermedi è la visione mesopica.

2.2 DEFINIZIONI E TIPI DI COLORI

La problematica del colore e il suo studio ha causato il proliferare di tante definizioni.

I colori si definiscono in: acromatici, colori spettrali, colori fondamentali, colori primari, colori complementari.

Tra le sensazioni chiamate colori ne abbiamo tre con caratteristiche particolari: bianco, nero e grigio. Questi ultimi non corrispondono alla definizione di colore perché sono caratterizzati da un solo attributo cioè la luminanza, infatti possono solamente essere più chiari o più scuri. Per questo motivo vengono definiti colori acromatici, cioè senza colore e saturazione o con saturazione nulla. Inoltre se lo spettro di trasmissione, emissione o riflessione di uno stimolo mostra la stessa distribuzione energetica per le varie lunghezze d'onda, lo stimolo è chiamato bianco o grigio. I **colori definiti spettrali** originano dalla scomposizione, attraverso un prisma, della luce solare e vengono classificati in base alla deviazione prismatica che subiscono.

Essi sono: violetto, indaco, blu, verde, giallo, arancio, rosso.

Questi colori vengono rappresentati sul disco rotante di Newton (Fig.5) e descrivono un fenomeno particolare, infatti se lo si fa ruotare velocemente, si ottiene la sensazione del bianco o meglio grigio, un colore acromatico.

Esistono anche **colori non spettrali**, come porpora o magenta.

Tra i **colori fondamentali** vengono classificati il rosso, il blu, ed il giallo poiché non contengono sensazioni cromatiche di altri colori e inoltre si distinguono dai colori puri che sono stimoli con saturazione massima.



Fig.5 Disco rotante di Newton

Questi colori fondamentali sono presenti anche fra i colori primari, tranne il giallo, poiché per essere tali non devono formarsi dalla somma di altri colori.

Infine ci sono i **colori complementari** che se uniti in sintesi additiva danno come risultato il colore bianco, cioè si annullano. Essi sono quelli che si trovano in una posizione opposta nella scala armonica dei colori. Inoltre se vengono associati, danno luogo al massimo contrasto.

2.3 COLORIMETRIA E COLORE

Per colorimetria s'intende la misurazione sia quantitativa che qualitativa del colore. La colorimetria trova la sua base, non in un'unità di misura, ma nella percezione visiva e più precisamente in un "osservatore standard", a rappresentazione della visione di un campione umano.

La sorgente luminosa di base, con qualche precisazione è data dall'illuminamento solare. Il colore viene definito come "un aspetto dell'esperienza visiva", caratterizzato da tre componenti ed originato dalla stimolazione con radiazione di lunghezza d'onda compresa fra 380 e 760 nm. La struttura atomica di un oggetto, l'interazione di questa con la radiazione visibile che lo illumina e l'attività di fotorecettori oculari e della psiche danno origine al colore percepito.

2.3.1 GLI ATTRIBUTI DEI COLORI E LA LORO RAPPRESENTAZIONE GRAFICA

I colori hanno diverse caratteristiche o attributi che servono alla loro descrizione e identificazione. Ogni sensazione cromatica è caratterizzata da tre parametri che, se rilevati soggettivamente, sono:

- tinta o colore
- intensità (densità)
- brillantezza.

Quindi per tale motivo il colore può essere diverso (rosso, verde...); più o meno denso.

(Es. Rosa → Rosso desaturato); più o meno "chiaro", brillante o scuro.

Questi tre parametri cambiano in modo indipendente.

Invece, se rilevati oggettivamente, cioè con misurazioni fisiche, i parametri divengono rispettivamente:

- lunghezza d'onda (in nm)
- saturazione o purezza (in unità relative)
- luminanza (in nit o in $\frac{cd}{m^2}$)

Nella pratica, visto che gli oggetti colorati mostrano uno spettro piuttosto ampio e non lunghezze d'onda monocromatiche è molto comodo definire oggettivamente il colore in base a: **lunghezza d'onda dominante, saturazione o purezza, potere riflettente medio.**

La lunghezza d'onda dominante è la lunghezza d'onda che viene percepita con maggior brillantezza e viene ricavata mettendo a confronto lo spettro dello stimolo con la curva di sensibilità spettrale.

Per **saturazione** si intende la purezza o l'intensità di colore. Un colore saturo "non contiene parti di nero o bianco", ma possiede il massimo grado di intensità e pienezza ovvero il più alto livello di qualità cromatica.

La brillantezza è un attributo con il quale si indica la diversa "intensità" di una luce o se si tratta di un oggetto colorato della quantità di luce riflessa.

Essa è correlata con la luminanza, bisogna tener presente, fissate le condizioni visive che brillantezza e luminanza non sono correlate linearmente. La misura di un colore con gli attributi appena descritti si basa sul fatto che tutti i colori percepibili possano essere riprodotti per miscelazione di tre luci primarie opportunamente scelte.

Inoltre, non bisogna confondere la trivarianza del colore con le sintesi tricromatiche.

2.3.1.1 DIAGRAMMA CIE

Il modello CIE 1931 si basa sull'utilizzo dei tre colori primari che, se opportunamente miscelati tra loro permettono di ricavare tutti i colori che l'occhio umano è in grado di percepire.

Infatti, questi tre colori primari sono definiti da ben precise distribuzioni di intensità spettrale, $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$ scelte in modo convenzionale.

Dall'integrazione di queste tre curve con lo spettro della sorgente luminosa si ottengono le coordinate (x, y) . Gli assi sono formati dalle coordinate x, y ed i colori si trovano all'interno di un triangolo così individuato (Fig.6): I vertici del triangolo, cioè i punti aventi $(x=0, y=0)$ $(x=1, y=0)$ $(x=0, y=1)$ corrispondono a colori immaginari, scelti in modo tale che tutti i colori reali percepibili dall'occhio umano si possano ottenere come sovrapposizione opportuna di x, y e z . I colori spettrali "puri", corrispondenti cioè a lunghezze d'onda ben definite, stanno su una curva a ferro di cavallo; la curva è chiusa alla base dalla linea "porpora pura", che non corrisponde a nessun colore ottenibile con una definita lunghezza d'onda.

Il punto W al centro del diagramma (coordinate $x=0,33, y=0,33, z=0,33$) è il bianco ("white") o punto acromatico, cioè senza colore.

La tinta di un punto P si ottiene congiungendo P al punto W e prolungando il segmento fino alla curva dei colori spettrali. Il punto D che sta sull'intersezione è il colore dominante, nel senso che P è una miscela più o meno carica di bianco e del colore di D.

In D si ha la saturazione della tinta. L'intersezione C dal lato opposto di B è il colore complementare, cioè il colore che si ottiene togliendo dal bianco il colore avente lunghezza d'onda D. Il colore nero si ottiene quando si è al di sotto della soglia di sensibilità di tutti e tre i tipi di coni, per cui non si registra nessuno stimolo.

Fra il bianco e il nero ci sono diversi toni di grigio, in cui si supera la soglia di sensibilità dei coni, pur mantenendo la stessa miscela eguale delle tre componenti. Anche i colori possono avere un loro tono, che si ottiene valutando a quale "tono di grigio" corrisponde l'intensità di luce dei colori componenti.

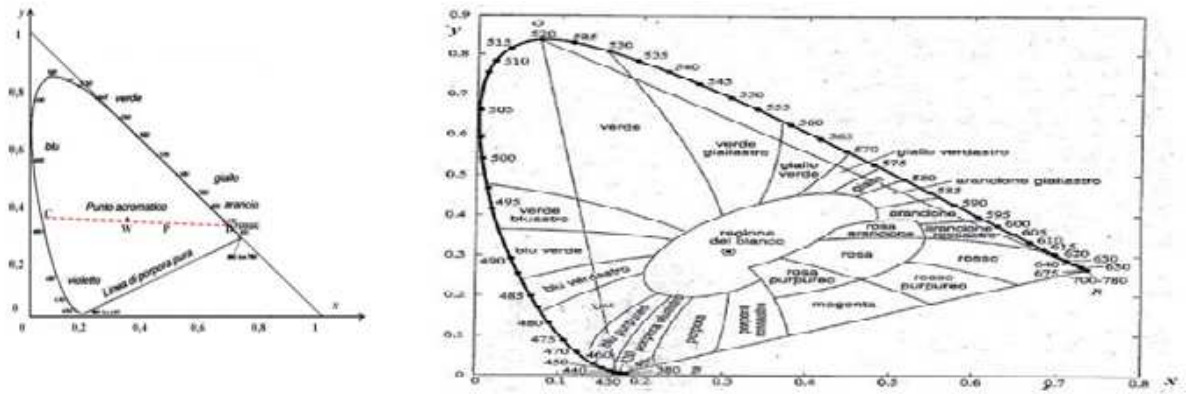


Fig.6 Diagramma CIE

2.3.2 SINTESI CROMATICHE (ADDITIVA E SOTTRATTIVA)

Una riproduzione cromatica accurata con le sintesi dipende dalla scelta della triade di colori primari, anche se la sola triade può risultare insufficiente da non permettere la riproduzione dei diversi colori, in questo caso vengono usati dei colori specifici in aggiunta.

I colori in natura si mescolano secondo due modalità diverse: la sintesi additiva e la sintesi sottrattiva.(Fig.7)



Fig.7 Sintesi additiva e sottrattiva

La **sintesi additiva** dei colori è quella usata dall'occhio umano e dai dispositivi che lo imitano, (televisioni, telecamere), che sintetizzano i colori affiancando punti colorati. Un'immagine è scomposta in tanti puntini (pixel) rossi, verdi e blu. I colori normalmente utilizzati per la sintesi additiva sono il rosso, il verde, il blu (in inglese Red-Green-Blue: RGB). Si ha sintesi additiva anche quando si sovrappongono le luci colorate provenienti da diversi fari. Se, invece, il punto di partenza è uno stimolo equienergetico e questo viene privato di alcune componenti fino a creare uno stimolo cromatico, si parla di **sintesi sottrattiva**. La triade di uso comune è Giallo-Ciano-Magenta.

La combinazione di due stimoli complementari porta a uno stimolo equienergetico, quindi al grigio.

2.3.3 CENNI SUL RAPPORTO COLORE/MATERIA

La radiazione visibile può interagire con un oggetto in tre modi. Essa può venir riflessa totalmente o parzialmente, senza attraversare l'oggetto, può essere assorbita in parte o totalmente, o ancora trasmessa in modo parziale o totale. Se l'oggetto assorbe tutte le varie radiazioni incidenti su di esso, nessuna radiazione poi può raggiungere l'occhio e di conseguenza "il corpo" appare nero, quando le temperature sono sufficientemente basse.

Considerando invece un corpo nero, se riscaldato, emette per le varie frequenze.

Più è alta la temperatura raggiunta dall'oggetto, maggiore sarà il picco di frequenza delle radiazioni emesse ed inversamente minori le lunghezze d'onda. Per avere emissione nella regione del visibile la temperatura deve essere almeno di 1000K, per temperature inferiori si ha emissione nella regione infrarossa. Nelle lampadine ad incandescenza la temperatura del filamento metallico raggiunge i 2700K e l'emissione avviene nelle regioni dell'IR, del rosso e nel giallo. La temperatura superficiale del sole invece è di circa 6000K. L'emissione solare per gli umani assume un aspetto neutro (bianco) poiché probabilmente l'evoluzione del nostro sistema visivo è avvenuta in presenza di questa luce. L'illuminazione solare varia nell'arco della giornata, per non avere problemi nella variazione della percezione, gli esseri umani hanno sviluppato la costanza percettiva di colore.

