

Capitolo 2 Color urban design: temi, strumenti, tecniche, normativa di riferimento

Fabrizio Ivan Apollonio, Alma Mater Studiorum University of Bologna, Dept. of Architecture

Marco Gaiani, Alma Mater Studiorum University of Bologna, Dept. of Architecture

Abstract

Lo scritto si propone di ripercorrere i temi del progetto del colore alla scala urbana nei suoi riferimenti culturali, in rapporto ai problemi e alle occasioni della contemporaneità, affrontandone sia la dimensione creativa, sia la dimensione tecnica, sia la dimensione normativa, soprattutto in riferimento alla conservazione dell'edilizia antica. Nonostante tema, tecniche di analisi e soluzioni siano ampiamente consolidati, tuttavia, forse proprio per questa presunta solidità dell'impianto di base, la ricerca e l'innovazione verso la soluzione di problemi legati al colore e alla sua presenza nella nostra scena urbana quotidiana, sembrano negli ultimi anni essersi fermati. I portati delle tecnologie informatiche, la possibilità di indagine più accurate sui contesti e la loro classificazione con possibilità di riuso come materiale per il progetto, lo stesso apparato normativo, appaiono essere più uno stereotipo che uno strumento effettivo per progettare ambienti più appropriati alla nostra vita quotidiana e più capaci di essere strumento di esperienza capace di suscitare vive emozioni nell'utente della città. In questa direzione il contributo mira a dare una rilettura critica più che una trattazione esaustiva degli elementi-chiave per riuscire a riproporre il colore come elemento fondamentale del sistema città.

Keywords:

Color urban design, color analysis, color mapping, color detection, color plans, color conservation, urban color history

DOI 10.23738/RCASB.00402

This chapter is part of the book: Color Design & Technology - A Multidisciplinary Approach to Colour – Part 3, edited by Alice Plutino, Gabriele Simone and Alessandro Rizzi

ISBN 978-88-99513-17-7

Research Culture and Science Book Series Vol 4

ISSN 2785-115X www.rcasb.eu

1. Introduzione

Gordon Cullen definisce un sistema urbano come l'arte di unificare visione e struttura dell'insieme di edifici, strade e piazze che costituiscono un ambiente urbano (Cullen, 1976).

Kevin Lynch, nel suo evergreen *The Image of the City* (Lynch, 1960) spiega come la percezione e la conoscenza dei sistemi urbani siano un processo duplice tra osservatore e spazio osservato. L'ambiente suggerisce distinzioni e relazioni e l'osservatore, con grande adattabilità e alla luce dei propri scopi, seleziona, organizza e conferisce significato a ciò che vede. Le immagini della città nascono come risultato di questo processo e sono costituite da tre componenti: identità, struttura e significato. La prima di queste componenti, l'identità, ha a che fare con la nozione che ogni immagine urbana o del paesaggio, agrario o naturale che sia, è un'entità separata e distinta dalle altre immagini dello stesso ambito; la struttura si riferisce ai modelli spaziali e relazionali propri di quell'immagine; infine, il significato si riferisce al significato pratico o emotivo che l'immagine genera nell'osservatore. 'Immaginabilità' è il termine coniato da Lynch per riferirsi alle qualità insite in un sito, come proprietà "that gives it a high probability of evoking a strong image in any given observer" (Lynch, 1960, p. 9).

La 'immaginabilità' di un determinato luogo è definita da forma, colore e disposizione degli elementi chiave.

Questa 'intuizione' è stata poi dimostrata e specificata dalle neuroscienze che hanno permesso di rendere il pensiero di Lynch non solo strumento di analisi, ma materiale per il progetto, dimostrando i nessi causa-effetto di molte delle possibili variabili.

In questo percorso di approfondimento compiuto dagli studi neuro-scientifici ai nostri fini è centrale il lavoro di David Marr, di vent'anni posteriore a quello di Lynch. Marr descrive la visione come un "complex information-processing system", il cui scopo è rivelare "what is present in the world, and where it is" (Marr, 1982). L'input di questo processo è un'immagine bidimensionale (la luce che entra nella retina) e l'output è la percezione del mondo tridimensionale (Stevens, 2012).

Nella necessità di replicare, nel modo più fedele possibile, questo processo per rendere il mondo comprensibile e quindi utilizzabile come strumento atto a facilitare il percorso quotidiano dell'essere umano è anche lo scopo del progetto di architettura e alla scala urbana, dunque, in quanto fondante dell'ideazione complessiva, il progetto del colore a entrambe le scale.

Infatti, come spiega tra gli altri anche Semir Zeki (Zeki, 1993), il papà della neuro-estetica, il cervello ha un compito fondamentale, 'l'acquisizione della conoscenza del mondo', cioè delle caratteristiche specifiche e stabili di ciò

che ci circonda, null'altro che ciò che gli permette di ordinare gli oggetti per categorie: "The brain is only interested in obtaining knowledge about those permanent, essential, or characteristic properties of objects and surfaces that allow it to categorize them" (Zeki, 1993). Questo è quanto viene svolto anche dal processo della visione che, come spiega lo stesso Zeki in *The inner vision* (Zeki, 1999), è oggi inteso come un processo attivo in cui il cervello, nella sua ricerca di conoscenza del mondo, opera una scelta tra tutti i dati disponibili e, confrontando l'informazione selezionata con i ricordi immagazzinati, genera l'immagine visiva. Tale modo operativo è possibile grazie al fatto che la parte del cervello che si occupa dell'elaborazione visiva consiste di molte aree differenti, funzionalmente specializzate e topograficamente distinte, ciascuna delle quali elabora e percepisce un differente attributo della scena visiva.

Operativamente, tornando a Marr, la decodifica di una scena avviene tramite una sequenza di rappresentazioni a livello simbolico crescente, progredendo da uno 'schizzo primitivo' dell'immagine retinica, composto da primitive visive come bordi, linee e aree, a uno 'schizzo 2D1/2' dove queste primitive sono ulteriormente elaborate e includono un'indicazione di profondità relativa all'osservatore, fino a riconoscere oggetti 3D e scene alla fine del processo. Più estesamente, integrando la teoria di Marr con i contributi successivi, i livelli di questa elaborazione possono essere classificati come visione precoce, intermedia e tardiva. La visione precoce estrae elementi semplici dall'ambiente visivo, come colore, luminanza, forma, movimento e posizione (Livingstone, 2002). La visione intermedia isola alcuni elementi e raggruppa gli altri per formare regioni coerenti, in quella che altrimenti sarebbe una matrice sensoriale caotica e aggressiva (Biederman e Cooper, 1991). La visione tardiva seleziona queste regioni coerenti e le raffronta coi ricordi al fine di riconoscere gli oggetti e i significati a essi connessi (Farah, 2000).

Il colore, quindi, è uno degli elementi base su cui si fonda la nostra conoscenza e quindi nell'ambiente artificiale non si può prescindere da una sua progettazione.

Ma qual è la sua importanza nella scala della conoscenza?

Studi relativi al riconoscimento hanno dimostrato che il colore è un elemento fondamentale nel ritrovamento di informazioni memorizzate, in quanto fattore affidabile di rappresentazione degli oggetti (Cave et al., 1996) (Vernon e Lloyd-Jones, 2003). Le informazioni sul colore infatti hanno un ruolo basilare nel riconoscimento degli oggetti, sia agevolando la codifica dell'immagine di un oggetto visivo nella memoria, sia agendo come un efficiente elemento per il ritrovamento di rappresentazioni sia di oggetti

isolati sia di oggetti inclusi in scene naturali o artificiali, specialmente per gli oggetti il cui colore è fortemente associato alla loro identità, o quando il colore è un elemento prominente (Hanna e Remington, 1996) o l'unico indizio di codifica (Brady et al., 2013).

Il colore può quindi essere utilizzato per classificare e recuperare oggetti nella memoria a lungo termine indipendentemente dalla loro forma. Ancora più, gli attuali studi hanno dimostrato che forma e colore di un oggetto possono essere utilizzati dalla nostra mente con la stessa probabilità per indicizzare e recuperare immagini di oggetti nella memoria a lungo termine. Questa è una scoperta non banale poiché mostra che il colore, lungi dall'essere una caratteristica secondaria disponibile solo quando le informazioni sulla forma non sono sufficienti, viene utilizzato come una caratteristica importante per il recupero dalla memoria, anche quando la forma sarebbe sufficiente (Reppa et al., 2020).

Un'ultima osservazione riguarda la sequenza temporale con cui acquisiamo conoscenza. Il tempo necessario per elaborare diversi attributi varia; di conseguenza, vediamo alcuni attributi prima di altri (Zeki, 2005). Sebbene non sia ancora emerso un quadro completo del decorso temporale dei componenti che contribuiscono alla percezione della scena, la maggior parte dei lavori sperimentali distingue tra fasi iniziali (prima di 100 ms) e fasi finali (da 200 a 300 ms, prima che l'osservatore muova l'occhio) dell'analisi della scena (Oliva, 2013). Un'esposizione di soli 20-30 ms è sufficiente per sapere se la scena raffigura un luogo naturale o urbano (Greene e Oliva, 2009) (Joubert et al., 2007). Comunque, il colore è percepito prima della forma, la forma prima del movimento: l'intervallo tra la percezione del colore e il movimento è di circa 60-80 ms. Ne consegue che c'è un'asincronia percettiva e una gerarchia nella percezione visiva. Poiché percepire un attributo equivale a diventarne consapevoli, ne consegue che diventiamo consapevoli di attributi diversi in momenti diversi e che i diversi attributi hanno una gerarchia di importanza. Il colore è tra i primi e quindi tra i più importanti, per questo è necessario sia accuratamente considerato nel processo progettuale urbano per migliorare la percezione dello spazio urbano.

