



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI INGEGNERIA
TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

L'UTILIZZO DEL LED
NELL'ILLUMINAZIONE MUSEALE

CONSIDERAZIONI CRITICHE E PROSPETTIVE FUTURE

Relatore

Ch.mo Prof. Ing. Pietro Fiorentin

Laureando

Andrea Furlanetto

Matricola 1106512

A.A. 2017/2018

Sommario

Introduzione	1
Capitolo 1 - Storia e principi dell'illuminazione allo stato solido	3
1.1 – EVOLUZIONE DEL LED.....	3
1.2 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEI LED	5
1.3 – TIPOLOGIA E STRUTTURA DEI LED PER L'ILLUMINAZIONE	9
1.4 – LED A LUCE BIANCA	11
1.4.1 – EFFICIENZA DI CONVERSIONE DEI FOSFORI	13
1.5 – LED RGB E LED A LUCE BIANCA	14
1.6 – ASPETTI TERMICI DELLE SORGENTI LED	14
1.5.1 – INFLUENZA DELLA TEMPERATURA DI GIUNZIONE	17
1.6 – LA QUALITÀ DEI LED – IL BINNING	18
1.6.1 – LA QUALITÀ E LE PRESTAZIONI COLORIMETRICHE DEI LED	19
Capitolo 2 - Fondamenti di colorimetria	21
2.1 – LA VISIONE UMANA E LA PERCEZIONE DEL COLORE	21
2.2 – LA QUANTIFICAZIONE DEL COLORE	24
2.2.1 – GLI SPAZI DI COLORE	25
2.3 – IL COLORE NELL'ARTE: I PIGMENTI	27
2.3.1 – LE ALTERAZIONI CROMATICHE	28
2.3.1.1 – Variazioni cromatiche in alcuni particolari pigmenti.....	30
2.4 – LA VALUTAZIONE DEL COLORE NELLE OPERE D'ARTE: TECNICHE DI MISURA NON INVASIVE.....	32
2.4.1 – LE PRINCIPALI TECNICHE DI MISURA NON INVASIVE	32
2.4.2 – PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DELLA TECNICA FORS.....	34

Capitolo 3 - La normativa di riferimento.....	37
3.1 – TECHNICAL REPORT CIE 157:2004.....	38
3.1.1 – PRINCIPI SCIENTIFICI.....	38
3.1.2 - L’AZIONE FOTOCHIMICA.....	39
3.1.1.1 - Irradianza e durata dell’esposizione	40
3.1.1.2 – Distribuzione spettrale della potenza della radiazione incidente.....	41
3.1.1.3 – Fotosensibilità del materiale.....	43
3.1.2 – EFFETTO DEL RISCALDAMENTO RADIANTE.....	46
3.1.3 – LA VALUTAZIONE DEL DANNO.....	47
3.1.3.1 – Il sistema di classificazione <i>Blue Wool</i>	47
3.1.3.2 – Il sistema <i>CIELAB</i>	48
3.1.3.3 – Il modello di Berlino	50
3.1.3.4 – Variazioni di colore	55
3.1.4 – RACCOMANDAZIONI PER L’ILLUMINAZIONE MUSEALE	57
3.2 – SPECIFICA TECNICA UNI CEN/TS 16163.....	58
 Capitolo 4 - <i>La Cappella Sistina e La Monna Lisa</i> , analisi di due casi studio.....	59
4.1 - LA CAPPELLA SISTINA	60
4.1.1 - DESCRIZIONE DELL’OPERA.....	61
4.1.2 – IL VECCHIO IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	62
4.1.3 – IL NUOVO IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE A LED	64
4.2 - LA MONNA LISA	76
4.2.1 - DESCRIZIONE DELL’OPERA.....	76
4.2.2 – LA PRIMA ILLUMINAZIONE A LED DELLA GIOCONDA.....	77
4.2.3 – LA NUOVA ILLUMINAZIONE A LED DELLA GIOCONDA	79
 Capitolo 5 - Criticità nell’impiego dei LED.....	85
5.1 – I GIRASOLI DI VAN GOGH: UN CASO STUDIO DI SEGNO CONTRARIO?.....	85
5.2 – NECESSITÀ DI NUOVI APPROFONDIMENTI	87
5.3 – LA SITUAZIONE ATTUALE	88
5.4 – GLI STUDI PIÙ RECENTI.....	91
5.5 – CONCLUSIONI.....	92

Capitolo 6 - Jacopo Tintoretto e le opere realizzate per la Chiesa di Madonna dell'Orto in Venezia.....	93
6.1 – L'ARTISTA E LA PITTURA VENEZIANA DEL XVI SECOLO	93
6.2 – ANALISI ARCHEOMETRICHE NELLA PITTURA DI TINTORETTO	94
6.3 – DENTRO LE OPERE: L'ADORAZIONE DEL VITELLO D'ORO E IL GIUDIZIO UNIVERSALE	96
6.4 – IPOTESI DI UNA NUOVA ILLUMINAZIONE	103
6.5 – CONSIDERAZIONI FINALI	111
 Bibliografia.....	 115

Introduzione

L'impiego di sorgenti luminose allo stato solido (LED) è diventato oggi sempre più frequente, sostituendo di fatto, pressoché in ogni settore, l'illuminazione tradizionale.

Le ragioni sottostanti a questo cambiamento sono riconducibili alla pluralità di vantaggi correlati alla tecnologia LED, e spaziano dall'effettivo risparmio energetico di tali sorgenti, alla loro lunga durata, alle dimensioni compatte e quindi alla facilità di posizionamento, fino alla duttilità d'impiego. Ed invero le ultime generazioni di LED di potenza soddisfano ciascuna delle suddette esigenze.

Accanto a tali ambiti ve n'è in particolare uno, quello dell'illuminazione museale, che al giorno d'oggi vede un impiego sempre maggiore e sempre più soddisfacente delle sorgenti LED e che sta riscuotendo un consenso pressoché unanime.

Questo lavoro è finalizzato per l'appunto ad analizzare le ragioni della scelta preponderante e sempre più diffusa nell'utilizzo del LED per l'illuminazione museale, a giustificarne il consenso goduto presso gli addetti ai lavori ed a verificare se, anche sotto il profilo scientifico, le ragioni della diffusione dell'illuminazione allo stato solido trovino adeguata motivazione.

Verranno preliminarmente ricordati ed esaminati i principi dell'illuminazione e i fondamenti di colorimetria allo scopo di richiamare alcune nozioni scientifiche propedeutiche alle argomentazioni che verranno sviluppate nel capitolo finale.

Particolare attenzione verrà dedicata all'impatto che tali sorgenti hanno sulle opere d'arte, allo scopo di verificare e – se del caso – confermare la bontà dell'impiego di tale tecnologia in questo specifico settore, questione non ancora del tutto approfondita, come confermato dal fatto che diversi studi sono in atto anche attraverso apposite commissioni ministeriali.

In particolare, dopo aver esaminato le caratteristiche tecniche proprie dell'illuminazione a LED, la normativa di riferimento, i casi studio più noti a livello mondiale nei quali l'impiego dei LED ha avuto una grandissima risonanza, verrà effettuata un'analisi critica sul futuro impiego di questa straordinaria tecnologia.

Il lavoro si concluderà con alcune considerazioni in merito alla possibilità di applicare questa tecnologia – e quindi di illuminare con sorgenti a LED – una coppia di capolavori assoluti del Tintoretto, in occasione della ricorrenza dei 500 anni dalla nascita del maestro.

Più precisamente, dopo una breve disamina storica volta a inquadrare la figura di Tintoretto e le sue peculiarità artistiche, verranno presentate nel dettaglio due grandi opere (*Giudizio Universale* e *Adorazione del vitello d'oro*, situate nella chiesa di Madonna dell'Orto in Venezia) di identiche dimensioni ed appartenenti al medesimo ciclo pittorico, le quali, valutata la collocazione, soffrono di una scarsa illuminazione: tutto ciò allo scopo di verificare se, con l'ausilio di una nuova illuminazione interamente a LED, coerentemente pensata e studiata, possa essere data nuova vita a questi capolavori e se questa metodologia possa venire utilizzata come paradigma di illuminazione di altre opere analoghe e coeve presenti nel contesto della città di Venezia.

Capitolo 1

Storia e principi dell'illuminazione allo stato solido

1.1 – EVOLUZIONE DEL LED

Il fenomeno fisico dell'elettroluminescenza, cioè dell'emissione di luce da un semiconduttore percorso da corrente elettrica, si ottenne per la prima volta agli inizi del secolo scorso.

Le prime scoperte in questo ambito furono di Henry Joseph Round, il quale nel 1907 notò che, applicando una tensione di soli 10 volt ad un cristallo di carburo di silicio (SiC), si poteva osservare una debole emissione di luce giallastra.

Si era però ancora ben lontani dall'invenzione del LED così come lo intendiamo oggi, per il quale si dovette aspettare fino agli anni '60; fino a metà del '900, infatti, si conoscevano solamente i semiconduttori presenti in natura.

Nel 1961, sfruttando le proprietà dell'Arseniuro di Gallio (GaAs), fu costruito e commercializzato il primo diodo ad emissione infrarossa, sviluppato da James Biard e Gary Pittman per la Texas Instruments.

L'anno successivo Nick Holonyak, per la General Electric, sviluppò il primo LED a luce rossa, da subito intuito dalle aziende del settore come una grande invenzione, potenzialmente in grado di apportare notevoli miglioramenti ai prodotti in commercio e allargare l'orizzonte tecnologico, fino ad allora limitato dalle scarse prestazioni e dagli alti consumi dei componenti di generazione precedente.

Con lo studio delle proprietà dei semiconduttori furono presto inventati LED di diversi colori e nacquero i display a sette segmenti, molto pratici per rappresentare cifre o caratteri e adatti quindi all'impiego negli strumenti di misura ed in altri apparecchi elettronici.

All'inizio degli anni '70 iniziarono ad essere prodotte calcolatrici tascabili con display a LED e la Hamilton Watch Company produsse il primo orologio digitale della storia. Negli anni seguenti i LED diventarono i protagonisti nell'ambito della segnalazione luminosa nei dispositivi elettronici fino all'avvento dei display a cristalli liquidi. Con lo sviluppo di questi schermi, l'impiego dei LED nei dispositivi elettronici subì un'attenuazione dovuta alla maggiore efficienza del nuovo prodotto.

Nel 1993, il giapponese Shuji Nakamura inventò il primo LED a luce blu ad alta efficienza, che aprì la strada per l'invenzione dei primi LED bianchi, lanciati poi sul mercato nel 1995. Tale risultato portò Nakamura a ricevere il premio Nobel per la fisica nel 2014.

Da quel momento l'attività di ricerca ha avuto quale obiettivo quello di aumentare sempre più la luminosità dei LED, con l'idea di riuscire ad utilizzarli per l'illuminazione, andando a sostituire totalmente le tradizionali lampade ad incandescenza o a scarica.

In accordo con la legge di Hainz, formulata dall'omonimo scienziato alla conferenza dal titolo "Strategies in Light" tenutasi in California nel febbraio del 2000, si è statisticamente notato che ogni dieci anni il flusso luminoso (misurato in lumen) generato dai LED aumenta di venti volte e il costo di produzione diventa un decimo. Proprio in quegli anni è iniziata la progettazione e costruzione delle prime lampadine a LED, composte da più diodi affiancati per raggiungere la luminosità di una tradizionale lampadina.

Negli stessi anni le industrie hanno lavorato per produrre dispositivi LED in grado di emettere contemporaneamente luce di più colori, integrando all'interno dello stesso bulbo più giunzioni. Quest'ultima soluzione ha come principale vantaggio, rispetto all'utilizzo di più LED separati, la possibilità di utilizzare circa un terzo dei componenti per realizzare lo stesso dispositivo, garantendo dimensioni ridotte e una migliore qualità.

Tra i settori che hanno tratto maggiore vantaggio dalla tecnologia LED si trova sicuramente quello automobilistico: la vera e propria innovazione risiede nell'impiego di luci a LED per l'illuminazione frontale, sia per le cosiddette luci diurne che per i proiettori anabbaglianti e abbaglianti, molto più luminosi ed efficienti dei fari tradizionali. La prima casa automobilistica ad introdurre fari a LED nelle proprie vetture è stata Audi nel 2004.

Infine l'impiego dei LED ha comportato una vera e propria rivoluzione nell'ambito dello show business e, in particolare, con l'introduzione dei *ledwall*, grandi matrici di LED utilizzati nei grandi spettacoli come schermi per visualizzare immagini senza la necessità di videoproiettori.

1.2 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEI LED

Il LED (acronimo inglese di Light Emitting Diode) è un dispositivo elettronico (diodo) costituito da una giunzione PN polarizzata direttamente che, attraversata dalla corrente, emette radiazioni elettromagnetiche (come, di fatto, avviene in ogni diodo) nel campo del visibile, cioè luce.

A differenza delle lampade tradizionali, è bene far notare che i LED convertono direttamente l'energia elettrica in luce.

Il materiale alla base del funzionamento del LED deve essere semiconduttore e il fenomeno fisico che permette ai LED di emettere luce si chiama *ricombinazione*.

Il comportamento elettrico di ogni materiale dipende dalla sua struttura atomica ed è esprimibile in base ai livelli energetici, che caratterizzano il comportamento degli elettroni degli atomi del materiale stesso.

Ogni materiale è caratterizzato dal fatto di possedere almeno due delle tre bande fondamentali che sono la banda di valenza, la banda proibita e la banda di conduzione. Le bande sono un insieme di livelli energetici *possibili* o *impossibili* per gli elettroni di quel materiale. Quando *possibili* sono occupati da elettroni e la banda è detta di valenza; in tale banda, il livello energetico più alto (occupato da elettroni) si chiama *livello di Fermi*.

In un materiale semiconduttore, in cui il gap tra la banda di valenza e la banda di conduzione degli elettroni è minore di 1 eV, le lacune e gli elettroni liberi sono presenti in egual quantità. La resistività offerta dai semiconduttori è però ancora troppo elevata per essere utilizzati direttamente come base per la realizzazione di una giunzione. Se però vengono introdotte delle impurità, operazione che prende il nome di **drogaggio**, il numero di lacune ed elettroni non è più uguale. Vengono cioè introdotti elementi chimici differenti (drogaggio di tipo N o di tipo P) all'interno del reticolo cristallino.

Con il drogaggio di tipo N si ha l'obiettivo di aumentare il numero di elettroni liberi. Esso si realizza inserendo nel reticolo cristallino tetravalente del semiconduttore un materiale drogante pentavalente (con cinque elettroni di valenza) come il fosforo (P), l'antimonio (Sb) o l'arsenico (As). A causa della struttura del silicio (tetravalente) il quinto legame non si può formare e l'elettrone in eccesso, non essendo coinvolto in un orbitale di legame, può divenire libero con una piccola quantità di energia. Ad ogni atomo di materiale drogante inserito corrisponde un elettrone libero.

Analogamente avviene con il drogaggio di tipo P, in cui si aumenta il numero di lacune, inserendo un materiale trivalente (tre elettroni di valenza) che può realizzare solamente tre legami. I materiali droganti trivalenti sono l'alluminio (Al), il gallio (Ga) o l'indio (In).

All'interno della stessa base di silicio avvengono entrambi questi processi così da creare delle aree a maggioranza di elettroni ed altre a maggioranza di lacune.

Questa nuova configurazione di materiale semiconduttore drogato prende il nome di **giunzione PN** e sta alla base del funzionamento dei LED.

Nella regione di contatto tra le due parti (*Figura 1.1*), gli elettroni tendono a diffondere dalla zona N alla zona P, mentre le lacune si spostano dalla zona P alla zona N. La regione a destra e a sinistra della giunzione prende il nome di *zona di svuotamento*, in quanto è caratterizzata da una diminuzione di elettroni nella parte N e da un decremento di lacune nella porzione P.

Questo fenomeno di diffusione si verifica a causa della tendenza dei livelli di Fermi delle due porzioni a raggiungere l'allineamento. In altre parole, la regione di tipo N tende a far abbassare il suo livello di Fermi cedendo elettroni alla regione P, mentre la regione P spinge il proprio livello di Fermi ad alzarsi, ricevendo elettroni dalla zona N e, quindi, cedendo lacune.

Il processo di diffusione termina quando i livelli di Fermi delle due porzioni di materiale risultano allineati. A seguito dello spostamento dei livelli di Fermi, la banda di valenza e la banda di conduzione nella regione di svuotamento risultano "piegate"; infatti, dato che la parte N tende a cedere elettroni alla parte P, la banda di conduzione subisce un piegamento che la allontana dal livello di Fermi, mentre, dal momento che la parte P tende a ricevere elettroni dalla zona N, la sua banda di conduzione tende ad avvicinarsi al livello di Fermi.

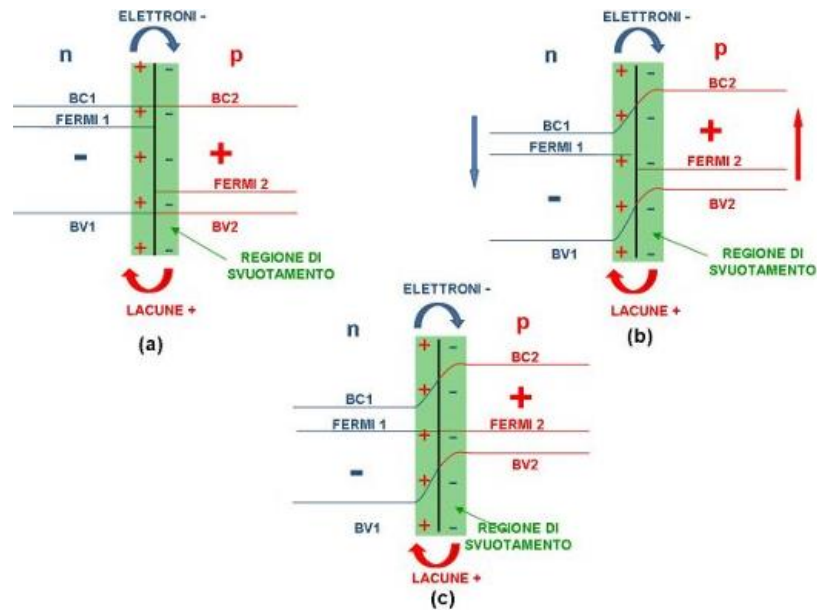


Figura 1.1 – Semiconduttore drogato con evidenziate la regione P, la regione N e la zona di svuotamento; a), b) e c) individuano tre diversi stadi in successione del processo di allineamento dei livelli di Fermi.

Le regioni lontane dalla giunzione, invece, non essendo interessate a fenomeni diffusivi, mantengono inalterata la posizione delle loro bande (*Figura 2.1 (c)*). Una volta che i livelli di Fermi risultano allineati, la zona di svuotamento non è più soggetta a fenomeni diffusivi ed è caratterizzata, a destra, da una regione di ioni fissi negativi e, a sinistra, da una zona di ioni fissi positivi. Questa differenza di carica ai lati della giunzione dà origine al cosiddetto potenziale di *built-in*, il quale, a livello grafico, è rappresentato dal segmento OB mostrato in *Figura 2.2*.

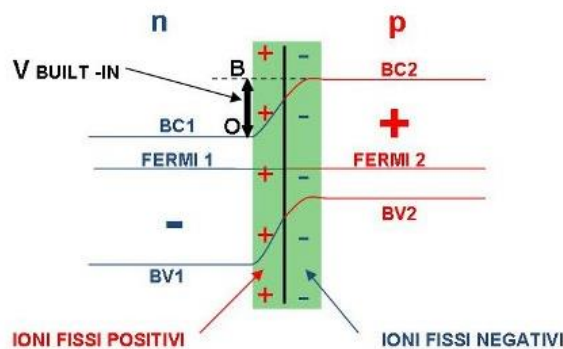


Figura 1.2 – Livelli di fermi allineati, non vi sono più fenomeni diffusivi.

La presenza di tale potenziale determina la nascita di un campo elettrico che, in condizione di equilibrio, si oppone ad ogni ulteriore diffusione di cariche, evitando il disallineamento dei livelli di Fermi.

Quando si applica una tensione positiva alla giunzione (anodo (+), zona P e catodo (-), zona N), si forzano gli elettroni in eccesso presenti nella regione N a migrare nella regione P e si ottiene una c.d. **polarizzazione diretta** della giunzione. Il suo valore deve superare un valore di soglia che coincide con il potenziale elettrico necessario per strappare via gli elettroni che hanno riempito le lacune in prossimità della regione di svuotamento della zona P.

Viceversa, quando si applica un potenziale negativo, si ottiene l'effetto di ampliare la zona di svuotamento, ovvero di accrescere la barriera di potenziale.

In un *diodo*, la conduzione si ottiene solo se il diodo è polarizzato direttamente, ovvero quando la tensione applicata ai suoi capi è positiva sull'anodo e negativa sul catodo; la caratteristica del diodo infatti non è lineare: al crescere della tensione, la corrente cresce con legge esponenziale. Se poi ai suoi capi viene invertita la polarità di alimentazione, il diodo non conduce più.

Il LED, diodo emettitore di luce, è costituito da una giunzione PN polarizzata direttamente; ciò significa che alla zona P è stato applicato un potenziale positivo, mentre alla zona N è stato imposto un potenziale negativo.

In questa situazione, gli elettroni della parte N, respinti dal potenziale negativo, entrano nella regione di svuotamento e convertono gli ioni fissi positivi in cariche libere negative; da parte opposta, anche le lacune, respinte dal potenziale positivo, entrano nella zona di svuotamento e trasformano gli ioni fissi negativi in cariche positive; come conseguenza di questa diffusione di cariche, la regione di svuotamento si restringe.

Una volta che la regione di svuotamento è praticamente scomparsa, gli elettroni liberi della parte N e le lacune della parte P si **ricombinano** a livello della giunzione emettendo fotoni.

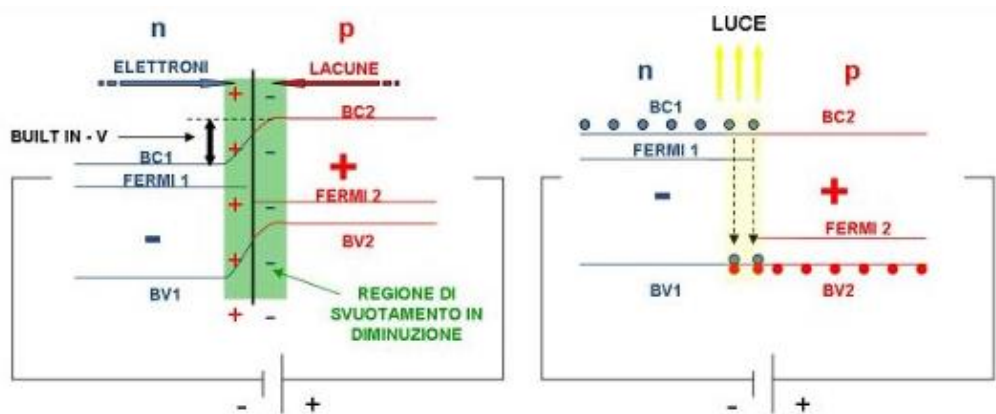


Figura 1.3 – Effetto della ricombinazione: emissione di fotoni.

Dal momento che gli elettroni della regione N si trovano in banda di conduzione, mentre le lacune della zona P sono in banda di valenza, affinché avvenga la ricombinazione, gli elettroni devono liberarsi della quantità di energia corrispondente al gap e saltare in banda di valenza. Durante questo processo l'energia di cui gli elettroni si liberano viene emessa in forma di luce e il colore di tale radiazione luminosa dipende esclusivamente dal valore del gap del semiconduttore.

Quest'ultimo, per garantire ricombinazioni facili e, soprattutto, radiative, deve essere caratterizzato da una corrispondenza spaziale tra minimo della banda di conduzione e massimo della banda di valenza: esso deve essere, quindi, un semiconduttore a band-gap diretta (come può essere ad esempio l'arseniuro di gallio, GaAs).

1.3 – TIPOLOGIA E STRUTTURA DEI LED PER L'ILLUMINAZIONE

I LED utilizzati per scopi illuminotecnici sono detti High-Power LED o più semplicemente Power LED (LED di potenza) in quanto la giunzione deve essere attraversata da un valore elevato di corrente, generalmente non inferiore ai 350mA. Per fare questo si agisce sul drogaggio, cioè sulla densità di atomi droganti introdotti nel reticolo cristallino, e sulla dimensione della giunzione stessa.

I semiconduttori oggi usati per i LED di potenza sono sempre di sintesi e vengono scelti in base alla colorazione da ottenere.

In particolare si possono individuare due classi di appartenenza:

- Power LED basati sull'utilizzo di AllInGaP (Alluminio, Indio, Gallio e Forforo), producono luce arancio-rossa, arancio, gialla e verde;
- Power LED basati sull'utilizzo di InGaN (Nitrato di Indio e Gallio), producono luce blu, blu-verde, verde e in combinazione con fosfori luce bianca.

La struttura maggiormente diffusa nella realizzazione di un chip LED prevede un sistema a livelli concentrici, ognuno dei quali replica aree funzionali precise, che corrispondono alle esigenze di: alimentazione elettrica, gestione del flusso luminoso, dissipazione termica, supporto strutturale. Al crescere della struttura, i livelli assumono il nome di: package, modulo, apparecchio.

Il chip LED è prodotto mediante impianti di crescita epitassiale MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition), che si basa sulla deposizione di semiconduttori e di impurità (droganti) in fase di vapore per formare strati monocristallini sovrapposti. Con la tecnica epitassiale (dal greco *epis*, strato, e *taxis*, ordinato) è possibile infatti costruire semiconduttori artificiali ottenibili miscelando in appositi forni *gas trivalenti* (Ga, Al, In) e *gas pentavalenti* (As, P, Sb). La reazione che ne scaturisce determina la formazione di cristalli elementari di composto *tetravalente* semiconduttore che potranno poi essere drogati con composti *bivalenti* P ed *esavalenti* N, per ottenere una ricchezza di portatori di carica.

In seguito alla crescita epitassiale si ottiene un wafer di parecchi centimetri di lato che è necessario tagliare per ottenere i chip di circa 0,25-0,5 mm; a questo piccolissimo elemento ottenuto viene successivamente applicata la contattatura attraverso processi chimici controllati.

Infine, per ottenere il cosiddetto LED package (o capsule LED) è necessario creare un involucro per contenere il chip, le componenti meccaniche e ottiche, le connessioni elettriche. Spesso, queste unità base per il successivo utilizzo negli apparecchi racchiudono più LED al loro interno (LED multipli) che vengono per l'appunto incapsulati in un unico involucro in silicone trasparente.

1.4 – LED A LUCE BIANCA

I LED colorati emettono luce quasi monocromatica, a seconda della qualità presentano uno spettro con una banda di emissione più o meno stretta, la quale dipende dalla composizione chimica dei semiconduttori e dagli elementi con i quali vengono drogati.

Per realizzare un LED a *luce bianca* vi sono due differenti possibilità:

- a. utilizzare LED monocromatici mescolandoli per sintesi additiva;
- b. utilizzare un unico LED con emissione blu oppure ultravioletta aggiungendovi dei fosfori con emissione gialla: la luce primaria si combina con l'emissione dei fosfori creando una distribuzione spettrale complessiva che dà per l'appunto il colore bianco.

I fosfori possono essere inseriti immediatamente sulla capsula del chip oppure su un supporto posto a distanza, lasciando inalterato il chip LED blu.

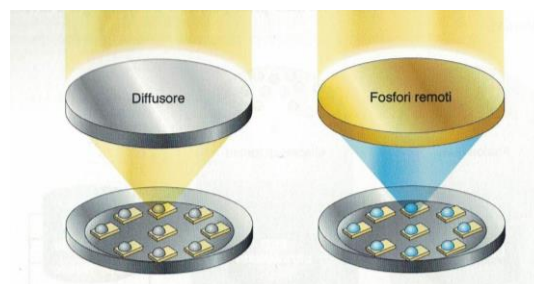


Figura 1.4 – Confronto tra due sistemi per ottenere luce bianca tramite LED blu e fosforo giallo di conversione. A sinistra il fosforo è contenuto nel chip; a destra, il fosforo è posizionato sull'elemento diffusore in posizione remota.

Un LED a luce bianca può quindi essere costruito utilizzando LED blu (ad esempio con una lunghezza d'onda dominante di 450 nm), una camera di miscelazione e dei fosfori applicati su un supporto (solitamente vengono stampati su lastre di plastica o vetro di forma piana o a cupola) posizionato ad alcuni centimetri di distanza.

Il fatto di far coincidere il diffusore con il supporto dei fosfori (*Figura 1.4*) permette di ottenere una serie di benefici. In primo luogo la luminanza risulta distribuita su un'area molto più ampia, l'efficienza di estrazione è migliore e diminuisce il carico termico dei fosfori; inoltre si ottiene un flusso luminoso di colore omogeneo.

Nella tecnologia a fosfori remoti, la camera di miscelazione (*Figura 1.5*) assume particolare importanza; la forma e la finitura della camera sono simili a quelle di un riflettore, in modo tale da poter incrementare l'emissione totale del sistema.

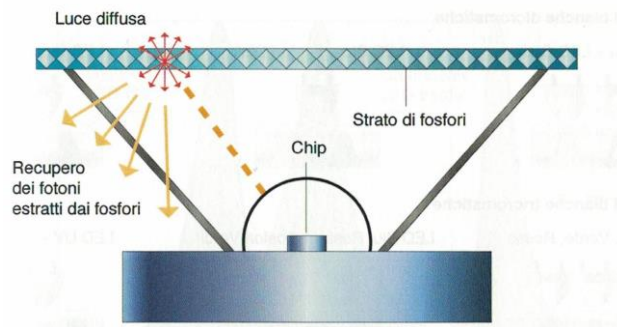


Figura 1.5 – Camera di miscelazione di un LED a fosfori remoti.

Per la realizzazione di LED blu viene impiegato il nitruro di gallio (GaN), un materiale a banda diretta con un'emissione luminosa nell'intervallo 440-460 nm.

Il metodo più comune per l'applicazione di fosfori è quello di utilizzare una polvere YAG (Yttrium Aluminium Garnet) drogata con elementi di terre rare otticamente attivi, come neodimio (Nd), cerio (Ce) e torio (Th), miscelati con un legante: questa miscela viene depositata direttamente sopra e intorno al chip, oppure sul supporto plastico che funge anche da diffusore.

La combinazione del LED blu (440-460 nm) con i fosfori gialli porta all'ottenimento di temperature correlate di colore di 4000-7000 K, mentre per avere temperature inferiori si ricorre all'uso di più fosfori (bifosfori o trifosfori), generalmente accoppiati ad un LED che emette nell'UV (380-400 nm). Il vantaggio dell'accoppiamento tra fosfori di bande differenti e il LED UV è che l'emissione di luce visibile è generata unicamente dalla fosforescenza e lo spettro appare più ampio, a differenza dello spettro dovuto alla somma della luminescenza del LED blu con la fosforescenza dei soli fosfori gialli.

I LED UV, sempre realizzati in GaN, con miscela di fosfori misti, riescono ad avere un indice di resa cromatica superiore a 90.

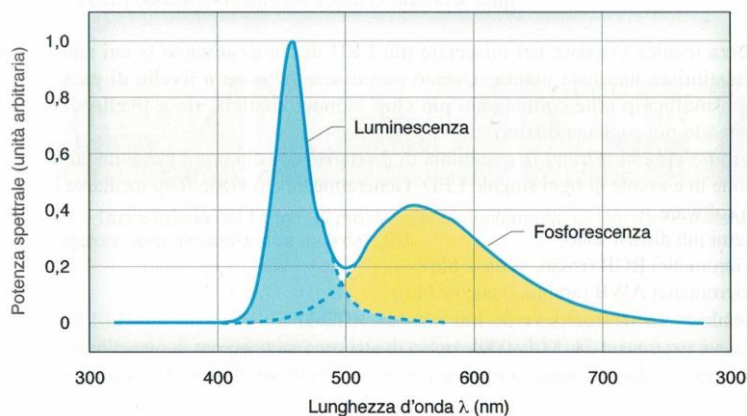


Figura 1.6 – Emissioni spettrali del LED a luce blu e del fosforo giallo.