2.3.4 FENOMENI DELLA PERCEZIONE CROMATICA

I principali fenomeni che caratterizzano la percezione dei colori sono tre:

- Costanza del colore
- Opponenza cromatica
- Contrasto cromatico simultaneo

L'occhio in molti casi funge da "azzeratore", cioè capace di qualificare in modo relativo, effettuando il confronto tra due campioni. D'altro canto l'occhio non presenta elevate capacità per la valutazione assoluta di uno stimolo. Durante il giorno il contenuto spettrale della luce varia notevolmente ma le superfici e gli oggetti conservano la loro colorazione a dispetto di un'ampia gamma di variazioni nella composizione delle lunghezze d'onda e dell'energia che essi riflettono. Questo fenomeno è noto come costanza del colore

Es: La neve appare bianca anche al crepuscolo e il carbone appare nero anche se illuminato dal sole, questo anche se l'energia riflessa dal carbone risulta superiore a quella riflessa dalla neve.

Tutto questo accade grazie alla partecipazione psicologica e descrive una delle tante costanze percettive della psiche. (Fig.8)

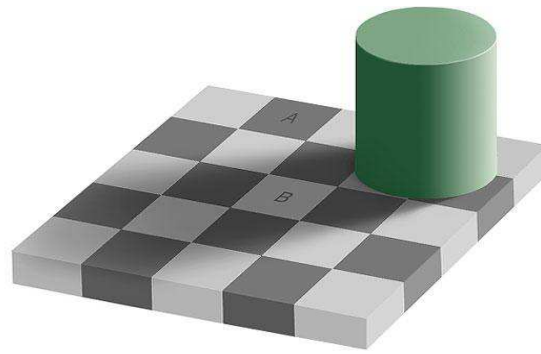


Fig.8 Illusione ottica.
I quadrati
contrassegnati con A
e B hanno la stessa
tonalità di grigio

Il modello dell'opponenza dei colori ha preso vita dall'intuizione di Hering, riguardo alcuni colori impossibili. Es: rosso verdastro, blu giallastro.(Fig.9)

La teoria dell'opponenza cromatica suggerisce quindi che la percezione dei colori sia basata sulla risposta di tre meccanismi che operano sull'opponenza di due colori: rosso-verde, blu-giallo (il terzo meccanismo bianco-nero è acromatico).



Fig 9. Opponenza cromatica

Il fenomeno del contrasto cromatico simultaneo fu studiato da Chevreul, egli si accorse, che se la fissazione dell'occhio su un'immagine molto colorata, per un tempo di 15-20 secondi, si spostava poi su uno sfondo bianco, si formava per pochi secondi, la stessa immagine, ma del colore complementare a quello reale.

Questo fenomeno è rappresentato nella figura 10.

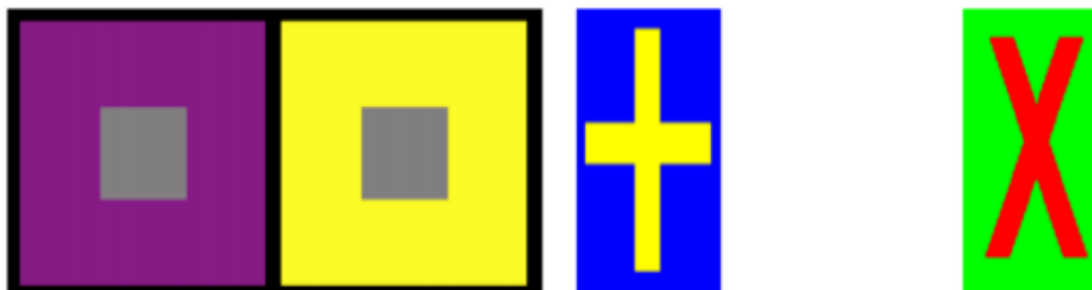


Fig. 10 Esempio di contrasto simultaneo e contrasto successivo

2.3.5 METAMERISMO

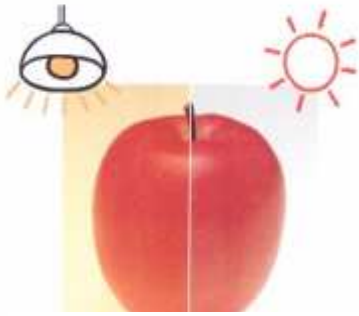


Fig.11 L'oggetto in questione presenta un grado di metamerismo

Il fattore di riflessione spettrale o curva spettrofotometrica, che fornisce il valore della percentuale di luce riflessa da un oggetto alle varie lunghezze d'onda, fornisce un'analisi accurata del comportamento di un oggetto colorato, sotto condizioni di illuminamento prestabilite.

Se due oggetti hanno curve spettrofotometriche identiche, allora sono percepiti uguali, indipendentemente dagli illuminanti o dagli osservatori impiegati: si dice che tali oggetti hanno colori isomeri.

Qualora si usino prodotti coloranti diversi, l'imitazione di colore tra standard e oggetto presenta un certo grado di metameria: anche se i due colori sembrano uguali (imitazione), le curve di riflettanza differiscono. I colori metamericici sono pertanto definiti come stimoli di colore che danno la medesima percezione visiva e quindi hanno gli stessi valori tristimolo (nel diagramma di cromaticità sono quindi rappresentati dallo stesso punto), ma con distribuzione spettrale differente; questi colori sono giudicati uguali limitatamente a specifiche condizioni di imitazione e osservazione.(Fig.11)

CAPITOLO 3

ANOMALIA NELLA VISIONE DEI COLORI E TEST

La prima rilevazione di un'anomalia nella percezione cromatica è rivelata da J. Dalton, chimico e fisico del Novecento, il quale era affetto da una discromatopsia.

Per questo motivo, le varie alterazioni vengono racchiuse nel termine "daltonismo".

I difetti nella percezione cromatica possono essere congeniti o acquisiti.

I soggetti con questa deficienza subiscono una riduzione sia nella capacità di discriminazione e sia nella capacità di vedere i diversi colori rispetto ad un soggetto "normale".

3.1 CLASSIFICAZIONE DELL'ANOMALIE CROMATICHE: DISCROMATOPSIE E ACROMATOPSIE

Le alterazioni della percezione cromatica vengono distinte in due principali gruppi:

- discromatopsie o discromie, quando la percezione cromatica è presente ma è differente dal normale
- acromatopsia (acromia o monocromatismo) quando la percezione cromatica è assente

Le anomalie del tipo discromatopsico sono di gran lunga più frequenti.

Un soggetto normale presenta tre pigmenti retinici (tricromia) con diverso spettro di assorbimento. Il tricromatismo si suddivide in "normale" ed "anomalo". La maggior parte dei soggetti è tricromate normale; essi lavorando al colorimetro raggiungono le uguaglianze fra il colore in esame e la mescolanza degli stimoli che hanno a disposizione e le varie differenze individuali variano entro limiti ragionevoli. Nei tricromati anomali il grado di anomalia è lieve, anche in questo caso sono presenti tre pigmenti dei coni diversi ma uno di questi è differente dal normale.

Essi si suddividono in:

- protanomali, presentano una discriminazione ridotta nel rosso-giallo;
- deuteranomali anch'essi con riduzione di discriminazione ma nel verde-giallo;
- tritanomali con riduzione della discriminazione nel verde-blu.

Le differenze tra questi tre gruppi risiedono nel fatto che i protanomali possiedono una curva di sensibilità, alle diverse lunghezze d'onda, diversa dal normale ovvero minor sensibilità per le grandi lunghezze d'onda. I deuteranomali hanno una curva di sensibilità diversa dal normale. Mentre la curva di sensibilità del tritanomalo si differenzia da esso nella parte delle brevi lunghezze d'onda. Il tetartan (o tetran) è un'anomalia per il giallo di cui viene solo ipotizzata l'esistenza, ma che non ha trovato prove cliniche e sperimentali. I dicromati si suddividono in tre gruppi(Fig12) :

- deuteranopi
- protanopi
- tritanopi

I deuteranopi attribuiscono due colori a tutto lo spettro, il giallo per le lunghezze d'onda maggiori (confondendo giallo, arancio e rosso) e porpora-blu per quelle brevi. Il punto neutro si trova tra le due sensazioni cromatiche, a 497/498 nm, in prossimità di questo punto si ha capacità di discriminazione ma con l'allontanarsi la soglia aumenta sempre di più.

La brillantezza spettrale è molto simile a quella normale, poiché i due fotorecettori rimanenti consentono di rilevare l'intero spettro.

I protanopi non differiscono molto dai deuteranopi, infatti gli stimoli oltre il punto neutro (492/495 nm) appaiono giallastri (confondendo verde, giallo, arancio e rosso), invece quelli di lunghezza d'onda inferiore appaiono blu-porpora. Per quanto riguarda la brillantezza spettrale, essa è ridotta per il rosso ed è spostata verso brevi lunghezze, tanto che un oggetto rosso può essere giudicato nero. La protanopia è considerata più grave della deuteranopia.

Per quanto riguarda la tritanopia, la discriminazione spettrale è ridotta per le piccole lunghezze d'onda ed è migliore a circa 570 nm. Il punto neutro si trova a 570/571 nm. La brillantezza spettrale e l'estensione dello spettro sono simili al normale anche con la perdita di un fotorecettore estremo. La sensazione prevalente è per stimoli rosso e verde-blu. Nei soggetti monocromati è in atto solo la discriminazione della brillantezza, mentre sono incapaci di percepire le differenze di tono. Inoltre sono casi molto rari e nella maggior parte dei casi il loro difetto è dato dall'inattività dei coni (la loro curva di sensibilità è uguale a quella scotopica di un individuo normale). Il monocromatismo è chiamato anche acromatopsia, così come il dicromatismo è denominato discromatopsia.

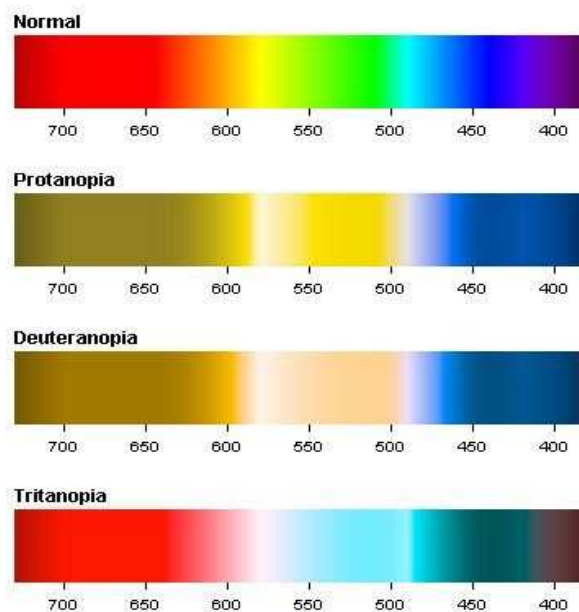


Fig.12 Lo spettro percepito dagli individui con normale visione dei colori, protanopia, deuteranopia e tritanopia

3.1.1 INCIDENZA ED EREDITARIETA'

Le discromatopsie congenite sono considerate malattie ereditarie recessive legate ai cromosomi sessuali. Il sesso femminile è coinvolto con minor frequenza poiché è fondamentale che entrambi i genitori siano portatori dell'anomalia (cioè che entrambi i cromosomi presentano il gene anomalo). Tutto questo è legato al fatto che l'anomalia è legata al cromosoma X, infatti un padre con quest'anomalia, non può diffonderla ai figli maschi ma solo alle figlie femmine che poi divengono portatrici. Circa l'8% dei maschi è affetto da una discromatopsia, ma solo il 4-6% dei soggetti lamenta disagi, in genere in forma lieve. Tra questo 8% abbiamo:

- 5% presentano deuteranomia;
- 1% presentano deuteranopia;
- 1% presentano protanomalia;
- 1% presentano protanopia;

La popolazione femminile è affetta per uno 0.25%-0.4% (deuteranomia) e sporadicamente per le altre anomalie. Le anomalie Tritan (<0.001% della popolazione maschile) invece sono di tipo autosomico dominante, cioè non è legato a cromosomi sessuali, ma prevalentemente si presentano nella forma acquisita. Anche il monocromatismo (<0,0001% della popolazione maschile) è probabilmente trasmesso autosomicamente.