Vari studi hanno mostrato poi (O'Connor, 2006) come la risposta complessiva all'osservazione dell'ambiente costruito coinvolga giudizi cognitivi sugli attributi della costruzione, sulle reazioni emotive e sulla valutazione affettiva in termini di significati connotativi che gli attributi dell'edificio possono trasmettere (Nasar, 1994) (Stamps, 2000). Hershberger (1992) indica forme, colori e configurazione spaziale dell'ambiente costruito come gli elementi principali che influenzano questa risposta estetica complessiva.

Un uso chiaro dei colori permette alla città di mostrare un aspetto non confuso, capace di portare piacere, facilità d'uso, comfort ed equilibrio ai cittadini. I colori fin dal lontano passato, oltre a decorare edifici, sono stati utilizzati per veicolare messaggi e come strumento per preservare l'identità di una città. I colori possono rafforzare gli aspetti visivi e simbolici del paesaggio urbano e creare un'atmosfera desiderabile e piacevole.

Un corretto uso dei colori negli spazi urbani poi aiuta i cittadini a trovare e localizzare facilmente ciò che cercano; a identificare servizi come fermate degli autobus, apparecchiature elettroniche, depositi per i rifiuti solidi e parcheggi. Poiché le teorie sull'armonia del colore e sul contrasto hanno dimostrato come dimensioni e proporzioni siano uno dei fattori principali che influenzano la percezione visiva e l'identificazione di un colore è chiaro come ogni analisi colorimetrica di un dato ambiente sia un lavoro multiscala. Per questo in letteratura (Moughtin et al., 1999) di solito sono individuate tre scale, quella della città o del quartiere, quella del vicinato (strada o piazza) e quella dell'edificio coi suoi dettagli. In un senso geografico, i colori delle diverse componenti strutturali risultano in identità diverse alle diverse scale a causa della diversa scala dell'ambiente costruito. Ad esempio, l'identità cromatica di un singolo edificio può avere un impatto su una strada, tuttavia potrebbe non avere necessariamente un impatto sull'intero quartiere. In una città, è assai improbabile poter rappresentare il paesaggio cromatico tramite un singolo colore. In questo processo multiscala il colore potenzialmente può creare un'identità riconoscibile per gli elementi appartenenti alle diverse scale dell'ambiente urbano e per questo va non solo letto, ma anche progettato multiscalarmente, seguendo il modo tipico della progettazione urbana che opera tramite varie scale spaziali piuttosto che su una specifica (Carmona et al., 2003, p.6).

Lo scritto si inserisce in questo contesto per ripercorrere i temi del progetto del colore alla scala urbana nei suoi riferimenti culturali, in rapporto ai problemi e alle occasioni della contemporaneità, affrontandone sia la dimensione creativa, sia la dimensione tecnica, sia la dimensione normativa, soprattutto in riferimento alla conservazione dell'edilizia antica.

Nonostante il tema sia consolidato, come sono consolidate le tecniche di analisi e le soluzioni, tuttavia, forse proprio per questa solidità dell'impianto di base, la ricerca e l'innovazione verso la soluzione di problemi legati al colore e alla sua presenza nella nostra scena urbana quotidiana, sembrano negli ultimi anni essersi fermati, così come limitato è l'utilizzo dei portati delle neuroscienze e delle tecnologie informatiche.

La possibilità che queste ultime offrono di indagini più accurate sui contesti e la loro conoscenza con possibilità di riuso come materiale per il progetto,

lo stesso apparato normativo appaiono essere più uno stereotipo che uno strumento effettivo per progettare ambienti più appropriati alla nostra vita quotidiana e più capaci di essere strumento di esperienza capace di suscitare vive emozioni nell'utente della città. In questa direzione il capitolo mira a fornire una rilettura critica degli elementi-chiave dell'analisi e del progetto del colore alla scala urbana più che una trattazione esaustiva, al fine di cercare di illustrare gli elementi-chiave che possono riproporre il colore come elemento fondamentale del sistema città.

Particolare attenzione, quindi, è rivolta ad una analisi delle ipotesi di lavoro, ad una lettura ragionata del modo in cui è stato utilizzato il colore nell'ambiente urbano e nella composizione delle facciate degli edifici nei secoli, al fine di contestualizzare, appunto, le ipotesi di lavoro odierno.

Una seconda chiave di analisi illustrata nello scritto è data dal riesame del modo in cui il colore è stato utilizzato in funzione degli elementi costituenti l'architettura: volumi, superfici, materiali, interazione luce-superficie.

Infine, la parte metodologica è chiusa esponendo un approccio sistematico all'analisi dell'*urban color* e alla sua mappatura dalla scala dell'intero organismo urbano fino a quella della scala dell'edificio passando per la scala dell'isolato e del fronte stradale edificato.

Lo scritto si concentra poi sulle tecniche di analisi dei colori esistenti passando criticamente in rassegna metodi, dispositivi, tipi di output e strumenti di analisi. In particolare, sono descritte non solo le tecniche per acquisire, riprodurre, visualizzare e classificare il colore per via analogica e per via digitale, ma sono illustrati problemi e soluzioni relativi alle filiere basate sulla colorimetria (Oleari, 1998) per produrre e comunicare il progetto del colore alla scala urbana e dell'edificio.

Ampio spazio è dedicato ai metodi in cui l'acquisizione e riproduzione del colore è proposta utilizzando tecniche a base tridimensionale (cioè modelli digitali 3D) in quanto sistema capace di superare molte delle difficoltà dei metodi basati sulla acquisizione e riproduzione del colore 'isolato' dal contesto o bidimensionali come gli aspetti soggettivi della percezione visiva, le caratteristiche oggettive relative alle fonti di illuminazione e il modo in cui si guarda qualcosa. Il rilievo del colore alla scala urbana e dell'architettura, infatti, fa solitamente riferimento a metodi che non sono in grado di garantire la corretta percezione del colore su un monitor RGB o la sua fedele riproduzione su un supporto di stampa, e di assicurare un giusto controllo del colore su una superficie ampia, e dal colore non uniforme.

Infine, il sistema normativo di riferimento è narrato richiamando la sua storia in quanto metodo per spiegarne ragioni, pregi e limiti.

2. Il colore della città nel corso dei secoli

Nei contesti urbani, il concetto di colore è stato tradizionalmente considerato in termini di definizione delle tavolozze dei colori impiegati nella realizzazione degli edifici. In particolare, il colore prevalente, quello della facciata è uno dei numerosi elementi che possono contribuire a un senso di 'luogo' (Porter, 1997, p. 23), a cui fa eco l'affermazione di Lynch (1960) secondo il quale sono la forma, il colore e la disposizione degli elementi degli ambienti costruiti e naturali che contribuiscono alla 'immaginabilità' di un ambiente particolare.

L'utilizzo del colore in architettura riguarda essenzialmente la qualità estetica di un edificio, in cui una tavolozza cromatica può essere utilizzata per evidenziare o mimetizzare un'intera forma costruita rispetto al contesto in cui è inserita, per esaltare gli elementi tettonici delle facciate o i dettagli, e per esprimere lo stile personale di un progettista o di un marchio.

Per questo l'uso del colore, con riferimento sia al luogo, sia alle tradizioni storiche e culturali, è un approccio seguito da diversi filoni culturali progettuali inerenti all'architettura urbana che si basa su una 'tradizione' cromatica del luogo.

Le rappresentazioni iconografiche delle città redatte nel corso dei secoli testimoniano come, indipendentemente dalle latitudini e dai periodi, le città siano state sempre caratterizzate da un 'panorama cromatico' molto vario e ricco a partire, quantomeno, dal Medioevo.

Le prime iconografie delle città non avevano l'obiettivo di rappresentarle fedelmente, e tantomeno i loro autori possedevano le conoscenze e le competenze adeguate a farlo. Come dimostrano le miniature, le principali opere a stampa pubblicate a partire dalla seconda metà del Cinquecento, ma in particolar modo i numerosissimi disegni originali risalenti a quel periodo vi era soprattutto la tendenza dominante di restituire una rappresentazione ideale e/o simbolica, e necessariamente semplificata, piuttosto che un'accurata resa spaziale.

Nella maggioranza dei casi tali iconografie rappresentavano un punto di vista soggettivo, dettato da predisposizioni personali o culturali; un approccio che ha a lungo prevalso sulla resa matematica e geometrica dello spazio, che si affermerà solo più tardi. In questo quadro il colore occupava generalmente un posto centrale.