1.4.1 – EFFICIENZA DI CONVERSIONE DEI FOSFORI

Risulta a questo punto interessante poter definire quanto vale l'efficienza di conversione dei fosfori e per fare ciò bisogna tenere conto di due fattori: *efficienza quantica esterna* e *efficienza di conversione o spostamento di Stokes*.

La prima si può esprimere come segue

$$\eta_{ext} = \frac{\text{numero di fotoni emessi nello spazio libero dal convertitore}}{\text{numero di fotoni assorbiti dal convertitore}}$$

mentre la seconda, conseguenza della conversione di un fotone con lunghezza d'onda λ_1 in uno con lunghezza d'onda λ_2 , si può esprimere come

$$\eta_{Stokes} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

e si ha sempre che $\lambda_1 < \lambda_2$.

Dunque, l'efficienza del convertitore, ovvero il fosforo, si può esprimere come

$$\eta_{convertitore} = \eta_{Stokes} \cdot \eta_{ext}$$

In linea generale, l'efficienza della conversione energetica dei fosfori è dell'ordine del 60%; si tenga presente che sia con LED blu che con LED UV, i materiali utilizzati per la capsula subiscono un inevitabile degrado a d opera delle stesse radiazioni ultraviolette (presenti anche in minima parte nei LED blu).

È possibile dunque esprimere l'efficienza totale di un LED che emette luce bianca mediante la tecnologia a fosfori come prodotto *dell'efficienza del LED per il grado di assorbimento dei fosfori per l'efficienza di conversione*. Attualmente, per un LED blu con fosfori gialli, si può assumere un'efficienza massima teorica di 250 lm/W.

1.5 – LED RGB E LED A LUCE BIANCA

L'utilizzo di sorgenti LED a luce bianca oppure a LED RGB è dettata principalmente dall'utilizzo che se ne vuole fare.

Se l'obiettivo è ottenere una luce bianca omogenea si sceglierà per quanto possibile una sorgente costruita con la tecnologia a fosfori in quanto la proiezione di luce sarà uniforme. È chiaramente possibile ottenere l'apparente medesimo risultato con una sorgente quadricromatica RGBW per sintesi additiva ma se si osservano ad esempio i bordi di proiezione o le stesse ombre degli oggetti che si interpongono, si noterà una molteplicità di contorni risultanti, uno per ciascun LED monocromatico.

Infatti, per quanto mescolati, saranno sempre una sorgente multichip; per ottenere una diffusione omogenea si possono interporre ottiche e filtri diffondenti a scapito però della diminuzione di intensità luminosa e quindi di efficienza complessiva del corpo illuminante.

1.6 – ASPETTI TERMICI DELLE SORGENTI LED

È noto che le sorgenti a LED non irradiano calore, il loro spettro in effetti difficilmente raggiunge lunghezze d'onda superiori ai 780-800 nm, a differenza ad esempio delle conosciute lampade a incandescenza. Ma a differenza di queste ultime sono proprio i LED a dover ricorrere a grossi dissipatori di calore.

La motivazione è semplice: mentre le lampade alogene *irradiano* calore attraverso l'emissione di onde elettromagnetiche nella zona dell'infrarosso, i LED *conducono* calore dalla giunzione PN.

Un parametro fondamentale da tenere presente quando si ha a che fare con LED di potenza è proprio la **temperatura di giunzione**.

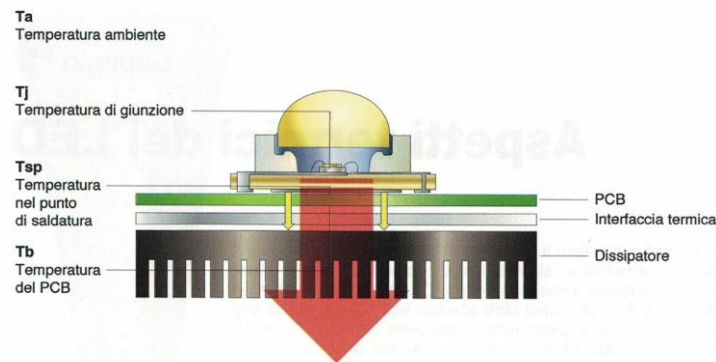


Figura 1.6 – Temperature di riferimento nel LED.

Senza una corretta gestione del calore, la temperatura della giunzione sale e questo inficia le prestazioni e l'affidabilità del LED.

I parametri che maggiormente influiscono sulla temperatura di giunzione sono:

- a. la corrente di pilotaggio;
- b. la resistenza termica totale esistente tra la giunzione e l'ambiente;
- c. la potenza del LED in funzione della superficie di dissipazione e della temperatura ambiente.

Il primo parametro è di facile intuizione, proprio per l'effetto Joule, più è elevata la corrente di pilotaggio e maggiore sarà il calore generato sul chip, e dal momento che la giunzione PN è generalmente molto piccola, la densità di calore generata per unità di area è decisamente elevata.

Ricorrendo all'espressione matematica, si può esprimere la temperatura di giunzione come

$$T_j = T_a + (R_{\theta_{j-a}} \cdot P_d) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

dove

T_a è la temperatura ambiente

$R_{\theta_{j-a}}$ è la resistenza termica totale esistente tra giunzione PN e ambiente

P_d è la potenza dissipata, data dal prodotto di tensione di alimentazione e corrente di pilotaggio ($P_d = V_f I_f$)

La resistenza termica $R\theta_{J-a}$ può essere definita come la somma della serie delle resistenze termiche tra giunzione e punto di saldatura ($R\theta_{J-sp}$), tra il punto di saldatura e la piastra ($R\theta_{sp-b}$) e tra contatto termico della piastra e l'ambiente ($R\theta_{b-a}$):

$$R\theta_{J-a} = R\theta_{J-sp} + R\theta_{sp-b} + R\theta_{b-a} \quad \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right]$$

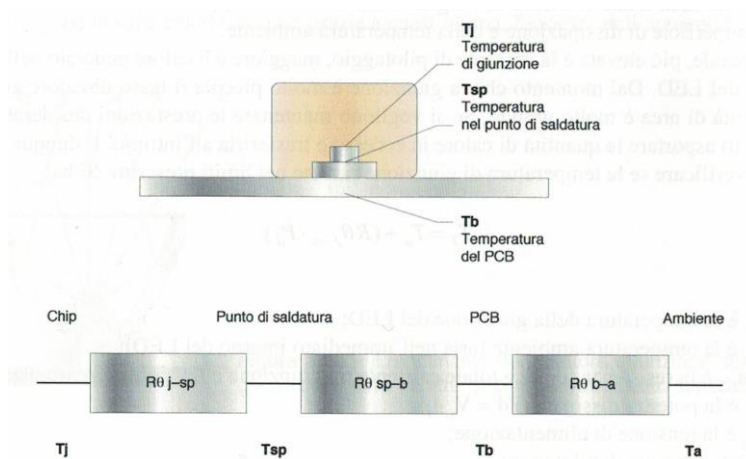


Figura 1.7 – Modello della resistenza termica equivalente di un LED.

Quando la corrente elettrica viene applicata al chip, nella giunzione PN si verificano due processi di ricombinazione: il primo dà origine all'emissione di fotoni mentre il secondo genera energia vibrazionale, cioè calore che si trasmette alle strutture adiacenti.

La tecnologia costruttiva dei LED di potenza deve essere tale da poter garantire che le giunzioni possano essere attraversate da forti correnti e i vari substrati di appoggio siano capaci di smaltire rapidamente il calore prodotto.

In particolare gioca un ruolo fondamentale in questo aspetto la piastra di raffreddamento inferiore.

A differenza della capsula superiore, che è ugualmente in contatto con la giunzione ma ha una piccola superficie di scambio termico con l'ambiente e quindi il suo contributo è trascurabile, la piastra di raffreddamento ha un'elevata conducibilità termica associata ad una massa relativamente piccola ed è dunque la principale responsabile del trasferimento di calore dalla giunzione alla base del LED.

La dissipazione del calore prodotto dai LED può avvenire in modo passivo o attivo. Il primo include il caso dei dissipatori alettati in rame o alluminio e i sistemi heat-pipe, il cui funzionamento è basato sullo scambio convettivo naturale. Il secondo impiega invece sistemi che forzano lo scambio termico sul dissipatore alettato tramite l'uso di ventilatori, celle Peltier o ventole piezoelettriche.

1.5.1 – INFLUENZA DELLA TEMPERATURA DI GIUNZIONE

La dipendenza del flusso luminoso dalla temperatura è una caratteristica fondamentale di ogni sorgente LED e la temperatura della giunzione, in particolare, influisce su molti parametri di un LED (caduta di tensione, flusso, emissione spettrale, etc...).

Il mantenimento del flusso luminoso nel tempo è un parametro molto importante per una sorgente LED. Esso indica la percentuale di flusso residua emessa rispetto a quella iniziale, riferita ad un certo numero di ore di funzionamento: generalmente si considera L_{70} , inteso come il numero di ore di mantenimento del flusso luminoso del LED per valori superiori al 70% del valore iniziale¹.

Poiché, come detto, la giunzione PN si trova incapsulata all'interno del package, essa non è raggiungibile e le misure vengono effettuate sull'involucro.

Per misurare la temperatura di giunzione, le sorgenti in prova vengono inserite all'interno di una camera a temperatura controllata la quale viene fatta variare gradualmente mentre si misura la caduta di tensione di ciascuna sorgente in prova. I dati così ottenuti sono poi utilizzati per stimare la temperatura di giunzione in condizioni di funzionamento reali.

I LED manifestano sensibili variazioni di flusso durante un primo periodo di funzionamento (circa 1000 ore) per poi stabilizzarsi su un andamento sistematico.

Alte temperature dell'ambiente comportano una diminuzione sensibile di flusso e durata dei LED e possono richiedere l'uso di sistemi di raffreddamento attivi.

L'aumento dei centri di ricombinazione, dovuto all'aumento della temperatura di giunzione, causa una variazione del flusso luminoso emesso.

¹ I metodi di prova normalizzati sono riportati nella IESNA LM-80, *Approved Method for Measuring Lumen Depreciation of LED Light Sources*.

Un altro effetto correlato all'innalzamento della temperatura è il degrado degli incapsulanti epossidici usati per l'involucro, che non devono superare una temperatura massima (indicata pari a 120 °C).

Spesso, il degrado spettrale di un LED a luce bianca si manifesta inizialmente come una variazione di colore provocata dall'ingiallimento di una capsula trasparente; successivamente si verifica una perdita di efficienza dei fosfori e solo infine si ha una perdita delle proprietà emissive della giunzione.

1.6 – LA QUALITÀ DEI LED – IL BINNING

Il processo di fabbricazione di un LED è molto delicato e soggetto a diverse variabili (posizionamento del chip, conformazione dell'involucro, applicazione dei fosfori, imperfezioni nei materiali, tolleranze nel processo produttivo).

La conseguenza è che all'interno di ogni lotto di produzione ogni LED presenterà caratteristiche differenti, anche se in misura minima. Laddove però è richiesta una certa qualità del prodotto e una uniformità necessaria dove gli apparecchi montano più sorgenti LED di egual tipo al loro interno, deve essere adottato un sistema che possa garantire tali richieste.

I produttori dunque, coscienti dell'impossibilità di garantire la perfetta uguaglianza tra tutti i LED prodotti nello stesso lotto, adottano sistemi di classificazione, o **binning**, per intervalli di tolleranza. In particolare, per le proprietà elettrica si indicano due limiti (minimo e massimo) che determinano un BIN della tensione di polarizzazione; per il flusso minimo emesso e la temperatura di colore correlata (CCT) nominale si ricorre all'uso di un codice: i diodi LED con lo stesso BIN emettono tutti un flusso luminoso non inferiore a quello di riferimento (Flux BIN) e hanno tutti una CCT il cui scostamento è compreso entro determinati limiti (Color BIN).

Merita porre ulteriormente l'attenzione sulla qualità del colore dei LED, che viene descritta nel successivo paragrafo.

1.6.1 – LA QUALITÀ E LE PRESTAZIONI COLORIMETRICHE DEI LED

Il colore dei LED viene specificato nei datasheet dei produttori attraverso coordinate cromatiche relative al sistema Lxy, principalmente, oppure al sistema Lu'v'².

Per i LED bianchi vengono, oltre a queste, riportate la temperatura correlata di colore (CCT) e l'indice di resa cromatica (CRI). Mentre per i LED monocromatici vengono riportati i valori della lunghezza d'onda dominante e della lunghezza d'onda di picco.

L'indice generale di resa cromatica CRI (Color Rendering Index) indica la capacità della sorgente di rendere fedelmente i colori degli oggetti illuminati³.

Recenti studi hanno però evidenziato che il CRI non riesce a definire in modo soddisfacente le qualità cromatiche di una sorgente allo stato solido, ovviamente limitatamente al caso di LED a luce bianca (pubblicazione CIE 177:2007 – *Color rendering of white LED light sources*). L'indice CRI può infatti assumere valori elevati anche per sorgenti che non rendono fedelmente i colori saturi, penalizzando così le sorgenti che realizzano ottimi contrasti cromatici.

Per tale motivo, sono al vaglio altri sistemi di notazione del colore che si basano su nuovi campioni di colore.

² Una breve descrizione degli spazi colore è riportata al paragrafo 2.2.1.

³ Il metodo di valutazione del CRI è definito nella pubblicazione CIE 13.3:1995, *Method of Measuring the Color Rendering of Light Sources*.

Capitolo 2

Fondamenti di colorimetria

2.1 – LA VISIONE UMANA E LA PERCEZIONE DEL COLORE

Il colore non è una grandezza fisica, bensì costituisce il risultato della sensazione visiva generata dall'interazione tra la luce e la materia che ci circonda, e come tale è un'entità puramente soggettiva e non misurabile.

La maggior parte dei corpi, ad esclusione di quelli che emettono radiazioni nel campo del visibile (autoluminosi), possono essere visti solamente quando sono illuminati. È proprio l'interazione tra la radiazione elettromagnetica che li illumina e la capacità dei corpi di riflettere che rende questi ultimi visibili e classificabili in base al colore.

Il colore corrisponde dunque alla riflessione delle lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica che il corpo non riesce ad assorbire.

Si parla di *colore dell'oggetto* quando si fa riferimento alle proprietà dell'oggetto e di *colore percepito di un oggetto* intendendo la risultante finale delle caratteristiche dell'oggetto, della luce incidente, dall'ambiente circostante, della direzione di osservazione e dell'adattamento dell'osservatore.

Il complesso processo visivo, che verrà esaminato nei soli limiti che in questa sede interessano, ha origine quando la luce raggiunge l'occhio umano e viene assorbita. Le immagini

del mondo esterno vengono così proiettate, capovolte e rimpicciolite, su una sottile membrana nervosa chiamata retina, che ricopre tutta la superficie interna del bulbo oculare ed è ricca di terminazioni nervose che comunicano direttamente con il cervello.

Tra i vari strati che la compongono troviamo quello dei fotorecettori (*coni* e *bastoncelli*), i quali sono i veri e propri responsabili della trasduzione in impulsi elettrici delle reazioni fotochimiche attivate dalla radiazione luminosa⁴.

I coni rendono possibile la visione dei colori e sono responsabili della visione diurna (*fotopica*) mentre i bastoncelli (presenti in numero nettamente superiore ai coni, circa 120 milioni i primi e 6 milioni i secondi) permettono una visione monocromatica, essendo più sensibili all'intensità della luce piuttosto che al suo contenuto spettrale, e sono responsabili della visione notturna (*scotopica*).

La *visione fotopica* (diurna) è caratterizzata da una sensibilità differente dell'occhio umano alle diverse lunghezze d'onda della radiazione luminosa.

A partire dalle misurazioni effettuate su un gran numero di osservatori, nel 1924 la CIE – Commission Internationale de l'Eclairage (organismo tecnico-scientifico internazionale che si occupa della diffusione e dello scambio di informazioni in ambito illuminotecnico al fine di sviluppare degli standard e dei principi guida in materia) – ha definito la curva di efficacia luminosa $V(\lambda)$, la quale segue un andamento di tipo gaussiano con il massimo centrato a 555 nm (colore giallo-verde), valore che rappresenta per l'appunto la lunghezza d'onda alla quale l'occhio umano è più sensibile.

Un'analoga curva $V'(\lambda)$ descrive la sensibilità dell'occhio umano in *visione scotopica*, quindi in scarse condizioni di illuminazione. Questa curva, di forma simile alla precedente, ha un massimo intorno ai 507 nm e un'area maggiore, cioè ha un'efficacia luminosa (espressa in lm/W) più elevata, pari a 1700 lm/W contro i 683 lm/W della curva di visione fotopica.

Si riportano in *Figura 2.1* gli andamenti delle curve appena descritte; definite dalla CIE, esse corrispondono alla sensibilità spettrale di due soggetti denominati *osservatore fotopico standard* e *osservatore scotopico standard*.

⁴ L'insieme delle radiazioni con lunghezze d'onda tra i 380 ed i 780 nm è chiamato spettro visibile (VIS) perché comprende tutte quelle radiazioni che sono percepibili dall'occhio umano.

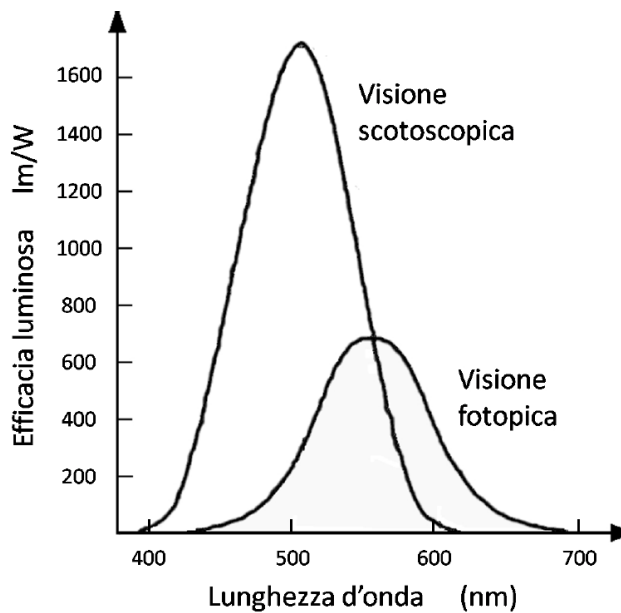


Figura 2.1 – Curve di sensibilità in visione fotopica e scotopica.

Il processo visivo non si limita alla trasposizione al cervello delle immagini che si formano nel nostro occhio, ma include tutta l'elaborazione delle informazioni che si possono trarre da esse e la loro correlazione con i dati che abbiamo in memoria, al fine di ottenere l'informazione più completa possibile di ciò che ci circonda. In questo processo, il colore è un dato aggiuntivo, importante per riconoscere e classificare gli oggetti, seppur non fondamentale per la vita dell'uomo.

Nel linguaggio tecnico si distingue tra *percezione del colore*, definibile come un'impressione di colore soggettiva, frutto di un'interpretazione mentale, e *sensazione di colore*, esperienza oggettiva dovuta alla stimolazione dei fotorecettori.

Verso la metà del secolo scorso, grazie all'avvento dell'elettrofisiologia, una disciplina che consente di monitorare l'attività anche di singoli neuroni sulla base di stimolazioni elettriche, sono state individuate tre differenti tipologie di *coni* all'interno della retina, ognuna delle quali possiede una propria curva di sensibilità (Figura 2.2).

I bastoncelli non partecipano in modo significativo alla sensibilità al colore perché ad alti livelli di illuminazione questo tipo di fotorecettore è poco efficiente, e, inoltre, quando il loro

effetto si fa maggiormente sentire, la percezione del colore nell'occhio umano è molto approssimativa.

La percezione del colore, dunque, nonostante a rigore andrebbe valutata in funzione di quattro variabili (tre livelli di sensibilità dei coni e l'influenza dei bastoncelli), può avvenire esclusivamente in funzione della curva di sensibilità dei coni.

Pertanto si può identificare lo stimolo percettivo di un colore tramite una terna di numeri inseriti in un corretto contesto di riferimento.

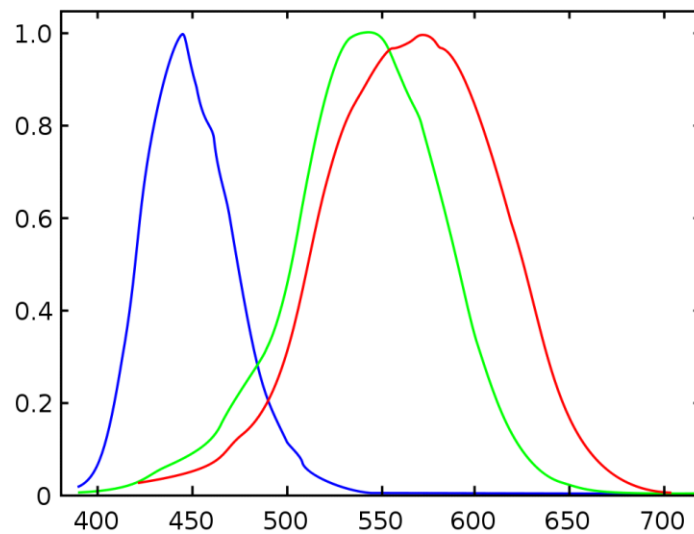


Figura 2.2 – Curve di sensibilità dei coni al variare della lunghezza d'onda.

2.2 – LA QUANTIFICAZIONE DEL COLORE

Il colore è un aspetto della sensazione visiva caratterizzato essenzialmente da tre qualità:

1. **tono o tinta:** è legato alla lunghezza d'onda dominante ed individua il colore con cui viene visto un oggetto;
2. **purezza o saturazione:** indica la vivacità del colore, si differenzia quindi dalla visione del grigio
3. **luminanza o luminosità:** esprime l'intensità luminosa nella direzione della visione.

La scoperta delle tre curve di sensibilità dei coni rappresentate in *Figura 2.2* ha permesso di considerare ogni colore come una combinazione lineare di tre funzioni, un risultato che

costituisce il fondamento del tricromatismo. Tuttavia è importante notare come questa relazione non sia biunivoca e come colori con densità spettrali diverse possano dare la stessa terna di valori.

I principi secondo cui avviene la *sintesi additiva* del colore sono stati formalizzati da Grassmann con le omonime leggi, in seguito ridefinite da Hunt:

1. Una sensazione di colore è completamente specificata da tre grandezze: la tinta, l'intensità del colore e l'intensità del bianco.
2. Se una luce varia con continuità, anche la sensazione di colore della mescolanza additiva con una seconda luce fissata varia con continuità.
3. Il risultato di una mescolanza additiva di colori dipende solo dal loro aspetto e non dalla loro composizione fisica (cioè dallo spettro).

2.2.1 – GLI SPAZI DI COLORE

Dai primi standard definiti dalla CIE, quando viene definito lo standard dell'osservatore tipico a partire dalle leggi di Grassmann e dai valori tristimolo (*Figura 2.2*) e un sistema con tre colori primari di riferimento (RGB), si è passati ad un sistema a coordinate cromatiche xyz , in cui una componente è direttamente proporzionale ai livelli di luminanza. In particolare, essendo la somma delle tre coordinate sempre uguale ad 1, è sufficiente conoscerne due per definire univocamente il punto di colore; da qui il sistema ha preso il nome Lxy , in cui si individuano le due coordinate e la luminanza L , utilizzata come terza coordinata linearmente indipendente dalle altre due.

Contestualmente è stato introdotto il diagramma colorimetrico CIE 1931 che rappresenta lo *spazio di colore* all'interno del quale vi sono tutti i colori possibili (*Figura 2.3*): al centro si nota la miscelazione dei tre colori fondamentali con ovvia risultante del bianco. Nel diagramma di è riprodotta anche la *curva di Planck*, che rappresenta i punti di colore assunti dal corpo nero al variare della propria temperatura⁵.

⁵ Si ricordi che la **temperatura di colore** di una data sorgente è definita come la temperatura di un radiatore planckiano, ovvero un corpo nero, la cui radiazione ha la stessa cromaticità dello stimolo dato dalla sorgente.

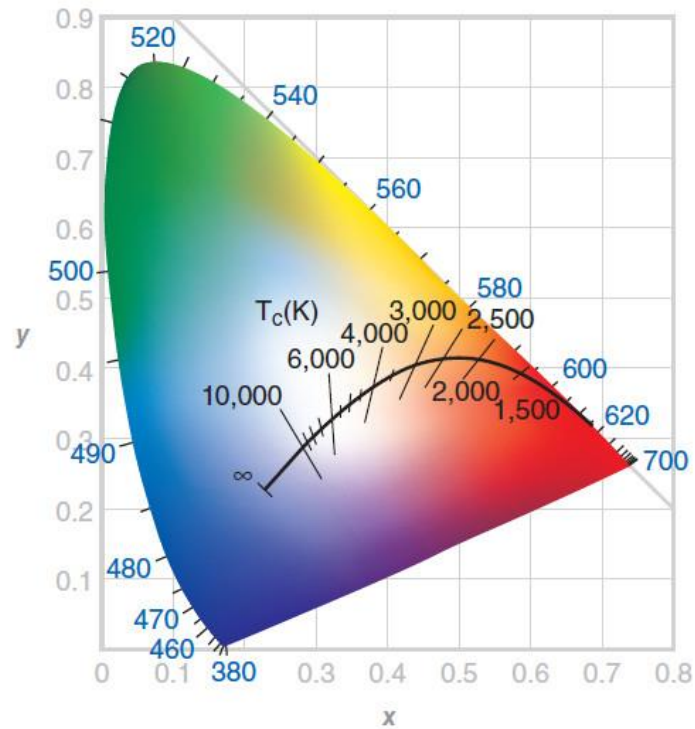


Figura 2.3 – Diagramma di cromaticità CIE 1931.

Il piano xy così definito non è uniforme dal punto di vista dei colori percepiti: punti equidistanti non corrispondono a colori ugualmente simili. A tal proposito, le ellissi di Mac Adams (16 in tutto) individuano colori tra loro indistinguibili (Figura 2.4).

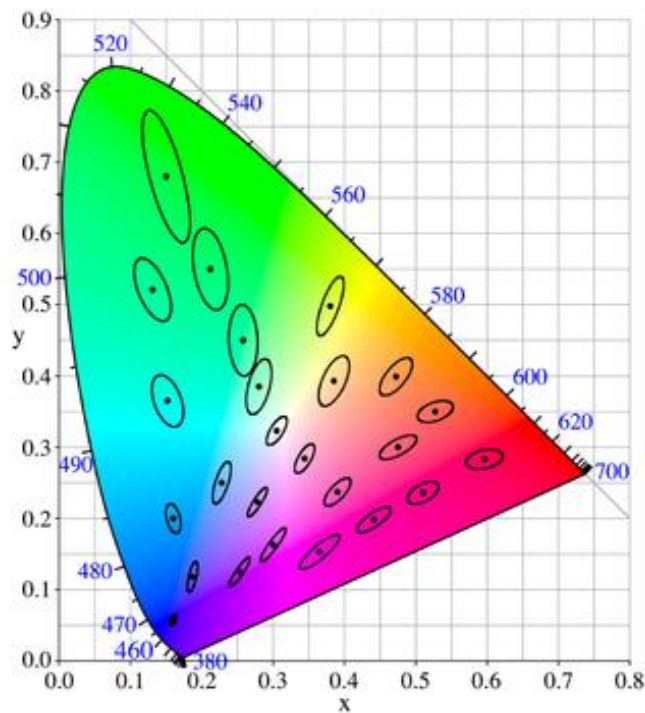


Figura 2.4 – Le 16 ellissi di Mac Adams individuate all'interno del diagramma di cromaticità CIE 1931.

Negli anni seguenti sono stati proposti nuovi metodi per l'identificazione del colore come il sistema CIE a scala uniforme (UCS) in cui nel 1960 la CIE definisce due nuove coordinate cromatiche (u, v) legate tramite precise relazioni alle precedenti (x,y) e vi associa nel 1964 uno spazio tridimensionale aggiungendo una terza grandezza chiamata *indice di chiarezza* W^* . Si viene così a creare un nuovo spazio tridimensionale $U^*V^*W^*$, ancora oggi utilizzato per il calcolo dell'indice di resa cromatica Ra.

Nel 1976 la CIE propone due nuovi sistemi di riferimento con lo scopo di dare una specificazione psicometrica del colore, ovvero per poter specificare il colore così come lo si percepisce.

Il primo è lo spazio CIELUV o (L^*,u^*,v^*) , estensione tridimensionale dei digrammi di cromaticità delle nuove coordinate (u',v') ricavate grazie a relazioni lineari dalle coordinate (u,v) , con l'obiettivo di una nuova mappatura del diagramma xy molto meno irregolare, con il minor numero di ellissi di Mac Adams e di forma quanto più simile ad una circonferenza.

Il secondo, che troverà una dettagliata spiegazione nel paragrafo 3.1.3.2, è lo spazio di colore CIELAB o (L^*,a^*,b^*) in cui la componente L^* è la stessa del precedente e le componenti a^* e b^* individuano rispettivamente il contenuto di rosso/verde e di giallo/blu dello stimolo colore.

2.3 – IL COLORE NELL'ARTE: I PIGMENTI

Si passa ora ad affrontare la tematica più strettamente correlata al tema di interesse, parlando del colore nell'arte.

Quando si parla di arte, l'associazione con una percezione visiva di immagini e colori è immediata. Se in particolare si fa riferimento alla pittura, è naturale associare determinate rappresentazioni con le loro precise cromie ad un momento storico ben definito. Pur se nel corso dei secoli le tecniche artistiche si sono moltiplicate, evolvendo verso forme d'arte concettuale, resta innegabile il fatto che la pittura continua a occupare la parte preponderante rispetto alle altre tecniche, di tal che risulta indispensabile esaminare i materiali che nell'ambito di tale forma artistica vengono impiegati.

I due componenti essenziali della pittura sono i *pigmenti*, cioè sostanze solide colorate in forma di polvere, e il *medium* (gomma, colla, uovo, olio, etc.) che ha la funzione di far aderire le particelle di pigmento sia fra loro sia alla superficie che deve essere dipinta.

La classificazione dei pigmenti è basata sulla loro natura ed origine, per cui si parla di pigmenti inorganici e organici, che a loro volta possono essere di origine naturale o sintetica. I pigmenti organici si differenziano da quelli inorganici per la loro composizione chimica a base di composti organici del carbonio anziché cristallini.

La classificazione chimica più adottata è quella della AATCC (*American Association of Textile Chemists and Colorists*) che definisce un Colour Index in base alla struttura chimica.

Le caratteristiche principali di un pigmento sono:

- l'*insolubilità* nel solvente o nel veicolo in cui è disperso;
- la *stabilità* fisica (ad esempio resistenza alla luce o al calore);
- l'*inerzia* chimica nei confronti delle sostanze con cui sono mescolati (ad esempio leganti, additivi o altri pigmenti).

2.3.1 – LE ALTERAZIONI CROMATICHE

Nel tempo, i pigmenti colorati nelle opere d'arte subiscono variazioni cromatiche (sbiadimento, annerimento e formazione di patine) dovute a molteplici fattori, uno dei quali è costituito dall'interazione con la luce.

Come verrà affrontato nel capitolo successivo, l'azione della luce sugli oggetti può dar luogo a effetti negativi dovuti a processi di tipo *fotochimico* oppure di *riscaldamento da radiazione*. Nel primo caso, tipico è l'ingiallimento dei bordi esterni delle pagine di libri rimasti esposti alla luce oppure l'alterazione, solitamente per perdita di trasparenza ed annerimento, della vernice protettiva di dipinti ad olio o tempera.