3.2 DISCROMATOPSIE ACQUISITE

Le alterazioni delle vie visive (retina, nervo ottico, strutture superiori) possono influenzare la visione cromatica. Questo tipo di alterazione è legato alle funzioni della parte anatomica coinvolta, si conoscono, infatti, alterazioni corticali che portano ad una percezione acromatica solo per parte dell'intero campo visivo. In alcune malattie della retina e del nervo ottico è ancora sconosciuto il meccanismo che determina la perdita o il recupero del senso cromatico.

Le anomalie acquisite hanno varie caratteristiche che le differenzia da quelle congenite:

- Iniziano dopo la nascita in qualsiasi momento;
- La gravità varia con il tempo;
- Classificazione e risultati ai test possono differire dalle forme congenite;
- L'acuità visiva è ridotta e il campo visivo alterato;
- Prevalentemente di tipo tritan;
- Incidenza simile per maschi e femmine.

Inoltre essendo una forma acquisita le alterazioni nella visione cromatica possono essere bilaterali o monolaterali e tra le varie cause abbiamo:

- L'opacità del cristallino (cataratta) che può portare ad una alterazione seppur lieve della sensibilità blu-giallo;
- Negli alcolisti si riscontra una riduzione della sensibilità ai colori, maggiore per il blu-giallo rispetto al rosso-verde;
- Traumi cranici.

3.2.1 CLASSIFICAZIONE DELLE DISCROMATOPSIE ACQUISITE

Birch nel 1993 classificò le forme acquisite in tre tipi:

- Tipo 1 (Rosso-Verde): simile alla forma protan congenita, il picco della curva di efficienza luminosa è spostato verso lunghezze d'onda brevi. Tra le varie cause abbiamo la distrofia dei coni o dell'epitelio retinico pigmentato
- Tipo 2 (Rosso-Verde): simile alla forma deutan congenita, ma con maggior riduzione della sensibilità spettrale a lunghezza d'onda brevi. Essa è causata dalla neurite ottica.
- Tipo 3 tritan (Blu): simile alla forma tritan congenita ma con il picco della curva di efficienza luminosa spostato verso lunghezze d'onda lunghe. Le cause sono: corioretinopatia sierosa centrale, degenerazione maculare senile, distrofia dei coni e bastoncelli, disordini vascolari retinici (causato da diabete), lesioni retiniche periferiche, glaucoma, atrofia ottica autosomica dominante.

La gravità di queste forme è molto variabile e la classificazione tramite i vari test tradizionali può essere confusa.

La discromatopsia può essere accompagnata da visus normale, i vari limiti sono rappresentati dal fatto che i soggetti affetti non possono occuparsi di alcune professioni o mestieri, in genere tutte le attività che richiedono l'integrità del senso cromatico.

3.3 TEST PER LA VALUTAZIONE DELLE ANOMALIE CROMATICHE

Un esame minuzioso della percezione o sensibilità cromatica deve osservare le proprietà fondamentali del colore, ovvero: il tono (in funzione della lunghezza d'onda); la saturazione (in rapporto alla purezza del "colore"); la brillantezza (dipendente dalla luminanza, considerando costante la saturazione); per di più poiché la sensibilità cromatica può essere alterata in rapporto alle diverse parti del campo visivo bisogna determinare il campo visivo cromatico.

Anche la sensibilità cromatica che proviene dalla macula è necessaria misurarla in rapporto alla grandezza minima di una superficie "colorata" percepita ad una data distanza, definita acuità cromatica.

Nella pratica comune molto spesso si ricorre a metodi semplici adatti a vari tipi di soggetti che ci consentono di valutare con sufficienza i vari difetti cromatici, si tratta quindi di presentare una gran quantità di oggetti al soggetto, capaci di stimolare sensazioni cromatiche e invitandolo a scegliere quello che ritiene più simile al campione prescelto. Questo metodo permette analisi qualitative.

Tra i vari metodi molto diffusi in passato vi erano le lane di Holmgreen, costituite da un vasto assortimento di matassine di lana diversamente colorate.

Oggi queste matassine sono state sostituite da test che richiedono una classifica di campioni colorimetricamente ben definiti (test di Farnsworth). Se il soggetto presenta una buona visione cromatica, le matassine scelte presentano un colore simile a quello del campione, mentre se ci sono anomalie, il colore sarà diverso, ovviamente più le tinte sono lievi o incerte (colori di confusione), più gli errori saranno evidenti.

Sono numerosi gli apparecchi e i vari metodi proposti per l'esame della percezione cromatica.

Si determinano:

- Metodi basati sui “colori” spettrali e sulle loro miscele;
- Metodi basati sui “colori” complementari;
- Metodi basati sui “colori” di confusione.

3.3.1 ANOMALOSCOPIO DI NAGEL

L' anomaloscopio (Fig.13) di Nagel per difetti R-V; di Pickford-Nicolson per difetti nel blu-giallo è lo strumento di riferimento per valutare la tricromatopsia anomala, difficile che venga usato nella pratica comune anche per il costo notevole. Viene chiesto al soggetto di formare uno stimolo in sintesi additiva (rosso+verde), paragonato allo stimolo monocromatico proposto come campione (giallo).

L'intensità maggiore usata per il rosso o verde identifica il soggetto come, affetto da anomalia protan o deutan. Svolgere test cromatici a video (o videoterminale) è molto comodo ma il controllo dell'equilibrio di illuminazione e dei cromatismi risulta essere complesso.



Fig.13 Anomaloscopio di Nagel

3.3.2 TEST DI FARNSWORTH

Il test di riferimento per la percezione cromatica è considerato quello di Farnsworth, esso presenta due versioni: 100 toni (“100 Hue”, adattato a 88 campioni) per ricerca, e il test dicotomico D-15, sufficiente per le esigenze cliniche.

Per eseguire il test D-15 (Fig.14), bisogna ordinare in sequenza una serie di 15 campioni colorati, una volta stabilita la sequenza dal soggetto, essa viene posta su uno schema e in relazione ai vari accoppiamenti che il soggetto realizza, si evidenziano le varie difficoltà percettive.

Questo test nasce con l'intenzione di differenziare i soggetti con percezione cromatica normale o con lievi anomalie (che non compromettono la visione), da quelli con anomalie (da questo il termine dicotomico). Le varie anomalie vengono differenziate per gruppo e può essere evidenziata anche la condizione tritan.

Per come è strutturato il test l'evidenziazione della tricromia anomala è difficile.

Da questo test originano il test di Lanthony desaturato e il test Adams DSAT, consigliati per le forme acquisite e per la tricromia anomala, sono simili al D-15 ma dotati di una sensibilità maggiore; il test 28 toni di Roth (versione ridotta del “100 Hue”) e il CUCT (City University Color Test) che ci permette la valutazione della gravità dell' anomalia.



Fig. 14 Test di Farnsworth D-15

3.3.3 CITY UNIVERSITY COLOUR TEST

Il City University Color Test (Fig.15) è stato sviluppato dall'omonima università londinese, deriva dal test di Farnsworth D-15 ed è diviso in due parti. La prima parte evidenzia la presenza di anomalia nella percezione cromatica, viene utilizzata per trovare rapidamente un significativo difetto nella visione dei colori. Con questa parte del test possono essere individuati tutti e tre i tipi di difetti anche se il deutan e il protan non possono essere distinti tra loro come invece succede per il tritan; mentre la seconda parte identifica il tipo di anomalia e serve per distinguere il tipo di discromatopsia e avere delle informazioni riguardo al grado del difetto.

A differenza del test di Ishihara questo test molto spesso riesce ad individuare anomalie di tipo tritan. Può essere eseguito sia in monoculare che binoculare e va posto a 40 cm dagli occhi del soggetto e perpendicolarmente alla linea di sguardo o osservazione.

E' necessaria un'illuminazione di 600 lux per soggetti giovani e quasi il doppio per soggetti che superano i 50 anni di età.



Fig.15 City university colour vision test

3.3.4 ISHIHARA TEST

Il test di Ishihara (Fig.16) è composto da una serie di tavole con lo scopo di diagnosticare in maniera accurata il daltonismo congenito, soprattutto per l'asse rosso- verde, che rappresenta la forma più comune del daltonismo.

E' composto da 38 tavole poste all'interno di un libro con pagine che presentano uno sfondo tipicamente nero. Le tavole sono formate da piccoli cerchietti di colorazione differente ma con

uguale livello di luminosità con all' interno dei numeri o dei percorsi da seguire. Quest'ultime devono essere sottoposte al soggetto in una stanza molto luminosa, alla luce del giorno e proveniente dalle sue spalle, esse devono essere tenute all'altezza dell' occhio ad una distanza minore di 75 cm evitando visuali oblique e movimenti della testa che potrebbero alterare il test. La lettura di una tavola deve essere effettuata in 15 secondi di tempo ed è possibile eseguire il test sia in mono che in binoculare. La prima tavola contiene il numero 12 e non è pseudoisocromatica. E' la tavola di dimostrazione del test e viene letta anche da chi presenta anomalie nella percezione dei colori. La quantità di letture delle tavole da 1 a 21 determina la normalità o i difetti nella visione dei colori. Se vengono lette normalmente 17 o più tavole, la visione dei colori è ritenuta normale. Se vengono lette soltanto 13 o meno di 13 tavole, la visione dei colori è da ritenersi deficiente. Tuttavia, riferendosi alle tavole 18,19 e 20 soltanto coloro che leggono i numeri 5,2,45,73 e li leggono più facilmente di quelli sulle tavole 14,10,13 e 17, sono da ritenersi anormali.

Le tavole 22-25 sono le più interessanti, in quanto permettono di distinguere la vera cecità per un colore (protanopia o deuteranopia a seconda che sia per il rosso o per il verde) dalla cecità parziale (protanomalia o deuteranomalia). Dalla tavola 27 alla 38 i numeri sono sostituiti da percorsi per gli illetterati, con lo stesso significato della lettura dei numeri.