Questo è particolarmente evidente nelle miniature, in cui questa rappresentazione colorata e simbolica non solo era dovuta a necessità rappresentative, ma soprattutto alla perdita di interesse da parte del Cristianesimo rispetto alla realtà percepita dai sensi a favore, invece, della

propensione e sviluppo di uno stile figurativo, dove ogni elemento acquista valore solo in quanto metafora del mondo trascendente.

Ne è un esempio la vista di Gerusalemme del 1455 ad opera di Jean Mielot su incarico di Filippo III di Borgogna, detto il Buono, che abbellisce la traduzione della *Descriptio Terrae Sanctae* realizzata dal monaco domenicano Burchard du Mont-Sion nel 1283 (figura 1). Nella parte superiore della miniatura Gerusalemme è vista da ovest, con in primo piano la Torre di David completa delle sue quattro torri angolari. Su una base stilizzata e convenzionale, l'artista sintetizza abilmente i dettagli più significativi, rappresentando all'interno delle mura i minareti, i campanili e le cupole dorate e blu delle chiese e delle moschee. La veduta soprattutto si caratterizza per l'azzurro e le sue sfumature, simbolo dello Spirito (azzurro del cielo, del vento, del soffio) con cui è colorata l'intera città; colore che si trova tutt'oggi in altre realtà e contesti contemporanei.

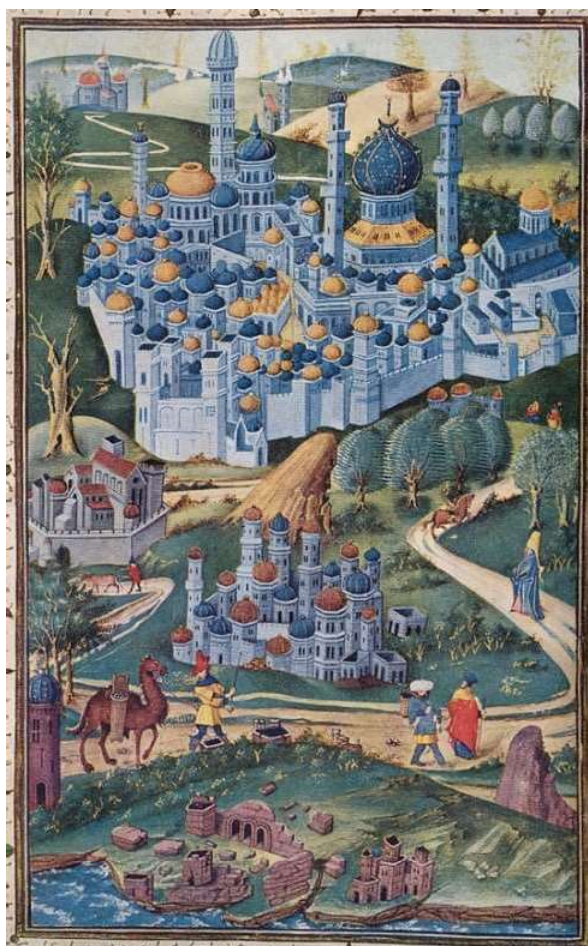


Figura 1. Jean Mielot, Vista della Terra Santa, miniatura, 1455.

Tra essi uno dei casi certamente rimarchevoli è quello della città di Jodhpur il cui colore blu si narra che sia associato a Dio Shiva, per il colore assunto dalla sua pelle dopo aver inghiottito un veleno (Halahala) al fine di salvare il pianeta. A causa della sacralità associata al blu, molti dei suoi seguaci che si erano stabiliti nella regione imbrattavano le loro case con questo colore, tanto Jodhpur fu presto soprannominata 'la Città Blu'.

Il blu caratterizza anche il centro storico di Casamassima, in Puglia, dove la leggenda narra che sia legato al 'Maphorion' (velo) dell'allora patrona del paese, la Madonna di Costantinopoli, come ringraziamento per aver risparmiato l'abitato della città dalla peste che aveva colpito la vicina Bari e tutto l'entroterra a metà del 1600, o quello di Chefchouen, in Marocco, dove si dice che le case siano state dipinte di blu ad imitazione del colore di Dio e del cielo - allo stesso modo in cui è colorata Gerusalemme nella miniatura del 1400 - dai profughi ebrei giunti qui negli anni '30 del Novecento.

A Jaipur, sempre in India, è associato il colore rosa. Entro le mura del suo centro storico ogni edificio è di un colore 'rosa' terracotta, ottenuto tramite il colore della pietra arenaria utilizzata prevalentemente per la realizzazione nelle costruzioni, ma anche il colore che, simboleggiando l'accoglienza e l'ospitalità, il Maharaja Sawai Ram Singh impose per l'intera città come strategia estrema per impressionare il principe del Galles Alberto in occasione della visita alla città, durante il suo tour in India del 1876.



Figura 2. Matrakçı Nasuh, Halep (dett. sx), Bargzin (dx), miniatura XVI sec.

Anche le testimonianze provenienti dal mondo islamico di poco posteriori alla vista di Mielot ci restituiscono immagini di città che, pur costituendo un documento storico, riportano comunque un modo di vedere luoghi e edifici simbolico e a colori. Le miniature di città come Bitlis o Dargzin, raffigurate da Matrakçı Nasuh nel XVI secolo, riportano emergenze e monumenti rilevanti, come castelli o moschee, accanto ad esempi di case, tutte vivacemente colorate (figura 2).

Nello stesso periodo di queste vedute arabe, in Europa vedono la luce i due primi atlanti a stampa: il *Theatrum Orbis Terrarum* di Abramo Ortelio pubblicato nel 1570 ad Anversa da Gilles Coppens de Diest e il *Civitates orbis terrarum*, edito da Georg Braun, canonico della cattedrale di Colonia, a partire dal 1572. Quest'ultimo, in gran parte inciso da Franz Hogenberg, conteneva 546 prospettive, vedute a volo d'uccello e viste cartografiche di città di tutto il mondo (figura 3).

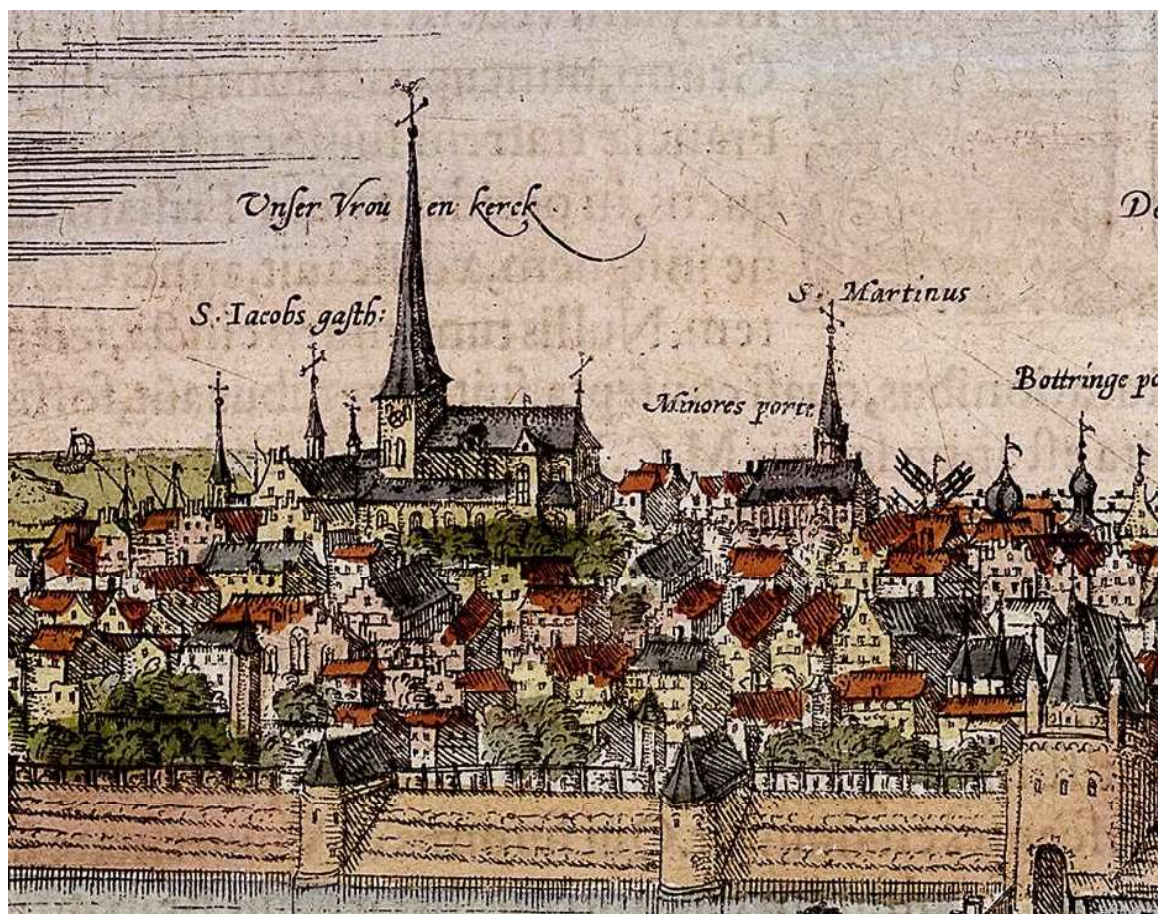


Figura 3. Georg Braun and Frans Hogenberg, Groningen – Groninga, opulenta, populosa, et valide contra hostiles insultus munita Phrisie urbs, ..., 1575, (dett.).