L'identificazione di un viraggio cromatico in un'opera pittorica non è sempre facile, in quanto l'alterazione può essere talmente avanzata da rendere la superficie uniformemente modificata a livello macroscopico. Spesso è possibile riconoscere tracce del colore originale mediante tecniche microscopiche. Inoltre, è possibile che alcune parti rimangano protette dalle

luce in quanto vicine alla cornice o sottostanti ad altri strati pittorici e mantengano così la loro tinta originale e permettano di ricavare utili informazioni sull'aspetto iniziale del dipinto.

Si consideri che in molti casi non è possibile svolgere indagini diagnostiche approfondite, laddove il valore dell'opera in questione sia tale da privilegiare la sua integrità a scapito della possibilità di avere informazioni. Per tale motivo, come si evidenzierà nel seguito del capitolo, sono state introdotte preziose tecniche di rilievo non invasive, che non necessitano cioè di alcun campionamento.

Si possono riassumere schematicamente nella seguente tabella le principali cause delle suddette variazioni:

Agenti chimici	Agenti climatici
pigmenti di composizione chimicamente incompatibili	acqua
	umidità
interazioni specifiche tra pigmento e legante	temperatura
	irraggiamento solare
sostanze inquinanti	irraggiamento artificiale
reagenti per la pulizia	vento

Tabella 2.2 – Principali cause di danno alle opere d'arte.

In aggiunta a ciò, vanno considerate anche le forme di *degrado biologico*: vi sono cioè batteri che si nutrono di leganti e coloranti e che formano patine saline che causano l'insorgere di vaste aree biancastre sulla superficie delle opere.

Lo sbiadimento di un materiale colorante per interazione con la luce coinvolge generalmente la rottura di uno o più legami, in modo che i gruppi cromofori, presenti sulla molecola e responsabili dell'assorbimento selettivo di luce che genera colore, si modificano.

È sufficiente anche il solo passaggio da *doppio legame* a *legame singolo*. In conseguenza di tale rottura, i gruppi cromofori assorbono altre lunghezze d'onda e causano la riflessione di un altro colore da parte delle molecole.

L'acido solfidrico (H₂S), che si forma dagli scarichi industriali e dalle vecchie illuminazioni a GAS, causa l'annerimento dei pigmenti a base di piombo (bianco piombo) e, in misura minore, di quelli a base di rame. Dalla combinazione dell'acido solfidrico con il piombo

si origina un composto di colore molto scuro: il solfuro di piombo ($\text{H}_2\text{S} + \text{Pb}^{2+} \rightarrow \text{PbS}$). In particolare, l'annerimento avviene su opere pittoriche con pigmento a base d'acqua come i manoscritti, senza vernici essiccatrici.

Un'alterazione chimica piuttosto diffusa nei dipinti a olio si ha quando una non completa polimerizzazione delle molecole di olio essiccative causa interazioni con i pigmenti.

Ad esempio, la formazione di crateri biancastri sulla superficie contenenti composti organici a base di piombo e acidi grassi avviene per reazione tra il bianco piombo (che è tra i pigmenti più utilizzati nell'arte, dall'antichità fino al XIX secolo) e gli acidi grassi derivanti dall'incompleta polimerizzazione dell'olio di lino utilizzato come legante.

2.3.1.1 – Variazioni cromatiche in alcuni particolari pigmenti

Tra i pigmenti inorganici più utilizzati nella pittura, si trovano il *realgar* e il *pararealgar*, pigmenti naturali composti da solfuro di arsenico; essi sono in uso fin da tempi antichissimi e sono noti per merito dei loro colori brillanti.

Il *realgar* (As_4S_4) presenta una tipica colorazione rosso-arancione e se esposto alla luce solare per un certo tempo forma uno strato friabile di colore giallo, che spesso non veniva notato quando era combinato insieme al giallo orpimento ⁶(As_2S_3).

In realtà, la nuova sostanza che si forma, che si chiama *pararealgar*, ha la stessa formula chimica e la stessa struttura cristallina del *realgar* ma differente struttura molecolare. Questo perché si rompono gli originali legami As-As e As-S e si riformano diversamente.

Analoga situazione si verifica anche per la *malachite* e l'*azzurrite*, due pigmenti che hanno la stessa composizione chimica ma una struttura cristallina differente che li fa apparire di due colori diversi. Il viraggio da azzurrite, $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ a malachite, $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ è noto da molti secoli. I due minerali sono chimicamente molto affini, e il passaggio dal primo al secondo avviene spontaneamente.

⁶ L'orpimento è un pigmento giallo noto già agli Egizi e chiamato in antichità *aurum pigmentum* perché impiegato dagli scribi nella preparazione di inchiostri di colore simile all'oro.

Dal punto di vista artistico questo viraggio, ben noto ai pittori, era il punto debole dell'azzurrite, che per questo era considerata meno pregiata di altri pigmenti blu. In alcuni casi, invece, il cangiamento dell'azzurrite era sfruttato per avere una tinta particolare blu-verdastra.

In sostanza si hanno delle transizioni a livello atomico per cui un elettrone si sposta da un punto all'altro della stessa struttura senza dunque modificare la composizione chimica.

Fenomeno analogo può avvenire tra i metalli, come nel caso del *blu di Prussia*, in cui sono compresenti Fe_2 e Fe_3 . Il Fe_2 cede un elettrone a Fe_3 e si verifica una sorta di ossidoriduzione all'interno della stessa struttura.

Altri pigmenti di tipo inorganico sono il *vermiglione* (il cui equivalente naturale è il *cinabro*) che risulta essere abbastanza stabile nel tempo, tranne in presenza di cloro che agisce da catalizzatore e provoca una reazione che porta allo sviluppo di una sottile crosta nero-grigia, e lo *smaltino*, derivato dalla frantumazione di vetro sodico potassico a cui, in fase di produzione, veniva aggiunto cobalto per caratterizzarlo con il colore azzurro. Ciò che chimicamente avviene è una reazione tra la natura alcalina del pigmento e l'acidità dell'ambiente del legante.

I principali pigmenti organici naturali impiegati per la pittura sono i pigmenti azoici, le ftalocianine, i pigmenti chinacridonici e le *lacche*.

Queste ultime, in particolare, sono pigmenti organici conosciuti da moltissimo tempo perché ricavate dai coloranti naturali; si trovano utilizzate in larga parte in tutta la storia della pittura. Le lacche non hanno un'ottima resistenza alla luce, ma hanno toni di colore molto vivaci, brillanti e trasparenti, ideali per sovrapposizioni cromatiche e lumeggiature.

In passato, si consideri almeno fino al XIX secolo, non era del tutto nota la loro forte fotosensibilità e pertanto se ne faceva un largo uso senza prevedere che, come in molte delle opere a noi giunte, si alterasse completamente l'intera cromia compositiva e, di conseguenza, le sensazioni comunicate all'osservatore.

Come verrà affrontato nel capitolo 5 del presente lavoro, si ritrova l'uso delle lacche anche in opere più recenti, probabilmente utilizzate in maniera consapevole.

2.4 – LA VALUTAZIONE DEL COLORE NELLE OPERE D’ARTE: TECNICHE DI MISURA NON INVASIVE

Con il concetto di “tecniche non invasive” si intende l’insieme di indagini diagnostiche, esami e rilievi, condotti impiegando metodi che non alterano il materiale e che non ne richiedono la distruzione o tanto meno il prelievo di campioni. Rientrano in tali tecniche, in genere, tutti i metodi c.d. indiretti.

In tale ambito, si considerano metodi che utilizzano gli effetti della radiazione elettromagnetica (in tutto il suo spettro di energia) sul materiale.

Si potrebbe obiettare che qualunque tipo di interazione con la materia ne causa un’alterazione, ma giova replicare che l’incidenza di tali metodi, in particolare sulle opere d’arte, è del tutto trascurabile.

2.4.1 – LE PRINCIPALI TECNICHE DI MISURA NON INVASIVE

La **spettroscopia di riflettanza** è una tecnica spettroscopica basata sulla misura del fattore di riflettanza spettrale in funzione della lunghezza d’onda della radiazione incidente.

La spettroscopia di riflettanza nella regione del visibile è stata applicata per la prima volta allo studio dei dipinti negli anni trenta del secolo scorso. Questa pratica, sviluppata inizialmente nei laboratori del dipartimento scientifico della National Gallery di Londra, cominciò a diffondersi dai primi anni ’80 grazie alla possibilità di utilizzo di spettrofotometri portatili equipaggiati con fibre ottiche e sensori che operavano sia nella banda del visibile che nel vicino infrarosso.

La spettroscopia di riflettanza per mezzo di fibre ottiche (FORS), che sarà oggetto di un successivo brevissimo approfondimento, è una tecnica non invasiva che permette di ottenere misurazioni *in situ*, su oggetti cioè totalmente inamovibili dal loro collocamento. Grazie a questo sistema si riescono ad ottenere informazioni utili all’identificazione dei pigmenti, i loro colori e le loro variazioni nel tempo; e sebbene vi siano diverse variabili in gioco, si possono acquisire con una certa sicurezza anche informazioni sulle caratteristiche spettrali di ciascun pigmento.

Il problema principale nell’identificazione dei pigmenti è la possibilità di disporre di un

appropriato database in cui trovare quanti più campioni possibili di spettri da poter confrontare.

L'identificazione dei pigmenti avviene per l'appunto attraverso il confronto dello spettro ricavato durante la misura con uno spettro di un campione noto preparato in laboratorio. I campioni di laboratorio sono preparati con molta attenzione per essere quanto più simili agli stessi pigmenti usati dagli artisti nel corso della storia. Grazie ad analisi chimiche è possibile ricavare l'esatta composizione percentuale degli elementi dei pigmenti così da poter riprodurre dei campioni confrontabili.

A supporto di ciò, gli stessi campioni sono preparati secondo le tecniche proprie dell'epoca di utilizzo; ad esempio, una volta mescolati al medium (olio di semi lino, colla animale, uovo, etc...) vengono spalmati su un fondo di gesso bianco preparatorio applicato su una tavola di legno, e in seguito si possono creare diverse stratificazioni applicando vernici trasparenti su pitture opache.

Tutti questi campioni sono poi analizzati con le tecniche spettroscopiche e registrati in database secondo la loro composizione. Uno dei principali laboratori scientifici, che si è occupato di costruire negli anni questo ampio catalogo, è quello dell'Istituto di Fisica Applicata 'Nello Carrara' presso il CNR di Firenze.

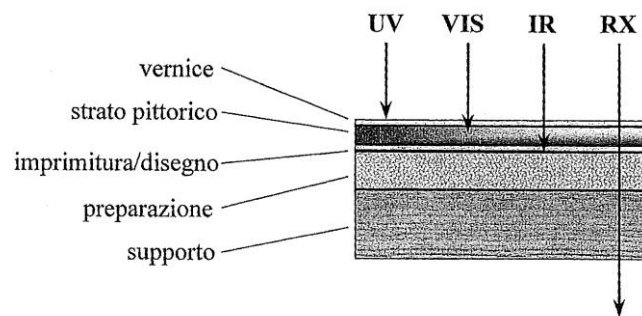


Figura 2.5 – Livelli di penetrazione delle radiazioni elettromagnetiche aventi differenti frequenze.

Un altro metodo utilizzato di frequente nell'analisi di opere d'arte è la **fluorescenza a raggi X**, comunemente indicata con l'acronimo XRF (X-Ray Fluorescence). Si tratta di un metodo d'analisi che si basa sul fenomeno della fluorescenza indotta in un oggetto quando questo viene attraversato da radiazioni elettromagnetiche con frequenza dell'ordine di 10^{18} Hz (lunghezza d'onda compresa fra 10 nm e 1 pm): la diseccitazione di un atomo,

precedentemente eccitato da un fascio di raggi X incidente, viene accompagnata dall'emissione di una radiazione caratteristica.

Dall'analisi di quest'ultima, si può risalire agli atomi dai quali sono stati emessi i fotoni caratteristici e quindi alla composizione elementare del target utilizzato. Nello studio della fluorescenza a raggi X, le righe spettrali caratteristiche vengono dunque analizzate per poter determinare la concentrazione degli elementi in cui viene indotta la fluorescenza.

Questa tecnica, grazie all'evoluzione della tecnologia, è oggi considerata tra le tecniche di analisi non distruttive. Essa permette di penetrare nel campione in prova fornendo utili informazioni sulla stratigrafia dell'opera e sui supporti sottostanti gli strati pittorici.

2.4.2 – PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DELLA TECNICA FORS

La Spettroscopia di Riflettanza mediante Fibre Ottiche (FORS, Fiber Optics Reflectance Spectroscopy) è sicuramente interessante per la facilità d'applicazione e in termini di velocità di risposta per l'identificazione dei pigmenti presenti nelle opere d'arte (il tempo medio di acquisizione dello spettro è di 20 ms). Si noti che si tratta di una tecnica qualitativa e non quantitativa; per analisi dettagliate degli oggetti in prova è necessario ricorrere ad analisi chimiche di campioni prelevati.

Si è specificato che si tratta di spettroscopia di *riflettanza* in quanto il dato di interesse è proprio la componente riflessa della luce incidente; in passato la spettroscopia era prevalentemente legata all'analisi della *trasmittanza*, cioè la componente trasmessa attraverso campioni e soluzioni.

La tecnica FORS si basa sull'analisi di spettri di riflettanza in cui l'intensità della radiazione retrodiffusa dalla superficie investigata è riportata in funzione della lunghezza d'onda della radiazione inviata sulla zona di misura. Il valore dell'intensità, riportato come percentuale di luce diffusa (riflessa) dalla superficie investigata, è rapportato a un bianco di riferimento (generalmente si utilizza una superficie di teflon per la calibrazione), che si assume diffondente luce al 100% su tutto l'intervallo spettrale considerato.

L'identificazione dei pigmenti avviene per comparazione con spettri di stesure pittoriche di riferimento.

I componenti fondamentali di uno spettrofotometro FORS sono:

- una sorgente policroma, generalmente una lampada alogena o al deuterio
- un monocromatore, cioè un sistema in grado di suddividere la luce in bande di emissione molto strette e dunque monocromatiche
- un fascio di fibre ottiche in quarzo purissimo con due o più terminazioni, una per la luce incidente sull'opera, le altre per ricondurre le radiazioni riflesse ai sensori
- due o più sensori fotoelettrici, generalmente realizzati in silicio o InGaAs, ciascuno responsabile (e di conseguenza tarato) di una porzione di spettro

Al variare della sorgente varia lo spettro su cui poter lavorare; ad esempio, le lampade alogene sono indicate per lavorare bene nei campi VIS e NIR⁷ (intervallo di utilizzazione 350-3200 nm), le lampade al deuterio sono ideali per analisi nel campo UV⁸ (intervallo di utilizzazione 185-400 nm) o ancora le lampade allo xeno permettono di avere colorazioni sature nel visibile ma sopra gli 800 nm presentano dei picchi di forte intensità che alterano i risultati.

Per quanto riguarda i monocromatori, attualmente si trovano prismi oppure reticoli di diffrazione. Essi oscillano continuamente per fare in modo di scansionare tutto lo spettro. Deve essere posta una particolare attenzione alla geometria dei reticoli di diffrazione per evitare il manifestarsi di picchi di riflessione in corrispondenza di multipli e sottomultipli della frequenza utilizzata in un preciso istante.

⁷ La banda dell'infrarosso (IR) è la parte di spettro elettromagnetico comprendente le lunghezze d'onda superiori ai 750 nm, tra cui si distinguono generalmente le radiazioni dell'infrarosso molto vicino (VNIR) tra 750 e 2500 nm e le radiazioni del vicino infrarosso (NIR) da 2500 a 25000 nm.

⁸ Si ricorda che è definito campo dell'ultravioletto (UV) quella parte di spettro elettromagnetico che comprende tutte le lunghezze d'onda tra i 100 ed i 380 nm. Solitamente si distingue in: UVC (100 – 280 nm), UVB (280 – 315 nm) e UVA (315 – 380 nm).

Capitolo 3

La normativa di riferimento

In ambito museale un'illuminazione adeguata è condizione essenziale per consentire al pubblico la massima visibilità e fruibilità delle opere in esposizione. La progettazione dell'illuminazione nell'ambiente espositivo è quindi fondamentale anche per la valorizzazione del patrimonio storico-artistico a cui l'istituzione museale deve assolvere, insieme alla salvaguardia del patrimonio stesso, garantita dalla messa a punto di corrette condizioni ambientali e di conservazione a valere nel lungo periodo. L'ottimizzazione dell'ambiente luminoso vede facilmente in conflitto le esigenze della fruizione con quelle della conservazione: la radiazione luminosa rappresenta infatti uno degli agenti primari di degrado dei materiali, i quali – esposti alla luce in modo prolungato o con illuminazione non adeguata – possono subire alterazioni irreversibili.

In merito allo studio e alla valutazione dei danni dovuti alle radiazioni luminose, il documento tecnico di riferimento è costituito dal **Technical Report CIE 157:2004**.

In esso sono evidenziati i parametri da considerare per valutare il danno, le relazioni matematiche da seguire e i modelli di prove sperimentali. Infine, tale documento definisce delle classi di appartenenza dei materiali in merito alla loro sensibilità alla luce e i relativi livelli massimi di illuminamento unitamente al numero massimo di ore annuali di esposizione.

Un altro documento di fondamentale importanza per l'illuminazione delle opere d'arte è la specifica tecnica europea **CEN/TS 16163:2014**, pubblicata nel 2014 e recepita poi nello stesso anno dall'ente italiano di normazione nella UNI CEN/TS 16163, dal titolo di "Linee guida

e procedure per scegliere l'illuminazione adatta a esposizioni in ambienti interni".

Di seguito sintetizzeremo quanto illustrato da ciascuno dei due documenti in merito alla valutazione e al controllo dei potenziali danni alle opere d'arte, e alle linee guida per una corretta illuminazione museale.

3.1 – TECHNICAL REPORT CIE 157:2004

3.1.1 – PRINCIPI SCIENTIFICI

La norma muove dall'assioma secondo cui ogni cambiamento peggiorativo dello stato fisico-chimico delle composizioni di qualunque opera d'arte è definito come *forma di degrado*.

Tale forma di degrado può avvenire per cause diverse, in particolare si possono individuare tre tipologie di deterioramento:

- chimico (avviene a livello di struttura molecolare)
- fisico (comprende la forma e l'aspetto estetico dell'opera)
- biologico (dovuto alla presenza di colonizzazioni di micro organismi)

Questa classificazione non deve far pensare ad azioni completamente disgiunte l'una dall'altra; ognuna di esse può portare infatti a un progressivo indebolimento dell'opera e favorire l'evolversi del degrado da uno stato iniziale di tipo chimico ad uno successivo di tipo fisico.

Ancora: processi differenti possono portare al verificarsi simultaneo di danni per effetto sia chimico sia fisico.

Secondo la norma, sono sostanzialmente due i processi per i quali la luce può causare danni alle opere d'arte: l'**azione fotochimica** e il **riscaldamento da radiazione**.

Entrambi presuppongono lo studio della luce secondo un'analisi prevalentemente radiometrica. L'azione fotochimica è dovuta principalmente all'azione delle lunghezze corte dello spettro visibile e UV, mentre il riscaldamento da radiazione è una diretta conseguenza dell'assorbimento di lunghezze d'onda lunghe (IR).

Illustrati gli effetti indotti dalle radiazioni elettromagnetiche sulle opere d'arte, la norma tecnica si concentra poi sulla valutazione del danno.

Peraltro, le considerazioni effettuate in tale documento fanno riferimento al solo danno da degrado fotochimico dovuto a UV e non a quello dovuto a lunghezze d'onda lunghe (IR). Tale scelta di campo appare giustificata dal fatto che la maggior parte dei pigmenti utilizzati per la pittura non presentano ampie bande di assorbimento nella regione dell'infrarosso, a differenza del modo in cui si comportano rispetto a lunghezze d'onda più corte.

3.1.2 - L'AZIONE FOTOCHIMICA

L'azione fotochimica è il processo per il quale una molecola subisce un cambiamento chimico dovuto a un'energia di attivazione derivante dall'assorbimento di un fotone.

Per ogni fotone incidente c'è una probabilità finita di un cambiamento permanente sull'opera. Per gli oggetti sensibili all'esposizione luminosa non esiste un livello sicuro di esposizione alla luce, e gli effetti di un'azione fotochimica sono generalmente irreversibili.

Nei materiali organici, i processi di cambiamento chimico sono estremamente complessi e un'azione fotochimica potrebbe essere solo l'inizio di una catena di cambiamenti chimici portati avanti successivamente da altri agenti, quali l'umidità, il cambio di temperatura e la presenza di inquinamento atmosferico.

Il cambiamento di colore è solitamente l'indicatore più eloquente di danni causati dall'illuminazione alle opere di un museo. Tuttavia, gli effetti visibili dell'azione fotochimica possono differire dal classico ingiallimento e scolorimento delle tonalità e causare, piuttosto, l'incupimento di alcuni coloranti. L'altro effetto principale dovuto all'esposizione luminosa è visibile nello sfilacciarsi delle fibre e nel verificarsi di crepe o piccole rotture sulla superficie.

È tuttavia difficile distinguere tali effetti di cambiamento chimico, da ricondurre direttamente all'azione fotochimica, da quelli derivanti dall'impatto del riscaldamento da radiazione.

Si possono individuare quattro fattori principali che determinano l'azione fotochimica su un'opera d'arte:

- irradianza
- durata dell'esposizione
- distribuzione spettrale della radianza incidente
- fotosensibilità del materiale

di seguito partitamente esaminati.

3.1.1.1 - Irradianza e durata dell'esposizione

L'irradianza E_e è una grandezza radiometrica e rappresenta la densità di energia ricevuta dalla superficie illuminata. Essa è definita come il flusso radiante incidente su un elemento infinitesimo diviso per l'area dell'elemento stesso

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

dove

Φ_e è il flusso radiante [W]

dA è l'elemento infinitesimo di area dell'oggetto [m²]

L'irradianza su una superficie non ortogonale alla direzione di propagazione del flusso varia con il coseno dell'angolo di incidenza α .

La grandezza fotometrica duale dell'irradianza è l'illuminamento. Quest'ultima è una grandezza importante perché, se la prima non viene percepita dai nostri occhi, la seconda è direttamente proporzionale alla radiazione riflessa e definisce dunque la percezione che si ha degli oggetti.

Il principio per il quale, data una sorgente di irradiazione, l'esposizione (H) è l'integrale dell'irradianza nel tempo, è noto come Principio di Reciprocità, o Legge di Bunsen-Roscoe, che può essere espresso come:

$$H = \int_t E_e dt \quad \left[\frac{Wh}{m^2} \right]$$

dove

E_e è l'irradianza incidente sulla superficie [W/m²]

t è il tempo misurato in ore [h]

Quando E_e è costante, come nel caso dell'illuminazione elettrica, l'equazione assume la forma semplice:

$$H = E_e t$$

Secondo tale principio, un'esposizione totale di 10 W/m² per 10 ore è equivalente ad un'esposizione di 20 W/m² per 5 ore o 5 W/m² per 20 ore.

L'*illuminamento* in termini fotometrici non è una misura alternativa affidabile: esso rappresenta infatti la densità del flusso luminoso in termini di flusso radiante misurato secondo la funzione di visibilità fotopica $V(\lambda)$, cioè secondo la tipica risposta visiva umana dell'osservatore fotometrico internazionale, così come definita dalla CIE.

3.1.1.2 – Distribuzione spettrale della potenza della radiazione incidente

Il flusso radiante, che include l'ultravioletto e il vicino infrarosso oltre naturalmente a tutta la banda del visibile, può essere visto come un flusso di fotoni in cui ciascuno di essi rappresenta una quantità discreta di energia. Il livello energetico di ciascun fotone è proporzionale alla frequenza della radiazione monocromatica emessa, in particolare vale la relazione:

$$E = h\nu \quad [J]$$

dove

E è l'energia di ciascun fotone

h è la costante di Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J s)

ν è la frequenza [Hz]

Tenendo in considerazione che la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda λ , l'equazione può essere riscritta come

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad [J]$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto.

L'energia del fotone è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione incidente e questa relazione evidenzia come flussi luminosi di lunghezze d'onda corte abbiano energia molto più elevata rispetto ad un flusso luminoso con prevalenza di lunghezze d'onda lunghe.

In particolare un flusso di radiazione ultravioletta (UV), cioè con lunghezza d'onda inferiore ai 400 nm così come definito dalla CIE, ha un livello energetico notevolmente superiore ad un flusso di radiazione visibile o infrarosso (IR)⁹. Segue, dunque, che per oggetti che sono composti da differenti tipi di molecole, una sorgente di luce con una certa prevalenza di lunghezze d'onda lunghe come una sorgente a incandescenza sarà meno destinata all'innescò di un processo fotochimico rispetto a una sorgente con uno spettro di distribuzione di potenza molto più ampio verso le lunghezze d'onda corte.

L'assorbimento ed il successivo smaltimento di energia da parte della particella costituiscono quello che è denominato *processo primario* dell'azione fotochimica, che dipende esclusivamente dalla radiazione luminosa. In seguito, l'attività della particella eccitata può scatenare una complessa serie di reazioni chimiche a catena, le quali possono portare alla trasformazione totale della sostanza. Questa fase è indicata come *processo secondario*, su cui peraltro influiscono in modo decisivo altri fattori come la temperatura e l'umidità dell'ambiente.

⁹ Si ricordi che è definito campo dell'ultravioletto (UV) quella parte di spettro elettromagnetico che comprende tutte le lunghezze d'onda tra i 100 ed i 380 nm. Il campo dell'infrarosso (IR) comprende invece tutte le lunghezze d'onda tra 780 nm e 1 mm.

La conseguenza più evidente dell'azione fotochimica (nel complesso dei suoi due processi), come analizzato nel precedente capitolo, è la variazione del colore con cui appare l'oggetto e quindi il viraggio cromatico o la perdita di chiarezza per ossidazione dei pigmenti.

Nella *Tabella 3.1* sono riportati i valori tipici di contenuto UV per diverse sorgenti luminose, misurati in *microwatt per lumen* dell'intero flusso ($\mu\text{W}/\text{lm}$).

Si noti che nessuna sorgente è completamente priva di radiazione nella banda UV, tuttavia, grazie ai recenti progressi nella tecnologia LED si riescono ad ottenere sorgenti con un'ampia banda nel visibile e l'assenza di contenuto UV e IR.

TIPO DI SORGENTE	CONTENUTO UV [$\mu\text{W}/\text{lm}$]
Luce solare	400 – 1500
Incandescenza	70 – 80
Incandescenza alogena	40 – 170
Fluorescente	30 – 100
Alogenuri metallici	160 – 700
LED	<5

Tabella 3.1 – Valori tipici di contenuto UV per differenti sorgenti luminose. Dati riportati nella CIE 157:2004 e forniti dal Dott. David Saunders, Dipartimento scientifico, The National Gallery, Londra, Regno Unito.

3.1.1.3 – Fotosensibilità del materiale

Nel 1953 fu proposta una prima procedura per valutare il danno potenziale relativo di differenti tipologie di sorgenti luminose.

Introdotta la funzione di danno $D(\lambda)$, che mette in relazione la lunghezza d'onda con il relativo danno potenziale (*Figura 3.1*), fu proposto di utilizzarla per definire un indice di danno DI per la radiazione incidente e così poter confrontare il potenziale di danno di diverse sorgenti.

Per fare questo furono considerati dapprima i flussi luminosi effettivi di una data sorgente, dove il suffisso *dm* indica che la grandezza indicata è pesata con la sensibilità spettrale del materiale ricevente e si dice, quindi, che è *effettiva*.

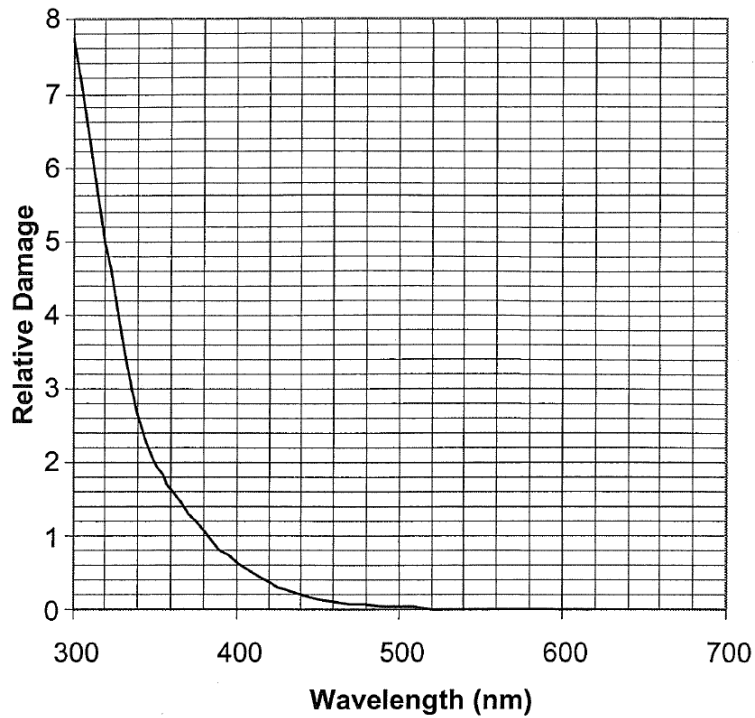


Figura 3.1 – La funzione di danno $D(\lambda)$.

Nel dettaglio, furono prese in considerazione le seguenti relazioni.

Flusso di danno relativo

$$F_{dm,rel} = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot D(\lambda) \cdot d\lambda$$

Flusso luminoso relativo

$$F_{v,rel} = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

dove

λ è la lunghezza d'onda (nm)

$\Phi(\lambda)$ è la potenza spettrale radiante (W/nm)

$T(\lambda)$ è la trasmittanza del filtro eventuale

$D(\lambda)$ è la funzione di danno

$V(\lambda)$ è la curva di efficacia luminosa in visione fotopica (definita dalla CIE)

E fu definito l'indice di danno della radiazione incidente come il rapporto tra i due flussi relativi:

$$DI = \frac{F_{dm,rel}}{F_{v,rel}}$$

Nonostante le buone intuizioni, il problema rimase sulla determinazione di $D(\lambda)$ poiché tale curva è stata estrapolata da un numero limitato di misurazioni effettuate solamente su campioni di carta di bassa qualità.

Inoltre, la curva della funzione di danno sembra attribuire tutta la responsabilità alle sole lunghezze d'onda UV con un piccolo contributo di lunghezze d'onda del visibile nella zona a frequenza più elevata. Questo portò a considerare le sorgenti alogene come unica soluzione di illuminazione museale per evitare qualsiasi forma di danno, contestualmente all'eliminazione per quanto possibile della luce naturale.

Per legare però la funzione di danno potenziale relativo di diversi spettri di sorgente con differenti materiali, possibili oggetti di danno, si rese necessario individuare una relazione che potesse attribuire ad ogni sostanza un parametro con cui indicare la possibilità di innesco di una reazione fotochimica qualora essa sia colpita da una radiazione elettromagnetica incidente di una determinata lunghezza d'onda. Tale parametro, denominato *curva di sensibilità*, si può esprimere nel seguente modo:

$$s(\lambda)_{dm,rel} = \alpha(\lambda) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot f(\lambda)$$

dove

$s(\lambda)_{dm,rel}$ è sensibilità spettrale relativa del materiale in oggetto

$\alpha(\lambda)$ è il coefficiente spettrale di assorbimento dello stesso

$f(\lambda)$ è la funzione caratteristica del materiale in oggetto

Da questo modello si evince che innanzitutto l'energia deve essere assorbita per creare danno, in secondo luogo che la probabilità di una reazione fotochimica è legata al livello energetico dei fotoni e infine che ci sarà sicuramente una funzione caratteristica del materiale (al variare della lunghezza d'onda) che dipenderà dalle proprietà intrinseche del materiale stesso.