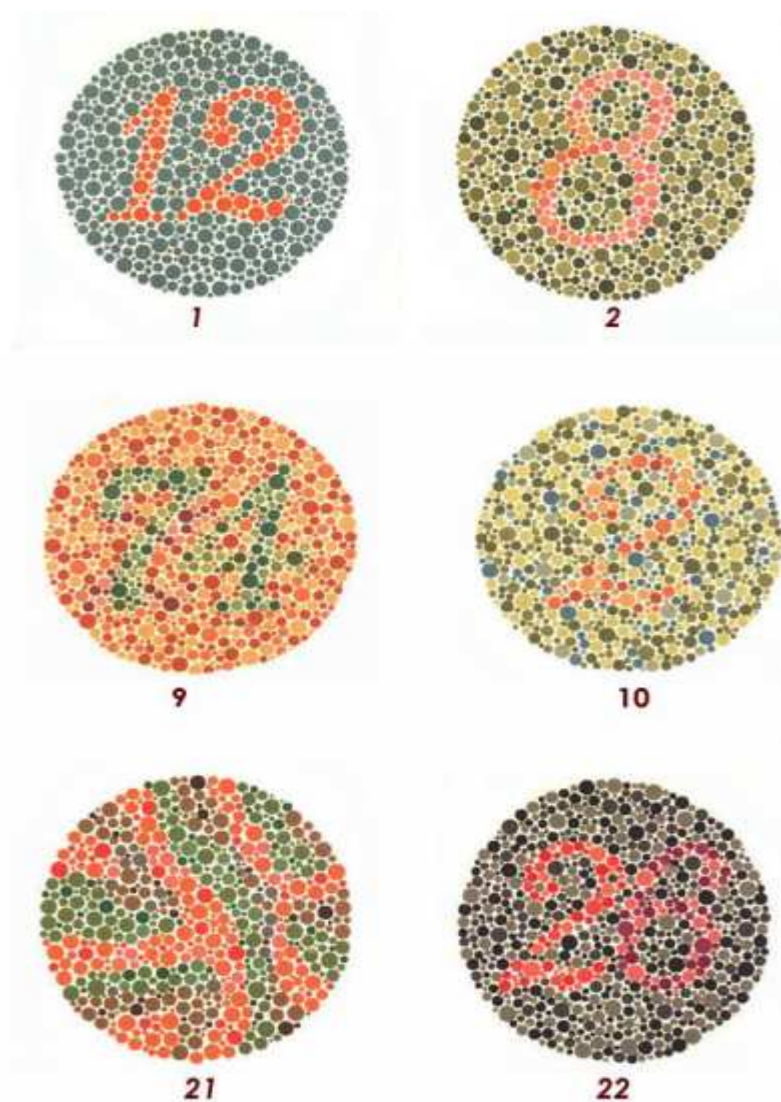


Fig.16 Tavole di Ishihara

3.3.5 TEST COLORLITE

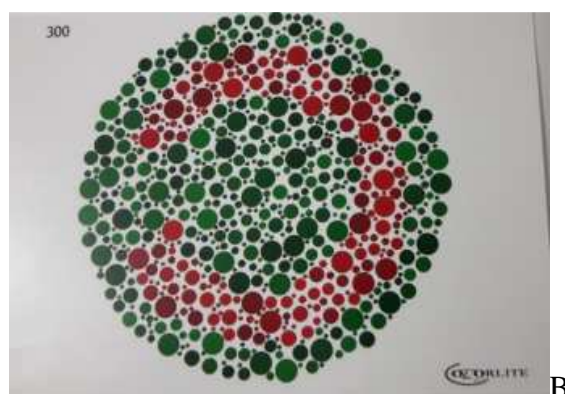
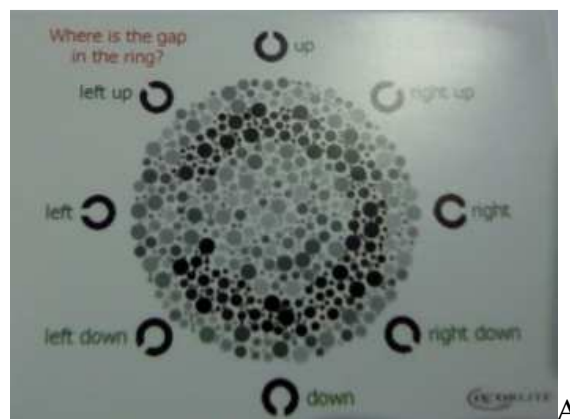
Il Color Vision test individua il tipo e la gravità del daltonismo, durante le varie misurazioni con lenti correttive ci consente di scegliere le lenti più appropriate.

Il test è molto semplice e veloce, infatti dura circa 1-3 minuti.

Il sistema colorlite è formato da un test, e un set di filtri di prova.

Il test è composto da tre sezioni, dove ognuna è composta da una serie di tavole pseudoisocromatiche dove all' interno sono presenti gli anelli di Landolt. La prima tavola è in bianco e nero e serve solo per la comprensione dell'intero test (Fig.17A). Ognuna delle sezioni ha delle caratteristiche e degli scopi precisi infatti: la prima è formata da 16 tavole chiamata serie rosso-verde, serve per determinare la gravità della discromatopsia. Le tavole hanno uno sfondo verde con gli anelli rosso-marroni (Fig.17B), mentre le restanti due sezioni, composte ognuna da 11 tavole, servono a distinguere il difetto protan da quello deutan e quindi il tipo di discromatopsia.

La sezione dedicata a rilevare il difetto protan cioè la seconda, presenta tavole con sfondo porpora e gli anelli blu (Fig.17C), mentre la terza sezione quella dedicata a rilevare il difetto deutan è composta da tavole con sfondo porpora e gli anelli verdi (Fig.17D). Non ci sono tavole per determinare la tritanopia, difetto nelle lunghezze d'onda minori.



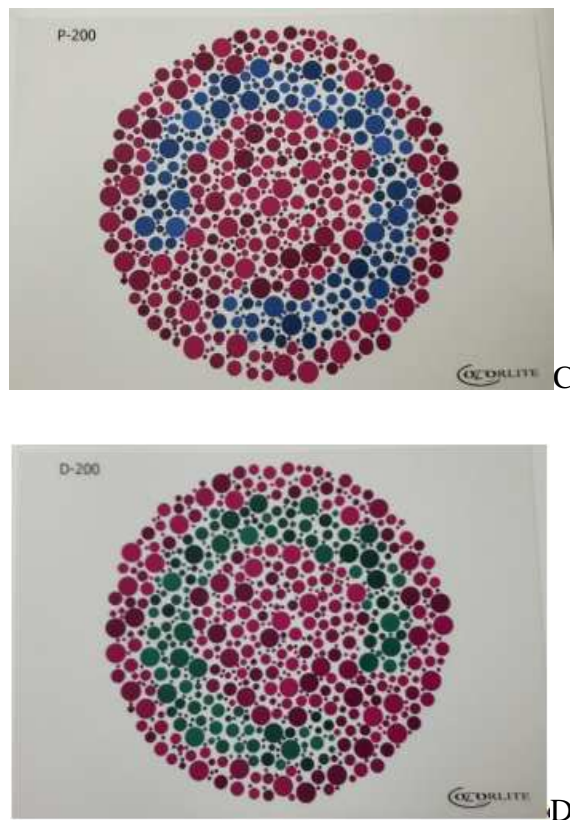


Fig 17: a) prima pagina del ColorLite test, tavola non pseudoisocromatica. b) prima tavola della prima sezione (rosso-verde) del ColorLite test. c) prima tavola della seconda sezione (blu-porpora) del ColorLite test. d) prima tavola della terza sezione (verde-porpora) del ColorLite test.

Gli anelli all'inizio di ogni sezione possiedono un forte contrasto di colori, ma andando avanti con le tavole, aumenta la sensibilità del contrasto del colore mentre lo sfondo è costante. Quindi nel riconoscere l'apertura dell'anello, aumenta sempre di più la difficoltà andando avanti nella lettura, inoltre a seconda della sensibilità del soggetto per una sezione rispetto ad un'altra, si determina il difetto. La prima tavola della serie rosso-verde ha come codice identificativo 300, mentre le altre due sezioni partono da 200, fino ad arrivare alla 20 dove l'anello è quasi uniforme allo sfondo. La normalità viene raggiunta dal riconoscimento dell'anello appartenente alla tavola 80. Nella prima sezione (rosso-verde), il colore rosso-marrone dell'anello nella tavola 300 va a sbiadire man-mano che si procede con il test, diventando così marrone verso la tavola 200 e poi verde, fino a confondersi con lo sfondo nella tavola 20. Come diminuisce la componente rossa della prima sezione, così anche quella blu e verde della seconda e terza sezione diminuiscono. Queste anomalie si possono ridurre usando lenti migliorative. I filtri presenti in questo sistema sono formati da uno strato particolare, progettato per permettere allo spettro della luce di combinarsi in modo che la stimolazione dei colori avvenga normalmente, come nei soggetti senza anomalie. Osservando i vari spettri dei filtri possiamo notare come lo spettro venga attenuato maggiormente nella lunghezza d'onda del verde (VEDI APPENDICE). Grazie a questi filtri, chiamati filtri Colorlite, diamo l'opportunità ai discromati di avere la visione nella percezione di colori. Infatti nella maggior parte dei casi si ha un miglioramento nella discriminazione dei colori. Nel set di prova si trovano due tipi di filtri, uno per il difetto protan (P) e l'altro per il difetto deutan (D). Entrambi i tipi di filtri presentano gradazioni di colore diverso, dalla meno alla più intensa chiamati con un codice. Es: P-10,P-15,P-20,P-25,P-30 dove P sta per protan oppure D-10,D-15,D-20,D25,D-30 dove D sta per deutan. (Fig.18)

Se il soggetto nella prima serie (rosso-verde) raggiunge come risultato massimo la tavola 200, si parte con il filtro di prova P-25 o D-25 a seconda del difetto che presenta, quindi in base ai risultati dei test precedenti si propone il filtro più opportuno. Si propone di far indossare i filtri almeno 10-15 minuti al soggetto, per dar tempo al sistema percettivo di adattarsi. Successivamente si chiede al soggetto di osservare un foglio bianco, se gli appare bianco c'è bisogno di un altro po' di tempo, se gli appare rosso la lente sposta eccessivamente la lunghezza d'onda, il soggetto dovrà avere percezione del colore del foglio come bianco-rosa. Il filtro sarà idoneo se il soggetto avrà miglioramenti sia nel Color Vision test sia nelle tavole di Ishihara.



Fig.18 Set di filtri ColorLite

CAPITOLO 4

CARATTERIZZAZIONE DELLA SCENA LUMINOSA

4.1 RADIOMETRIA E FOTOMETRIA

La radiometria studia la misura della radiazione elettromagnetica tramite un insieme di grandezze fisiche.

Le grandezze radiometriche per l'emissione e la trasmissione sono:

- Energia radiante (Q_e) \rightarrow energia totale emessa da una sorgente, misurata in Joule.
- Flusso radiante o potenza radiante $\Phi_e \rightarrow$ energia emessa da una sorgente per unità di tempo, l'unità di misura è il watt. Se il flusso è uguale nelle varie direzioni, la sorgente viene detta isotropa.
- Intensità radiante (I_e) \rightarrow è la grandezza che descrive il diverso comportamento della sorgente nelle varie direzioni dello spazio. E' definita come il flusso radiante per unità di angolo solido in una data direzione, si misura in $\frac{W}{sr}$.
- Radianza (L_e) \rightarrow è la quantità di energia emessa da una superficie nell'unità di tempo per unità di angolo solido in una data di direzione e per unità di superficie. L'unità di misura è watt $sr^{-1}m^{-2}$. L'angolo solido è una regione conica di spazio ed è definita dal rapporto tra l'area della superficie A intercettata dal cono sulla sfera ed il quadrato del raggio della sfera stessa: $\omega = \frac{A}{r^2}$. L'unità di misura è steradiani.
- Irradianza \rightarrow è una grandezza radiometrica utile in fase di ricezione, definita come il flusso radiante incidente su un elemento infinitesimo di superficie diviso l'area dell'elemento stesso. Si misura in $\frac{W}{m^2}$.