Le vedute delle *Civitates* fornirono una visione unica e completa della vita urbana all'inizio del XVI secolo, risaltando, comunque, per l'attenzione posta alla rappresentazione fedele del territorio e del paesaggio, e per il potere di osservazione e la raffinatezza interpretativa che le caratterizzava. Le tavole colorate, per quanto riguarda i dettagli delle viste prospettiche delle città, riportano con rapide pennellate principalmente indicazioni relative ai tetti – gli elementi maggiormente visibili – e solo in alcuni casi (come, ad esempio, per Groningen) anche indicazioni cromatiche, non sappiamo quanto fedeli, relative agli scorci delle facciate degli edifici che sporgono oltre le mura. Nella maggior parte degli altri casi, invece, queste sono lasciate bianche.

Negli stessi anni in cui vengono pubblicati questi atlanti acromatici nel paramento perimetrale degli edifici, si andò affermando in molte città, soprattutto nel nord Italia, come Genova, Venezia, Padova, Bergamo o Verona, l'uso di decorare le facciate degli edifici principali o, in molti casi, anche delle case più modeste con intonaco affrescato o graffito tanto da ricevere l'appellativo di 'pictae', ovvero dipinte, un'accentuazione della tradizione che voleva già da tempo gli edifici dotati di una loro cromaticità come parte esplicita del loro sussistere (Falzone, 2008).

In tal senso, una testimonianza storica di come fosse una città già nella prima metà del Trecento è offerta da una straordinaria testimonianza iconografica, l'affresco raffigurante *Gli effetti del Buon Governo*, realizzato da Ambrogio Lorenzetti all'interno del Palazzo Pubblico di Siena nel 1338-1339 (figura 4). Il dipinto restituisce la Siena trecentesca come un panorama cromatico piuttosto variegato che comprende il bianco, il grigio e varie sfumature di rosso e rosa. L'individuazione delle reali finiture delle facciate è comunque problematica, nonostante la qualità dell'affresco: le case bianche è probabile che siano state semplicemente imbiancate a calce, mentre gli edifici rossi (come testimoniato anche dalle mura della città) si può ipotizzare che abbiano i muri a vista, oppure, come quelli grigi, che abbiano uno strato di intonaco dipinto a imitazione della pietra naturale. All'interno di questo variegato panorama si scorge però una loggia che, al di sotto dell'ampia copertura di protezione, presenta un ricco apparato di motivi geometrici con elementi polilobati, inscritti all'interno di rombi e no, tutti vivamente colorati.

Quella rappresentata da *Gli effetti del Buon Governo* è una tipologia di decorazioni delle facciate di fatto molto comune in numerose città italiane e databile tra il XIII secolo e la prima metà del XVI secolo.

A causa del naturale degrado, al passare del tempo e ai mutamenti del gusto molte di queste testimonianze sono andate naturalmente perdute; non più di

moda nel corso dei secoli si è provveduto al loro occultamento o alla loro distruzione.



Figura 4. Ambrogio Lorenzetti, *Allegoria ed Effetti del Buono e del Cattivo Governo* (dett.), Siena, Palazzo Pubblico di Siena, 1338-1339.

Tuttavia, alcuni lacerti sono sopravvissuti o sono stati riportati alla luce nel corso di lavori di restauro che hanno provveduto a una loro rivalutazione e al loro ripristino (figura 5).

A Bologna, per esempio, presso il Palazzo d'Accursio, sede attuale del Comune, della Biblioteca della Sala Borsa e di una delle collezioni comunali d'arte, sono ancora visibili frammenti di intonaco medievale con decorazioni e grandi fasce orizzontali rosse e bianche e nel vicino Palazzo Re Enzo motivi a losanghe nella fascia di coronamento, subito sotto lo sporto del tetto. A Trento le Case Cazuffi-Rella presentano importanti esempi di facciate affrescate con scene figurative inquadrare da parti architettoniche formate da colonne e marcapiani, risalenti al 1530 circa. Nella vicina Rovereto possiamo trovare alcune facciate decorate con un motivo a scacchiera rossa e bianca. A Spilimbergo (Pordenone) l'intonaco è affrescato con cubi prospettici bianchi, rossi e verdi databili probabilmente alla fine del Trecento o all'inizio del

Quattrocento. A Mantova, una casa in via Fratelli Bandiera presenta una decorazione della facciata databile alla fine del XV secolo, riportante un motivo di cerchi intrecciati scanditi da una parte architettonica formata da colonne e trabeazione dipinta a *trompe l'oeil*: un motivo tipico delle facciate rinascimentali di Mantova e chiaramente ispirato alla decorazione della Camera degli Sposi di Palazzo Te affrescata da Mantegna tra il 1465 e il 1474.

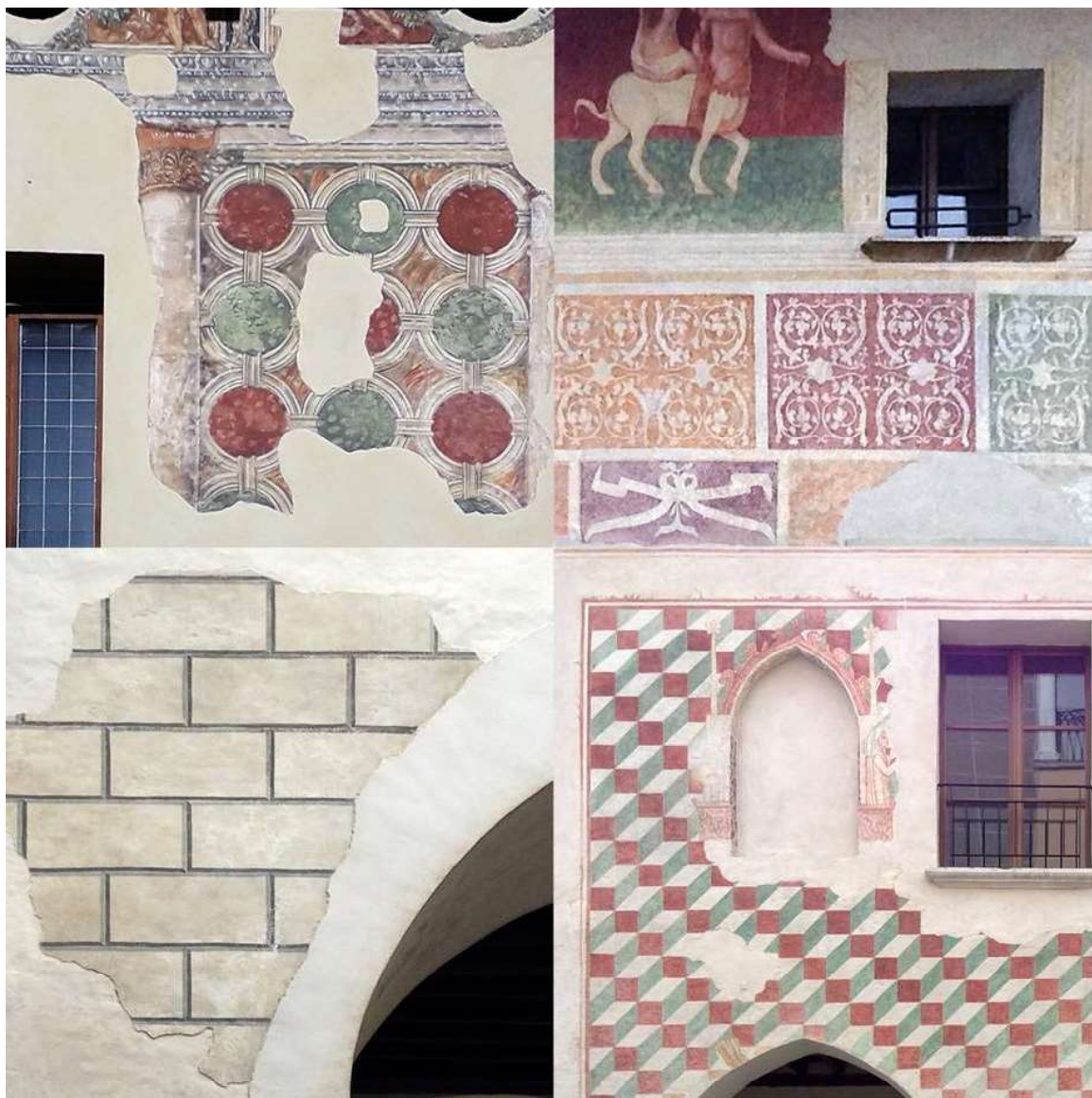


Figura 5. Collage di dettagli di facciate “pictae”: Mantova (in alto a sinistra); Verona (in basso a sinistra); Spilimbergo (Udine) (in alto e in basso a destra).