3.1.2 – EFFETTO DEL RISCALDAMENTO RADIANTE

La seconda forma di degrado è provocata dal riscaldamento da radiazione.

Quando l'energia incidente sull'oggetto viene assorbita, senza tuttavia agire a livello dei legami chimici, viene dispersa all'interno della struttura molecolare del materiale come calore.

Questo è il caso tipico delle radiazioni infrarosse, cioè quelle ricomprese nella parte di spettro di lunghezze d'onda superiori ai 750nm. Le radiazioni infrarosse provocano un incremento della mobilità delle particelle ed un conseguente aumento della temperatura superficiale dell'oggetto, superiore a quella ambiente.

La temperatura massima T_{max} raggiungibile dall'oggetto esposto è espressa dalla relazione:

$$T_{max} = T_a + \frac{kAE_e}{hc} \quad [^{\circ}C]$$

dove

T_a è la temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

K è una costante di proporzionalità

A è il coefficiente globale di assorbimento (cioè la media dello spettro di assorbimento)

E_e è l'irradianza (W/m^2)

h_c è il coefficiente di perdita di calore per conduzione

L'equazione mostra che l'innalzamento della temperatura superficiale dell'oggetto è direttamente proporzionale all'irradianza ed è indipendente dalla capacità termica dell'oggetto, dalla sua densità o dal suo spessore. Il flusso incidente su un oggetto viene in parte assorbito; tale assorbimento è funzione solo dello spettro della radiazione incidente e dello spettro del materiale ricevente.

L'effetto del riscaldamento radiante potrebbe apparire meno influente, tra le cause di danno, rispetto alle radiazioni UV che danno origine ai processi di alterazione chimica. Tuttavia, l'attenzione posta a prevenire i danni da radiazione ultravioletta ha fatto sì che il riscaldamento radiante diventasse una causa altrettanto rilevante di danneggiamento.

Buona prassi di conservazione dovrebbe essere quella di mantenere costanti ed entro certi limiti la temperatura dell'aria e l'umidità.

Ed ancora: accensioni e spegnimenti giornalieri causano espansioni e contrazioni a livello molecolare sui dipinti, tanto che la sostanza pittorica stessa subisce movimenti dando origine a scolorimenti, indurimenti, crepe e perfino rotture della superficie. La rilevazione di tali effetti non consente di distinguere facilmente se le cause degli stessi siano di origine chimica (reazioni indotte sui pigmenti) o termica (agitazione delle molecole dei vari strati di materiale); tuttavia, in ogni caso sarebbe opportuno evitare radiazioni elettromagnetiche al di fuori dello spettro visibile per limitare il più possibile gli effetti di danno.

3.1.3 – LA VALUTAZIONE DEL DANNO

3.1.3.1 – Il sistema di classificazione *Blue Wool*

Per molti materiali, l'effetto più ovvio quando sottoposti a radiazione luminosa è un progressivo scolorimento, caratterizzato principalmente dalla perdita di saturazione dei colori più scuri.

Questo ha portato ad adottare il sistema di classificazione ISO (1995) come sistema di classificazione generale per il settore museale. Questo sistema è basato sulla scala c.d. *Blue Wool* che comprende 8 categorie: ISO1 rappresenta il livello di materiale in assoluto più fotosensibile, il livello ISO2 è riferito a circa metà della fotosensibilità del livello 1, e così via fino al livello ISO8, che racchiude i materiali meno sensibili alle radiazioni luminose.

Il metodo di misura consiste nell'inserire all'interno di uno stesso *case*, in cui vengono controllate temperatura ed umidità, il campione di prova e 8 campioni di tessuto di tinte standard. Tutti e nove i campioni vengono parzialmente coperti e irradiati da una sorgente con lo spettro più ampio possibile. Ad intervalli regolari si procede con una comparazione visiva tra il campione in prova e il campione di tessuto che in quel preciso istante gli è più simile: si crea così un sistema per associare il progressivo scolorimento dell'oggetto in prova ad uno degli otto campioni.

3.1.3.2 – Il sistema CIELAB

Poiché non tutti i materiali rispondono con una semplice perdita di saturazione del colore, anzi, come vedremo nel capitolo 5, non è così raro nelle opere d'arte un viraggio di colore nel tempo di diversi pigmenti .

Per classificare queste variazioni cromatiche, il sistema ad oggi più completo e maggiormente utilizzato è il CIELAB (CIE, 1986).

Questo sistema definisce uno spazio di colore tridimensionale in cui le caratteristiche di un colore vengono specificate in termini di luminanza (L^*) e di due coordinate cromatiche a^* e b^* . Il parametro L^* varia da una condizione di bianco ad una di nero mentre i parametri a^* e b^* variano nel seguente modo: i valori positivi di a^* indicano una condizione di *rosso saturo* che si sposta progressivamente verso una condizione di *verde saturo* per i valori negativi di a^* , analogamente per i valori di b^* che si spostano da una condizione di *giallo saturo* a valori negativi in cui la condizione è di *blu saturo*.

Una rappresentazione grafica del suddetto sistema è riportata in *Figura 3.2*.

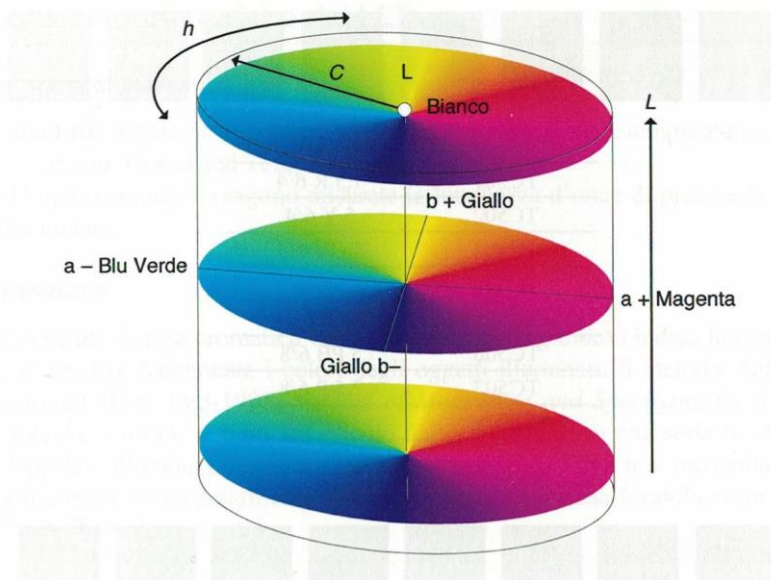


Figura 3.2 – Il sistema CIELAB.

Poiché le equazioni di trasformazione che permettono di ottenere lo spazio CIELAB riguardano la radice cubica dei valori del tristimolo, per questo spazio non ci sono diagrammi di cromaticità e non è definita nemmeno una grandezza correlata alla saturazione. Sono definite,

tuttavia, due grandezze correlate con tinta e croma, rispettivamente chiamate angolo di tinta (a,b):

$$h_{ab} = \arctg \frac{b^*}{a^*}$$

e croma (a,b):

$$C_{a,b}^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}$$

Per come è stato definito, lo spazio CIELAB risulta essere costituito da piani orizzontali paralleli a chiarezza costante, come riportato in *Figura 3.3*.

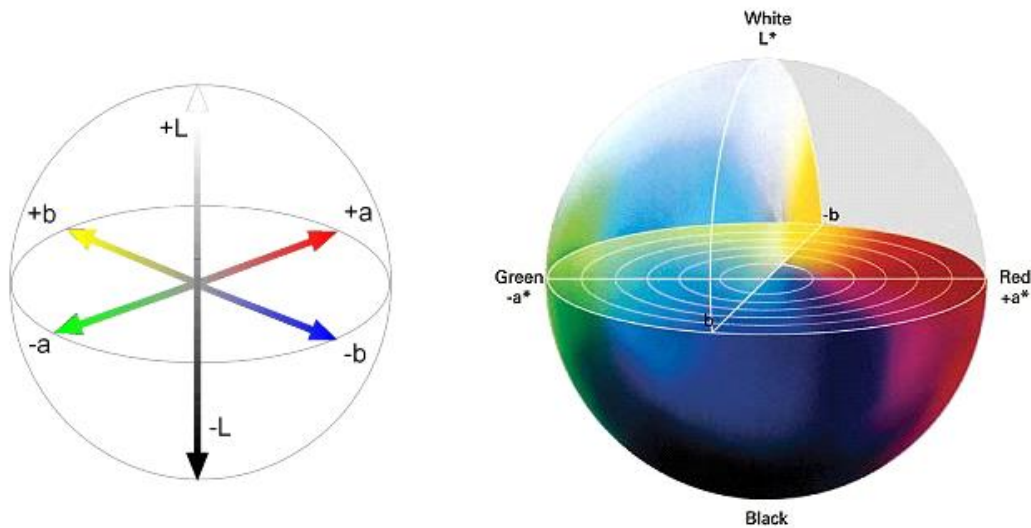


Figura 3.3 – Rappresentazione alternativa del sistema CIELAB.

Nello spazio CIELAB, la differenza di colore tra due stimoli (L^*_1, a^*_1, b^*_1) (L^*_2, a^*_2, b^*_2) è rappresentata dalla loro distanza euclidea:

$$\Delta E_{a,b}^* = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

detta *formula di differenza di colore CIELAB*.

Il carattere incrementale delle grandezze dello spazio CIELAB rende $\Delta E_{a,b}^*$ adatta a misurare differenze di colore sia grandi che piccole, anche se due stimoli con una differenza di colore inferiore a 1 nello spazio CIELAB risultano praticamente indistinguibili.

C'è comunque da tenere conto che, nell'ambito della riproduzione del colore e nella grafica, sono comunemente considerate accettabili differenze di colore con $\Delta E^* < 3$.

Questo sistema ha permesso e permette tuttora di raccogliere dati precisi sulle progressive variazioni cromatiche indotte su diversi materiali dall'esposizione alla radiazione luminosa ed ha confermato la validità del principio di reciprocità.

3.1.3.3 – Il modello di Berlino

Successivamente all'introduzione dello spazio colore CIELAB, è stato proposto agli inizi degli anni '90 un metodo di valutazione del *potenziale di danno* da un gruppo di ricercatori che lavorava a Berlino, da cui il nome.

In questo modello, il danno subito da un oggetto in esposizione è una funzione dell'*effettiva esposizione radiante* H_{dm} :

$$DM = f(H_{dm})$$

e l'*irradianza di danno* E_{dm} è funzione sia dello spettro della radiazione incidente della risposta spettrale relativa del materiale di cui è costituito l'oggetto:

$$E_{dm} = \int_{\lambda} E_{e,\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \cdot d\lambda \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

dove

$E_{e,\lambda}$ è l'irradianza spettrale (W/m^2)

$s(\lambda)_{dm,rel}$ è la sensibilità spettrale relativa normalizzata a 300 nm¹⁰

λ è la lunghezza d'onda (nm)

Si può dunque esprimere l'*effettiva esposizione radiante* come l'integrale nel tempo dell'irradianza di danno:

$$H_{dm} = \int_t E_{dm} dt \quad \left[\frac{W h}{m^2} \right]$$

¹⁰ Si ha cioè $s(\lambda)_{dm,rel} = 1$ per $\lambda = 300$ nm.

e inoltre si definisce la *soglia dell'effettiva esposizione radiante* quel valore di H_{dm} che causa la minima variazione cromatica, cioè per $\Delta E^*_{a,b} = 1$:

$$H_{s,dm} = E_{dm} \cdot t_s \quad \left[\frac{W h}{m^2} \right]$$

Si può osservare quanto appena descritto nel grafico di *Figura 3.4*.

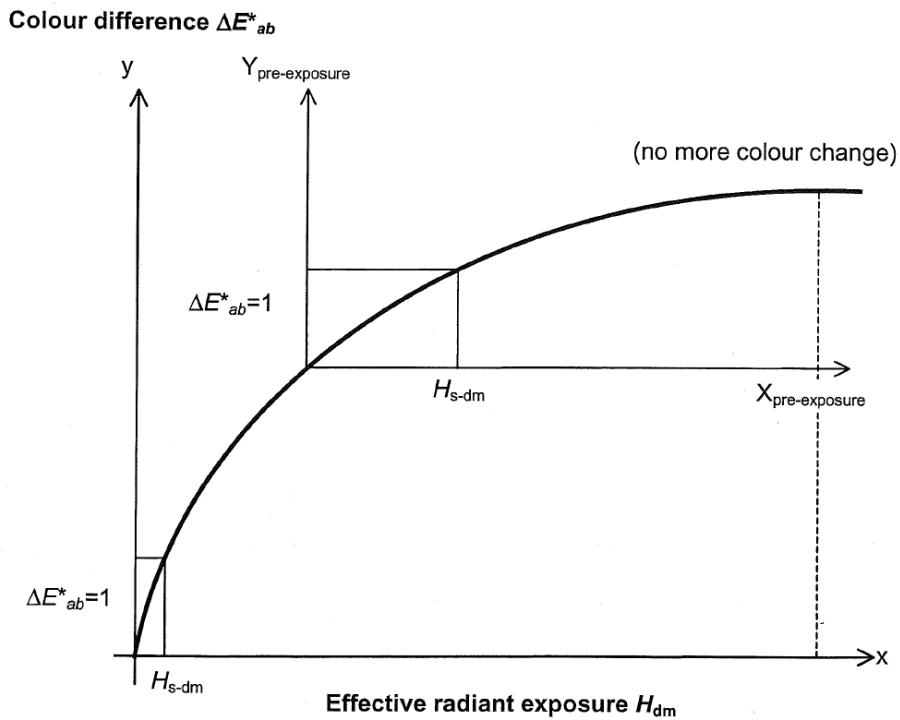


Figura 3.4 –La relazione tra la causa del danno H_{dm} e l'effetto $\Delta E^*_{a,b}$.

Riassumendo, in accordo con il modello di Berlino, si può affermare che la causa del danno è l'effettiva radianza di esposizione (H_{dm}), l'effetto è il cambiamento di colore ($\Delta E^*_{a,b}$) e la soglia di danno di H_{dm} è proprio quel valore per cui si causa un $\Delta E^*_{a,b} = 1$.

La capacità di un fotone di attivare o meno una reazione fotochimica dipende dall'energia che esso può scambiare con la particella con cui collide.

Risulta quindi necessario attribuire ad ogni sostanza un parametro con cui indicare la possibilità di innesco di una reazione fotochimica al suo interno quando è colpita da una radiazione di determinata lunghezza d'onda.

Tale parametro, denominato *curva di sensibilità*, si può esprimere con la seguente relazione:

$$s(\lambda)_{dm,rel} = \alpha(\lambda) \frac{1}{\lambda} f(\lambda)$$

dove, per un dato materiale, si ha

$s(\lambda)_{dm,rel}$ è la sensibilità spettrale relativa

$\alpha(\lambda)$ è il coefficiente spettrale di assorbimento

$f(\lambda)$ è la funzione caratteristica

La curva di sensibilità spettrale relativa di un materiale rappresenta l'entità del danno subito dallo stesso quando assorbe una radiazione di lunghezza d'onda λ , espresso come variazione di colore, normalizzata al valore massimo registrato.

Secondo il modello Berlino, in seguito ad acquisizioni periodiche di misure colorimetriche effettuate su un gran numero di campioni, è emerso che la curva di sensibilità può essere rappresentata da una funzione esponenziale del tipo

$$s(\lambda)_{dm,rel} = e^{[-b(\lambda-300)]}$$

normalizzata per $\lambda=300$ nm (cioè, per tale valore la relazione sopra risulta uguale a 1) e dove b è un valore numerico sperimentale proprio di ogni categoria di materiale.

In *Tabella 3.2* sono riportati i valori ricavati dalle prove di invecchiamento accelerato su diversi campioni, suddivisi per categoria. Per ognuna di queste categorie è riportato anche l'andamento grafico dell'effettiva esposizione radiante in funzione della lunghezza d'onda (*Figura 3.5*). Si noti che è stato considerato il logaritmo in base 10 di $H_{s,dm}$ (in termini unitari: $\log H_{s,dm}$ per 100 nm) per ottenere così un andamento lineare di più facile lettura.

GRUPPO	TIPOLOGIA DI MATERIALE	$H_{s,dm} (Wh/m^2)$	b
a	Carta da giornale (bassa qualità)	5	0,038
b	Carta ruvida (disegno)	1200	0,0125
c	Dipinti ad olio su tela	850	0,0115
d	Tessuti	290	0,0100
e	Acquerelli su carta ruvida	175	0,0115

Tabella 3.2 – Valori ricavati dalle misure sperimentali per cinque diverse categorie di materiali.

In particolare, per la categoria **a** è stato valutato conveniente esprimere la curva come $1,65 \log H_{s,dm}/100 \text{ nm}$ (che appare come la curva più simile all'andamento della funzione $D(\lambda)$ proposta da Harrison, molto più sensibile alle radiazioni UV e molto meno a quelle visibili), mentre per le curve da **b** a **e** è stato considerato un andamento di $0,5 \log H_{s,dm}/100 \text{ nm}$, il che significa che ogni 200 nm di lunghezza d'onda, la sensibilità cambia di un fattore 10.

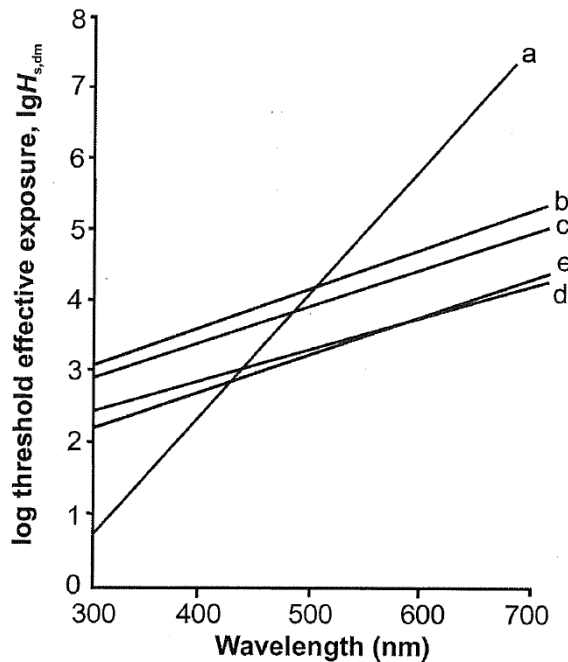


Figura 3.5 – Distribuzione spettrale del logaritmo dell'effettiva esposizione radiante di soglia per cinque diverse categorie di materiale.

Si ricordi che $H_{s,dm}$ non è costante ma incrementa come soglia di esposizione man mano che il materiale diventa sempre meno sensibile. Inoltre, come già visto e come si riprenderà poi, nel caso di pigmenti pittorici le variazioni cromatiche indotte dalle radiazioni elettromagnetiche sono un chiaro indice di cambiamento dell'assorbanza spettrale; ciò comporta dunque una variazione di sensibilità dei pigmenti stessi che può diventare critica in alcune situazioni.

Si può infine concludere che per una data situazione in cui sono definiti sia l'oggetto (o il materiale) ricevente la radiazione, sia la sorgente (e la sua posizione relativa con l'oggetto), il *potenziale di danno* può essere espresso come il rapporto tra l'irradianza effettiva di danno E_{dm} e l'irradianza E proprie di tale situazione:

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E}$$

In seguito al modello di Berlino sono stati effettuati ulteriori approfondimenti e studi sperimentali che han portato a nuove considerazioni in merito all'effettivo comportamento dei pigmenti al variare della lunghezza della radiazione incidente.

Si osservino, a titolo di esempio, i grafici di *Figura 3.6* così come riportati nel Technical Report CIE 157.

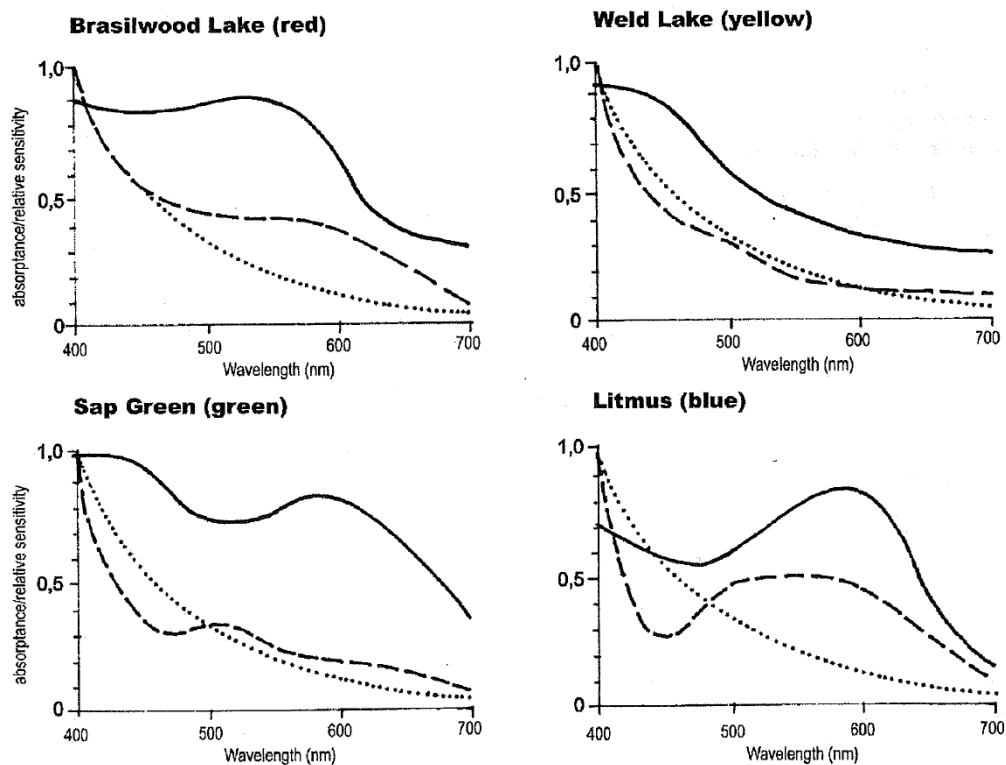


Figura 3.5 – Assorbanza spettrale (linea continua) e risposta spettrale relativa (linea tratteggiata) di quattro pigmenti di differenti artisti. La linea a puntini mostra la risposta spettrale relativa normalizzata a 400 nm basata sulla funzione definita dal modello di Berlino.

Da questi si possono trarre due semplici ma fondamentali conclusioni: sicuramente la gran parte dei pigmenti è molto più sensibile alle radiazioni con lunghezze d'onda più corte ma è altrettanto vero che ogni pigmento ha un suo comportamento differente in termini di assorbanza spettrale e di sensibilità spettrale relativa e il modello di Berlino non può di certo descrivere con un'unica curva il comportamento di ogni singolo pigmento; preso invece un insieme di pigmenti con una simile sensibilità, si può affermare con una buona approssimazione che il modello di Berlino ne descriva un andamento generale in termini di risposta spettrale relativa.

3.1.3.4 –Variazioni di colore

Le variazioni di colore sono sicuramente il parametro più semplice ed immediato per poter valutare il danno da fotodegrado che un oggetto può subire se esposto a radiazioni luminose.

In seguito ad alcuni studi in laboratorio su diversi campioni di coloranti, si è osservato come la perdita di colore sia proporzionale alla concentrazione di particelle coloranti. Questo è dimostrato nel modello di Johnston-Feller (1968) in cui si afferma che

$$\ln C_t = \ln C_0 + k_1 t$$

dove

C_0 è la concentrazione iniziale di colorante

C_t è la concentrazione di colorante dopo il tempo t

k_1 è una costante

Si può facilmente intuire, dall'andamento del logaritmo naturale, come il processo evolva rapidamente all'inizio per poi rallentare progressivamente e tendere ad un valore massimo (raggiungibile solo all'infinito).

Un materiale è dunque, in linea generale, più reattivo e sensibile all'effetto fotochimico durante i primi tempi della sua vita per poi tendere pressoché a stabilizzarsi; vi sono però molti altri parametri in gioco oltre all'azione fotochimica che possono portare ad un continuo degrado del materiale nel tempo.

La *Figura 3.6*, unitamente alla *Tabella 3.3*, mostra la relazione tra la lunghezza d'onda e il danno potenziale relativo di due sorgenti ad ampio spettro visibile (privi di UV). In particolare, vengono mostrate le relazioni che intercorrono tra la temperatura colore di una sorgente planckiana e il danno potenziale relativo nel range 2500-7500 K, e di tre distribuzioni spettrali di luce solare a diverse temperature di colore.

Il potenziale di danno è relativo all'illuminante CIE standard A (2586 K), lampadina a incandescenza standard, e le relazioni utilizzate sono quelle descritte nel modello di Berlino.

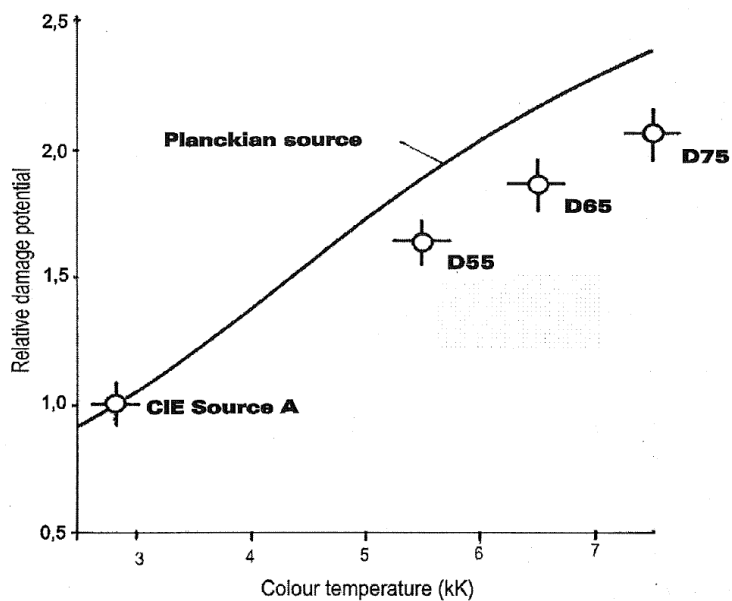


Figura 3.5 – Potenziale di danno relativo e temperatura di colore per una sorgente planckiana e per tre sorgenti D, in accordo con la relazione della curva di sensibilità spettrale, normalizzate all'illuminante CIE standard A (2586 K).

TEMPERATURA DI COLORE DI UNA SORGENTE PLANCKIANA (K)	POTENZIALE DI DANNO RELATIVO	SORGENTE DAYLIGHT	POTENZIALE DI DANNO RELATIVO
2500	0.92	D55	1.63
3000	1.04	D65	1.87
3500	1.20	D75	2.07
4000	1.37		
4500	1.54		
5000	1.71		
5500	1.87		
6000	2.01		
6500	2.15		
7000	2.28		
7500	2.40		

Tabella 3.3 – Potenziale di danno relativo per una sorgente planckiana a diverse temperature di colore e per 3 sorgenti D.

3.1.4 – RACCOMANDAZIONI PER L'ILLUMINAZIONE MUSEALE

Dopo l'ampia trattazione scientifica, il Technical Report CIE 157 riporta una serie di indicazioni per la prevenzione dei danni all'interno degli spazi museali.

Innanzitutto si definiscono quattro categorie di classificazione dei materiali in accordo con la loro fotosensibilità (*Tabella 3.4, così come riportata nella specifica tecnica*) e viene mostrata la relazione con la classificazione dei pigmenti definita dalla scala Blue Wool.

Si suggeriscono successivamente i metodi per la prevenzione del danno e per il controllo degli effetti negativi dello stesso. Si consiglia di minimizzare la durata dell'esposizione delle opere, l'irradianza e si consiglia di proteggerle da flussi di radiazioni non visibili come UV e IR.

In particolare si chiede di verificare che la distribuzione spettrale di potenza di ogni sorgente abbia un valore inferiore ai 10 mW/lm per onde di lunghezza inferiore ai 400 nm.

Infine, allo scopo di prevenire quanto più possibile l'insorgere di danni, vengono suggeriti i livelli massimi di esposizione in termini di illuminamento superficiale massimo e di ore annuali di esposizione (*Tabella 3.5*) per ogni categoria di materiale.

Category	Description
1. Irresponsive	The object is composed entirely of materials that are permanent , in that they have no light responsivity. Examples: most metals, stone, most glass, genuine ceramic, enamel, most minerals.
2. Low responsivity	The object includes durable materials that are slightly light responsive . Examples: oil and tempera painting, fresco, undyed leather and wood, horn, bone, ivory, lacquer, some plastics.
3. Medium responsivity	The object includes fugitive materials that are moderately light responsive . Examples: costumes, watercolours, pastels, tapestries, prints and drawings, manuscripts, miniatures, paintings in distemper media, wallpaper, gouache, dyed leather and most natural history objects, including botanical specimens, fur and feathers.
4. High responsivity	The object includes highly light responsive materials. Examples: silk, colorants known to be highly fugitive, newspaper.

Tabella 3.4 – Le 4 categorie di fotosensibilità così come riportate nella CIE 157:2004.

Categoria di fotosensibilità	Corrispondenza classificazione scala Blue Wool (ISO)	Limiti di illuminamento (lux)	Limiti di esposizione (lux h/y)
insensibile	-	nessun limite	nessun limite
bassa sensibilità	7, 8	200	600000
media sensibilità	4, 5, 6	50	150000
alta sensibilità	1, 2, 3	50	15000

Tabella 3.5 – Limiti espositivi e corrispondenza classificazione ISO con le 4 categoria di sensibilità.

3.2 – SPECIFICA TECNICA UNI CEN/TS 16163

La specifica tecnica CEN/TS 16163:2014 “*Conservation of Cultural Heritage – Guidelines and procedures for choosing appropriate lighting for indoor exhibitions*”, elaborato nell’ambito del CEN (Comitato Europeo di Normazione) – pubblicato nel 2014 e recepito nello stesso anno dall’UNI (Ente Italiano di Normazione) che ne ha pubblicato la versione italiana – è un documento inteso a fornire indicazioni e criteri per predisporre una corretta illuminazione di ambienti espositivi e museali interni; tuttavia è classificato come specificazione tecnica e quindi – pur rappresentando una valida guida tecnica – non ha lo status di standard normativo.

Tale specifica definisce le procedure e i mezzi per produrre un illuminazione adatta ai fini conservativi. Tiene conto degli aspetti estetici, espositivi e conservativi e discute le implicazioni della progettazione dell’illuminazione ai fini di salvaguardare i beni culturali.

Inoltre, vengono riportate le raccomandazioni sui livelli di illuminamento minimo e massimo accettabili, come già indicati nella CIE 157:2004.

La finalità è di fornire gli elementi necessari per costruire una politica europea comune e una guida per assistere i curatori, i conservatori e i responsabili di progetto nel realizzare illuminazioni compatibili con la conservazione degli oggetti esposti.

Tale specifica tecnica concerne l’illuminazione di oggetti in esposizioni pubbliche o private in ambienti interni, ma non prende in considerazione l’illuminazione in altri contesti culturali come le esposizioni all’aperto.

Capitolo 4

La Cappella Sistina e La Monna Lisa, analisi di due casi studio

In questo capitolo vengono analizzati e studiati gli aspetti tecnici di alcuni recenti interventi di illuminazione artificiale a LED in luoghi d'arte di eccezionale importanza.

In particolare, a motivo della loro originalità e rilevanza tecnica, verranno trattati due esempi di illuminazione utilizzati, rispettivamente, per la Cappella Sistina e per il dipinto della Monna Lisa.

Nel primo caso si tratta di una recente illuminazione volta a valorizzare gli affreschi che risaltano l'architettura interna della Cappella Sistina, un luogo ricco di arte e di storia, in sostituzione del vecchio impianto realizzato negli anni '80 del secolo scorso.