La fotometria studia la percezione di una radiazione elettromagnetica da parte di un osservatore umano, l'occhio non ha la stessa sensibilità per le varie lunghezze d'onda, essa dipende anche dall'intensità della radiazione stessa. La valutazione visiva di uno stimolo radiometrico è oggetto della fotometria.

Il coefficiente di visibilità spettrale valuta la sensibilità delle radiazioni elettromagnetiche sia in regime fotopico che scotopico. Solitamente la fotometria ha un'utilizzazione pratica soprattutto in condizioni fotopiche.

In regime fotopico:

Il coefficiente di visibilità spettrale $K(\lambda) = K_m V(\lambda)$: dove K_m è una costante di proporzionalità pari a $683 \frac{lm}{W}$ e $V(\lambda)$ è la funzione di risposta spettrale fotopica dell'occhio umano:

- massima sensibilità: lunghezza d'onda 555 nm, minima sensibilità: lunghezza d'onda 460 nm e a 620-750nm (Fig. 18)

In regime scotopico:

Il coefficiente di visibilità spettrale $K'(\lambda) = K'_m V'(\lambda)$: dove K'_m è una costante di proporzionalità pari a $1740 \frac{lm}{W}$ e $V'(\lambda)$ è la funzione di risposta spettrale scotopica dell'occhio umano:

- massima sensibilità: lunghezza d'onda 507 nm, minima sensibilità: lunghezza d'onda 620 nm (Fig.19)

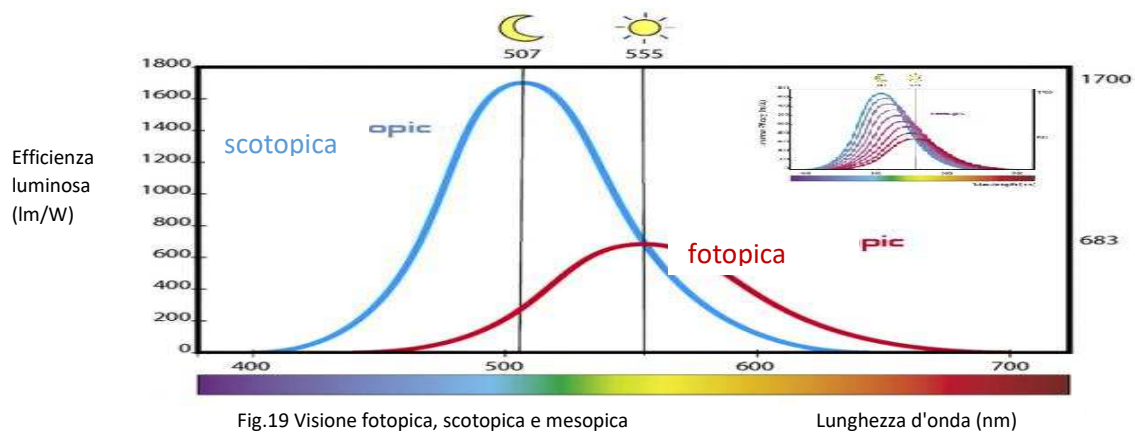


Fig.19 Visione fotopica, scotopica e mesopica

4.2 STRUMENTI UTILIZZATI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA SCENA LUMINOSA: LUXMETRO

Ogni area di visione comporta un certo illuminamento, non soltanto minimo, ma anche massimo, perché un'illuminazione eccessiva non porta vantaggi, ma può disturbare (abbagliamento, difficoltà di adattamento).

I vari livelli di illuminamento delle diverse aree, quali tavoli di lavoro, zone di disimpegno, sono facili da stabilire grazie ad uno strumento, detto **luxmetro**.

La luce incide su un ricettore costituito da silicio, un materiale semiconduttore, ottenendo una corrente misurabile in un circuito attraverso un microamperometro. Dalla corrente generata, grazie ad opportune scale di conversione, viene così ricavata la misurazione dell'energia luminosa. Il luxmetro deve avere una risposta alla radiazione luminosa quanto più vicina alla curva fotopica di sensibilità relativa $V(\lambda)$, cioè deve simulare il più possibile l'occhio umano normalizzato dal punto di vista fotometrico.

Il luxmetro è in grado di misurare fonti a luce intermittente ed è gestibile con una sola mano, per quel che riguarda il range di misura è molto ampio (0,01-299000 lux), è composto da un display LCD di grandi dimensioni e retroilluminato. Questi luxmetri permettono di effettuare un ampio spettro di misura, appena l'ambiente è sufficientemente illuminato si visualizza automaticamente la misura.

In fase di analisi offre le seguenti possibilità:

- Misura assoluta dell'illuminamento in lux;
- Confronto di valori di illuminamento con valore differenziale o percentuale;
- Illuminazione integrata (esposizione) con visualizzazione del tempo di integrazione e del valore medio di illuminamento.

4.2.1 SPETTROFOTOMETRO E SPETTRORADIOMETRO

Gli strumenti per la misura spettrale della radiazione luminosa si dividono in due categorie:

- Strumenti che misurano la luce, cioè l'irradiamento e la radianza, e vengono definiti come **spettroradiometri**;
- Strumenti che misurano la "modulazione" della luce, cioè la riflettanza o la trasmittanza, definiti invece **spettrofotometri** che presentano una sorgente di luce interna.

Le varie misurazioni dovrebbero essere svolte nell'intervallo da 360 a 780 nm, cioè nello spettro visibile.

Gli spettrofotometri si tarano su campioni fisici il cui fattore di riflessione spettrale è certificato, la taratura va verificata periodicamente e risultano essere costituiti da:

- Un sistema di illuminazione;
- Un apparato ottico per illuminare il corpo in esame e raccogliere la luce secondo qualche geometria;
- Uno spettroradiometro per la misurazione.

La misurazione è gestita da un computer esterno o interno che fornisce i dati misurati.

Si definisce spettrofotometria la tecnica basata sulla misura diretta dell'intensità di colore in termini di potere di assorbimento/riflessione della luce da parte di una data soluzione in alcune regioni specifiche dello spettro della luce.

In altre parole, si illumina con luce bianca, una soluzione di cui si vuole misurare il colore, poi si filtrano tramite filtri ottici alcuni colori e si inviano a dei sensori che ne rilevano l'intensità. Il tutto in relazione ad un liquido di riferimento di cui conosciamo le caratteristiche (come termine di paragone per tarare lo strumento).

Gli spettroradiometri si tarano facendo misure su sorgenti la cui distribuzione spettrale di potenza è certificata da un laboratorio.

Lo spettroradiometro è uno strumento che misura la distribuzione spettrale della radiazione. Tenendo conto della funzione $V(\lambda)$ è possibile ricavare la distribuzione spettrale della radiazione luminosa e quindi ottenere importanti proprietà come il colore di una sorgente o di una superficie oppure il fattore di riflessione o trasmissione monocromatico di un corpo.

Il Cs-2000 (Konica Minolta) è uno spettroradiometro policromatico che misura livelli di luminanza molto bassi, di soli $0.003 \frac{cd}{m^2}$ e la capacità di misurare i contrasti 100.000:1.

Le caratteristiche fondamentali sono:

- Il sistema ottico e la gestione elettronica dei segnali del CS-2000 permettono di migliorarne il rendimento, con misurazioni accurate fino a livelli di $0,003 \frac{cd}{m^2}$ con angolo di 1° , anche per le aree a livelli di luminanza particolarmente bassi. Inoltre l'ampiezza di banda dimezzata, inferiore a 5nm (richiesta per le misurazioni colorimetriche) su tutto il range di lunghezza d'onda garantisce misurazioni cromatiche precise.
- Angoli di misurazione selezionabili per rilievi su aree sia di grandi dimensioni che piccole. Con il CS-2000 si possono selezionare angoli di misurazione di $0,1^\circ$, $0,2^\circ$, e 1° . Ciò fornisce un diametro di misurazione standard minimo di $\varnothing 0,5mm$; se si utilizzano le lenti addizionali close-up si possono addirittura misurare aree inferiori a $\varnothing 0,1mm$. Il CS-2000 può quindi essere utilizzato non solo per le misurazioni di display, ma anche per aree di piccole dimensioni o per sorgenti luminose distanti.
- Si ottiene un'ottima ripetibilità eliminando fonti di disturbi meccaniche o elettriche. Per ripetibilità si intendono misurazioni ripetute con le stesse condizioni ambientali, il rapporto tra differenza di misurazione e media dei valori misurati. Un'indicazione della precisione di misurazione
- Basso errore di polarizzazione.

L'errore di polarizzazione, che si genera quando si utilizza un sistema ottico con reticolo oleografico in riflessione, è stato ridotto al 2% per misurazioni più stabili sui display che sfruttano la polarizzazione, come ad es. LCD. L'errore di polarizzazione si presenta per le variazioni nel rapporto di riflettanza della luce polarizzata in base all'angolo di accettazione dello strumento.

4.3 MESSA A PUNTO SCENE LUMINOSE

Con lo spettroradiometro e il luxmetro ho caratterizzato le varie scene luminose controllate.

Nelle tre diverse sorgenti di illuminazione artificiale, situate nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale (LED Panel, Lampada ad incandescenza, lampada fluorescente), caratterizzate da temperature di colore e dall'illuminamento, ho rilevato le varie misure radiometriche riportate nelle seguenti tabelle (Tabella 1 e 2). Nell'appendice vengono riportati i diversi grafici delle varie misurazioni effettuate nelle diverse scene luminose.

I parametri riportati nelle seguenti tabelle sono:

- Illuminamento all'occhio espresso in Lux
- Irradianza all'occhio espressa in $\frac{W}{m^2}$
- Tau energetica, che rappresenta il fattore di trasmissione energetica espressa in %
- Tau visibile, è il valore di trasmissione luminosa espresso in %

TABELLA 1

	FLUO(4000K- LUX)	INC(2700K- 800LUX)	LP(3000K- 800LUX)	LP(4000K- 800LUX)	LP(6000K- 800LUX)
ILL(lx)	487	118,38	352,39	355,72	355,21
IRRADIANZA $\frac{W}{m^2}$	1,31	1,08	1,08	1,09	1,09
D10 τ_e %	49,06	56,90	56,90	53,07	48,46
D10 τ_v %	55,48	65,53	65,53	59,25	51,70
D15 τ_v %	40,97	46,35	46,35	42,82	38,58
D15 τ_e %	51,14	60,10	60,10	54,30	47,33
D20 τ_v %	40,02	44,78	44,78	41,52	37,59
D20 τ_e %	50,26	38,89	38,89	53,50	47,02
D25 τ_v %	36,11	39,94	39,94	37,36	34,27
D25 τ_e %	47,77	56,24	56,24	51,99	46,90
D30 τ_v %	28,06	30,95	30,95	39,06	26,79
D30 τ_e %	39,67	57,80	48,54	44,95	40,42

TABELLA 2

	FLUO(4000K-800LUX)	INC(2700K-800LUX)	LP(3000K-800LUX)	LP(4000K-800LUX)	LP(6000K-800LUX)
ILL (lx)	487	118,38	352,39	355,72	355,21
IRRADIANZA $\frac{W}{m^2}$	1,31	1,08	1,08	1,09	1,09
P10 τ_c %	44,12	49,38	50,13	46,45	42,02
P10 τ_v %	49,83	66,28	60,44	53,57	45,30
P15 τ_v %	40,02	44,69	44,78	41,52	37,59
P15 τ_c %	50,26	65,35	58,89	53,50	47,02
P20 τ_v %	30,69	36,10	36,23	32,26	27,48
P20 τ_c %	37,52	58,56	50,40	42,26	32,48
P25 τ_v %	23,83	28,26	27,62	24,20	20,09
P25 τ_c %	33,22	54,66	44,80	37,52	28,77
P30 τ_v %	18,45	22,48	21,17	18,57	15,45
P30 τ_c %	29,42	51,54	40,75	35,03	28,17