In epoca rinascimentale una più puntuale e precisa idea di quali siano stati i principi e gli ideali che hanno conformato in quei secoli il rapporto tra colore e città è possibile averla dai tre famosi dipinti conosciuti come *La città ideale* o ‘pannelli’ di Baltimora, Urbino e Berlino. In essi sono rappresentati, in una

prospettiva lineare centrale, i grandi spazi urbani di una veduta architettonica (figura 6). Questi dipinti ci mostrano l'immagine della città, basata sui principi dell'umanesimo e dell'architettura che trovarono la loro fonte di ispirazione nel classicismo, che, a partire dal XV secolo, si affermò in gran parte dell'Europa. I colori degli edifici civili sono scelti a imitazione dei materiali da costruzione naturali (calcare, arenaria, ecc.); le differenze cromatiche tra la cosiddetta 'superficie zero' della facciata e gli elementi architettonici (lesene, cornici, archi, ecc.) sono utilizzate per evidenziare le regole che guidano la composizione della facciata del progetto.



Figura 6. La città ideale rinascimentale, dettagli. Tavola di Urbino (a sinistra); Tavola di Baltimora (al centro); Tavola di Berlino (a destra).

Alcuni principi di base si mantengono inalterati nell'epoca successiva, ma una forte innovazione segna l'architettura barocca. Il suo stile altamente decorativo e teatrale, apparso in Italia all'inizio del XVII secolo e gradualmente diffusosi in tutta Europa, fu introdotto originariamente dalla Chiesa cattolica, in particolare dai gesuiti, come mezzo per combattere la Riforma e la chiesa protestante attraverso il ricorso a una nuova architettura che avesse le capacità di ispirare sorpresa e stupore.

A causa delle idee di Calvino, e in particolare di Zwingli in Svizzera, infatti il colore venne visto come una distrazione da Dio, e così tutte le chiese protestanti furono sistematicamente private della loro 'sensualità' cattolica e dell'eccesso, e dipinte di bianco all'interno.

Nel periodo barocco i caratteri stilistici, il linguaggio che aveva caratterizzato l'architettura del Rinascimento assume un carattere nuovo e originale, non solo nelle forme dei volumi e delle decorazioni che si arricchiscono e diventano sempre più elaborate, ma anche nell'uso del colore, che si allontana da quei vincoli derivanti dalla necessità di descrivere la 'verità' dei materiali da costruzione per assumere una valenza più scenografica e drammatica, ma di nuovo e soprattutto simbolica.

Oltre all'architettura che caratterizzò le città italiane in quel periodo, due edifici costituiscono riferimenti emblematici, ancora oggi, di quello che fu l'impiego del colore nella più elevata forma di rappresentazione del potere: il castello di Schönbrunn a Vienna, con il 'giallo di Schönbrunn' con il quale è identificata quella struttura cromatica che regola, ormai da secoli, il sistema di tinteggiatura adottato sulla facciata del castello, e il palazzo dell'Ermitage a San Pietroburgo dove le facciate del palazzo, dopo aver cambiato più volte nel corso dei secoli lo schema dei colori, sono oggi dipinte con ossido di cromo con l'aggiunta di pigmento smeraldo, le colonne, le cornici, le aste interfalda e le cornici delle finestre sono bianche, mentre le decorazione a stucco, i cartigli e i capitelli sono tinteggiati di ocre.

Nei secoli che seguono, e in particolare a partire dall'inizio dell'Ottocento, parallelamente alla nascita dei piani urbani si adottano dei veri e propri piani del colore che miravano a ripristinare il colore delle facciate su scala cittadina con riferimento ad un prototipo storico, come ad esempio quello del periodo barocco, dando luogo a una uniformità del colore architettonico secondo un sistema coordinato. Di essi certamente uno dei più significativi è il piano colore elaborato dal Consiglio degli Edili per la città di Torino.

Cambiamenti significativi si hanno nei primi decenni del Novecento quando la pittura affianca e stimola il rinnovamento dell'architettura, trovando concreta affermazione nei movimenti (o -ismi) astratto-figurativi, quali il cubismo con i suoi derivati, il purismo e il neoplasticismo, il costruttivismo, l'espressionismo e il futurismo. Ma fu con la progressiva industrializzazione del settore delle costruzioni edili e soprattutto con l'affermazione del Movimento Moderno, del Bauhaus e dell'International Style che le decorazioni della facciata, il cui stile e linguaggio erano cambiati più volte nel corso dei secoli per adeguarsi alle nuove mode che a poco a poco si erano succedute, caddero definitivamente in disuso sostituite dal bianco assoluto,

perché degradate, considerate obsolete o per mancanza di comprensione del loro valore storico e testimoniale.

L'uso del bianco era stato legato, per secoli, anche a ragioni climatiche o ambientali, potendo garantire una migliore protezione dall'irraggiamento solare e, con l'impiego della periodica tinteggiatura a calce, di sanificazione e protezione dagli insetti, come nel caso di molte città del bacino del Mediterraneo, quali Santorini in Grecia, o Ostuni nel Salento. Gli architetti del Movimento Moderno trovarono al bianco una nuova accezione ispirati dalle parole di Le Corbusier che in un articolo del 1918 sul purismo e cubismo, scritto con il pittore Amédée Ozenfant (Ozenfant e Le Corbusier, 1918), afferma: "L'idea di forma precede quella di colore. La forma è preminente, il colore è solo uno dei suoi accessori".

Nei principi del Movimento Moderno trovano quindi preminenza le forme geometriche pure e le loro molteplici combinazioni, ammantate di bianco. La più estesa applicazione di tali principi si trova nella Città Bianca di Tel Aviv, dal 2003 sito del Patrimonio Culturale Mondiale dell'UNESCO, un insieme di oltre 4.000 edifici costruiti secondo i dettami del Bauhaus a partire dagli anni '30 del secolo scorso (figura 7). Il riconoscimento dell'UNESCO della Città Bianca di Tel Aviv in quanto "eccezionale esempio di nuova pianificazione urbana e architettura all'inizio del XX secolo" ne riconosce l'adattamento unico delle tendenze delle architettoniche del Movimento Moderno alle tradizioni culturali, climatiche e locali della città.



Figura 7. Tel Aviv: Yehuda Lulka, Thermometre House, 1935-1936 (a sinistra); Zvee Rechter, The Engel House, 1933 (a destra).

Gli edifici residenziali e pubblici, all'interno di questa area, sono stati progettati da architetti in fuga dall'Europa o nati in Israele che hanno fatto

proprie le idee del Bauhaus e quelle del primo Le Corbusier, mettendo in pratica i principi dell'architettura moderna, con la loro enfasi sulla funzionalità e sui materiali da costruzione economici, che furono percepiti come ideali per la costruzione ex-novo di Tel Aviv.

Con le guerre, prima, e la ricostruzione, poi, le necessità e le priorità dell'azione politica, oltre che culturale, lasciano in secondo piano qualsiasi attenzione rivolta al tessuto consolidato, così come al valore e al ruolo del colore nel recupero di un'identità locale e del senso del luogo.

I lavori e le riflessioni di Brino, Lenclos e Spillmann, sviluppate a partire dagli anni '70 e raccolte e sistematizzate in collettanea nel volume di Porter e Mikellides (Porter e Mikellides, 2009), portano una rinnovata attenzione verso il colore - non più legato solo alla tinteggiatura - come protagonista nella definizione della scena urbana. Il lavoro di Lenclos, associato prima al regionalismo critico e poi alla geografia del colore porta a vedere "il colore architettonico, ora espresso nei materiali e nell'illuminazione piuttosto che nella pittura," come uno strumento in grado di creare "una nuova dialettica cromatica tra forma, spazio, struttura e luce" (Lenclos, 2009, p. 86), non più solo come una decorazione aggiuntiva, ma piuttosto come un costituente della luce che è influenzato dalle condizioni climatiche, dalla latitudine, dai cicli stagionali e dalle strutture superficiali.

Dal canto suo la gamma cromatica originale che Spillmann mette a punto per il quartiere di Kirchsteigfeld a Potsdam - realizzato tra il 1994 e il 1997 a partire da un masterplan di Rob Krier e Cristoph Kohl - fu ispirata dal concetto di 'unità nella diversità' che aveva l'obiettivo di consolidare le relazioni urbane, fornendo al contempo "una discriminazione a colori intensi tra spazi pubblici, semi-privati e privati" (Spillmann, 2009, p. 36). La novità della metodologia proposta da Spillmann fu sostenuta dall'integrazione degli aspetti funzionali, ambientali e sociali del progetto del colore nell'ambiente costruito contemporaneo.

Le città contemporanee si caratterizzano non solo per una complessa compresenza di nuovi elementi costruiti, apparsi in maniera densa e dalle forme nuove sulla scena urbana, ma anche innovativi per tipologia, come ad esempio cartelloni digitali di grandi dimensioni e installazioni di arte urbana, utilizzo di materiali innovativi che cambiano colore e altamente riflettenti, sviluppo di nuove tecnologie di illuminazione e introduzione di facciate multimediali.