Nel secondo caso l'illuminazione de La Monna Lisa di Leonardo da Vinci, esposta al museo del Louvre di Parigi, rappresenta un esempio di opera di modeste dimensioni che presenta caratteristiche specifiche ed esigenze totalmente differenti rispetto al caso precedente. Qui si tratta di un intervento di sostituzione per il miglioramento delle performance di una sorgente già costituita da LED di potenza, realizzata e installata con la tecnologia di più di 10 anni fa.

Entrambi i capolavori sono stati oggetto di recenti studi che si proponevano di progettare il miglior sistema di illuminazione a LED al fine di rendere le opere pienamente fruibili al pubblico.

Le evidenti differenze tra le due opere in questione non riguardano solamente le dimensioni e la struttura delle stesse, ma anche la tecnica di realizzazione e la posizione

rispetto allo spettatore. Le pareti e la volta della Cappella Sistina, infatti, presentano affreschi molto ampi costituiti da grandi campiture uniformi di colore e da tonalità accese che identificano chiaramente le figure.

Il delicato olio su tela della Monna Lisa, invece, si concentra su tonalità più calde e cupe tramite le quali il personaggio in primo piano quasi si fonde con la natura dello sfondo.

Anche le esigenze di conservazione delle due opere sono differenti, dal momento che variano gli effetti di deterioramento dovuti al tempo, alle condizioni climatiche e all'illuminazione stessa.

4.1 - LA CAPPELLA SISTINA



« Senza aver visto la Cappella Sistina non è possibile formare un'idea apprezzabile di cosa un uomo solo sia in grado di ottenere. »

Johann Wolfgang von Goethe

Figura 4.1 – Interno della Cappella Sistina.

4.1.1 - DESCRIZIONE DELL'OPERA

La Cappella Sistina, inserita nel percorso dei Musei Vaticani siti accanto alla Basilica di San Pietro in Città del Vaticano, fu costruita tra il 1475 e il 1481, all'epoca di papa Sisto IV della Rovere, pontefice dal 1471 al 1484, che fece ristrutturare l'antica Cappella Magna. Proprio al papa che ne volle l'edificazione si deve il nome di Cappella Sistina.

La pianta basilicale misura 40,93 m di lunghezza per 13,41 m di larghezza, rispettando così le dimensioni del Tempio di Salomone riportate nell'Antico Testamento.

Ha un'altezza di 20,70 m ed è coperta da una volta a botte ribassata, collegata alle pareti da vele e pennacchi, che generano lunette in corrispondenza dei muri laterali. Sotto ciascuna lunetta si aprono le strette finestre ad arco che danno luce all'ambiente: sono sei su ciascuna parete laterale a cui si aggiungevano altre due aperture sul lato ovest, in seguito tamponate con la creazione del *Giudizio Universale*.

Nota per i celebri affreschi di Michelangelo Buonarroti, la Cappella fu inizialmente decorata (1481-1482) da un'équipe di pittori costituita da Pietro Perugino, Sandro Botticelli, Domenico Ghirlandaio, Cosimo Rosselli, coadiuvati dalle rispettive botteghe e da alcuni più stretti collaboratori.

Nella primavera del 1504 la particolare natura del terreno su cui sorge la Cappella determinò un'inclinamento della parete meridionale che, in seguito ad assestamenti, lasciò una vasta e minacciosa crepa sul soffitto. Fu così che Giulio II della Rovere (pontefice dal 1503 al 1513), nipote di Sisto IV, decise di restaurare la volta con catene, sia sopra la volta principale sia negli ambienti inferiori, rendendola di nuovo agibile. La decorazione della volta di Piermatteo d'Amelia risultò danneggiata irreparabilmente e, nel 1508, il pontefice affidò l'incarico di modificare la decorazione a Michelangelo, cui si devono gli affreschi della volta e delle lunette, sulla parte alta delle pareti. Vent'anni più tardi papa Clemente VII commissionò ancora a Michelangelo l'enorme affresco del *Giudizio Universale* nella parete di fondo della Cappella Sistina, che già era in parte dipinta.

Il programma generale della decorazione pittorica della cappella è articolato su tre registri dal basso verso l'alto: lo zoccolo con finti arazzi, il secondo ordine con scene del Vecchio e del Nuovo Testamento e infine l'ordine più alto con la rappresentazione di pontefici martirizzati.

La decorazione pittorica, un'impresa colossale di circa cinquecento metri quadrati di affreschi popolati da oltre 300 figure per raccontare la creazione del mondo e del genere umano, venne concepita in stretto rapporto con le proporzioni architettoniche della cappella, assecondando la struttura delle pareti. Le partizioni si basano, infatti, sulla scansione delle finestre, che genera lo spazio per sei riquadri sotto ciascuna finestra delle pareti laterali e per due in quelle frontale e posteriore. La volta fu invece organizzata da Michelangelo in grandi archi e cornici, ricavando così riquadri, vele e lunette.

4.1.2 – IL VECCHIO IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

Negli ultimi vent'anni del secolo scorso e fino al 2014 l'illuminazione della Cappella Sistina era caratterizzata da un sistema che faceva largo uso di proiettori con sorgenti tradizionali di cospicua potenza (lampade alogene e a scarica), con conseguenti consumi molto elevati di energia elettrica. Esso era costituito da tre scenari che illuminavano, rispettivamente, la volta e il Giudizio Universale, gli affreschi dei quattrocentisti sulle pareti laterali e il piano di calpestio, per le cerimonie e i ricevimenti.

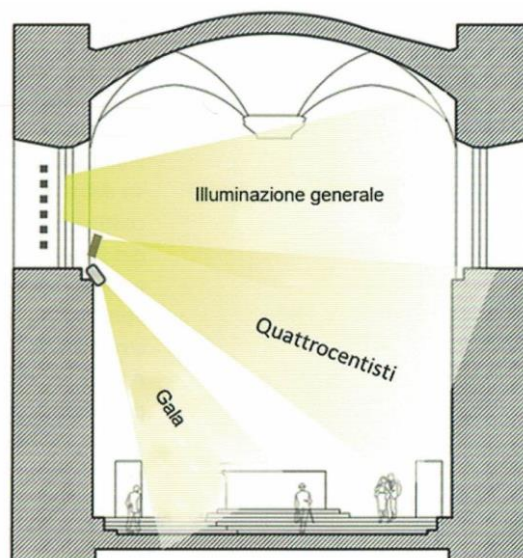


Figura 4.2– Distribuzione dei flussi della precedente illuminazione.

Nel dettaglio, la prima illuminazione avveniva mediante proiettori inseriti all'interno delle dodici finestre laterali che circondano la Cappella Sistina, costituiti da lampade a ioduri metallici OSRAM HQI con potenza di 1000W cadauno e con una emissione ad arco speciale di

3500K. Il posizionamento dei proiettori nel vano ricavato immediatamente all'esterno della finestra aveva l'obiettivo di far sembrare che la luce fosse naturale. Tale intuizione venne mantenuta anche nel successivo sistema di illuminazione. Inoltre, erano stati installati degli schermi diffondenti della misura delle finestre per enfatizzare maggiormente l'effetto della luce naturale.

Tale posizionamento, esterno al perimetro, era dettato anche dalla necessità di prevenire l'insorgere di fattori potenzialmente pericolosi a causa delle grandi dimensioni degli apparecchi e del carico termico da essi sviluppato.

In ogni caso, i proiettori installati all'interno generavano inevitabilmente una grossa quantità di calore che interferiva con il microclima della Cappella Sistina; questo comportava un dispendio energetico notevole, dovuto non solo ad una bassa efficienza delle lampade, che trasformavano in calore più del 75% della potenza assorbita, ma anche ai consumi dell'impianto di refrigerazione che doveva mantenere una temperatura costante che non fosse dannosa per le opere.

Gli affreschi quattrocenteschi erano illuminati da proiettori con lampada alogena da 1000W cadauna, che consentiva una buona resa cromatica ma disperdeva oltre l'85% del flusso radiante sotto forma di radiazioni infrarosse, oltre a creare forte abbagliamento, e dunque fattore di disturbo, perché in posizione visibile all'osservatore. Il miglioramento di tale aspetto fu oggetto di studio nella definizione della recente illuminazione.

Infine, il piano di calpestio era illuminato da proiettori a lampada alogena da 1000 W ciascuno, con emissioni spettrali di 2700K. Questi proiettori, rivolti verso il basso, causavano un effetto di abbagliamento sugli astanti e oscuravano le pitture più prossime, generando così danni estetici.

Inoltre, quando l'impianto di illuminazione di gala non era acceso, il flusso riflesso dalla parte superiore non garantiva un sufficiente illuminamento delle zone inferiori della Cappella, rendendo pertanto il sistema incompatibile con gli standard di sicurezza vigenti. Si passava infatti da un illuminamento di 5 lux, dovuto al solo riflesso dei proiettori utilizzati per la scena museale, ai 250 lux misurati sul piano di calpestio con l'accensione dei proiettori dedicati all'illuminazione di gala.

Infine l'indice di resa cromatica si attestava intorno ad un CRI 70.

4.1.3 – IL NUOVO IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE A LED

Al fine di risolvere i problemi descritti, e grazie ai progressi tecnologici nel campo dei LED di potenza, si decise di sostituire l'illuminazione esistente sfruttando le nuove tecnologie di illuminazione allo stato solido.

L'obiettivo era “un'illuminazione leggera e allo stesso tempo non invasiva, rispettosa della complessa realtà iconografica, stilistica, storica della Sistina, capace di restituire una lettura quieta, obiettiva e allo stesso tempo delicata, capace di raccontare in ogni dettaglio e di far comprendere tutto insieme quell'immane catechismo figurato che tre papi (Sisto IV, Giulio II e Paolo III) vollero dispiegare sulle pareti e sulla volta di quella che è da sempre e per tutti la *cappella del mondo*”¹¹.

Il nuovo impianto d'illuminazione per la Cappella Sistina venne completato nel 2014 dal consorzio europeo LED4Art, il cui partner tecnico principale è la multinazionale tedesca OSRAM.

L'obiettivo del nuovo sistema, secondo il direttore responsabile del progetto Carlo Maria Bogani, di OSRAM Italia, era di “fondere la luce con l'architettura in modo da donare ai visitatori la sensazione di ammirare le opere sotto la luce naturale, facendo credere che la luce si diffondesse unicamente attraverso le grandi finestre esistenti”. Questo ricalca già la precedente soluzione del posizionamento dei proiettori dietro le finestre.

La luce artificiale si fonde con quella naturale, la percezione che si crea è quella di avere sempre luce naturale che penetra dalle finestre, come era sicuramente la condizione più plausibile al tempo della realizzazione della Cappella.

Oltre alle sei grandi finestre poste lungo le pareti nord e sud, ve ne erano altre due sulla parete ovest, in seguito tamponate per permettere a Michelangelo di dipingere la parete dell'altare con il *Giudizio Universale*. Lo stesso Michelangelo rispettò il flusso della luce stabilito già dai pittori di fine Quattrocento, che nei loro affreschi raffiguravano le ombre in corrispondenza dei corpi illuminati dalla luce naturale.

¹¹ Antonio Paolucci, direttore dei Musei Vaticani, in occasione del convegno di presentazione dei nuovi impianti di illuminazione e condizionamento, Città del Vaticano, ottobre 2014.

Come prima cosa furono definiti i seguenti imprescindibili requisiti di progetto:

- conseguire un'illuminazione uniforme e diffusa di tutta la Cappella, evitando illuminazioni specifiche di alcune parti rispetto ad altre;
- ridurre al minimo le radiazioni infrarosse e le emissioni di raggi UV;
- migliorare l'indice di resa cromatica, portandolo da un CRI 70 a un $\text{CRI} \geq 95$;
- mantenere la temperatura colore intorno ai 3300 K;
- garantire un alto valore di uniformità ai livelli di illuminamento;
- prevedere due scenari di luce, uno di tipo museale, l'altro di gala;
- incrementare i livelli di illuminamento sul pavimento;
- riservare molta attenzione al risparmio energetico e alla vita media degli apparecchi.

Un ulteriore aspetto richiesto dal sistema di illuminazione era che nascondesse il più possibile i corpi illuminanti al fine di restituire armonia ed unità all'intera architettura della Cappella Sistina.

Lo studio geometrico sugli angoli di visibilità degli apparecchi posizionati sulla cornice marcapiano è stato un punto di partenza fondamentale per definire in seguito dimensioni ed esatte posizioni degli apparecchi.

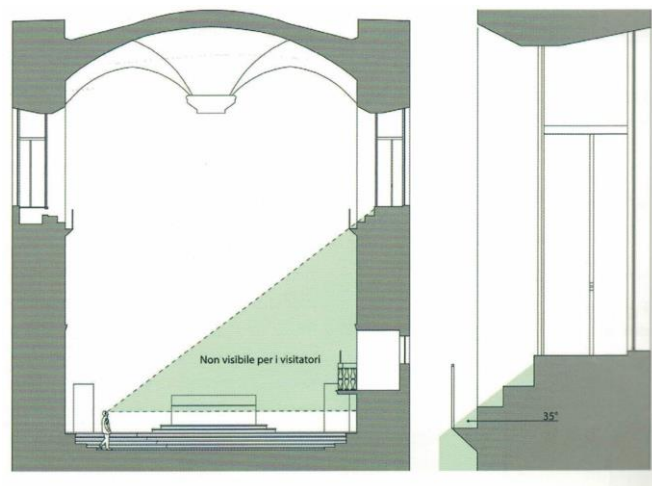


Figura 4.3 - Studio di visibilità: sezione trasversale e cornice marcapiano.

Tutti gli apparecchi sono installati all'interno della Cappella Sistina, lungo la cornice marcapiano ad una altezza di circa 10m da terra e sono completamente¹² invisibili agli

¹² Come si vedrà in seguito, i proiettori per l'illuminazione del piano di calpestio sono normalmente ripiegati su se stessi in posizione di riposo; quando viene richiesta l'illuminazione per lo scenario di gala, tramite un servomeccanismo, essi si portano in posizione operativa, sporgendo verso il basso.

osservatori. Questo comporta non solo una completa visione architettonica d'insieme, ma evita anche fastidiosi fenomeni d'abbagliamento.

A differenza del precedente che ne prevedeva tre, il nuovo sistema d'illuminazione prevede solamente due scenari, che riguardano una *scena museale* e una *scena di gala*.

Entrambi gli scenari sono controllabili da un pannello manuale esistente che si interfaccia al nuovo sistema tramite una centralina A/D che controlla gli apparecchi tramite protocollo DMX; inoltre l'interfaccia A/D è collegata all'intero sistema di gestione dei Musei Vaticani su rete dati, tramite una nuova interfaccia sviluppata in collaborazione tra OSRAM e SIEMENS.

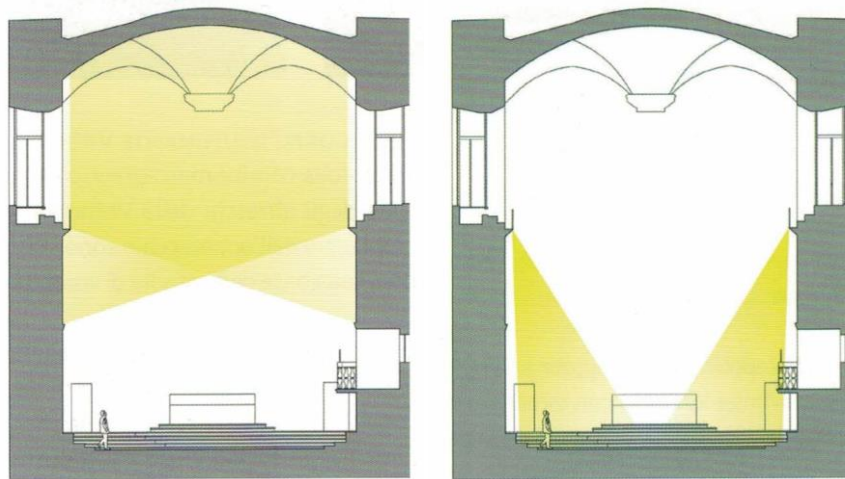


Figura 4.4 – Distribuzione dei flussi dei nuovi apparecchi; a sinistra per la *scena museale*, a destra per la *scena di gala*.

La *scena museale* illumina l'intero ciclo pittorico delle pareti, la volta e la grande parete dell'altare con il *Giudizio Universale*. Per l'illuminazione contemporanea della volta e degli affreschi dei Quattrocentisti è stato progettato un proiettore ad hoc, denominato in seguito V400 (*Figura 4.5*).



Figura 4.5 – Apparecchio V400.

Tali apparecchi, disposti lungo la cornice marcapiano parallelamente alle pareti (Figure 4.6 e 4.8), sfruttano un sistema di illuminazione diretta e un sistema di luce riflessa partendo da un'unica sorgente LED (Figura 4.7).

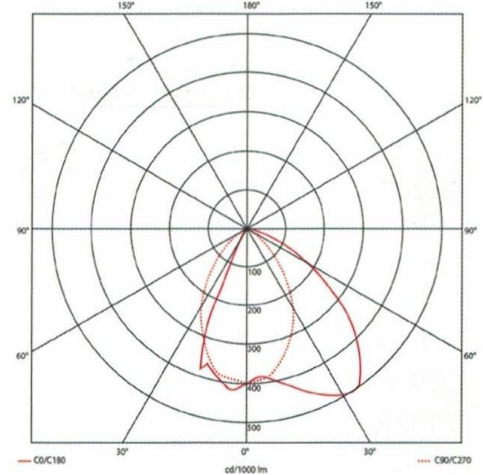


Figura 4.6 – Montaggio del proiettore V400 lungo la cornice marcapiano; a destra, la curva fotometrica dell'apparecchio.



Figura 4.7 – Caratteristiche del proiettore V400.

Osservando la curva fotometrica si può notare come esso abbia una distribuzione trasversale appositamente studiata per raggiungere sia i dipinti dei Quattrocentisti che la volta, mentre lungo l'asse longitudinale la distribuzione è quanto più uniforme possibile per evitare fenomeni involontari di puntamento. Il profilo di tali apparecchi è ottimizzato tenendo presente la curvatura della volta in modo tale da ottimizzare l'angolo di incidenza del flusso uscente.

Ognuno di questi apparecchi è composto da due piastre LED sulla parte superiore e una su quella inferiore. Alla parte superiore spetta il compito di illuminare il ciclo pittorico dei Quattrocentisti e il *Giudizio Universale*, mentre a quella inferiore, insieme ad un sistema riflettente della sorgente superiore, è affidato il compito di illuminare la volta. Infatti, grazie alla superficie riflettente in posizione speculare alle piastre LED superiori, si riesce a tagliare il flusso luminoso verso il basso evitando così l'effetto di abbagliamento, e si reindirizza il flusso verso la volta. Questo sistema, composto di luce riflessa e luce diretta dalla piastra inferiore verso la volta, garantisce ottimi livelli di illuminamento uniforme.

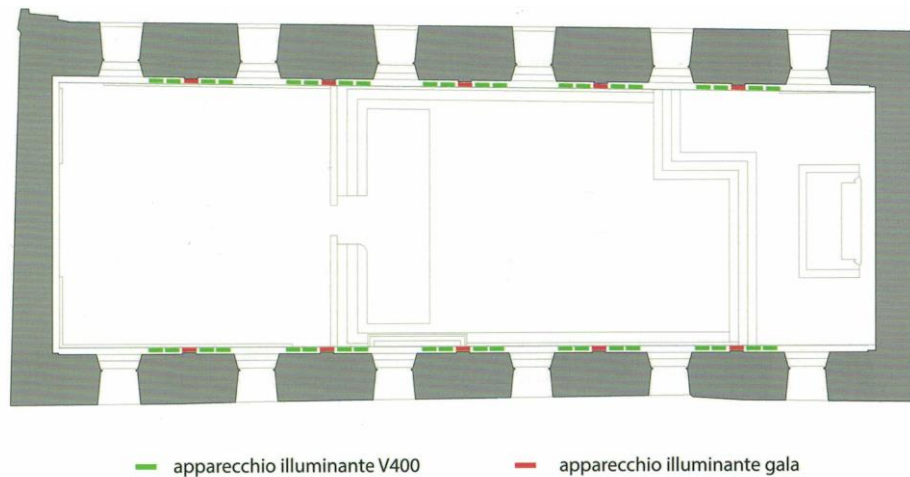


Figura 4.8 - Disposizione degli apparecchi illuminanti - pianta

In posizione analoga ed alternata rispetto agli apparecchi V400 (*Figura 4.8*) sono stati posizionati i proiettori per lo *scenario di Gala*. Essi si trovano normalmente in una posizione di riposo, ripiegati su loro stessi. Ogni qual volta viene richiamata la Scena Gala, essi effettuano, grazie a piccoli servomotori, una rotazione di quasi 180° e il corpo ottico viene orientato verso il piano di calpestio, sporgendo per una decina di centimetri dalla cornice marcapiano (*Figure 4.9 e 4.10*). Il corpo alimentazione rimane, invece, ancorato al livello orizzontale al di sopra della cornice.

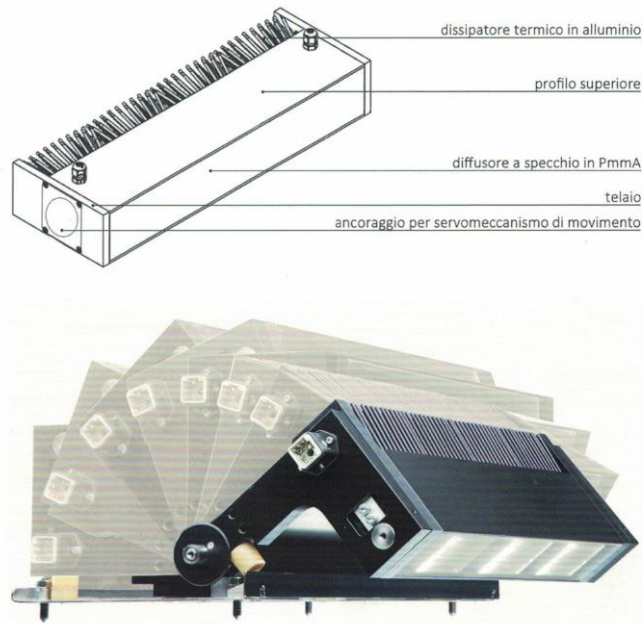


Figura 4.9 – Struttura e posizioni dell'apparecchio progettato per l'illuminazione del piano di calpestio.



Figura 4.10 – Montaggio del proiettore per l'illuminazione del piano di calpestio.

Questi apparecchi sono dotati di 3 piastre LED distinte in grado di erogare un flusso luminoso totale pari 18000 lm (a $T_a=25^{\circ}\text{C}$). Si tratta di piastre che impiegano LED di potenza a luce bianca modello *OSLON Square* di OSRAM con chip da 2 mm^2 .

Il fascio di luce è guidato da riflettori poliedrici lensless con superficie placcata argento (Ag 99,5%), questo permette di incrementare l'efficienza ottica del 11% rispetto a un trattamento superficiale standard.

	V400	GALA
DIMENSIONI (<i>lxpxh</i>)	830x220x90 mm	550x135x58 mm
PESO	8 kg	2.6 kg
POTENZA	130W	150 W
INDICE DI RESA CROMATICA CRI	90 100	80
FLUSSO LUMINOSO	5773 lm	15900 lm
INTERVALLO DI VARIABILITÀ DELLA CCT	3000 K – 3500 K	3000 K – 3500 K
LIFETIME	50000 h	50000 h
EFFICIENZA LUMINOSA	44 lm/W	106 lm/W
SISTEMA DI CONTROLLO	PWM	PWM
TECNOLOGIA	Power LED ad alta efficienza	Power LED ad alta efficienza

Tabella 4.1 – Specifiche tecniche dei due apparecchi

Entrambi gli apparecchi presentano un dissipatore in alluminio puro (AL1100, 99% di purezza) realizzato ad hoc, che consente di smaltire il calore generato dagli emettitori LED e ridurre così la temperatura di giunzione. Questo fattore è di fondamentale importanza per determinare la durata di vita utile del LED.

La giusta intuizione che sta alla base dell’ottima riuscita del nuovo sistema d’illuminazione è l’idea di sovrapporre ad uno spettro di LED bianco con CCT pari a 3200 K una selezione di spettri RGB in modo da ottimizzare, per addizione, i diversi parametri di colore.

Naturalmente sono stati esclusi fin dal principio LED con CCT troppo elevata (6000K) perché presentavano dominanti blu troppo evidenti e originavano componenti fredde troppo intense.

Il sistema definitivo prevede quindi di poter agire puntualmente su ogni singola dominante dei 3 LED monocromatici e sovrapporre così questo spettro a quello del LED bianco realizzato con tecnologia a fosfori.

In particolare, i tre LED monocromatici utilizzati sono:

- OSRAM OSOLON LB CPDP-GYZ – $\lambda_{\text{dom}}=476 \text{ nm}$, $T_s=25^\circ\text{C}$, $I_f=350\text{mA}$
- OSRAM OSOLON LV CK7P – $\lambda_{\text{dom}}=512 \text{ nm}$, $T_s=25^\circ\text{C}$, $I_f=350\text{mA}$
- OSRAM OSOLON LH CP7P – $\lambda_{\text{dom}}=660 \text{ nm}$, $T_s=25^\circ\text{C}$, $I_f=350\text{mA}$

Il LED bianco è il modello OSRAM OSOLON LCW CQ7P.EC-KSKU; la distribuzione spettrale di potenza dei singoli emettitori è riportata in *Figura 4.11*.

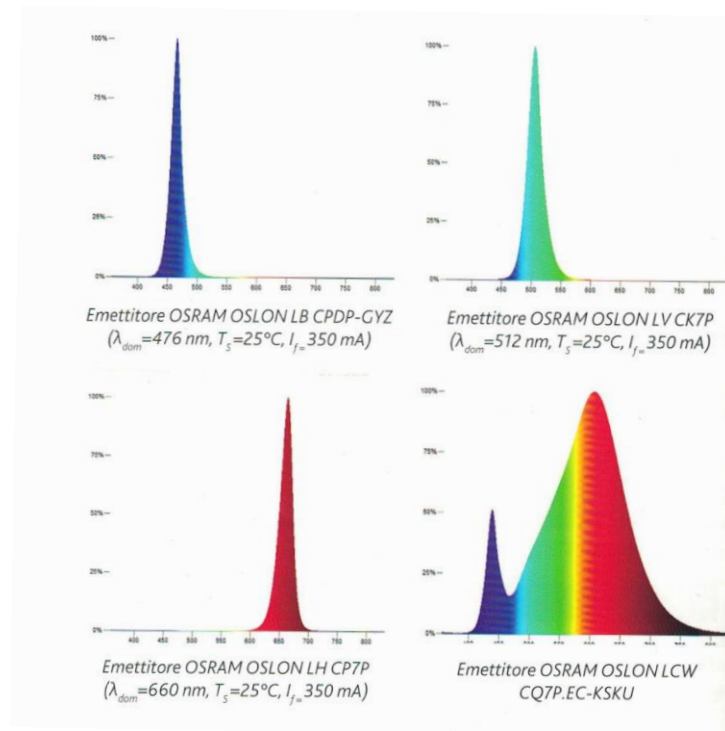


Figura 4.11 – Distribuzioni spettrali dei chip LED OSRAM componenti l'apparecchio V400.

Ma come determinare lo spettro migliore per gli affreschi della Cappella Sistina? Vi è un modo univoco di determinare la distribuzione spettrale? Come individuare se una soluzione è migliore o peggiore di un'altra?

La risposta a queste domande si fonda in questo caso su una scelta a priori: cercare di ricreare il più fedelmente possibile le condizioni ambientali che si immaginavano esserci al momento dell'esecuzione pittorica e collocarsi quindi in una situazione intermedia tra l'illuminazione naturale (circa 5400 K) e quella delle fiamme di torce e candele (circa 1200 K).

Secondo Bogani¹³, ipotizzando che si sia operato in queste condizioni, si dovrebbe riuscire a riprodurre le stesse condizioni luminose, in modo tale da avere buone probabilità di percepire i colori così come l'artista li ha immaginati e realizzati nell'esecuzione pittorica.

Attraverso l'utilizzo di uno spettroradiometro, che ha consentito di misurare l'energia radiante emessa dai singoli pigmenti in un definito intervallo di lunghezze d'onda, sono stati ottimizzati gli spettri dei LED sottoponendo a confronto 280 campioni dei principali pigmenti presenti negli affreschi di Michelangelo, rilevando differenze di colore in condizioni di luce naturale e luce artificiale. In tal modo si può assumere che uno spettro con elevata fedeltà di

¹³ Carlo Maria Bogani, responsabile del progetto per OSRAM.

riproduzione garantisce che il fascio luminoso che colpisce la superficie pittorica stimoli correttamente i pigmenti, riproducendo in maniera efficace e fedele tutti i colori.

Tutte le operazioni di impostazione e definizione dello spettro finale (*Figura 4.12*) sono avvenute in presenza della Commissione esaminatrice dei MCV.

Quest'ultima ha stabilito una temperatura di colore dello spettro finale di 3450 K e una luminanza di adattamento di 50 cd/m².

Infine, valutando che un'intensità eccessiva di luce potesse creare squilibri tra la volta (inclusa la fascia superiore delle pareti) rispetto al piano di calpestio, è stato scelto uno scenario di luce con un flusso corrispondente al 60% della potenza dell'impianto.

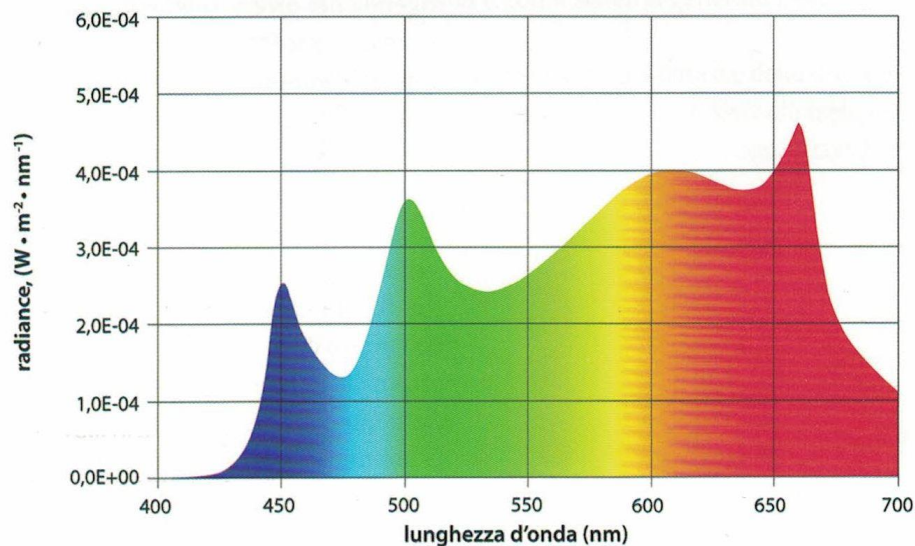


Figura 4.12 – Distribuzione spettrale definitiva risultante dalla combinazione degli spettri.

Un aspetto non secondario dell'intero progetto è il risparmio energetico che si ottiene grazie all'utilizzo di un sistema di illuminazione efficiente a LED.

La *Tabella 4.2* riporta i valori di illuminamento medio sulla superficie dipinta (o sul pavimento, nel caso dell'illuminazione per lo scenario di gala) e di potenza installata, a confronto con il vecchio impianto.

Come già sottolineato, dal momento che un'alta percentuale di potenza assorbita dal vecchio impianto di illuminazione era trasformata in calore (circa 85%), vi era anche la necessità di ridurre il carico termico verso l'ambiente e la potenza frigorifera necessaria a

mantenere le condizioni di microclima ideali e questo è stato reso possibile proprio grazie all'utilizzo della tecnologia LED.