4.3 I CASI

Nelle tabelle successive vengono riassunti i risultati dei test che sono stati effettuati adoperando diverse sorgenti di illuminazione artificiale. I test utilizzati sono stati spiegati nel capitolo precedente. In modo particolare, in questo lavoro di tesi abbiamo considerato un numero totale di soggetti pari a 7 con un range di età compreso tra i 20 e i 40 anni, esaminando il soggetto in 5 diverse condizioni:

- Led panel 3000K-800 Lux
- Led panel 4000K-800 Lux
- Led panel 6000K-800 Lux
- Lampada ad incandescenza 2700K-800 Lux
- Lampada fluorescente 4000K-800 Lux

CASO 1

3000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 1	Filtro D-10	
Tavola n°22	26	2	26	
Tavola n°23	42	4	42	
Tavola n°24	35	3	35	
Tavola n°25	96	9	96	
Tavola ColorLite test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 100	Da 300 a 60	
4000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 1	Filtro D-10	
Tavola n°22	26	2	26	
Tavola n°23	42	4	42	
Tavola n°24	35	3	35	
Tavola n°25	96	9	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 60	Da 300 a 60	

6000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 1	Filtro D-10	
Tavola n°22	26	2	26	
Tavola n°23	42	4	42	
Tavola n°24	35	3	35	
Tavola n°25	96	9	96	
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 100	Da 300 a 60
2700K - 800Lux (INC)				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 1	Filtro D-10	
Tavola n°22	26	2	26	
Tavola n°23	42	4	42	
Tavola n°24	35	3	35	
Tavola n°25	96	9	96	
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 60	Da 300 a 60
4000K - 800Lux (FLUO)				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 1	Filtro D-10	
Tavola n°22	26	2	26	
Tavola n°23	42	4	42	
Tavola n°24	35	3	35	
Tavola n°25	96	9	96	
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 100	Da 300 a 60

Il soggetto in esame, di età 26 presenta un difetto nella visione dei colori, infatti non ha letto esattamente le tavole 22-23-24-25 nelle varie scene luminose.

La discromatopsia viene confermata dalla capacità di riconoscere le tavole 18-19-20-21. Dall' esame effettuato si evince la presenza di una forma lieve di deuteranopia.

La conferma della presenza di una lieve alterazione viene confermata anche dal test Color lite. Infatti il soggetto in esame riesce a distinguere le tavole fino a 100, quindi fino a più della metà del test, in tre delle cinque scene luminose ovvero (LP)3000 k- 800 lux, (LP) 6000k-800 lux e (FLUO) 4000k-800 lux.

Grazie alla variazione della sorgente cioè (LP) 4000k-800 lux e (INC) 2700k-800 lux il soggetto riesce a distinguere le tavole fino a 60. Inoltre con l' utilizzo di una lente D10 si ha un notevole miglioramento della visione dei colori, infatti con questo filtro il soggetto riesce a distinguere le tavole di Ishihara 22-23-24-25 ed arrivare alla tavola 60 del Colorlite test, anche con le sorgenti con cui non superano 100.

CASO 2

3000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 2	Filtro P-20	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 260	Da 300 a 60

4000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 2	Filtro P-20	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60
6000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 2	Filtro P-20	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60
2700K - 800Lux (INC)				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 2	Filtro P-20	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60
4000K - 800Lux (FLUO)				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 1	Filtro P-20	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60

Il soggetto in esame, di età 22 presenta un difetto nella visione dei colori, infatti non ha letto le tavole 22-23-24.25 nelle varie scene luminose. La discromatopsia viene confermata dalla capacità di riconoscere le tavole 18-19-20-21. Dall' esame effettuato si evince la presenza di una grave forma di protanopia. La conferma della presenza di una grave alterazione viene confermata anche dal test Colorlite. Il soggetto in esame riesce a distinguere le tavole fino a 260, in una delle cinque scene luminose ovvero (LP) 3000k-800 lux. Grazie alla variazione della sorgente cioè (LP) 4000k-800 lux, (LP) 6000k-800 lux , (FLUO) 4000K-800 lux e (INC) 2700-800 lux il soggetto riesce a distinguere le tavole fino a 220, quindi due tavole in più. Inoltre con l' utilizzo di una lente P-20 si ha un notevole miglioramento della visione dei colori, infatti con questo filtro il soggetto riesce a distinguere le tavole di Ishihara 22-23-24-25 ed arrivare alla tavola 60 del Colorlite test, in tutte le varie sorgenti.

CASO 3

3000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 3	Filtro D-20
Tavola n°22		26	2	26
Tavola n°23		42	4	42
Tavola n°24		35	3	35
Tavola n°25		96	9	96
Tavola ColorLite test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60
4000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 3	Filtro D-20
Tavola n°22		26	2	26
Tavola n°23		42	4	42
Tavola n°24		35	3	35
Tavola n°25		96	9	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 260	Da 300 a 60
6000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 3	Filtro D-20
Tavola n°22		26	2	26
Tavola n°23		42	4	42
Tavola n°24		35	3	35
Tavola n°25		96	9	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 260	Da 300 a 60
2700K - 800Lux (INC)				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 3	Filtro D-20
Tavola n°22		26	2	26
Tavola n°23		42	4	42
Tavola n°24		35	3	35
Tavola n°25		96	9	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 260	Da 300 a 60
4000K - 800Lux (FLUO)				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 3	Filtro D-20
Tavola n°22		26	2	26
Tavola n°23		42	4	42
Tavola n°24		35	3	35
Tavola n°25		96	9	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60

Il soggetto in esame, di età 21 presenta un difetto nella visione dei colori, infatti non ha letto esattamente le tavole 22-23-24-25 nelle varie scene luminose. La discromatopsia viene confermata dalla capacità di riconoscere le tavole 18-19-20-21. Dall' esame effettuato si evince la presenza di una grave forma di deuteranopia. La conferma della presenza di una grave alterazione viene confermata anche dal test Colorlite. Infatti il soggetto in esame riesce a distinguere le tavole fino a 280 in due delle cinque scene luminose ovvero (LP) 3000k-800 lux e (FLUO) 4000k-800 lux. Grazie alla variazione della sorgente cioè (LP) 4000k-800 lux, (LP) 6000k-800 lux e (INC) 2700k-800 lux, il soggetto riesce a distinguere le tavole fino a 260,

quindi una tavola in più. Inoltre con l'utilizzo di una lente D-20 si ha un notevole miglioramento nella visione dei colori, infatti con questo filtro il soggetto riesce a distinguere le tavole di Ishihara 22-23-24-25 ed arrivare alla tavola 60 del Colorlite test, in tutte le varie sorgenti.

CASO 4

3000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 4	Filtro P-25	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60	
4000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 4	Filtro P-25	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60	
6000K - 800Lux				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 4	Filtro P-25	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 240	Da 300 a 60	
2700K - 800Lux (INC)				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 4	Filtro P-25	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60	
4000K - 800Lux (FLUO)				
Test di Ishihara	Normovedente	Caso 4	Filtro P-25	
Tavola n°22	26	X	26	
Tavola n°23	42	X	42	
Tavola n°24	35	X	35	
Tavola n°25	96	X	96	
Tavola ColorLite Test	Tavola	Tavola	Tavola	
Serie Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 240	Da 300 a 60	

Il soggetto in esame, di età 22 presenta un difetto nella visione dei colori, infatti non ha letto le tavole 22-23-24-25 nelle varie scene luminose. La discromatopsia viene confermata dalla capacità di riconoscere le tavole 18/19/20/21. Dall' esame effettuato si evince la presenza di una grave forma di protanopia. La conferma della presenza di una grave alterazione viene confermata anche dal test Colorlite. Infatti il soggetto in esame riesce a distinguere le tavole fino a 280 in due delle cinque scene luminose ovvero (LP) 3000k-800 lux e (INC) 2700k-800 lux. Con la variazione della sorgente cioè (LP) 6000k-800 lux e (FLUO) 4000k-800 lux, il soggetto riesce a distinguere le tavole fino a 240, con (LP)4000k-800 lux fino a 220. Inoltre con l'utilizzo di una P-25 si ha un notevole miglioramento nella visione dei colori, infatti con questo filtro il soggetto riesce a distinguere le tavole di Ishihara 22-23-24-25 ed arrivare alla tavola 60 del Colorlite test, in tutte le varie sorgenti.

CASO 5

3000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 5	Filtro P-30
Tavola n°22		26	X	26
Tavola n°23		42	x	42
Tavola n°24		35	X	35
Tavola n°25		96	X	96
Tavola ColorLite test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60
4000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 5	Filtro P-30
Tavola n°22		26	X	26
Tavola n°23		42	X	42
Tavola n°24		35	X	35
Tavola n°25		96	X	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60
6000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 5	Filtro P-30
Tavola n°22		26	X	26
Tavola n°23		42	X	42
Tavola n°24		35	X	35
Tavola n°25		96	X	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60
2700K - 800Lux (INC)				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 5	Filtro P-30
Tavola n°22		26	X	26
Tavola n°23		42	X	42
Tavola n°24		35	X	35
Tavola n°25		96	X	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60

4000K - 800Lux (FLUO)					
Test di Ishihara			Normovedente	Caso 5	Filtro P-30
Tavola n°22			26	X	26
Tavola n°23			42	X	42
Tavola n°24			35	X	35
Tavola n°25			96	X	96
Tavola ColorLite Test			Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso	Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 280	Da 300 a 60

Il soggetto in esame, di età 39 presenta un difetto nella visione dei colori, infatti non ha letto le tavole 22-23-24-25 nelle varie scene luminose. La discromatopsia viene confermata dalla capacità di riconoscere le tavole 18-19-20-21. Dall' esame effettuato si evince la presenza di una grave forma di protanopia.

La conferma della presenza di una grave alterazione viene confermata anche dal test Colorlite. Infatti il soggetto in esame riesce a distinguere le tavole fino a 280 in tutte e cinque le scene luminose ovvero (LP) 3000k-800 lux, (LP) 4000k-800 lux, (LP) 6000k-800lux, (INC) 2700k-800 lux e (FLUO) 4000k-800 lux. Inoltre con l'utilizzo di una P-30 si ha un notevole miglioramento nella visione dei colori, infatti con questo filtro il soggetto riesce a distinguere le tavole di Ishihara 22-23-24-25 ed arrivare alla tavola 60 del Colorlite test, in tutte le varie sorgenti.