Mentre le facciate mediatiche e le proiezioni di *video-mapping* sugli edifici rimangono limitate e circostanziate a particolari eventi o commemorazioni, cartelloni pubblicitari giganti appaiono sempre più spesso negli spazi

pubblici, - come a Times Square a New York - sulle facciate dei grattacieli e dei palazzi e persino sui tetti degli edifici storici, diventando parte integrante del panorama cittadino. Tuttavia, le immagini sature e tremolanti di un cartellone digitale possono sopraffare il colore proprio delle architetture, creare dissonanze cromatiche e influenzare le esperienze visive dei cittadini. Quando installati su edifici storici, questi pannelli possono compromettere il valore storico e culturale dello spazio pubblico o produrre associazioni simboliche indesiderate.

Fenomeni simili possono generare le facciate colorate seguendo tinte e colori espressione di un determinato marchio commerciale. Interi edifici – non solo commerciali - sono infatti quotidianamente dipinti con un colore correlato a un certo marchio con finalità pubblicitarie producendo conseguenze problematiche, senza considerare i potenziali effetti di questo approccio sull'aspetto e sull'estetica dell'area circostante.

Tutte queste esperienze sembrano la conseguenza di una perdita della cultura del rapporto da sempre esistente tra architettura e colore e l'effetto che per ricaduta questo produce sul contesto in cui gli edifici sono costruiti. Una migliore comprensione dei modi in cui i diversi strati di colore mutuamente si interfacciano nei contesti urbani contemporanei può aiutare architetti, progettisti urbani e pianificatori ad avere un approccio alternativo nel design del colore nell'ambiente e suggerire un modo più efficace di presentare i loro progetti ai committenti, agli stakeholder e alla comunità.

3. Colore e architettura

Come visto nei paragrafi precedenti, l'uso del colore in architettura ha avuto e ha, tuttora, tanti valori sintetizzabili elencando le forme attraverso cui esso è più ampiamente diffuso e utilizzato nel contesto contemporaneo, e con cui è necessario dialogare ogni volta che si interviene conservando o inserendo nuove architetture. Tali casi riguardano l'abbellimento delle facciate attraverso la riproduzione della natura, la colorazione fortemente cromatica come elemento di riconoscibilità e/o difesa dagli agenti atmosferici e ambientali, l'esaltazione del colore come stratagemma per creare un contrasto con l'atmosfera o l'ambiente circostante, o ancora come elemento celebrativo attraverso l'utilizzo di materiali preziosi colorati, quali ad esempio marmi, intarsi in mosaico, ecc.

Questi usi sono stati classificati nello spazio-tempo in vari modi, ma tutte le classificazioni comunque portano l'attenzione al binomio luce e colore come parametro di riferimento fondamentale.

Nelle fonti scritte, uno dei primi riferimenti al colore nell'architettura si trova nel trattato *De architectura* di Marco Vitruvio Pollio, l'architetto romano

vissuto al tempo di Augusto. Egli si occupa, principalmente, del colore dal punto di vista del suo impiego nella costruzione degli edifici, elencando e descrivendo da una parte i coloranti naturali, assieme al luogo dove possano essere trovati, e dall'altra i colori artificiali (intesi di nuovo come coloranti), descrivendo il modo di produrli.

Analogo è l'approccio di Leon Battista Alberti che, nel suo *De re aedificatoria* scritto nel 1450, riprendendo da Vitruvio, tratta del colore nel Libro VI semplicemente richiamando le sostanze coloranti o pitture "con le quali il muro può essere adornato". Nel Libro VII, Alberti poi collega il colore ai valori estetici dell'architettura, considerando solo gli aspetti geometrici, quali ad esempio le figure e le forme, la posizione o la congruenza delle parti, la proporzione e la composizione geometrica, senza analizzare gli altri aspetti dell'apparenza.

Nonostante per moltissimi secoli si sia creduto che i templi e le statue della classicità greca e romana fossero bianchi a costruire un'antichità ideale ammantata di candore, tuttavia la storia dell'architettura, della città e dell'arte dell'Occidente sono sempre state colorate. Semplicemente il colore è sbiadito con il tempo e gli elementi, oppure è stato volutamente rimosso e imbiancato per ragioni religiose o culturali.

Le statue greche e romane dell'antichità, pure ed eteree nel loro candore, sono state a lungo un'illusione. Così come i templi e grandi monumenti classici dell'architettura, come il Partenone, non sono mai state bianche bensì dipinte, con grande dettaglio e cura e con colori spesso sgargianti e dorati.

Su questo tema certamente la miglior argomentazione è fornita dal saggio di Fridell Anter (2005) sui colori del paesaggio urbano pompeiano. Ricomponendo un ampio insieme di fonti documentali - rapporti dei primi scavi, testi che descrivono i pigmenti usati all'epoca in cui fiorì Pompei, riproduzioni artistiche della città, modello archeologico esposto a Napoli, così come la sua ispezione in loco - Anter riesce a ricostruire, come pezzi di un puzzle, una rappresentazione coerente dell'uso del colore in quell'antica città romana.

Ma un uso estensivo del colore con ricche superfici pigmentate non appartiene solo all'antico.

Alcune testimonianze portano a ritenere plausibile che anche le cattedrali gotiche in Europa, fino all'affermazione della Riforma, fossero riccamente dipinte, internamente ed esternamente (Callet et al., 2010; Jennings, 2016).

Il colore della facciata è stato utilizzato come elemento strutturante lo stile architettonico negli edifici Art Déco o De Stijl dell'inizio del XX secolo. Le facciate altamente stilizzate degli edifici Art Déco spesso includono un'ampia

gamma di colori delle facciate sottolineati con l'impiego di luci al neon colorate.

Il movimento neoplasticista olandese, organizzato nel 1917 attorno alla rivista *De Stijl* e derivante dai dipinti astratti di Piet Mondrian, ha contribuito a creare una migliore consapevolezza sulla teoria e la pratica del colore, (Gage, 1993, ch. 14) introducendolo come elemento determinante dello spazio, in opposizione alla sua funzione puramente decorativa tradizionale. Tuttavia, questo movimento non ha prodotto risultati importanti nel campo dell'architettura e del design, ad eccezione di alcune opere di Theo van Doesburg, come il cabaret *Aubette*, e la casa *Schröder* di Rietveld in cui egli riuscì a realizzare una vera organizzazione spaziale del colore e dei piani, mentre gli altri continuarono a produrre trasposizioni bidimensionali degli elementi neoplasticisti dalla pittura all'architettura.

È solo poco più tardi che Le Corbusier introduce due funzioni comuni del colore ambientale. Una consiste nell'aiutare a fondere gli oggetti nel loro sfondo, e l'altra è nel permettere di attirare l'attenzione, attraverso il distacco che si verifica quando il colore è utilizzato in modo scultoreo per evidenziare le forme su uno sfondo neutro.

Come evidenziato in molti dei suoi primi edifici come *Villa Savoye* e *Villa Stein*, forma e gioco di luci sono centrali nel suo lavoro per definire i caratteri complessivi, ma per attirare l'attenzione su particolari dettagli è usato il colore. Le Corbusier ha suggerito, infatti, che "il colore ... non è un ornamento o una decorazione, ma un elemento organico dell'espressione architettonica" (Le Corbusier, 1953, citato in Caivano, 2006), dando seguito a questa affermazione in una serie di progetti, in cui in particolare l'uso del colore diviene giocoso nella facciata dell'*Unité d'Habitation*, un complesso di appartamenti a Marsiglia, o addirittura un esercizio neo-plasticista nel *Pavillon* a Zurigo del 1967, la sua ultima opera costruita.

Altri architetti dello scorso secolo come Luis Barragán hanno fatto uso del colore per creare una forte differenziazione visiva dell'oggetto architettonico rispetto al suo contesto, facendo uso di tinte ad alto contrasto capaci di emergere dal contesto come un colore scultoreo (Riggen Martinez, 1997). Allo stesso tempo il colore come forte elemento visivo permette di migliorare la rievocazione e identificare il senso del luogo.

Nell'immaginazione poetica di Luis Barragán il colore gioca un ruolo importante quanto la dimensione o lo spazio, permettendo di mantenere una struttura complessiva dei paramenti verticali minimalista con finestre piccole o schermate che permette di creare un'atmosfera confortevole in regioni - quelle in cui sono costruite le sue architetture - con cieli tersi e senza nuvole che richiedono aree ombreggiate per evitare la luce solare calda e intensa.