Il nuovo impianto ha permesso di conseguire un doppio risparmio assicurando non solo la diminuzione di assorbimento di energia elettrica da parte degli apparecchi illuminanti ma anche la diminuzione della potenza frigorifera prodotta dall'impianto di climatizzazione.

Pertanto, si è riusciti a innalzare i livelli di illuminamento abbassando contestualmente l'assorbimento energetico; per la *scena museale* si è ottenuto un risparmio complessivo sui consumi del 75%, mentre per la *scena di gala* si è raggiunto il 92%.

			VECCHIO PROGETTO	NUOVO PROGETTO
	Ore di funzionamento giornaliera	h/d	14,4	14,4
	Giorni di funzionamento all'anno	d/y	310	310
	Ore di funzionamento all'anno	h/y	4464	4464
Museale	Livelli di illuminamento	lux	6	10
	Potenza installata	W	15640	3900
	Consumi annuali	kWh/y	69817	17410
Risparmio sui consumi				75%
Gala	Livelli di illuminamento	lux	250	300
	Potenza installata	W	66000	5600
	Consumi annuali	kWh/y	294624	24998
Risparmio sui consumi				92%

Tabella 4.2 - Valori a confronto misurati con la vecchia illuminazione e con la nuova interamente realizzata a LED.

Per quanto riguarda gli studi sugli effetti di danno dovuti all'illuminazione artificiale, sono stati eseguiti alcuni controlli per verificare i possibili effetti dannosi delle radiazioni LED attraverso delle prove sperimentali su 16 diversi pigmenti (*Tabella 4.3*). Questi ultimi, sia di tipo organico sia inorganico, sono stati applicati su altrettanti campioni con tecniche analoghe a quelle utilizzate per gli affreschi e i dipinti dei Quattrocentisti.

Due gruppi di provini sono stati esposti alla radiazione elettromagnetica di due differenti apparecchi a LED OSRAM all'interno di una camera climatica con parametri termo-igrometrici corrispondenti al set-point del sistema di condizionamento della Cappella Sistina.

Pigmenti inorganici	Pigmenti organici
Bianco San Giovanni	Lacca di Garanza
Biacca	Resinato di rame
Giallo di stagno e piombo	
Ocra gialla	
Ocra rossa	
Morellone	
Cinabro	
Minio	
Lapislazzuli	
Smaltino	
Azzurrite	
Terra verde	
Malachite	
Nero avorio	

Tabella 4.3 - I 16 pigmenti utilizzati per i campioni di prova.

La sperimentazione, che ha avuto una durata di 3000 ore per ogni gruppo di provini ed un livello di illuminamento costanti pari a 1500 lux (circa venti volte il livello previsto per l'utilizzo all'interno della Cappella Sistina), ha visto l'impiego di uno spettrofotometro VIS a riflettanza diffusa al fine di poter rilevare alcune variazioni di colore.

Le prove han dimostrato una sostanziale stabilità delle caratteristiche fisiche e cromatiche dei pigmenti, ad eccezione della Lacca di Garanza per la quale sono stati registrati valori elevati di ΔE (>13).

OSRAM ha quindi fornito un terzo proiettore, quello che poi è stato effettivamente installato, che è stato sottoposto alle medesime prove nel Laboratorio di Diagnostica dei MCV e sul quale sono state eseguite misure radiometriche e fotometriche per confrontarle con i dati specificati dal produttore.

Le misure radiometriche sono state eseguite in camera oscura, ponendo la sorgente e la sonda di irradianza a 1,5m da terra e a 3m di distanza l'una dall'altra e sono state effettuate tre prove per valutare eventuali variazioni di flusso luminoso: lampada in posizione frontale rispetto al piano della sonda, lampada inclinata di 45° verso destra e lampada inclinata di 45° verso sinistra, sempre rispetto al piano della sonda.

Osservati dunque gli spettri della terza sorgente si nota una distribuzione che si estende dai 420nm ai 780nm (quindi si ha una totale assenza di UV) con un picco intorno ai 660nm e una carenza nella zona delle lunghezze d'onda più corte.

Nei tre casi gli spettri rimangono praticamente identici, naturalmente nel primo caso si hanno livelli di intensità proporzionalmente più elevati perché misurati nella principale direzione di emissione, e questo indica una buona uniformità di illuminazione.

Per le prove riguardanti la valutazione di eventuali variazioni cromatiche dovute all'esposizione luminosa, è stato ripreso lo schema di lavoro delle prime due sorgenti e si sono sottoposti due provini di pigmenti organici molto sensibili alla luce come la Lacca di Garanza e di Lacca di Cocciniglia alla nuova sorgente per un periodo di invecchiamento accelerato di 340 ore con livelli di illuminamento di 1500 lux.

In conclusione si può affermare che i valori di ΔE rilevati per le lacche sono compresi fra 1.00 e 3.00 e questo significa una leggera variazione cromatica, in ogni caso tali valori sono da considerarsi come la soglia di stabilizzazione dei provini. La causa principale di variazione cromatica riguarda il naturale processo di essiccamento, durante il quale l'eliminazione completa dell'acqua implica un cambiamento del colore e non un'alterazione dovuta alle radiazioni assorbite durante la fase di invecchiamento.

Al fine di ottenere poi un'ulteriore conferma della totale assenza di contenuto di radiazioni UV, sono stati inseriti nel *case* di prova i tessuti certificati UNI, di colore blu e molto sensibili alle lunghezze d'onda corte, per verificarne l'eventuale alterazione dovuta all'esposizione alla radiazione emessa dal corpo illuminante: l'assenza di alterazioni del tessuto dei provini conferma la totale assenza di radiazioni ultraviolette emesse dal corpo illuminate OSRAM V400.

Tutte queste operazioni sono state eseguite all'interno di un *case*, appositamente progettato dal laboratorio stesso dei MCV, dotato di sensoristica digitale per garantire che non si verificassero variazioni cromatiche dei pigmenti causate da effetti termici, ma solo dalla interazione con la radiazione luminosa

4.2 - LA MONNA LISA



Leonardo Da Vinci
Ritratto di Lisa Gherardini
1503-1506
Olio su tavola, 77x53cm
Museo del Louvre, Parigi

4.2.1 - DESCRIZIONE DELL'OPERA

La Monna Lisa, nota anche come La Gioconda, è il ritratto più famoso del mondo: una donna a mezzo busto, con un sorriso enigmatico, circondata da un paesaggio nebbioso e immaginario. I capelli, coperti da un impalpabile velo, si confondono con i fiumi e le montagne retrostanti, il volto pare emergere da uno sfondo dove tutto risulta sfumato. Il mistero che circonda l'identità della donna raffigurata, forse Lisa Gherardini, moglie del banchiere fiorentino Francesco del Giocondo, contribuì ad aumentare, nei secoli, la fama di questo celebre ritratto.

Si tratta di un olio su tavola di legno di pioppo, di dimensioni piuttosto contenute, 77x53 cm, dipinto da Leonardo da Vinci tra il 1503 e il 1506 e conservato a Parigi al Museo del Louvre.

Attraverso la tecnica dello sfumato, in particolare per i lati della bocca e gli angoli degli occhi della donna, il pittore cerca di rendere l'impalpabile variare delle fonti luminose, lasciando alle forme un margine di indeterminatezza.

4.2.2 – LA PRIMA ILLUMINAZIONE A LED DELLA GIOCONDA

La corretta illuminazione delle opere, specialmente in museo dell'importanza del Louvre, è da sempre considerato un fattore imprescindibile per la valorizzazione degli oggetti. Ciascun dipinto ha il diritto di essere osservato sotto la luce migliore per poter apprezzare la tecnica pittorica dell'artista o per ammirare la squisitezza delle sfumature di colore.

Tuttavia la luce deve sottostare a molteplici limiti. Il tempo, per esempio, potrebbe avere deformato la struttura o alterato la pigmentazione o danneggiato la tinta originale dell'opera. Il vetro, presente a protezione di diverse opere, altera la percezione originale dei colori e può disturbare la visibilità riflettendo particolari dell'ambiente circostante.

Tutti questi limiti sono presenti in forma più o meno accentuata nella Monna Lisa.

Durante gli ultimi cinquecento anni il pannello in legno ha modificato la sua forma accentuandone la convessità. Come risultato della deformazione si può notare come una fitta ragnatela abbia danneggiato la paziente opera di Leonardo da Vinci. I differenti strati di pittura che formano il ritratto sono ossidati, anneriti e ingialliti nelle tinte. Da ultimo, lo spesso vetro protettivo frontale tende a far virare il colore e il sistema di illuminazione deve tenerne conto.

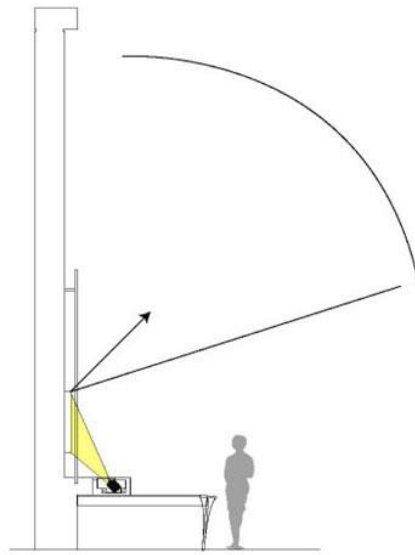


Figura 4.13 – Studio grafico per il posizionamento ottimale della sorgente al fine di evitare riflessioni fastidiose per il pubblico.

Il Museo del Louvre ha quindi richiesto una tecnica d'illuminazione che consentisse di attenuare questi difetti riportando il capolavoro il più vicino possibile al suo originale splendore.

Il famoso dipinto presentava delle esigenze specifiche in quanto è posto da solo su una grande parete e, per motivi di sicurezza, è protetto da uno spesso vetro frontale. Pertanto, al progetto di illuminazione era richiesto un sistema che permettesse la modifica della temperatura di colore per compensare le distorsioni cromatiche introdotte dal vetro protettivo.

La soluzione più appropriata consistette nell'utilizzo di una lampada con 7 sorgenti LED a colorazione multipla, sviluppata nel 2005 da ARKANZ-SKLAER GmbH, in collaborazione con FRAEN Corporation e DEF srl (*Figura 4.14*)



Figura 4.14 – Lampada a 7 chip LED realizzata per il primo progetto del 2005.

Si trattava di una lampada molto compatta, dati gli stretti spazi a disposizione, che, grazie ai differenti chip LED aventi bande di emissione molto strette e centrate su diverse lunghezze d'onda, permetteva di gestire le correzioni cromatiche necessarie per compensare sia la luce esterna che le deviazioni introdotte dal vetro frontale.

Presentava un color mixing a fibra ottica e un sistema di raffreddamento ad aria forzata; ognuno dei canali era pilotato indipendentemente a corrente costante.

Tale apparecchio ha funzionato costantemente per 70000 ore.

Come nel caso della Cappella Sistina si voleva evitare che l'apparecchio fosse visibile al pubblico e fu costruito un mobile ad hoc posto di fronte al quadro in cui il flusso luminoso della sorgente potesse colpire dal basso verso l'alto l'opera. Questa soluzione permette già intrinsecamente di evitare effetti di abbagliamento fastidiosi per l'osservatore.

4.2.3 – LA NUOVA ILLUMINAZIONE A LED DELLA GIOCONDA

In seguito, dalla volontà di apportare miglioramenti all'esistente sistema di illuminazione, introducendo specifiche più stringenti del primo progetto del 2005, si pensò di sostituire la lampada a 7 led con una più performante.

In particolare, si è cercato di migliorare l'efficienza luminosa della sorgente e la relativa distribuzione spaziale, di migliorare la precisione ottica per aumentare i livelli di uniformità sul dipinto e la gestione del colore tramite software con conseguente semplice adattamento a diverse esigenze museali.

Il 4 giugno 2013 è stato inaugurato il nuovo progetto di illuminazione del dipinto della Monna Lisa, a cura di Toshiba Lighting per il Museo del Louvre.

La nuova lampada Toshiba (*Figura 4.15*) consta di 34 sorgenti LED di 6 differenti colori che vengono mescolate insieme grazie alla combinazione di un sofisticato sistema di fibre ottiche e un'ottica a fascio parallelo, chiamato *scheib*. Il principio è molto simile al precedente sistema che mescolava i 7 colori, ma presenta un diaframma più evoluto.

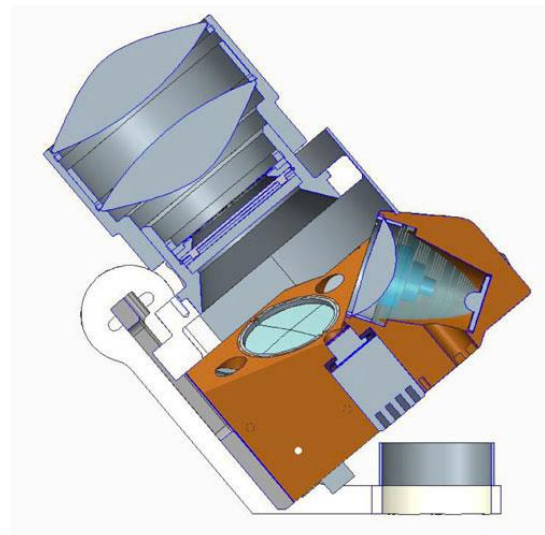


Figura 4.15 – Lampada realizzata per il nuovo progetto del 2013.
A sinistra una foto, a destra la rappresentazione schematica in sezione.

I 34 LED sono così suddivisi: 7 sorgenti *single-chip* e 3 sorgenti *multi-chips*, ciascuna delle quali composta da 9 chip.

Il mixing del colore avviene secondo 3 stadi principali in soli 120mm grazie a 3 componenti fondamentali oggetto di brevetto: ottica FRAEN – FCM-M1+FCX, ottica *scheib*, filtro a diffusione spaziale FRAEN SF.

Il primo sistema ottico FRAEN permette di focalizzare il fascio proveniente dai 34 LED su un disco che funge da spot ad alta omogeneità, le cui dimensioni sono calcolate in funzione delle misure del dipinto.

Successivamente, si trova il sistema di color mixing *scheib*: un fascio di fibre ottiche di 4mm di spessore che ha un'apertura numerica di 0,5, grazie alla quale il cono risultante dalla combinazione dei 34 led mostra un angolo di divergenza molto ampio, pari a ± 32 gradi. In tal modo il color mixing garantisce un'uniformità sulla superficie del dipinto prossima al 95%.

Ancora a valle si trova un sagomatore trapezoidale che lavora come diaframma di cut-off nel piano focale del sistema ottico. Questo consente la proiezione di uno spot rettangolare su un piano non ortogonale all'asse ottico dell'apparecchio (*Figura 4.16*).

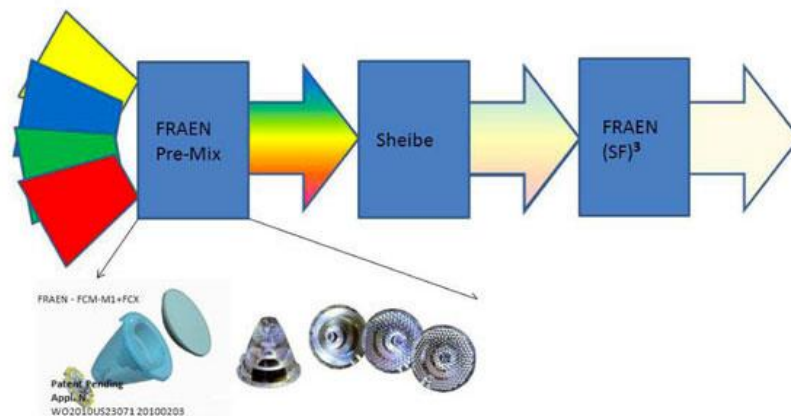


Figura 4.16 – Sequenza di filtri e ottiche della nuova sorgente.

Rispetto al primo progetto del 2005 in cui vi era un'unica lente asferica con apertura numerica di 0,8, nella nuova soluzione vi sono due lenti asferiche con apertura di 0,7. Questa variazione è risultata necessaria al fine di eliminare le distorsioni nella parte superiore della proiezione asimmetrica del fascio. Lo spot risultante è un rettangolo perfettamente definito e coincidente con il piano del dipinto.

Dato che l'asse ottico della lampada forma un angolo di 60° con la normale al piano del dipinto, vi era il concreto rischio che vi fosse una differenza significativa tra l'illuminamento

della parte inferiore rispetto a quella superiore. Per evitare tale problema è stato progettato un filtro speciale (SF)3 per bilanciare con precisione la distribuzione della luce (Figura 4.17).

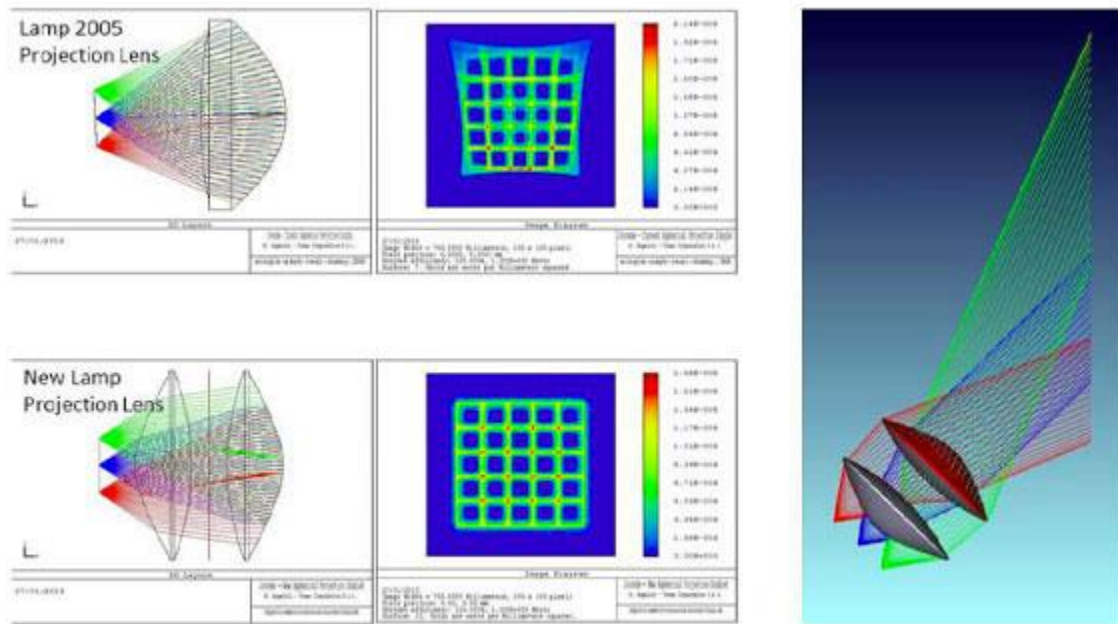


Figura 4.17 – Sistema a doppia lente asimmetrica che elimina le distorsioni (2013) a confronto con il precedente (2005).

La distribuzione spettrale, attentamente selezionata dopo numerose prove sul campo, è stata scelta per garantire sempre un indice di resa cromatica superiore a 95 in ogni possibile condizione di temperatura di colore scelta dal curatore (Figura 4.18).

Infine, la dissipazione di calore è affidata ad un massiccio radiatore in rame raffreddato da un sistema di ventilazione forzata per garantire parametri termici costanti e non apportare apprezzabili variazioni nello spettro (*color shifting*) durante la vita utile della lampada.

Il controllo della nuova lampada è gestito tramite protocollo DALI attraverso il controller CP64-LX-C, sviluppato dall'azienda francese AELSYS, con le funzioni di fornire i corretti set-point ai driver LED e memorizzare i differenti scenari.

Il software di configurazione, in aggiunta al modulo colorimetrico WINCIP, permette di controllare i sette differenti livelli di corrente dei canali dei driver che sono a loro volta determinati dalla composizione dei seguenti parametri: temperatura di colore risultante, intensità luminosa, distanza dal luogo planckiano nello spazio dei colori CIE 1931.

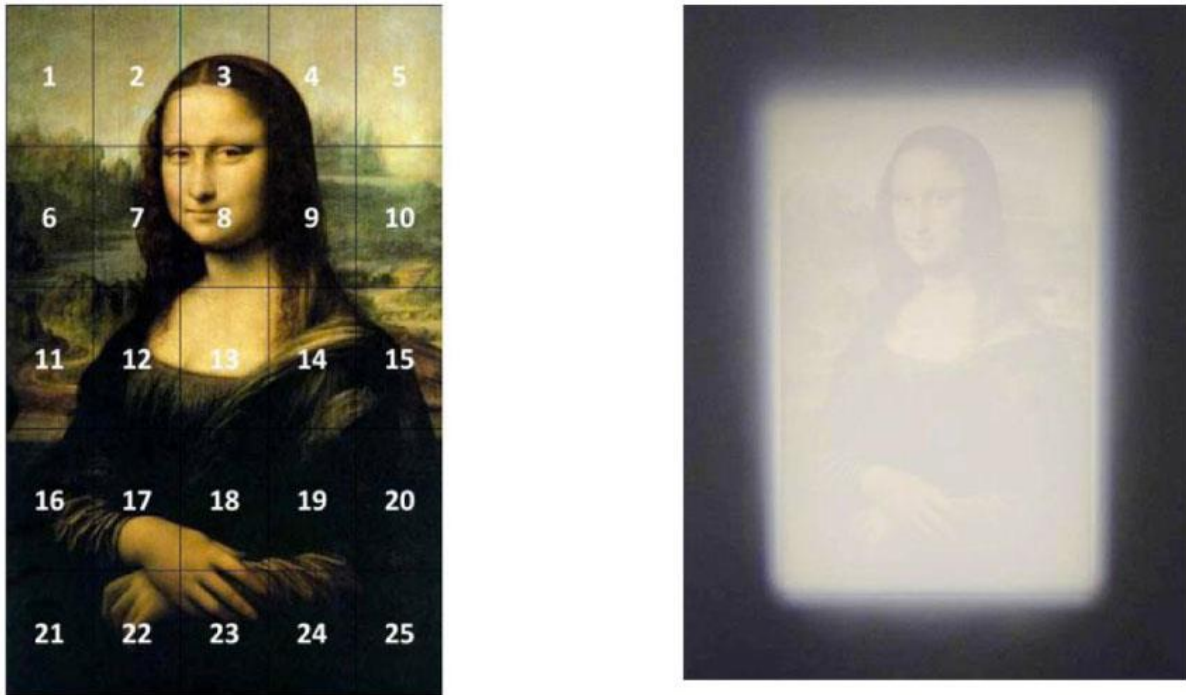


Figura 4.18 – La distribuzione luminosa mostra un indice di uniformità pari a 0,85 con il contributo della sola lampada; sale a 0,92 considerando anche la luce ambiente.

Per la caratterizzazione cromatica delle sorgenti della nuova lampada sono stati progettati ed utilizzati nuovi strumenti colorimetrici software. Questi consentono di controllare liberamente le coordinate cromatiche della luce emessa lavorando sullo spazio colore CIE ($U^*V^*W^*$) da cui si può ricavare in ogni istante l'indice di resa cromatica CRI e di conseguenza poter trovare il suo massimo valore.

Dopo che la Conservatoria del Museo del Louvre, al termine di una sessione di fronte al dipinto originale, ha deciso il set-up finale sulla base di un protocollo di valutazione di comune accordo, la decisione finale è stata presa dal Curatore, con l'assistenza dell'architetto progettista della sala della Gioconda, dopo un'attenta valutazione con differenti condizioni di luce esterna (sorgenti fluorescenti con una piccola porzione di luce naturale).

In *Tabella 4.4* sono infine riportati tutti i dati tecnici del nuovo apparecchio.

PARAMETRO	SPECIFICA RICHIESTA	LAMPADA TOSHIBA 2013
CCT con CRI elevato	2700 – 3800 K	Valore scelto: 3200K Regolabile da 2700 K a 3800 K
Flusso luminoso	//	Valore scelto: 88 lm Potenziabile fino a 400 lm
CRI	>90	CRI compreso fra 95 e 98
Color Quality Scale (CQS)	>85	>95
Radiazioni UV	<5 μ W/lm	<3 μ W/lm
Radiazioni IR	<0,1 W	<0,1 W
Uniformità sul dipinto (E_{min}/E_{avg})	>0.6	0,85 (con 16 punti di misurazione) >0,92 in presenza della componente di luce ambientale
Uniformità verticale sul dipinto	>0.9	0,93 ($E_{metà superiore}/E_{medio}$)
Illuminamento medio	100-250 lux (sorgente) + ambiente	180 lux sul vetro (solo sorgente) 108 lux sul dipinto (solo sorgente)
Flusso luminoso proiettato all'esterno della cornice	<1%	<0,5%
Vita utile della sorgente	>50000 ore	≈ 80000 ore

Tabella 4.4 – Specifiche tecniche della nuova sorgente Toshiba del 2013.

Capitolo 5

Criticità nell'impiego dei LED

5.1 – I GIRASOLI DI VAN GOGH: UN CASO STUDIO DI SEGNO CONTRARIO?

Nonostante l'ampia risonanza mediatica ottenuta dalle recenti installazioni esaminate come casi studio nel capitolo precedente, e nonostante l'evidente e innegabile miglioramento che la tecnologia LED ha portato sotto il profilo della migliore fruibilità dell'opera, il consenso sulla bontà di tale tipologia di illuminazione applicata al mondo dell'arte non è sempre stato unanime né lo è tuttora.

In particolare, nel 2012 venne pubblicato un articolo sul sito di *ESRF - A light for science*, intitolato “*LED lights may be bad for Van Gogh paintings*” ossia, tradotto letteralmente, “La luce dei LED potrebbe danneggiare i dipinti di Van Gogh”, che faceva riferimento e commentava criticamente la pubblicazione scientifica intitolata “*Degradation Process of Lead Chromate in Paintings by Vincent van Gogh Studied by Means of Spectromicroscopic Methods. 4. Artificial Aging of Model Samples of Co-Precipitates of Lead Chromate and Lead Sulfate*” (*Analytical Chemistry*, ottobre 2012) che riportava gli effetti del curioso imbrunimento di una parte dei pigmenti gialli presenti in alcuni dipinti del maestro olandese Vincent Van Gogh dopo la loro esposizione al pubblico in un museo.

Nell'articolo, frutto evidentemente di una lettura non particolarmente attenta della precedente ricerca, si era pervenuti a ritenere che gli autori della stessa avessero inteso

espressamente mettere in correlazione l'accertato degrado del colore con l'illuminazione a LED, originando così un dibattito che nella realtà muoveva da premesse errate.

Infatti, la ricerca, lungi dall'affermare tale diretta correlazione, aveva formulato considerazioni sostanzialmente ben diverse.

La ricerca aveva esaminato ed analizzato specificamente il degrado di alcuni pigmenti di tinta gialla (giallo cromo) – peraltro utilizzati non solo da Van Gogh (come nel caso delle opere *Vaso di girasoli* e *Ritratto di Gauguin*), ma anche da altri artisti coevi, tra cui Paul Cézanne – rilevando che una selezione di pigmento giallo, particolarmente ricca di zolfo, risultava molto sensibile non solo alla componente ultravioletta, ma anche alla componente blu dello spettro (335-525 nm) e molto meno invece alla componente rossa.

Più precisamente, grazie ad analisi effettuate con tecniche spettroscopiche, la ricerca era giunta alla conclusione che effettivamente alcune particolari linee di spettro, tra cui quelle blu attorno ai 335-525 nm, emesse dalle sorgenti analizzate, potevano rivelarsi dannose per alcuni pigmenti usati dall'artista olandese, senza però mai citare il LED come sorgente di illuminazione.

Quindi, che esista un degrado visibile dei campioni di pigmento è innegabile: esso è stato evidenziato con l'azione d'invecchiamento effettuata illuminando l'oggetto con una luce prodotta da una sorgente Xenon Cermax da 175 W, in grado di emettere tra i 200 nm e i 1100 nm, ovvero dall'ultravioletto al visibile fino all'infrarosso.

In particolare, i campioni sono stati sottoposti ai diversi ambienti di analisi apponendo dei filtri di selezione alla sorgente iniziale:

- UV-A + visibile con emissione spettrale sopra i 300 nm
- UV con emissione spettrale tra i 240 e i 400 nm
- blu con emissione tra 335 e 525 nm
- rosso con emissione superiore ai 570 nm

Ma da questo ad affermare con certezza che il LED deve considerarsi la causa unica o comunque principale di questo degrado, il passo è molto lungo: trattasi, in sostanza, di una mera speculazione, evidentemente originata da una scarsa conoscenza della tecnologia allo stato solido oggi a disposizione per l'illuminazione museale.

E del resto, esaminando attentamente le conclusioni della ricerca, appare immediatamente chiaro che gli autori non avevano mai posto questa precisa correlazione causa-effetto.

Oltretutto la ricerca non aveva neppure considerato il fatto che Van Gogh usasse anche altri pigmenti altamente fotosensibili, come la lacca di robbia o la lacca di geranio, acquistandone grosse quantità, di talché non si può neppure escludere del tutto che lo stesso Van Gogh cercasse coscientemente alcuni particolari pigmenti, nonostante la loro peculiarità di essere sensibili alla luce, tanto che, proprio per l'utilizzo da parte dell'artista olandese di colori e pigmenti non stabili alla luce, si possono oggi notare in alcuni suoi lavori viraggi di tonalità rosse e blu verso tonalità bianche e verdi.

Si deve quindi ritenere conclusivamente che, con molta probabilità, l'effetto di imbrunimento sia stato erroneamente attribuito ai LED bianchi, che, come è noto, all'epoca – ma oggi in forma minore – presentavano un picco rilevante proprio sulla dominante blu di 480 nm.

5.2 – NECESSITÀ DI NUOVI APPROFONDIMENTI

Pur se ingiustificate, le critiche hanno comunque introdotto un dibattito, e al di là del fatto che si sia trattato di una scelta dell'artista piuttosto che di un effettivo degrado, l'utilizzo sempre maggiore del LED per l'illuminazione delle opere d'arte induce a ritenere che sussista un'effettiva necessità di un'indagine più approfondita della materia mediante sperimentazioni, misure e analisi di laboratorio, chiedendosi se effettivamente sia ravvisabile nel LED una fonte di potenziale degrado per le opere d'arte e ciò anche alla luce delle ulteriori conoscenze scientifiche acquisite più recentemente.

Al riguardo si ritiene necessario che venga svolta un'indagine approfondita, utilizzando (se possibile) veramente le sorgenti incriminate, e non speculando su diagrammi spettrali di LED bianchi, con un picco estremo sui 440nm, ormai superati.

Indagine che - anche a voler astrattamente considerare la dannosità della parte blu e UV dello spettro dei LED - andrebbe estesa a tutte le sorgenti oggi note e utilizzabili per l'illuminazione museale, oltre naturalmente alla luce naturale, quasi sempre presente.

Devesi poi considerare che, malgrado l'evidenza dei vantaggi derivanti dall'illuminazione a LED, questa tecnologia non ha ancora trovato una precisa regolamentazione normativa, neppure sotto il profilo delle linee guida.

Le indicazioni vigenti non tengono conto in modo concreto delle nuove tecnologie: esse

hanno come principale obiettivo quello di prevenire ed evitare i possibili danni e il degrado delle opere d'arte conseguenti alle emissioni luminose.

L'entità del danno foto-indotto su un oggetto composito, quale può essere un'opera d'arte, è difficile da valutare perché, come si è visto, dipende da molteplici fattori, legati sia alle caratteristiche dei materiali costituenti il manufatto sia alla tipologia di ambiente espositivo nel suo insieme.

Il ruolo della *conservazione* consiste nel rallentare tali effetti nel tempo, cercando in particolare di rallentare il naturale processo di deterioramento che avviene nelle sostanze organiche.

La luce è per l'appunto uno degli agenti che possono portare ad un cambiamento peggiorativo, tanto che, molto spesso, il miglior modo di conservare un'opera è proprio l'assenza totale di luce.