CASO 6

3000K - 800Lux					
Test di Ishihara			Normovedente	Caso 6	Filtro P-25
Tavola n°22			26	X	26
Tavola n°23			42	X	42
Tavola n°24			35	X	35
Tavola n°25			96	X	96
Tavola ColorLite test			Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso	Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 260	Da 300 a 60

4000K - 800Lux					
Test di Ishihara			Normovedente	Caso 6	Filtro P-25
Tavola n°22			26	X	26
Tavola n°23			42	X	42
Tavola n°24			35	X	35
Tavola n°25			96	X	96
Tavola ColorLite Test			Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso	Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60

6000K - 800Lux					
Test di Ishihara			Normovedente	Caso 6	Filtro P-25
Tavola n°22			26	6	26
Tavola n°23			42	2	42
Tavola n°24			35	5	35
Tavola n°25			96	6	96
Tavola ColorLite Test			Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso	Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 260	Da 300 a 60

2700K - 800Lux (INC)				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 6	Filtro P-25
Tavola n°22		26	X	26
Tavola n°23		42	X	42
Tavola n°24		35	X	35
Tavola n°25		96	X	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60
4000K - 800Lux (FLUO)				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 6	Filtro P-25
Tavola n°22		26	X	26
Tavola n°23		42	X	42
Tavola n°24		35	X	35
Tavola n°25		96	X	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 220	Da 300 a 60

Il soggetto in esame, di età 20 presenta un difetto nella visione dei colori, infatti non ha letto le tavole 22-23-24-25 in quattro delle cinque scene luminose, con la sorgente (LP)6000-800 lux non le legge esattamente. La discromatopsia viene confermata dalla capacità di riconoscere le tavole 18-19-20-21. Dall' esame effettuato si evince la presenza di una grave forma di protanopia. La conferma della presenza di una grave alterazione viene confermata anche dal test Colorlite. Infatti il soggetto in esame riesce a distinguere le tavole fino a 260 in due delle cinque scene luminose ovvero (LP) 3000k-800 lux e (LP)6000k-800 lux. Con la variazione della sorgente cioè (LP) 4000k-800 lux, (INC) 2700k-800lux e (FLUO) 4000k-800 lux, il soggetto riesce a distinguere le tavole fino a 220, quindi due tavole in più. Inoltre con l'utilizzo di una P-25 si ha un notevole miglioramento nella visione dei colori, infatti con questo filtro il soggetto riesce a distinguere le tavole di Ishihara 22-23-24-25 ed arrivare alla tavola 60 del Colorlite test, in tutte le varie sorgenti.

CASO 7

3000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 7	Filtro D-25
Tavola n°22		26	26	26
Tavola n°23		42	42	42
Tavola n°24		35	35	35
Tavola n°25		96	96	96
Tavola ColorLite test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 100	Da 300 a 40
4000K - 800Lux				
Test di Ishihara		Normovedente	Caso 7	Filtro D-25
Tavola n°22		26	26	26
Tavola n°23		42	42	42
Tavola n°24		35	35	35
Tavola n°25		96	96	96
Tavola ColorLite Test		Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 80	Da 300 a 40

6000K - 800Lux					
Test di Ishihara			Normovedente	Caso 7	Filtro D-25
Tavola n°22			26	26	26
Tavola n°23			42	42	42
Tavola n°24			35	35	35
Tavola n°25			96	96	96
Tavola ColorLite Test			Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso	Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 100	Da 300 a 40
2700K - 800Lux (INC)					
Test di Ishihara			Normovedente	Caso 7	Filtro D-25
Tavola n°22			26	26	26
Tavola n°23			42	42	42
Tavola n°24			35	35	35
Tavola n°25			96	96	96
Tavola ColorLite Test			Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso	Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 80	Da 300 a 40
4000K - 800Lux (FLUO)					
Test di Ishihara			Normovedente	Caso 7	Filtro D-25
Tavola n°22			26	26	26
Tavola n°23			42	42	42
Tavola n°24			35	35	35
Tavola n°25			96	96	96
Tavola ColorLite Test			Tavola	Tavola	Tavola
Serie	Rosso	Verde	Da 300 a 30	Da 300 a 100	Da 300 a 40

Il soggetto in esame, di età 38 presenta un difetto nella visione dei colori, ha letto le tavole 22-23-24-25 nelle varie scene luminose. La discromatopsia viene confermata dalla capacità di riconoscere le tavole 18/19/20/21. Dall' esame effettuato si evince la presenza di una lievissima forma di deuteranopia. La conferma della presenza di una lieve alterazione viene confermata anche dal test Colorlite. Infatti il soggetto in esame riesce a distinguere le tavole fino a 100 in tre delle cinque scene luminose ovvero (LP) 3000k-800 lux, (LP) 6000k-800 lux e (FLUO) 4000k-800 lux. Con la variazione della sorgente cioè (LP) 4000k-800 lux e (INC) 2700k-800 lux, il soggetto riesce a distinguere le tavole fino a 80, circa quasi tutto il test. Inoltre con l'utilizzo di una D-25 si ha un miglioramento nella visione dei colori, infatti con questo filtro il soggetto riesce sempre a distinguere le tavole di Ishihara 22-23-24-25 ed arrivare alla tavola 40 del Colorlite test, in tutte le varie sorgenti.

4.4.1 ANALISI DEI DATI

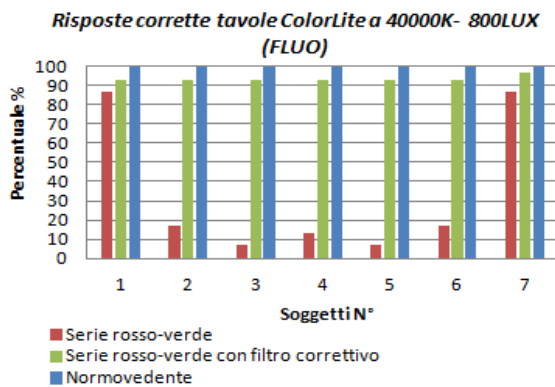
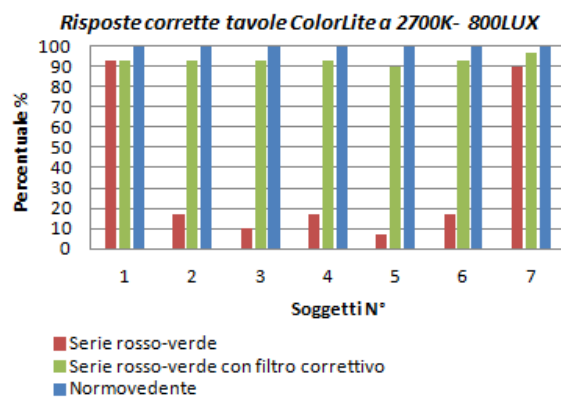
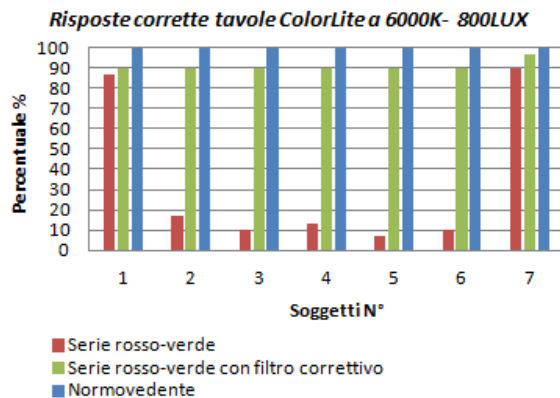
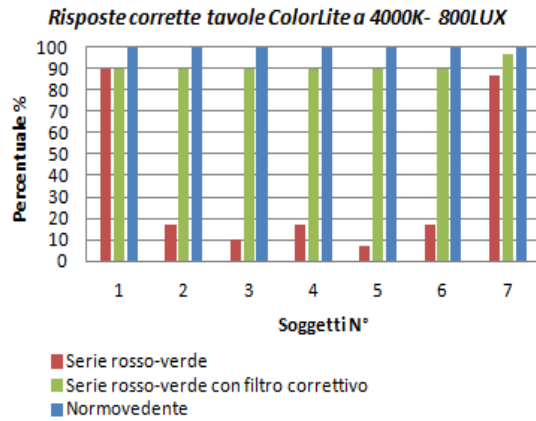
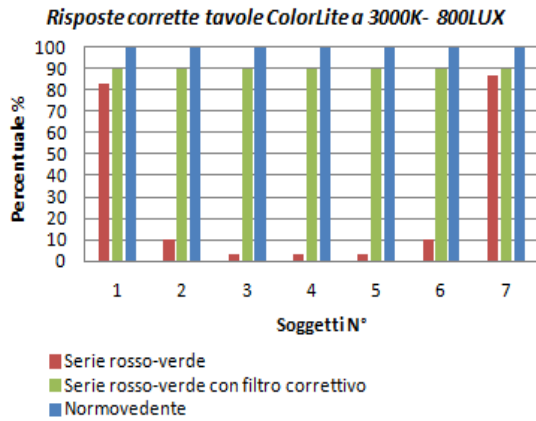
Ho esaminato 7 soggetti con deficit nella visione dei colori, di sesso maschile e di età compresa tra i 20 e 40 anni. Ho sottoposto i 7 soggetti a 2 test, Test di Ishihara e ColorLite test, nelle varie scene luminose. Entrambi i test sono stati eseguiti ad una distanza di 30-40 cm con tempo di lettura per ogni tavola di circa 10secondi.

Dai test è emerso che:

- 3 soggetti sono affetti da protanopia
- 2 soggetti sono affetti da deuteranopia
- 2 soggetti sono affetti da deuteranomalia

Questa classificazione è stata possibile osservando le risposte date dai soggetti alle tavole 22-23-24-25 del test di Ishihara e confermate dalla risposte errate nel riconoscimento dell'apertura degli anelli di Landolt nella serie viola-blu e viola-verde del test ColorLite.

Nei seguenti istogrammi sono state messe in relazione le risposte nei 7 soggetti per le tavole del ColorLite test, con e senza filtro, nelle diverse scene luminose, al fine di quantificare in modo percentuale il miglioramento della lettura delle tavole ottenuto con i filtri.



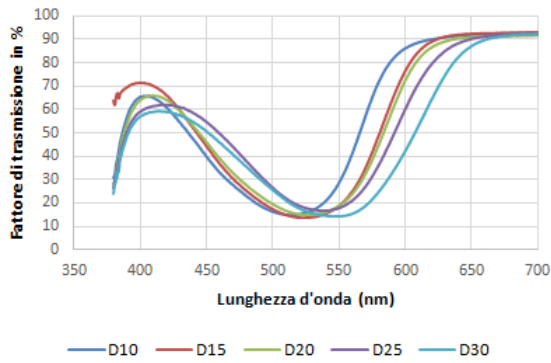
CONCLUSIONI

Per circa 180 milioni di persone nel mondo percepire i colori costituisce un'esperienza a loro parzialmente o completamente preclusa. Abbiamo visto che statisticamente l'8% degli uomini e lo 0,5% delle donne è affetto da una carenza di visione dei colori. A testimonianza di tutto ciò, i soggetti esaminati in questo lavoro di tesi sono tutti di sesso maschile. La perdita delle varie informazioni del mondo esterno per chi presenta questo tipo di anomalia riduce la qualità della vita quotidiana, oltre a provocare insicurezze nell'individuo e disagio verso l'intera comunità. Non siamo abituati a capire le varie problematiche di questi soggetti, ma ultimamente qualcosa sta cambiando.

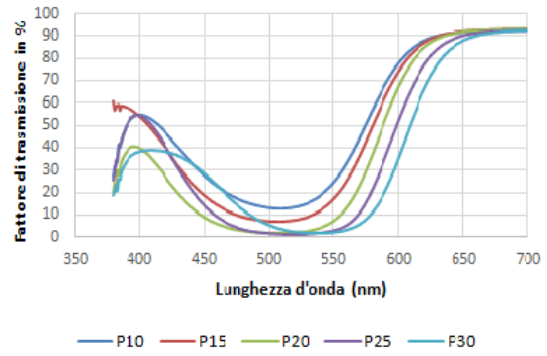
I soggetti sono stati sottoposti a due test Ishihara e Colorlite per evidenziare la discromatopsia e il tipo, nelle diverse scene luminose. Dai risultati si evince che nella maggior parte dei casi nella sorgente (LP) 4000k-800 lux ed (Inc) 2700-800 lux le risposte sono state migliori, considerando i soggetti senza l'utilizzo dei filtri. Con l'utilizzo dei filtri Colorlite c'è stato un miglioramento da parte di tutti i soggetti in entrambi i test, inoltre la migliore lente compensatrice non è la stessa per i vari soggetti. In tutti i casi grazie a questi filtri i soggetti hanno raggiunto la normale visione dei colori.