Pareti con trame ruvide e riflessi d'acqua accentuano l'impatto della intensa luce solare nei suoi edifici colorati. Questa strategia spaziale è evidente in molti dei progetti di Barragán, come la cappella delle Capuchinas Sacramentarias o la Casa Gilardi, dove minimizza qualsiasi vista diretta verso il cielo, o nella Cuadra San Cristobál, dove i colori vivaci della facciata riflettono il desiderio di Barragán di creare un senso di straordinario ma allo stesso tempo una combinazione di mistero e serenità, il carattere che egli stesso ha indicato di vitale importanza nelle sue opere, come ha spiegato nel suo discorso di accettazione del Pritzker Prize nel 1980. "Le strade colorate (messicane); l'umile maestà delle piazze dei villaggi (messicani)..." sono state le principali fonti della sua ispirazione, lasciando per tutta la sua carriera correre la sua immaginazione libera nelle haciendas e nei giardini del Messico, a ispirare i design ampi e colorati (Barragan, 1980). Come spiega Yutaka Saito "Così, il suo rosa proviene dalla bouganville, il suo colore rosso ruggine viene estratto dai fiori di tabachin e il suo viola chiaro è il colore dei fiori di jacaranda. Il blu è il colore del cielo e il giallo ocra quello della terra. Che rivelazione quando ho preso i fiori e controllato il coordinamento con gli edifici: combaciavano perfettamente" (Saito, 1994, p. 38).

Una forte reazione contro i principi del Movimento Moderno / Bauhaus venne, negli anni '70 e '80 del secolo scorso, da una serie di architetti interessati ai riferimenti alla storia e all'ambiente, oltre che all'applicazione del colore in architettura, che ha acquisito così un nuovo significato sotto gli orientamenti di quello che è conosciuto come Post Modernismo.

Al posto di scatole bianche, fredde, prive di vita e senso del luogo, invece di edifici minimali in acciaio e vetro apparsi disumani ad alcuni architetti e alla maggior parte degli utenti quotidiani, gli architetti Post Modern hanno offerto ai visitatori un nuovo linguaggio capace di offrire un senso di riconoscibilità e di radicamento, edifici caldi e invitanti. I post-modernisti attraverso l'uso di colori vibranti, presentando colonne più alte o più tozze, o rendendo astratte le forme tradizionali tramite l'uso di geometrie semplici, come un triangolo al posto di un frontone classico, riescono a aggiungere arguzia e fascino all'architettura. Oltre alle opere di Charles Moore, Robert Venturi, e Stanley Tigerman (negli Stati Uniti), Paolo Portoghesi e Aldo Rossi (in Italia) si distinguono in particolare quelle di Michael Graves che al posto del bianco usa colori vivaci, invece di forme astratte e senza ornamenti usa elementi classici come frontoni e colonne, rese in forme quasi caricaturali (come nel Team Disney Building in California del 1986), e in luogo del severo razionalismo di ispirazione Bauhaus usa umorismo e arguzia (come nel Denver Public Library a Denver del 1995).

In anni recenti negli interventi effettuati all'interno di città non storiche, il colore è sempre più utilizzato per far diventare gli edifici icone simboliche, riconoscibili e identificabili all'interno del paesaggio urbano in cui si inseriscono. Questo uso del colore è, ad esempio, tratto caratterizzante dell'architettura dello studio dB(A)rchitecture, come mostra il progetto per la realizzazione di una facciata che avvolge l'esistente Strand Arcade, situata nel vivace centro di Melbourne in Australia. Tra i loro lavori uno dei progetti più significativi e ambiziosi sempre per Melbourne è Pixel (figura 8).



Figura 8. dB(A)rchitecture, Pixel Building, Melbourne, Australia, 2010.

Situato in un importante contesto urbano presso l'ex birreria CUB, oltre a essere il primo edificio per uffici a emissioni zero in Australia, Pixel si caratterizza per una facciata complessa e colorata che avvolge i lati occidentale e settentrionale (esposti quindi al sole) dell'edificio, conferendogli la sua peculiare identità iconica. Tale effetto è ottenuto mediante un assemblaggio semplice ma complesso di pannelli colorati in materiale riciclato che offrono il massimo controllo della luce diurna, dell'ombra, delle viste e dell'abbagliamento, avvolgendo l'edificio senza soluzione di continuità a creare un'identità vibrante e unica.

In un altro progetto, sempre di dB(A), la risposta a un preciso brief esplora i temi del ritmo e della sequenza, del colore e della luce e come questi elementi si uniscono in modo olistico. La luce arcobaleno avvolge il nucleo centrale dell'edificio in un gesto singolare che esplora il ritmo e la sequenza; colore e luce. Il suo abbagliante spettacolo di colori, con una tavolozza che copre lo spettro visibile, è diventato un nuovo punto d'incontro all'interno del centro di Melbourne, oltre a ridefinire il ruolo e la funzione delle tende parasole, onnipresenti nelle strade della città.

La facciata Strand è stata progettata per creare un ritmo visivo dove le alette di vetro fabbricate su misura formano una facciata sequenziale che si estende su Lonsdale Street, Elizabeth Street, Little Bourke Street e Drivers Lane.

Nel corso dei secoli, le città storiche occidentali hanno mantenuto la loro fisionomia con un aspetto integrato nei confronti del loro ambiente, e, sebbene il risultato sia dovuto ad un'antropizzazione pianificata nel tempo, ciò avviene anche grazie all'uso costante di materiali da costruzione naturali legati a quel luogo, fino alla pittura e al corredo di abbellimenti effimeri, che è ciò che ha smesso di essere quando l'uomo ha creato la 'tinta' per coprire l'uso di materiali artificiali. Nelle città contemporanee questi legami si sono spesso spezzati, ma interventi di qualità e che utilizzano in maniera attenta e appropriata il colore come veicolo di riqualificazione dello spazio urbano continuano a esserci, nonostante le tecniche e i materiali impiegati trovino minori rapporti con la tradizione.

4. Analisi e mappatura del colore: dalla scala urbana alla scala dell'edificio

4.1 Generalità

L'analisi, mappatura e riproduzione del colore nell'ambiente urbano deve essere vista come un aspetto del più generale problema della mappatura e riproduzione dell'aspetto dei materiali delle superfici esterne degli organismi architettonici.

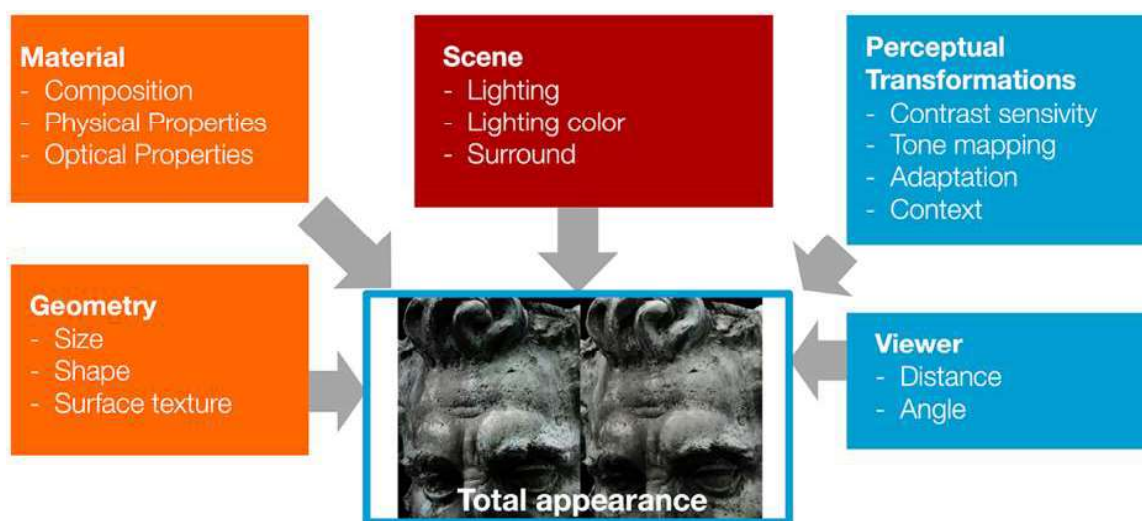


Figura 9. Gli elementi che compongono la 'total appearance'.

L'aspetto complessivo di ogni materiale è una combinazione dei suoi attributi cromatici (colore, declinato ad esempio in luminosità, tonalità e saturazione) e dei suoi attributi geometrici (come lucentezza, traslucenza, tessitura, forma) nel contesto in cui il materiale e l'oggetto a cui pertiene sono osservati.

Il modo in cui tutti questi parametri interagiscono è complesso; i parametri fisici relativi agli oggetti sono poi influenzati nella fase di percezione dalla risposta fisiologica del sistema visivo, ma anche dagli aspetti psicologici della comprensione umana, dalla cultura e dalla tradizione. Questa complessità ha fatto sì che non esista, ad oggi, alcuna forma descrittiva standardizzata dell'aspetto. È comune, comunque, la suddivisione in parametri oggettivi (forma, orientamento, scala, proprietà ottiche del materiale, colore, tessitura, comportamento alla riflessione, intensità e composizione spettrale dell'illuminazione) e parametri soggettivi (punto e direzione di vista, adattamento visivo, costanza del colore) che conduce alla definizione di 'total appearance' definita come la combinazione di "a description of the appearance of each element of a scene... with a personal interpretation of the total scene in term of its recognition and expectation" (Hutchings, 1999) (figura 9).

La quantificazione dell'apparenza di un oggetto o di un materiale è quindi una questione molto complicata (Hunter e Harold, 1987) e, per questo, ci si limita di solito alla sola misura delle proprietà ottiche: colore, lucentezza, traslucenza, texture.