La *conservazione* e la *fruizione*, da parte dello spettatore, delle opere d'arte sono due aspetti che sembrano scontrarsi continuamente.

Un'attenta politica di prevenzione dovrebbe ridurre l'esposizione alla luce come quella ad altri agenti, quali l'umidità o l'inquinamento atmosferico.

5.3 – LA SITUAZIONE ATTUALE

Data la complessità del problema e l'impossibilità di contemplare tutte le possibili situazioni pratiche, nell'allestimento di esposizioni, temporanee o permanenti, diventa essenziale poter quindi far riferimento a linee guida e standard normativi aggiornati in materia di prevenzione del danno fotoindotto in ambiente museale.

L'attuale situazione a livello di standardizzazione di criteri e procedure è in piena evoluzione.

Come già sottolineato, il riferimento più recente a livello internazionale è la Technical Specification CEN/TS 16163:2014 "*Conservation of Cultural Heritage – Guidelines and procedures for choosing appropriate lighting for indoor exhibitions*", elaborato nell'ambito del CEN (Comitato Europeo di Normazione), pubblicato nel 2014 e recepito nello stesso anno dall'UNI (Ente Italiano di Normazione), che ne ha pubblicato la versione italiana.

Un recente articolo, pubblicato nel 2015 in occasione della sesta edizione della International Building Physics Conference (IBPC) e intitolato “*Study on conservation aspects using LED technology for museum lighting*”, riporta i risultati di un esperimento condotto al fine di valutare i possibili effetti di degrado del colore di opere d'arte esposte alle radiazioni di sorgenti LED.

In particolare, sono stati effettuati i test utilizzando dei campioni di pigmenti sensibili alla luce e sottoposti a radiazioni elettromagnetiche di cinque differenti sorgenti LED e di una tradizionale lampada alogena. Le sorgenti a LED bianchi, realizzati tramite tecnologia a fosfori, sono state scelte di 5 diverse temperature correlate di colore (CCT). Per ciascuna di esse sono stati rilevati i diagrammi di distribuzione spettrale della potenza, oltre a una caratterizzazione in termini di indice di resa cromatica e contenuti relativi di UV-A e VIS-NIR.

Focalizzando l'attenzione sul contenuto UV sembrerebbe non avere alcuna relazione con la CCT dal momento che il contenuto di radiazioni ultraviolette è inferiore nel c.d. Cold White LED rispetto al Warm White LED. Questo potrebbe essere dovuto a una differente tecnologia applicativa dei fosfori. In ogni caso, il contenuto UV di tutte e cinque le sorgenti LED è inferiore al limite di 10 $\mu\text{W}/\text{lm}$ richiesto dalla normativa per le sorgenti altamente fotosensibili.

L'esperimento è stato condotto in accordo al Technical Report CIE 157:2004: il potenziale di danno relativo è stato calcolato in base alla relazione tra il danno e la CCT e i valori sono stati normalizzati in riferimento all'illuminante A (2856 K) e riportati graficamente insieme ai potenziali di danno relativi degli illuminanti D55, D65, D75 e della sorgente planckiana (Figura 5.1).

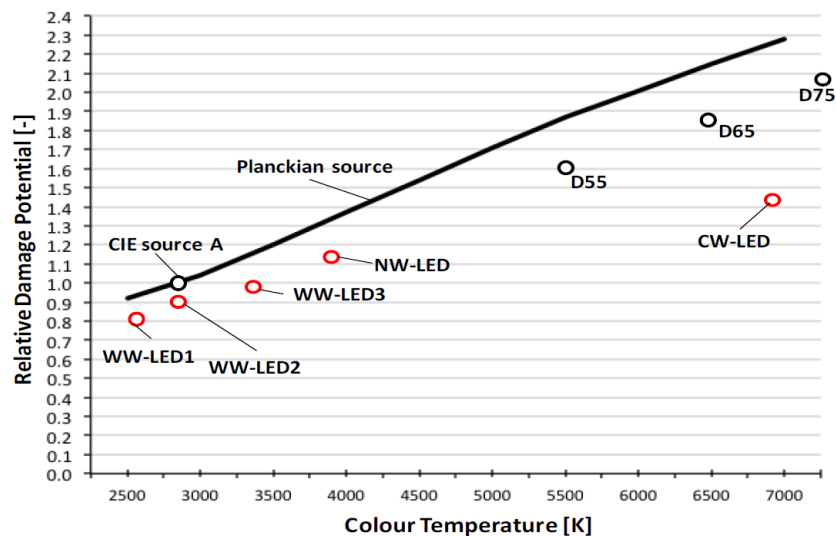


Figura 5.1 – Potenziale di danno relativo delle cinque sorgenti LED scelte (cerchi rossi) confrontati con una sorgente planckiana e con gli illuminanti D. Tutti i valori sono normalizzati all'illuminante A (2856 K).

I campioni utilizzati sono stati scelti fra quelli più sensibili alla luce, in particolare fra i primi tre gradi (ISO1, ISO2, ISO3) dei Blue Wool Standard Swatches e otto campioni di seta dipinta con pigmenti naturali.

L'esperimento è consistito in un processo di invecchiamento accelerato, svolto in due test di esposizione alle radiazioni di breve e lungo termine. In quest'ultimo sono state utilizzate solo le due sorgenti LED WW con valore CRI più elevato (97 e 96) e quella con LED Natural White (CRI 97).

Prima di sottoporre i campioni alle fasi di test, sono stati ricavati i diagrammi spettrali di riflettanza di ciascun pigmento.

Le analisi spettroscopiche (acquisite nell'intervallo 360 – 830 nm) svolte successivamente sui campioni invecchiati hanno permesso di ricavare, tramite la trasposizione nello spazio colore CIE76 $L^*a^*b^*$, il valore di scostamento ΔE .

I risultati dei due test sembrano confermare che i campioni di seta subiscono un viraggio di colore (seppur lieve) molto più rapido quando irraggiati dalle sorgenti a CCT elevata, a differenza dei campioni BWS che si modificano più velocemente sotto le sorgenti a bassa CCT.

Questo conferma ciò che era già stato ipotizzato, ovvero che i LED non hanno una CCT direttamente correlata ad un alto contenuto di UV, e non è pertanto confrontabile con la temperatura colore delle tradizionali sorgenti, dal punto di vista del danno che possono arrecare.

Infatti, sebbene la nostra percezione visiva riesce difficilmente a distinguere l'illuminamento su un oggetto dovuto a sorgenti alogene o a Power LED bianchi di ottima qualità costruttiva, la distribuzione spettrale è molto diversa.

Gli inevitabili picchi, seppur non più esageratamente elevati, della componente blu dei LED bianchi a fosfori comportano radiazione a basse lunghezze d'onda nonostante la temperatura di colore dichiarata sia confrontabile con quella di una lampada alogena.

Dunque non si può più ritenere la CCT come un indicatore assoluto né tanto meno è più possibile considerarla come parametro di confronto, il danno potenziale di una sorgente LED non è direttamente correlato alla sua temperatura di colore.

Vi è da chiedersi se le indicazioni CIE che mettono in relazione gli effetti di danno con la CCT siano ugualmente applicabili alle sorgenti LED e se i limiti di esposizione individuati dalla

scala BWS nella CIE 157:2004 possano essere considerati ancora validi per le sorgenti LED che presentano uno spettro molto più stretto rispetto a quello delle lampade tradizionali.

Al di là di quanto finora considerato, e a prescindere dall'indubbia necessità di ulteriori approfondimenti, le conclusioni tratte dalla ricerca sono soddisfacenti: le sorgenti LED analizzate non hanno riscontrato significative variazioni di colore nei processi di invecchiamento a lungo e a breve termine, portando così a ritenere i LED una nuova tecnologia che in prospettiva futura pare essere applicabile al mondo dell'arte con risultati davvero soddisfacenti.

5.4 – GLI STUDI PIÙ RECENTI

Appare quindi - oggi più che mai - necessario un nuovo approccio che dia risposta ad alcune precise domande. Gli strumenti che abbiamo per analizzare queste nuove sorgenti sono adatti e restituiscono valori veritieri? Oppure i metodi classici non prendono in considerazione tutti gli aspetti di analisi della luce elettronica? Vi sono difetti che non siamo ancora in grado di percepire misurare?

Date queste premesse, nel maggio 2016 presso l'UNI è stato avviato il nuovo gruppo di lavoro GL14 "*illuminazione dei beni culturali*", misto tra la Commissione UNI/CT 023 "Luce e illuminazione" e la Sottocommissione UNI/CT 033/SC 01 Beni culturali del GL04 Ambiente. Il gruppo GL14 riunisce competenze diverse, che spaziano dal settore dell'illuminotecnica, a quello della progettazione, a quello della scienza per la conservazione dei beni culturali.

Il GL14 sta lavorando in questi mesi alla stesura di un nuovo documento che – prendendo le mosse dal testo della CEN/TS 16163:2014 – ne aggiorni i contenuti integrandoli ove necessario. L'obiettivo finale è la redazione di una norma, da proporre anche a livello internazionale alla discussione del comitato CEN, che possa offrire un riferimento esauriente e tecnicamente aggiornato, e colmi la lacuna oggi esistente a livello di standardizzazione in materia di illuminazione di spazi museali interni.

5.5 – CONCLUSIONI

A conclusione di quanto esposto nel presente capitolo, possiamo dire che al momento non vi sono evidenze scientifiche di particolare dannosità dell'illuminazione a LED applicata al mondo dell'arte; al contrario parrebbe che i vantaggi dell'illuminazione allo stato solido siano privi di controindicazioni.

E se così stanno veramente le cose, si potrebbe ritenere senza timore che un incremento, ove necessario, dei livelli di illuminamento oltre i limiti riportati dalle linee guida non sia affatto controindicato e anzi potrebbe portare ad ammirare in un modo del tutto nuovo un'innumerabile quantità di opere d'arte.

Ad un uso sapiente della tecnologia LED, che prediliga la qualità delle sorgenti stesse e rispetti l'inestimabile valore delle opere che verranno illuminate, si potrà affidare dunque il compito di mostrare nel miglior modo possibile e sotto aspetti totalmente nuovi il mondo dell'arte negli anni futuri.

Capitolo 6

Jacopo Tintoretto e le opere realizzate per la Chiesa di Madonna dell'Orto in Venezia

6.1 – L'ARTISTA E LA PITTURA VENEZIANA DEL XVI SECOLO

Jacopo Robusti (Venezia, 1518-1594), noto per il suo stile drammatico, fu protagonista con Tiziano e Veronese della pittura veneziana del XVI secolo.

Figlio di un tintore di tessuti, da cui il soprannome Tintoretto, visse e lavorò sempre nella sua amata città d'origine, Venezia.

I primi biografi lo hanno presentato come un vero e proprio autodidatta, quasi uno straordinario fenomeno in un'epoca in cui il solo modo di entrare nella professione dei pittori era un lungo e severo apprendistato.

Secondo alcuni studi più recenti sulla tecnica di Tintoretto emerge che le prime opere seguano un'impostazione tradizionale mentre solo nel periodo della maturità e negli ultimi anni della sua vita siano emerse le sperimentazioni più ardite.

L'artista divenne interprete di una pittura di Stato adatta a rappresentare i momenti celebrativi e ufficiali di Venezia e intrattenne un rapporto quasi esclusivo con la sua città natale, tanto che le chiese e i palazzi veneziani sono pieni di sue opere. Facendosi interprete dei sentimenti più autentici della devozione popolare, Tintoretto fu tra i primi a fare della pittura uno strumento per suscitare pietà e coinvolgere emotivamente lo spettatore.

Nel XV secolo la maggior parte di quella che si può definire la pittura europea da cavalletto era eseguita su pannelli di legno. Fu a Venezia che nel secolo successivo i dipinti su

tela iniziarono a prevalere su quelli su tavola lignea. Gli affreschi infatti non potevano essere duraturi sulle pareti degli edifici veneziani che erano impregnati di umidità e salinità, tuttavia allo stesso tempo c'era la necessità di coprire grandi spazi di pareti e soffitti con dipinti e la tela era leggera ed economica rispetto al legno.

Specialmente per le opere realizzate per la chiesa della Madonna dell'Orto e per la Scuola Grande di San Rocco, Tintoretto offrì il lavoro per poco più del costo del solo materiale. Questo fa supporre che le opere che vediamo lì esposte devono essere sicuramente quello che voleva dipingere e come lo voleva dipingere, molto probabilmente con meno aiuti rispetto agli incarichi ufficiali a Palazzo Ducale.

Le due istituzioni rappresentano due dei suoi più importanti raggiungimenti nella sua vita: la Scuola Grande di San Rocco in cui spese così tanto tempo ed energia per la gloria di Dio, e la Madonna dell'Orto, la chiesa dove pregava e dove lui con la sua famiglia sarebbero stati sepolti.

Tintoretto morì nel 1594 all'età di 75 anni, oggi è sepolto nella cappella alla destra del presbiterio, proprio alle spalle del suo immenso *Giudizio Universale*.

6.2 – ANALISI ARCHEOMETRICHE NELLA PITTURA DI TINTORETTO

Nel corso dell'ultimo decennio, in occasione di mostre e restauri di opere del pittore veneziano, si sono avanzate numerose indagini archeometriche per analizzare lo stato di conservazione degli strati pittorici nei suoi dipinti.

Gli aspetti che emergono da questi studi portano a considerare quanto sia opportuno basare il giudizio moderno sulla drammaticità cromatica delle opere di Tintoretto, potendo oggi la scienza constatare che il deterioramento dei materiali pittorici ha totalmente trasformato l'originaria cromia di molte tinte. Di conseguenza si è portati al dubbio di quanto di quello che vediamo oggi fu intenzionalmente voluto dal pittore, e quanto invece è il risultato di alterazioni chimiche avvenute gradualmente nel corso dei secoli all'interno del film pittorico.

Analisi spettroscopiche non invasive come la spettroscopia di riflettanza nel visibile (FORS) e la fluorescenza a raggi X (XRF) hanno permesso di valutare lo stato di conservazione delle opere del Tintoretto, con particolare attenzione alle alterazioni cromatiche avvenute nel

corso dei secoli.

Tra i casi più eclatanti e diffusi si può notare il decadimento di molte tonalità azzurre.

Sappiamo che egli adoperò tutte le tonalità di blu in commercio al tempo, di volta in volta utilizzando pigmenti di maggiore o minore qualità a seconda della committenza, delle condizioni di lavoro, del prestigio dell'opera o del contesto. Venezia, allora il principale porto commerciale d'Europa, permetteva all'artista di trovare con facilità quello che gli serviva e di poter sperimentare anche le novità che il commercio con l'oriente portava.

Lo "smaltino" o *blu di smalto* è un pigmento che Tintoretto adoperò con frequenza, così come altri autori veneti coevi. Analisi elementari come la fluorescenza a raggi X (XRF) permettono di individuare i maggiori costituenti del vetro e le impurità, e pertanto consentono di identificarlo con certezza. Fin dagli anni Sessanta, gli studi scientifici hanno evidenziato il processo di alterazione che lo smaltino subisce se posto in un medium di natura oleosa (è noto che Tintoretto usasse prevalentemente per le sue opere olio di semi di lino come legante).

Con il corso del tempo, la reazione chimica tra la natura alcalina del pigmento e l'acidità del legante porta il potassio contenuto dello smaltino a emergere in superficie e causare a livello macroscopico l'ingrigimento generale delle campiture trattate con questo pigmento. Le aree azzurreate a smaltino oggi appaiono infatti grigie, grigio-verdi, bruno pallide.

È stato speculato che il fenomeno possa verificarsi già nel corso di un secolo dalla sua messa in opera. Da molti decenni si indaga circa le cause che determinano queste reazioni tra pigmento e legante: si è notato che in alcuni dipinti le aree marginali coperte da vernice, e quindi sottratte all'esposizione luminosa, si sono conservate, facendo dedurre che il ruolo della luce nel decadimento del colore blu di smalto sia certo.

È essenziale, comunque, comprendere che la visione odierna delle opere di Tintoretto non è equivalente a quello che avveniva presso i contemporanei dell'artista. I dipinti apparivano più vivaci, e mancano oggi moltissimi degli azzurri che egli elargiva con particolare generosità nei suoi dipinti, specialmente negli sfondi e nei paesaggi.

L'*indaco* può essere riconosciuto con un esame in spettroscopia di riflettanza in quanto la componente fondamentale, l'indigotina, ha una caratteristica banda di assorbimento.

L'*azzurrite* è presente in molte opere, soprattutto giovanili (è stato notato che un gran numero di dipinti giovanili presenta azzurrite, meno costosa del lapislazzuli, perciò più

abbordabile per un pittore agli inizi della sua carriera). Tintoretto, testimoniano gli esami spettroscopici, di sovente mescolava più qualità di blu insieme, per ottenere effetti di cangiantismo e di luminosità che si sono oggi perduti. È il caso ad esempio del *Trafugamento del corpo di San Marco*, conservato oggi alle Gallerie dell'Accademia e proveniente dalla Scuola Grande di San Marco, in cui il cielo che l'osservatore odierno percepisce, giallo, bruno e a tratti grigio, è il risultato della decolorazione degli strati pittorici contenenti blu di smalto e azzurrite. Non è un cielo cupo, burrascoso, ma un cielo blu, reso livido per l'impasto dell'azzurro con il nero.

Non sono tuttavia solo i colori azzurri ad avere mutato radicalmente aspetto nel corso del tempo. Oltre ai blu ingialliti o ingrigiti, lo spettatore odierno deve tenere in considerazione altre due importanti trasformazioni cromatiche: le lacche rosse sono imbrunite fino a diventare marrone-violaceo, il resinato di rame è annerito fino a perdere totalmente la brillantezza.

Sono stati analizzati i verdi, tutti a base rameica, che hanno virato verso il bruno-scuro a causa dei prodotti di alterazione. Malachite, verderame e resinato di rame non possono essere rilevati con XRF, e sono invece stati individuati con analisi stratigrafiche al microscopio. Analizzate al microscopio ottico, le sezioni sottili delle aree verdi mostrano come si sia creata nel corso del tempo una patina scura che copre l'originario strato verde brillante.

Infine, nella tavolozza di Tintoretto non potevano mancare le lacche rosse, pigmenti inorganici fortemente fotosensibili che nel corso dei decenni perdono la loro intensità e brillantezza, fino ad apparire, oggigiorno, viola scuro o marrone.

6.3 – DENTRO LE OPERE: L'ADORAZIONE DEL VITELLO D'ORO E IL GIUDIZIO UNIVERSALE

Considerando il coinvolgimento emotivo che Tintoretto voleva suscitare nello spettatore, troviamo come eloquente esempio l'*Adorazione del vitello d'oro* e il *Giudizio Universale* tuttora presenti sulle pareti del coro della chiesa di Madonna dell'Orto a Venezia.

Si tratta di due incredibili teleri di enormi dimensioni (14,5 x 5,8 metri) che impegnarono l'artista per oltre due anni (1562-1564).



Figura 6.1 – Vista d'insieme del presbiterio della chiesa della Madonna dell'Orto in Venezia.

A completare la decorazione del presbiterio vi sono altre cinque grandi tele raffiguranti le *Virtù* (di cui solo le quattro virtù cardinali sono opera di Tintoretto mentre la *Fede* è di Pietro Ricchi), le tele che rivestivano le portelle interne del precedente organo che rappresentano la *Visione della Croce di San Pietro* e la *Decollazione di San Paolo*, entrambe ad opera di Tintoretto, e l'*Annunciazione* di Jacopo Palma il Giovane. Invece la *Presentazione della Vergine al tempio* che Tintoretto aveva dipinto ad ornamento delle portelle esterne dell'organo, si trova oggi sulla navata destra, all'incirca nella posizione dove doveva trovarsi l'organo originale.

Si può affermare con una certa sicurezza che fosse lo stesso Tintoretto a cercarsi le commissioni, tant'è che l'esecuzione dei due immensi teleri fu offerta dallo stesso artista per

quello che sembrava un compito quasi impossibile per il prezzo irrisorio richiesto: un affare troppo conveniente per il priore della Madonna dell'Orto per essere rifiutato.

L'*Adorazione del vitello d'oro*, sulla parete di sinistra, illustra due scene: Mosè che riceve le Tavole della Legge nella parte superiore e in quella inferiore l'adorazione del simulacro del vitello realizzato con la fusione dell'oro del popolo ebraico in cammino verso la Terra Promessa.

Il *Giudizio Universale* appare invece come una scena molto più intensa e dinamica, quasi un centinaio di figure umane, disposte su piani diversi, conferiscono movimento e agitazione alla composizione intera. Si notano però alternate delle zone di vuoto che attirano l'osservatore perché illuminate da una luce forte, di uno splendore freddo. Proprio la luce e le differenti cromie producono un'intensa emozione nello spettatore. Il grande telero del *Giudizio Universale* esprime tutta la tragedia e la bellezza di quel momento supremo: "Quando il Figlio dell'Uomo verrà nella sua gloria con tutti i suoi angeli, si siederà sul trono della sua gloria. E verranno a lui tutte le genti, ed egli separerà gli uni dagli altri" (Mt 25, 31-32).

Seppur non vi è alcuna certezza documentata di un viaggio a Roma di Tintoretto, di certo non si può fare a meno di notare l'influenza dell'affresco di Michelangelo nella Cappella Sistina (terminato nel 1541) sul *Giudizio Universale* eseguito dal pittore veneziano vent'anni dopo.

Tintoretto non ha usato né gli stessi pigmenti, né lo stesso medium, né la superficie pittorica è la stessa, ma quello che egli ha preso in prestito da Michelangelo è l'idea della composizione. In realtà questa potrebbe essere stata ispirata anche dalle varie incisioni che giravano a Venezia dagli anni quaranta in poi raffiguranti il capolavoro della Cappella Sistina.

Le tele, come tutte le stoffe, erano tessute secondo certe misure standard; per dipinti grandi, come quelli presenti nella chiesa della Madonna dell'Orto, molti pezzi di tela dovettero essere cuciti insieme e tagliati su misura delle pareti absidali. Si noti che le tele dei due dipinti, seppur coevi, non sono della stessa tessitura, le fibre e gli spessori sono differenti, così come la geometria dei pezzi cuciti insieme.

Come la maggior parte dei supporti pittorici, la tela richiede un'imprimatura di fondo o preparazione per rendere la superficie adatta alla pittura.

I dipinti italiani su tavola lignea sembrano avere sempre uno strato di gesso, un materiale bianco, simile a stucco composto di gesso (solfato di calcio) e colla animale, che costituiva una superficie molto adatta alla doratura e alla ornamentazione.

Quando all'inizio del XVI secolo i pittori veneziani come Giovanni Bellini e Tiziano iniziarono a utilizzare la tela come supporto preferendola alla tavola lignea, continuarono con l'usanza di applicare un fondo bianco di gesso ma molto più sottile di quello usato per le tavole.

Sebbene constatato che Tintoretto, in particolare nei suoi lavori più tardi, preferiva un fondo scuro per le sue tele, sembra in questo caso aver deciso di rimanere legato al tradizionale fondo di gesso bianco sia per l'*Adorazione del vitello d'oro* che per il *Giudizio Universale*, forse con l'idea di ottenere maggiore luminosità data la posizione piuttosto poco illuminata in cui si trovano. Tali dipinti furono realizzati sicuramente in coppia per il luogo che occupano ancora oggi. I loro apici ad archi acuti sono dovuti alla forma del soffitto a volta della chiesa tipica gotica della Madonna dell'Orto.

Come i suoi contemporanei, anche Tintoretto fece molti disegni preliminari su carta ma soltanto pochi mostrano la composizione completa di un dipinto. Probabilmente la mente di Tintoretto lavorava così in fretta che la versione finale dipinta spesso è diversa dal disegno preliminare non solo nel particolare ma anche nella posizione delle figure; e così avviene anche nei due grandi teleri.

Nel corso dell'esame al microscopio ottico di campioni dell'*Adorazione del vitello d'oro* si è notato molte volte una riga tratteggiata di particelle di nero fumo tra il fondo di gesso bianco e gli strati di pittura. Questo fa supporre che ciò costituisca un sottostante disegno preliminare. Nei campioni presi invece dal *Giudizio Universale*, non è stato trovato alcuno di questi esempi, ma può non essere significativo, tenendo conto della dimensione dei campioni (approssimativamente 0,5mm di diametro) paragonata all'intera superficie del dipinto. L'artista ha lavorato dunque molto più a livello pittorico nel *Giudizio Universale* che nell'*Adorazione del vitello d'oro*.

Sono i pigmenti che danno colore alla pittura e la pittura veneziana del XVI secolo è celebre per il colore. La fama di questa pittura basata sul colore sembra derivare dai dipinti di Giorgione, da quelli del giovane Tiziano e di Giovanni Bellini. In questo periodo, nella pittura

veneziana, l'artista spesso unisce effettivamente in unico dipinto tutti i pigmenti di cui può disporre, e questo è anche il caso di Tintoretto.

Quello che in altre mani potrebbe diventare uno sfoggio volgare, raggiunge grande armonia nelle mani dei maestri veneziani.

Tintoretto, come il suo contemporaneo Paolo Veronese, portò avanti la grande tradizione coloristica veneziana.

L'Adorazione del vitello d'oro, dopo la pulitura, si è rivelato essere un dipinto ricco di colore come le decorazioni del soffitto e i fregi nella Sala dell'Albergo della Scuola Grande di San Rocco, dipinti nel 1564 subito dopo i due immensi teleri di Madonna dell'Orto.

Tintoretto diventò famoso all'inizio della sua carriera proprio grazie a uno dei suoi dipinti più ricchi di colore: *Il miracolo dello schiavo* (olio su tela, 1548, Venezia, Galleria dell'Accademia).

Nell'esame al microscopio ottico e nell'analisi chimica di campioni di pittura prelevati dai due grandi teleri, si è constatato come fossero presenti tutti i pigmenti che si avrebbero trovare sulla tavolozza di un pittore del tempo, compresi quelli meno comuni.

Venezia, infatti, ha goduto a lungo di una posizione privilegiata per quanto riguarda l'acquisto di pigmenti, essendo il porto di entrata in Europa per le importazioni dall'oriente.

Si riportano in forma schematica tutti i pigmenti utilizzati nelle due immense opere di Tintoretto:

- bianco piombo
- nero carbone
- ocra rossa
- ocra gialla
- blu oltremare naturale (lapislazzuli)
- azzurrite (minerale basico carbonato di rame blu)
- smaltino (un vetro blu in polvere che deve il suo colore alla presenza di cobalto)
- blu indaco (una sostanza colorante vegetale)
- malachite (minerale carbonato di rame verde, spesso presente negli affreschi ma raramente nella pittura da cavalletto)
- verderame
- smalti verdi di rame resinato
- giallo piombo e stagno (un doppio ossido di piombo e stagno)
- arsenico giallo e solfuro di arsenico
- pigmenti cremisi e porpurei (sostanze coloranti vegetali o animali assorbite in polveri bianche insolubili come idrossido di alluminio o gesso per fare i pigmenti rossi)

Osservando la grande tela raffigurante l'*Adorazione del vitello d'oro*, colpisce la veste blu della maestosa figura di donna che punta il dito verso il vitello.

Il pigmento blu è oltremare naturale estratto dalla pietra dura lapislazzuli attraverso un lungo e laborioso procedimento. Fu importato dall'Afghanistan ed era prezioso come l'oro tanto che spesso era stipulato nel contratto che il committente dovesse pagare separatamente per questo.

Nel campione prelevato da tale opera, le numerose particelle di ultramarino sono mescolate con bianchi piombo, non per rendere più economico il pigmento ma rendere un colore più brillante e radioso. Un campione simile è stato prelevato anche dal *Giudizio Universale* e si possono scorgere due strati di blu oltremare, l'inferiore in cui il pigmento è unito un po' di bianco per renderlo opaco e il superiore in cui il pigmento traslucido blu scuro è usato come una vernice per conferire un effetto più cupo e più ricco.

In alcuni dipinti di Tintoretto, per esempio quelli più tardi nella Scuola Grande di San Rocco, l'oltremare viene usato molto meno o per niente.

I pigmenti giallo e arancio di solfuro di arsenico, orpimento e realgar, si trovano raramente nei dipinti europei da cavalletto, eccetto quelli veneziani del XVI secolo. Qui il drappaggio giallo vibrante dell'orpimento, reo più intenso nelle ombre con il realgar arancione, si può trovare nei dipinti di Giorgione e Tiziano e in quelli di Tintoretto. Si chiama orpimento, cioè pigmento d'oro, perché le particelle cristalline hanno lucentezza metallica.

La gamma eccezionalmente ampia di tonalità dei pigmenti dal cremisi al porpora usati da Tintoretto, costituiti da sostanze animali e vegetali quali robbia, legno del Brasile, gommalacca e il kermes e il pigmento blu indaco, erano prodotti già utilizzati per la tintura tessile.

Il medium utilizzato dai pittori veneziani del XVI secolo è stato fonte di infinite speculazioni. Le più improbabili miscele sono state considerate come il "segreto veneziano" sostenendo che ogni artista potesse dipingere come Tiziano o Tintoretto. In ogni caso, una serie di campioni prelevati dai due grandi teleri sono stati analizzati per studiare il medium utilizzando la *gas cromatografia*, presso il dipartimento scientifico della National Gallery di Londra. Grazie a questo metodo, che consente di avere risultati attendibili da un campione di pittura di meno di un millimetro quadro, si è potuto accertare che in tutti i casi il medium era un olio, in particolare olio di semi di lino. Solo su alcuni campioni sono state trovate tracce di olio di noce, in accordo col fatto che in passato tale medium era consigliato per i pigmenti blu e bianchi perché ritenuto meno ingiallente.

Generalmente, nella pittura degli artisti contemporanei di Tintoretto, il *modus operandi* prevedeva la stesura di un fondo bianco (gesso), il disegno dell'intera composizione con tratti neri (carbone) e in seguito la stesura a zone dei diversi colori (ad esempio, il blu per le vesti, il verde per la vegetazione, il rosa per gli incarnati). Essendo la composizione già definita nel dettaglio, il margine all'improvvisazione era molto piccolo e la stesura di più strati magari sovrapposti era dettata dall'esigenza di creare effetti di ombre scure e lumeggiamenti; o ancora per ottenere particolari sfumature di colore era tipico dipingere con differenti vernici più o meno trasparenti sopra zone di colore già stese.

Tintoretto, a differenza di quanto appena riportato, prediligeva uno stile più libero, senza gli stretti schemi del disegno nero su bianco, man mano che dipingeva vi era un continuo modificarsi dell'intera composizione, fino a giungere al risultato finale che oggi possiamo ammirare.

Grazie alle radiografie a raggi X di alcuni campioni (in particolare dove vi è la presenza del bianco piombo che è opaco a tali frequenze) si possono notare strati sovrapposti di pennellate veloci e vorticosi che rappresentano i cambi d'idea dell'artista. Con l'analisi stratigrafica si può invece notare la presenza di lacca rossa (trasparente alle radiografie a raggi X), forse la preferita di Tintoretto per gli schizzi preparatori e gli abbozzi sulle tele, e poiché si trovava fra due strati di pittura opaca (il fondo bianco e lo strato di colore opaco sovrapposto) risultava impercettibile sulla superficie del dipinto.

Dopo il restauro e la pulitura, come appare oggi a noi, si nota che il grande dipinto dell'*Adorazione del vitello d'oro* presenta tonalità più luminose e brillanti rispetto al *Giudizio Universale* e questo era probabilmente voluto dallo stesso artista.

Ma non è solo questa la differenza fra le due grandi opere, nel *Giudizio universale* Tintoretto dipinge in modo molto più pesante con una sequenza di strati molto più complessa. Anche in questo caso sono stati analizzati dei campioni minuscoli delle due opere e si è visto come lo spessore massimo totale della pittura più fondo preparatorio nell'*Adorazione del vitello d'oro* è di circa 200 μm , mentre nel *Giudizio Universale* aggiunge lo spessore di 800 μm .