APPENDICE

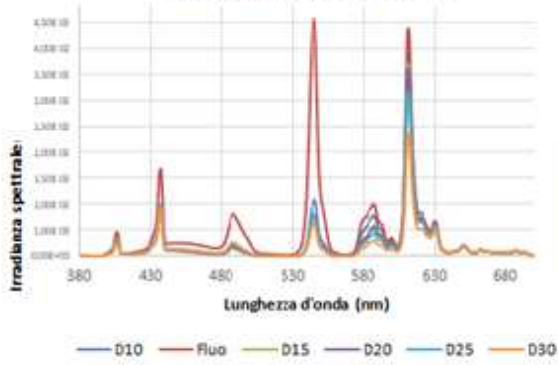
Spettro Filtri D



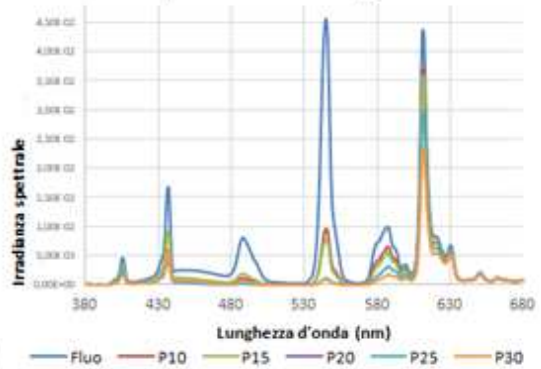
Spettro Filtri P



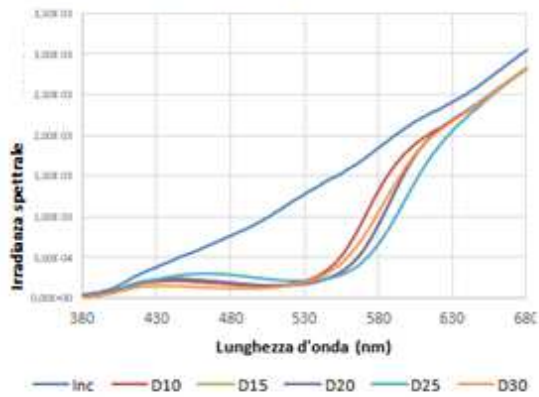
Spettro Filtri D con sorgente Fluo



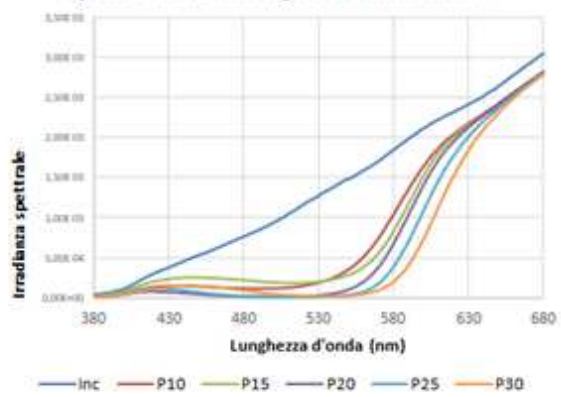
Spettro Filtri P con sorgente Fluo

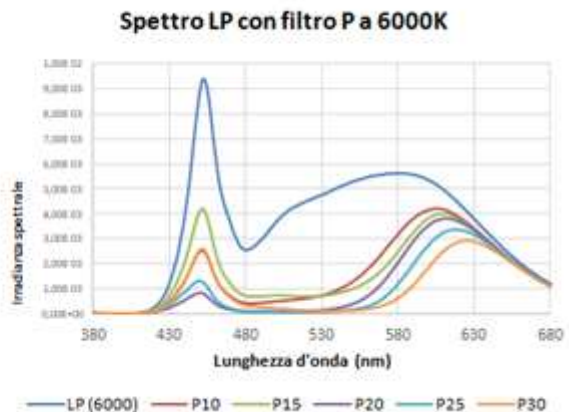
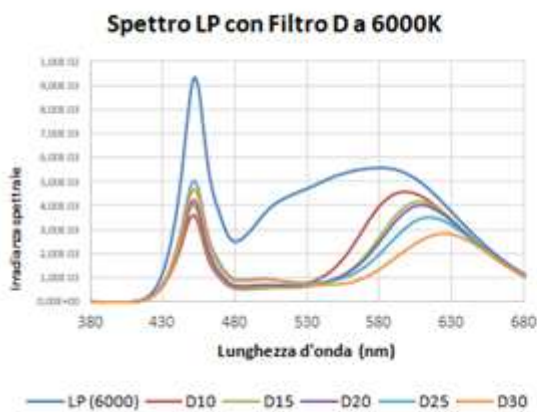
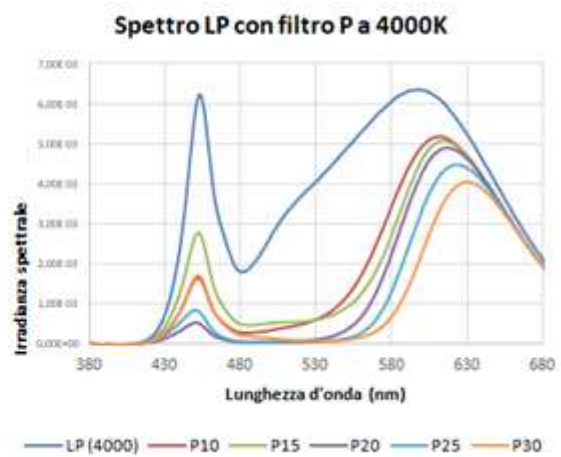
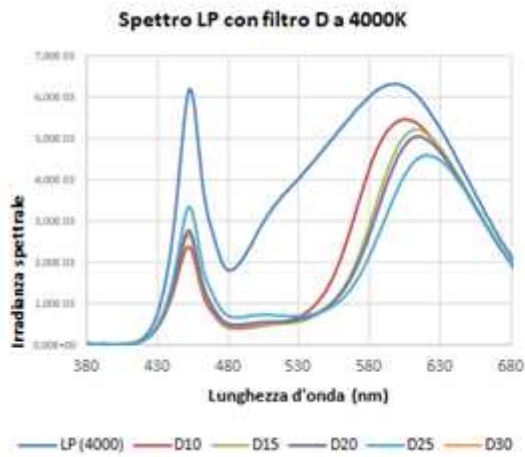
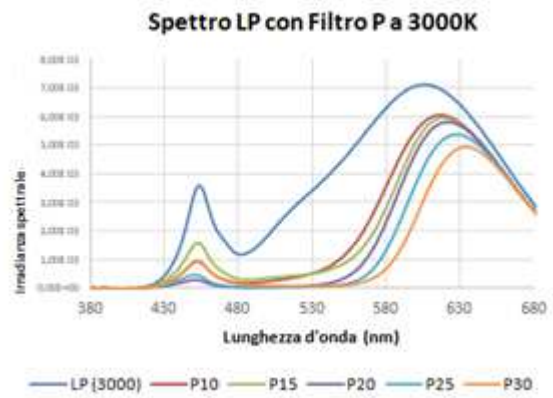
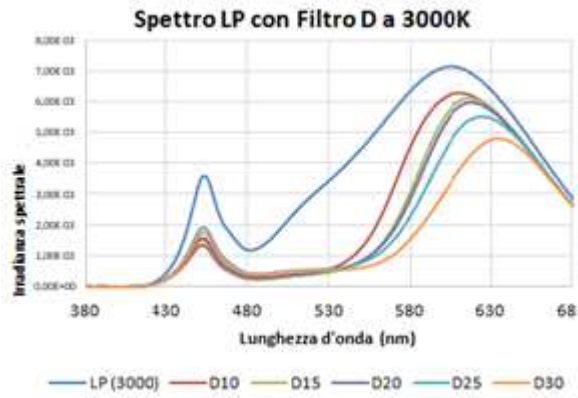


Spettro Filtro D con sorgente ad incandescenza



Spettro Filtro P con sorgente ad incandescenza





BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Paul A. Tipler – Gene Mosca, *Corso di Fisica vol.2*, Zanichelli.
2. Frova Andrea, *Luce colore e visione*, Rizzoli.
3. Anto Rossetti e Pietro Gheller, *manuale di optometria e contattologia*, Zanichelli.
4. P. Palladino, *Lezioni di illuminotecnica*, Ed. Tecniche Nuove, 2002
5. G. J. Chamberlin, *The CIE international colour system*. Traduzione italiana a cura di Volpones, C. Zanichelli Editore, Bologna, 1955.
6. http://www.federica.unina.it/architettura/fisica_tecnica_ambientale_illuminotecnica/orgenti-luce-artificiale-lampade/
7. <http://www.urai.it/ftp/app/colorimetria/corso/colore.pdf>
8. <http://chimicapratica.altervista.org/index-htm-files/P01%20-%20colorimetria.pdf>
9. http://www.treccani.it/enciclopedia/percezione_del_colore_%28
10. http://www.las.provincia.venezia.it/chimica/luce_colori_parte1/variabili_colore.htm
11. <https://25mguetti2014.wikispaces.com> Luce Colore Visione: Perché si vede ciò che si vede (BUR SCIENZA)
12. http://www.progettazioneottica.it/colorimetria_il_diagramma_CIE_e_la_temperatura_di_colore/986
13. http://it.colorlitelens.com/test_di_daltonismo.html
14. <http://www.watercuhe.com/doc/ita/download/elementi/illuminotecnica.pdf>
15. http://prodotti/misura_della_luce/luxmetri/T-100/introduzione.html
16. http://www.architettura.unina.2.it/docenti/areaprivata/119/documenti/Lez8a_Illumino_tecnica.pdf
17. <http://www.boscarol.com/blog/?p:14949>

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento alla Prof. Bellia che in questi mesi mi è stata vicino nei momenti più difficili, esponendosi anche in prima persona affinché tutto andasse per il verso giusto.

Un ringraziamento al Prof. Carelli, Prof. Spada e alla Dottoressa. Francesca per le varie collaborazioni, che mi sono state di aiuto per la realizzazione di questo lavoro.

Un ringraziamento a miei genitori e fratelli che mi hanno sempre supportato e creduto in me anche quando le cose non andavano bene, dandomi la forza di andare avanti e un grazie in generale a tutta la mia famiglia.

Un ringraziamento a Sabatino, persona splendida con cui ho stretto un rapporto da fratello, una delle persone che mi sono state più vicine in questo periodo.

Un ringraziamento a Ciro e Daniela amici universitari che mi hanno accompagnato in tutto il percorso, concludendo anche insieme. Felice di aver affrontato varie avventure con voi e nella speranza che ci sarete sempre.

Un ringraziamento a tutti gli amici e persone conosciute all' università, chi più e chi meno mi hanno aiutato sia nella mia carriera universitaria e sia a livello di crescita personale.

Un ringraziamento agli amici di infanzia e quelli conosciuti da pochi anni, che pur non conoscendo il mondo universitario, mi chiedevano sempre come andavano le cose, mettendosi a disposizione sempre, anche per un semplice passaggio alla stazione.

Un grazie speciale a tutti i professori e all' università in generale che oltre alla crescita didattica, mi hanno cambiato e formato come persona.

Grazie a tutti.