Si tenga presente che queste due opere, delle dimensioni di 14 metri in altezza per 6 di larghezza, raggiungono il peso di circa una tonnellata ciascuna. Nell'appendice fotografica allegata si possono vedere le foto originali dell'ultimo restauro avvenuto in seguito

all'eccezionale acqua alta del 1966; si possono notare i supporti e i meccanismi meccanici dell'epoca realizzati apposta per la rimozione dei teleri e il successivo riposizionamento.

Ancora più complessa è la realizzazione del *Giudizio Universale*, in cui oltre allo strato di gesso bianco di fondo, l'artista, anziché stendere singole aree di colore, dipingeva con uno spesso strato l'intero sfondo (starti mescolati di grigio, verde e marrone), poi dipingeva sopra gli incarnati delle figure e infine vi aggiungeva le stoffe. Inoltre si è notata la presenza di miscele di più pigmenti colorati, cosa rara per l'epoca in cui raramente si univano più di due diversi pigmenti in unico strato di pittura, a meno che uno non fosse bianco piombo.

6.4 – IPOTESI DI UNA NUOVA ILLUMINAZIONE

Prendendo ora in considerazione quanto finora detto sulla pittura veneziana del XVI secolo, e in particolare su quella caratteristica di Tintoretto, e partendo dalle analisi dei due casi studio così tra loro contrapposti, si può considerare come un interessante banco di prova la proposta di una nuova illuminazione a LED per le due grandi tele rinascimentali del *Giudizio Universale* e dell'*Adorazione del vitello d'oro*.

Venezia, in questo senso, è una città dove la sperimentazione potrebbe consentire di fare delle esperienze significative, in quanto nella città, e nelle sue numerose chiese in particolare, sono presenti opere di notevole interesse artistico, oltre che di importanti dimensioni, che si prestano perfettamente a consentire di verificare la bontà dell'utilizzo dell'illuminazione a LED. Inoltre, tali opere, appartenendo a epoche differenti e quindi comprendendo autori e stili diversi e un utilizzo dei più vari pigmenti che sono stati commercializzati da Venezia nel corso dei secoli, porterebbero a coprire un vastissimo campo di applicazioni dell'illuminazione allo stato solido.

Potendo osservare lo stato attuale delle opere, oltre alle considerazioni già trattate in merito alle variazioni cromatiche avvenute nel corso degli anni, è possibile notare alcune problematiche di carattere illuminotecnico.



Figura 6.3 – Stato attuale dell’illuminazione dell’Adorazione del vitello d’oro (a sinistra) e del Giudizio Universale (a destra), situati nel presbiterio della chiesa della Madonna dell’Orto, Venezia.

Dalla posizione ideale di osservazione, frontale al centro del dipinto, emergono delle vaste aree di riflessione diretta che non permettono la visione di quelle determinate zone.

Nell’*Adorazione del vitello d’oro* vi è una componente di luce naturale non indifferente, che per come è orientata la chiesa rispetto alla posizione solare durante il giorno, incide nella parte centrale dell’opera, in corrispondenza della vegetazione di sfondo a lato del monte Sinai.

Come è noto, la luce solare ha delle componenti di radiazione ultravioletta e infrarossa molto rilevanti, e nel corso degli anni tali radiazioni hanno alterato completamente le cromie presenti in quella parte dell’opera. In particolare, anche da una semplice analisi qualitativa, osservando gli spettri di riflettanza di due pigmenti molto utilizzati da Tintoretto

(specialmente nelle composizioni degli elementi naturali all'interno dell'opera), come lo smaltino e la malachite, si osservano dei livelli di riflettanza percentuale molto bassi sia nella regione UV (4%-8%) sia nel vicino infrarosso (10%-12%). Questo implica che la maggior parte di queste radiazioni elettromagnetiche è stata assorbita, causando scolorimento e ingrigimento dei pigmenti.

Anche il *Giudizio Universale* è soggetto ad una illuminazione evidentemente inadeguata. Una forte componente diffusa appare nella parte superiore, lasciando completamente nell'ombra la metà inferiore del dipinto. Inoltre vi è una componente di luce artificiale riflessa che impedisce la corretta visione dell'opera. Si noti poi come faticino ad emergere quei colori saturi caratteristici di Tintoretto, come il blu delle vesti e gli azzurri del cielo e delle acque, apparendo tutto permeato di una patina di colore giallastro.

Infine, osservando l'intero presbiterio nel suo insieme, si nota una prevalenza delle luminanze di fondo rispetto alle opere in esso contenuto. La luce artificiale, completamente diffusa, fa emergere il bianco delle pareti e della volta absidale, creando un forte contrasto con i dipinti, già scuri di per sé. Con questa illuminazione essi appaiono molto più cupi e non assolvono affatto a quella funzione emotiva fortemente voluta dall'artista.

Nel corso di alcuni sopralluoghi presso la chiesa della Madonna dell'Orto, nelle metà inferiori delle opere, cioè quelle facilmente raggiungibili senza ausili meccanici particolari sono stati misurati i seguenti valori di illuminamento e di temperatura colore, valori che pur se rilevati solo su una parte dei dipinti, ragionevolmente si possono assumere ugualmente come valori medi indicativi dello stato attuale delle opere:

		CON LUCE NATURALE 4970K	CON LUCE ARTIFICIALE ESISTENTE 3380K
<i>Adorazione del vitello d'oro</i>	0-3 metri dal basso	6,7 lux	33 lux
	4-7 metri dal basso	8,7 lux	70 lux
<i>Giudizio Universale</i>	0-3 metri dal basso	<i>Non misurabile</i>	12 lux
	4-7 metri dal basso	<i>Non misurabile</i>	30 lux
Piano di calpestio del presbiterio	centrale	5,2 lux	63 lux

Tabella 6.1 – Valori di illuminamento misurati allo stato attuale di conservazione.

Condizioni: mattina con cielo coperto, luce totalmente diffusa, luminanza uniforme. Luxmetro utilizzato: HT309.

Il punto di partenza per studiare una nuova illuminazione, una volta inquadrata storicamente le due opere, consiste nell'individuare la quantità della luce che su esse inciderà, in uno con la qualità, intesa come l'effetto cromatico globale che si vuole ottenere.

Sicuramente, come detto, le opere sono state realizzate per il luogo in cui oggi sono allocate, cioè il presbiterio della chiesa della Madonna dell'Orto. Quest'ultimo, non godendo di grandi aperture tali da lasciar passare i raggi solari, di fatto è poco illuminato di luce naturale; questa penetra prevalentemente dalle grandi finestre della navata centrale che si trovano a circa 20 m di altezza dal piano di calpestio. Per tale motivo si ricordi che Tintoretto preferì mantenere un fondo preparatorio chiaro.

Nonostante questa situazione di scarsa luce che li accomuna, i due capolavori appaiono totalmente diversi: a sinistra l'*Adorazione del vitello d'oro* presenta tonalità più chiare con colori più marcati nella parte inferiore, cromie più tenui nella parte alta, divise dal verde, marrone e ocra del monte Sinai che occupa la parte centrale dell'opera. A destra, il *Giudizio Universale* appare molto più carico e intenso; i colori sono molto più saturi ma al contempo più cupi, in particolare nella parte inferiore dell'opera, la quale ricorda al contempo l'affresco michelangiolesco e l'inferno dantesco. La scena ha una sua dinamicità intrinseca, si contano all'incirca un centinaio di figure umane in movimento, rispetto alla quasi staticità (specialmente della parte inferiore) dell'opera contrapposta.

Queste differenze sono sicuramente state pensate e volute dall'artista, ragione per cui con l'illuminazione dovranno essere rispettate e valorizzate, e non viceversa annullate, ed a tal fine sarà necessario evitare di tirare fuori luce laddove son state dipinte le tenebre dell'inferno.

Per stabilire il corretto posizionamento dei corpi illuminanti è doveroso tenere in considerazione più fattori: anzitutto la direzionalità della luce all'interno dell'opera, al fine di meglio evidenziare e valorizzare il pensiero dell'artista. In secondo luogo andrà considerato il punto di osservazione dello spettatore, il quale deve poter osservare l'opera senza rischio di riflesso né di abbagliamento da parte dei proiettori stessi, ma anzi dovrebbe poter cogliere il significato che, tramite la luce dipinta, l'artista ha voluto comunicare.

Infine, anche le scelte di carattere impiantistico (appendimenti, posizionamenti su travi e supporti esistenti, cablaggi elettrici) dovranno venire adeguatamente valutate allo scopo di scegliere il giusto compromesso fra le esigenze sopra delineate e la stessa estetica dell'edificio di culto, che dovrà venire per quanto possibile preservata.

Si può quindi preliminarmente concludere che sarà opportuna un'illuminazione diffusa all'interno dell'area del dipinto, priva di sottolineature teatrali, e ciò allo scopo di consentire alla luce stessa del dipinto di comunicare con lo spettatore. Ovviamente, date le dimensioni del dipinto, andranno installati diversi proiettori che ne copriranno aree differenti.

Quest'ultimo aspetto può altresì essere sfruttato per disporre di sorgenti con distribuzioni spettrali leggermente differenti, tali da poter valorizzare determinate specifiche cromie che emergono in alcune aree del dipinto.

Se infatti è stato già motivato che un'indicazione della temperatura di colore di una sorgente LED non è un parametro indicativo, la possibilità di avere differenti sorgenti in cui operare singolarmente su differenti bande di lunghezze d'onda, costituirebbe la scelta più appropriata.

Infine, supponendo di suddividere in più zone gli stessi dipinti seguendo gli andamenti cromatici che oggi ci appaiono, si potrà cercare di esaltare, tramite l'utilizzo di sorgenti a predominanza di lunghezze d'onda più lunghe – e quindi apparentemente più calde – le zone contenenti i pigmenti che meglio rispondono a tali frequenze, mentre si potranno utilizzare sorgenti con lunghezze d'onda più corte nelle zone in cui prevarranno cromie apparentemente più fredde.

Ovviamente, fermo restando l'utilizzo di sorgenti con Power LED di prima scelta, con un contenuto di UV e di IR completamente assente e con un indice di resa cromatica molto elevato (>90), si potrà sfruttare il vantaggio della peculiarità costruttiva dei LED bianchi a fosfori; in particolare sarà opportuno scegliere una CCT relativamente bassa, ad esempio compresa fra 2700 e 3500 K, a seconda della zona d'applicazione, sapendo che l'andamento tipico con il picco della dominante di emissione a lunghezza d'onda corta aiuterà a far emergere anche quelle tonalità più "fredde".

Una temperatura più elevata non sarebbe viceversa adatta alla condizione visiva, ma urterebbe addirittura con le caratteristiche peculiari dell'edificio storico e del suo contesto ambientale, sia reali che percepite dall'osservatore.

Scendendo ulteriormente nel dettaglio, mette conto evidenziare che in entrambe le opere l'artista ha utilizzato i blu più costosi solo per le vesti dei personaggi di maggior rilievo iconografico, mentre indaco e smaltino sono stati usati per il cielo e per l'acqua. Queste aree di colore azzurrognolo, con riverberi luminosi, che possiamo solo immaginare, oggi sono

percepite come brune o grigie. L'interpretazione odierna di queste opere, così come di molte altre, è fuorviata dalle alterazioni chimiche avvenute, tanto che la drammaticità cromatica spesso evidenziata nelle opere di Tintoretto è invece frutto unicamente di processi di alterazione chimica avvenuta nel tempo.

Tramite il database del CNR, in particolare dell'istituto di fisica applicata 'Nello Carrara' di Firenze, sono stati ricavati i diagrammi della riflettanza in funzione della lunghezza d'onda dei campioni di colore utilizzati proprio da Tintoretto.

I diagrammi ricavati con la tecnica FORS presentano un range di lunghezze d'onda analizzate fra i 270 nm e i 1700 nm, coprendo sia la banda UV, sia quella del visibile, sia quella del vicino infrarosso.

Questi diagrammi, ricavati tramite analisi su campioni con il metodo della spettroscopia di riflettanza, restituiscono utili informazioni sull'assorbanza e sulla riflettanza di ciascun pigmento al variare della lunghezza d'onda quando si dovrà intervenire con un progetto illuminotecnico. Non solo, ma tali diagrammi possono altresì fornire spiegazioni su alcuni fenomeni di degrado avvenuti in relazione alle sorgenti precedentemente utilizzate per l'illuminazione dell'opera.

Per esemplificare, si consideri di voler procedere con l'illuminazione della parte inferiore del *Giudizio Universale*. La scena appare molto scura e i colori predominanti sono il marrone e il nero del fondo da cui un poco alla volta emergono il verde e il rosa degli incarnati che riflettono al contempo una luce molto calda provenire dal lato sinistro.

Una sorgente adeguata dovrebbe avere una bassa CCT e, per non snaturare il gioco di luci e ombre creato dall'artista, dovrebbe essere posizionata a sinistra dell'opera e seguire la direzionalità della luce dipinta.

Non si può fare a meno di notare l'originalità di Tintoretto nell'inserire in alcuni punti dell'opera dei colori molto saturi, carichi, che quasi stonano con il resto dell'armonia cromatica. Si tratta in questo caso delle vesti azzurre delle due figure in basso a sinistra¹⁴.

Da un'analisi spettroscopica possiamo ricavare il particolare pigmento utilizzato per le vesti blu, e inoltre è possibile determinare se esso sia unito ad una certa quantità di bianco

¹⁴ Si noti che un simile motivo è riproposto a metà opera con due figure che indossano delle vesti di un colore rosso molto saturo e di nuovo sopra con altre due figure in vesti arancioni su un fondo dominato da tonalità complementari.

piombo.

Analogamente al criterio che presiede l'illuminazione della Cappella Sistina, una volta determinato l'andamento di riflessione spettrale è possibile andare a cercare una sorgente di tipo monocromatico, con banda di emissione centrata in corrispondenza del picco di riflessione, da sovrapporre alla sorgente bianca.

Si ipotizzi, con un buon grado di certezza, che si tratti di blu oltremare naturale (lapislazzuli). Analizzando gli andamenti delle risposte spettrali di questo pigmento, si osserva un'assorbanza quasi completa in tutto lo spettro del visibile e una parte di UV, a cui segue una riflettanza di quasi cinquanta punti percentuali in più nella porzione di infrarosso (*Grafico 6.1*).

Un colore dunque molto scuro, quasi sempre utilizzato insieme a grosse quantità di bianco piombo. Osservando infatti gli andamenti di riflessione spettrale nel caso di blu oltremare unito a bianco piombo emerge subito il caratteristico picco di riflessione intorno ai 480 nm che gli conferisce la tipica tonalità azzurro intenso; aumenta contestualmente anche la riflessione nella restante parte dello spettro (*Grafico 6.2*).

Grazie a questa analisi è possibile individuare la miglior sorgente monocromatica che possa far risaltare il pigmento azzurro/blu in quella determinata porzione di opera senza dover alterare la CCT di un'intera zona.

Questo sistema permette al *light designer* di lavorare su più livelli, di far emergere la tridimensionalità dell'opera mettendo in risalto quei contrasti cromatici (ormai molti dei quali sono perduti) tipici della pittura veneta del XVI secolo, senza alterare l'intera armonia del dipinto, ma anzi cercando di restituire l'apparenza più vicina al momento della realizzazione.

Dunque, una volta individuate le zone contenenti alcuni tratti caratteristici dell'opera, concentrando l'attenzione su alcune cromie particolari e peculiari del periodo storico, si procede con il posizionamento dei proiettori deputati a illuminare tali aree, si continuerà poi con ulteriori proiettori che avranno uno spettro quanto più omogeneo possibile rispetto alle varie frequenze, allo scopo di coprire le zone mancanti.

I medesimi ragionamenti possono essere fatti anche per altri pigmenti e per altre zone, anche di dimensioni maggiori, delle due opere.

Un pigmento sicuramente presente nei capolavori di Tintoretto potrebbe essere lo *smaltino* (sia puro, sia unito al bianco piombo), del quale possiamo ricavare gli andamenti spettrali grazie al database del CNR (*Grafico 6.3*).

In entrambi i casi (smaltino puro o smaltino unito al bianco piombo) si notano una bassa percentuale di riflettanza nel campo dell'ultravioletto e un picco appena accennato tra i 450 nm e i 480 nm; rimane invece un andamento piuttosto piatto nel restante campo del visibile. Il descritto andamento subisce un innalzamento di una decina di punti percentuali nel passaggio tra visibile e infrarosso, per poi assestarsi intorno ad una riflettanza relativa del 20% nel restante campo del vicino infrarosso.

Appare quindi come un colore molto scuro, con una predominanza delle radiazioni assorbite rispetto a quelle riflesse, con una dominante visibile nel blu.

Una sorgente a LED utilizzabile al fine di far risaltare questo pigmento avrà sicuramente la completa assenza delle radiazioni UV e IR (a cui il pigmento è soggetto ad un forte assorbimento, con le note conseguenze), uno spettro quanto più continuo per non snaturare i colori adiacenti a quello considerato, con un picco di potenza centrato sulla banda dei 480nm.

Tuttavia, si ricordi che nel corso del tempo, questo pigmento, largamente utilizzato da Tintoretto, ha subito delle alterazioni cromatiche evidenti. Pertanto risulta necessario un confronto spettrale fra il campione di laboratorio e quello invecchiato naturalmente sulla tela.

Dagli andamenti spettrali posti a confronto si può avere la conferma del pigmento utilizzato ma anche ulteriori informazioni su quelle che sono le sezioni dell'attuale spettro con una maggiore assorbanza.

Dunque, non si cercherà solo di far emergere le componenti spettrali tipiche del campione originario, ma anche di evitare di creare errate correlazioni tra spettri di sorgenti e risposta spettrale degli attuali pigmenti. Queste ultime, infatti, possono dare luogo ad apparenti distorsioni cromatiche o, nel peggiore dei casi, ad ulteriori effetti di danno.

Infine, per mantenere un buon bilanciamento con la luminanza di fondo, si dovrà evitare di utilizzare per l'illuminazione dell'ambiente i medesimi proiettori che risultano già impiegati per l'illuminazione dell'opera: al contrario vi saranno dei proiettori dedicati, cioè deputati ad illuminare, anche di luce riflessa, le zone architettoniche prive di opere, cercando di mantenere un rapporto di circa 1:3-1:5 tra lo sfondo e le opere, così da fornire il giusto risalto ai teleri stessi.

6.5 – CONSIDERAZIONI FINALI

In conclusione, può tranquillamente affermarsi che, come abbiamo visto fin qui, plurimi sono i vantaggi che si potrebbero trarre dall'impiego di illuminazione a LED su questi due capolavori, e ciò sia in termini di migliore fruibilità delle opere (vantaggi di carattere estetico), sia in termini di più idonea conservazione delle stesse, sia, infine – questione certamente non secondaria – di risparmio energetico, consentendo la prolungata illuminazione e fruizione dei dipinti nel tempo.

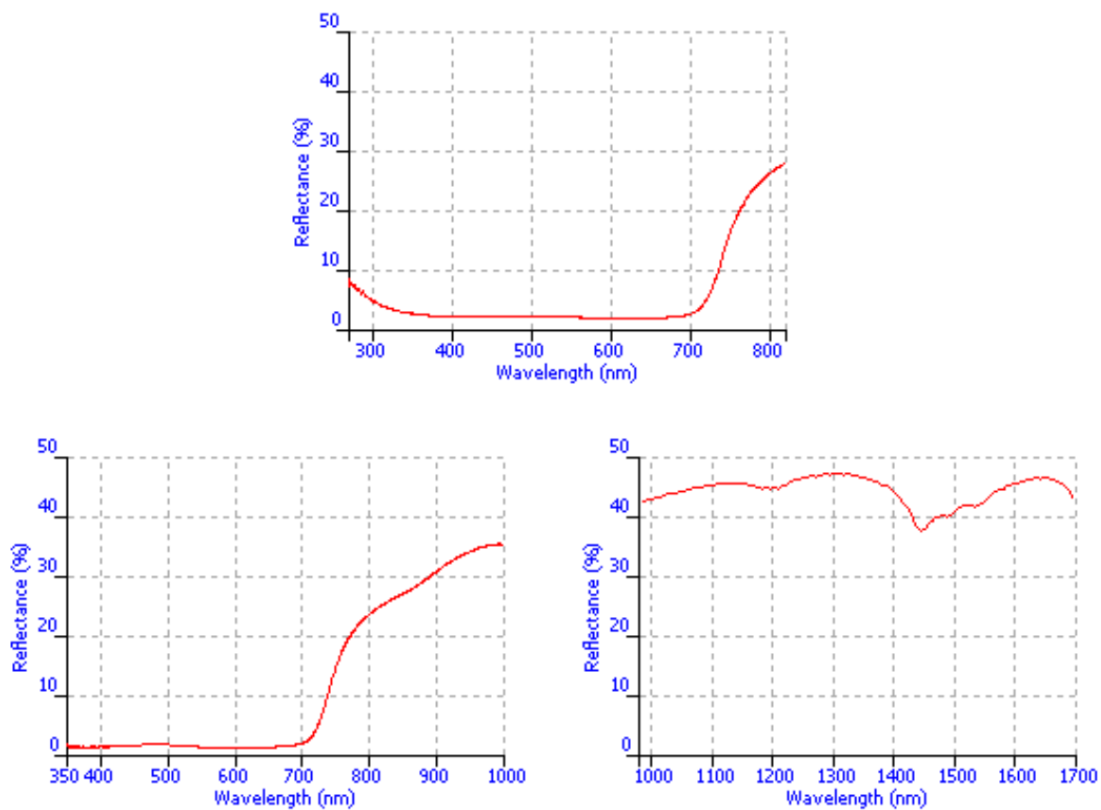


Grafico 6.1 – Diagramma spettrale in riflettanza relativa del pigmento puro blu oltremare (lapislazzuli) in olio di lino.

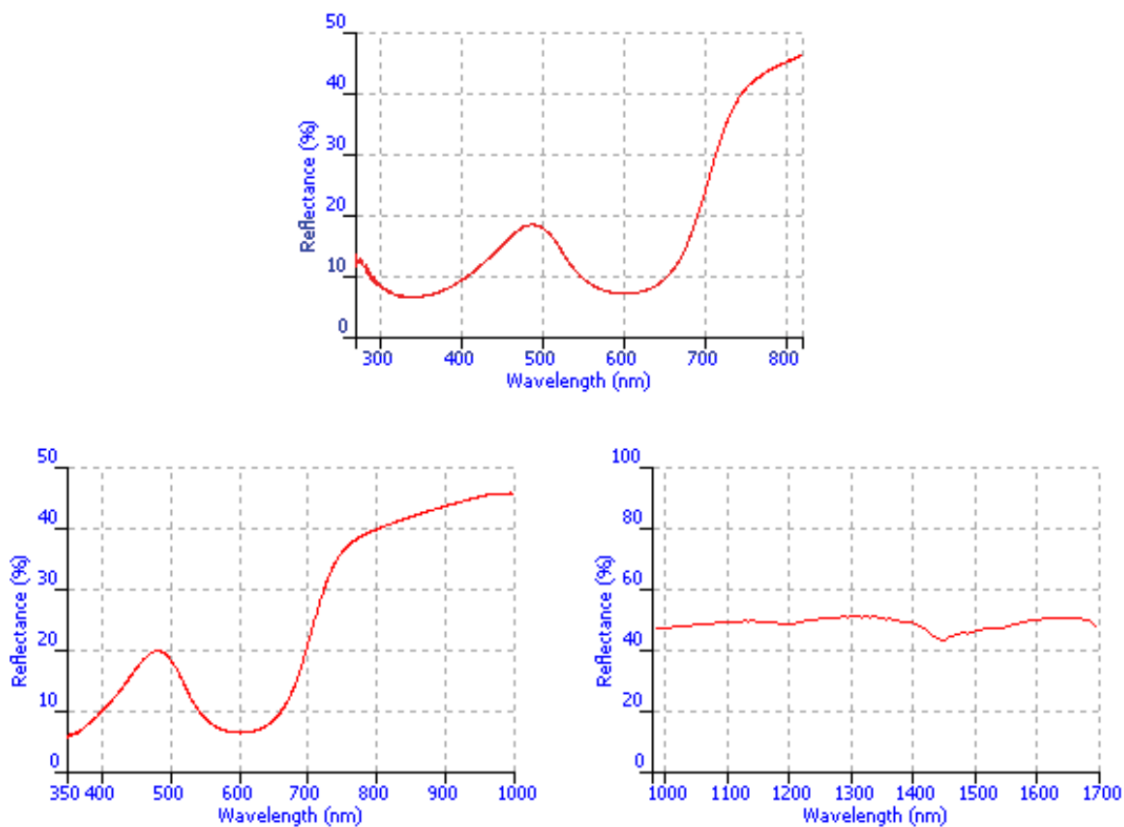


Grafico 6.2 – Diagramma spettrale in riflettanza del pigmento blu oltremare unito a bianco piombo in olio di lino.

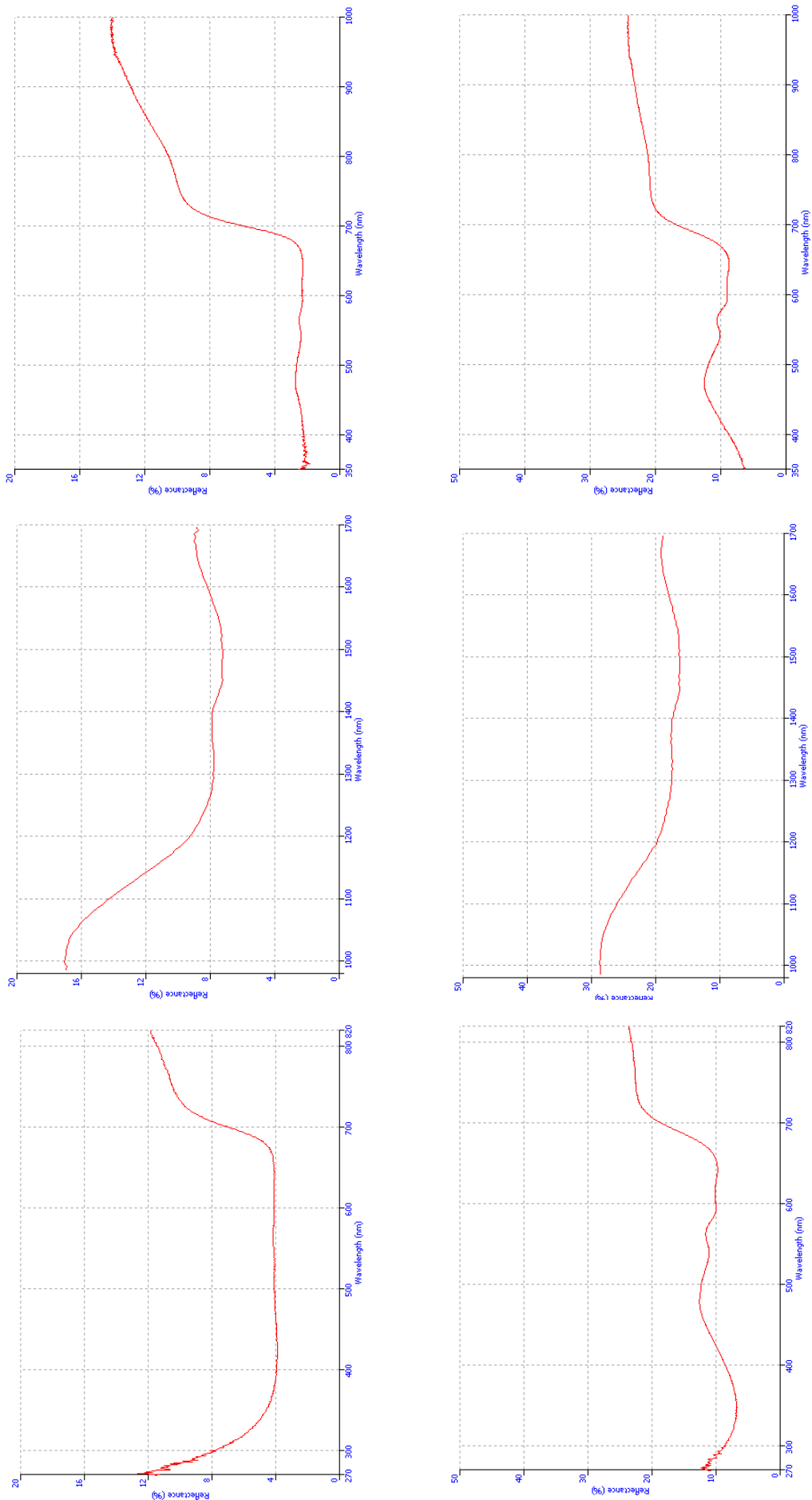


Grafico 6.3 – Diagramma spettrale in riflettanza relativa del pigmento puro smaltino (sopra) e del pigmento smaltino + bianco piombo (sotto).

Da sinistra a destra: UV e visibile, NIR, VIS.

Bibliografia

Palladino P., Spotti P., *Illuminare con i LED. Principi e applicazioni della luce elettronica*,
Techniche Nuove, 2012

Bonomo M., *Illuminazione d'interni*, Maggioli Editore, 2009

Moncada Lo Giudice G., De Lieto Vollaro A., *Illuminotecnica*, Casa Editrice Ambrosiana, 2007

Villa G., *Venezia, l'altro rinascimento*, Einaudi, 2014

Villa R., Villa G., *Tintoretto*, Silvana Editoriale, 2012

Clarke A., Rylands P., *Restoring Venice: the Church of the Madonna dell'Orto*, Londra, 1997

Luce nelle chiese, Atti dei convegni AIDI Milano Roma Venezia, Ediplan Editrice, 2010

La Cappella Sistina venti anni dopo, nuovo respiro nuova luce, Atti del Convegno, Città del Vaticano, 30-31 Ottobre 2014

Commission Internationale de l'Eclairage CIE 157:2004, *Control of Damage to Museum Objects by Optical Radiation*, CIE Technical Collection 2004

CEN/TS 16163:2014 *Conservation of Cultural Heritage-Guidelines and Procedures for Choosing Appropriate Lighting for Indoor Exhibitions*, 2014

Saunders D., Kirby J., *Light-induced damage: investigating the reciprocity principle*, in ICOM Committee for Conservation, 11th Triennial Meeting, Edinburgh, 87-90 (1996)

Cuttle C., *Damage to museum objects due to light exposure*, in *Lighting Res. Technol.* 28 (1) 1-9 (1996)

Schaeffer T. T., *Effects of Light on Materials in Collections*, Getty Publications, 2001

Harrison L. S., *Report on the deteriorating effects of modern light sources*, edizioni Metropolitan Museum of Art, New York (1953)

Piccablotto G., Aghemo C., Pellegrino A., Iacomussi P., Radis M., *Study of Conservation Aspects Using LED Technology for Museum Lighting*, 6th International Building Physics Conference IBPC 2015

Monico L., Janssens K., Miliani C., Van Der Snickt G., Brunetti B.G., Cestelli Guidi M., Radepon M., Cotte M., *Degradation Process of Lead Chromate in Paintings by Vincent van Gogh Studied by Means of Spectromicroscopic Methods. 4. Artificial Aging of Model Samples of Co-Precipitates of Lead Chromate and Lead Sulfate*, Anal. Chem. 2013

Ishii M., et al., *Color Degradation of Textiles with Natural Dyes and Blue Scale Standard Exposed to Withe LED Lamps: Evaluation for Effectiveness as Museum Lighting*, Journal of Illuminating Engineering Institute of Japan, May 2007

Piccoli B., Orsini S., *Luce e UV*, Biblioteca della luce Reggiani Editore, 1998

Associazione Italiana Di Illuminazione (AIDI), *Guida per l'illuminazione delle opere d'arte negli interni*, ottobre 1996