L'apparenza poi è un fenomeno dipendente dalla scala. Per modellizzarla di solito si utilizzano le tipologie di interazione della luce descritte da (Westin et al., 1992) dove sono raggruppate per dimensione delle strutture geometriche in tre diversi livelli:

- la *macrostruttura* che definisce forma e geometria generali dell'oggetto cui il materiale pertiene;
- la *mesostruttura*, data da elementi ancora visibili ad occhio nudo, ma che di solito non sono considerati costitutivi della forma complessiva dell'oggetto. Queste strutture superficiali sono date ad esempio da piccole protuberanze e causano effetti come interriflessioni o autombreggiamento (figura 10);

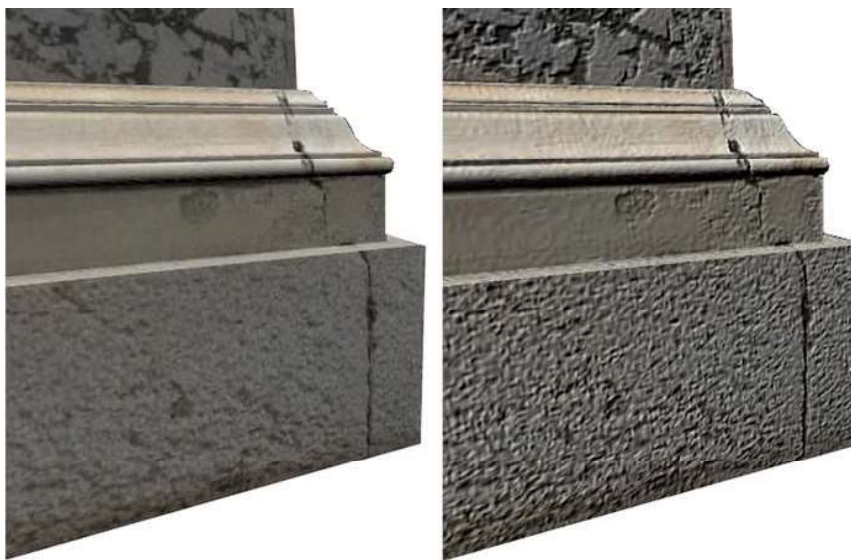


Figura 10. Un dettaglio architettonico renderizzato senza (a sinistra) e con (a destra) la mesostruttura.

- la *microstruttura* che definisce l'orientamento della riflessione della luce. È solitamente reputata formata da faccette microscopiche di ordini di grandezza inferiori alla risoluzione dell'occhio umano che, tuttavia, contribuiscono in modo significativo all'aspetto materiale, poiché possono occludere la luce o proiettare ombre o inter-riflessi l'una sull'altra (figura 11).

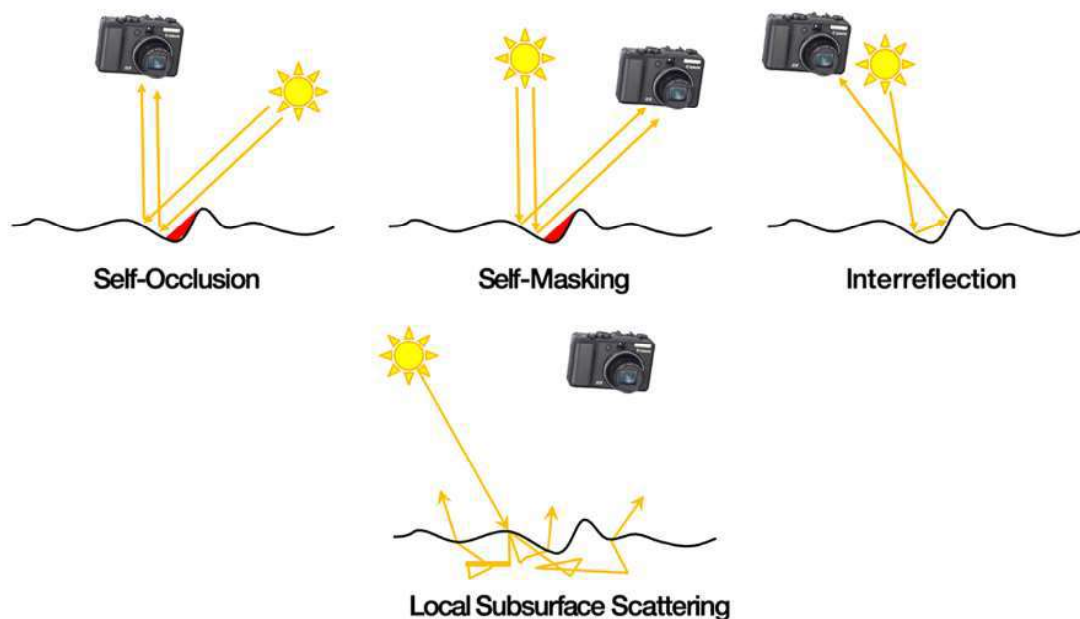


Figura 11. Gli effetti dati dalla microstruttura modellizzata come formata da microfacette.

La corretta modellizzazione di queste strutture è determinante per definire il comportamento dei materiali e quindi la loro percezione (Motoyoshi et al., 2007; Ludwig e Meyer, 2016).

In particolare, gli effetti alla microscala possono essere definiti dalla bidirectional reflectance distribution function (BRDF) (Nicodemus, 1965). Con il termine BRDF si intende una misura della distribuzione della riflettanza. È basata sulla relazione tra la luce incidente su una superficie e la luce riflessa da quella superficie nell'emisfero soprastante rispetto alla normale alla superficie, che è il vettore perpendicolare alla superficie in quel punto. Ogni direzione è parametrizzata da un angolo azimuth e da un angolo zenith e per questo la BRDF ha quattro dimensioni (Dorsey, Rushmeier e Sillion, 2007) (Weyrich et. al., 2008) (Guarnera et al., 2016) (figura 12).

Se la BRDF considera in aggiunta le coordinate di tessitura planare (x, y) si parla di una funzione di distribuzione della riflettanza bidirezionale variabile nello spazio (SVBRDF) capace di descrivere materiali opachi texturizzati o disomogenei.

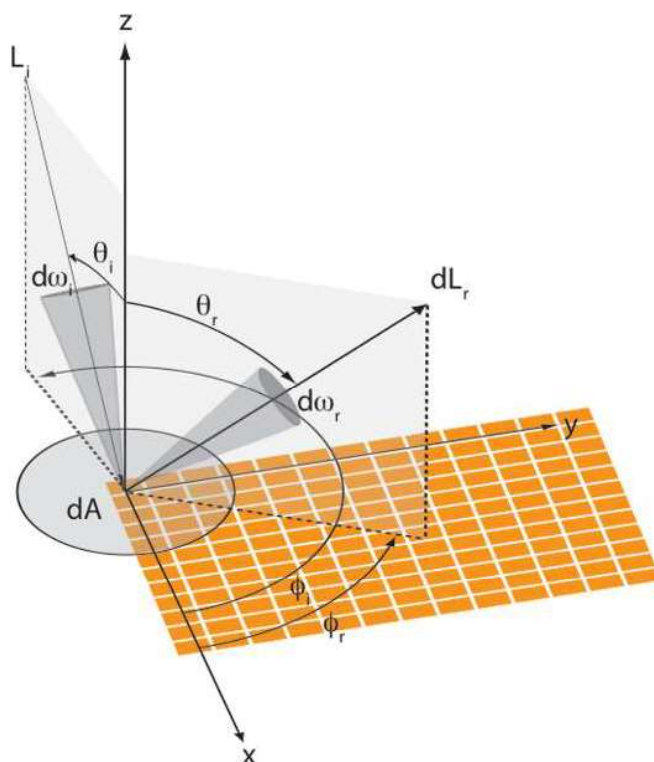


Figura 12. I parametri della BRDF.

Il ritrovamento corretto di tutti i parametri che costituiscono l'aspetto di un materiale è fondamentale per una restituzione fedele dell'artefatto. Basti pensare, ad esempio nel caso di un'apparecchiatura muraria, che una rappresentazione del colore approssimata, ma che mostra l'orditura dei mattoni, risulta all'occhio percettivamente più fedele di una che presenta maggiore fedeltà del colore ma priva delle inter-riflessioni date dalle fughe e dai laterizi. Tuttavia, non è un problema di soluzione semplice.

Ignorando le proprietà spettrali, la BRDF è una funzione dipendente da quattro variabili (come visto due angoli incidenti, due angoli di riflessione), quindi il numero di proprietà di riflettanza matematicamente possibili è praticamente infinito. Tuttavia, le leggi fisiche - come i principi di conservazione dell'energia e di reciprocità di Helmholtz - le limitano in qualche modo e questo ha permesso una buona approssimazione dei materiali reali utilizzando modelli analitici con un numero limitato di parametri facilmente implementabili computazionalmente (Cook, e Torrance, 1981) (Ward, 1992) (Torrance e Greenberg, 1997) (Ashikhmin e Shirley, 2000) (Ngan et al., 2005) (Ngan et al., 2006). La percezione della riflettanza superficiale può essere così formulata come il processo di stima di tali parametri a partire da immagini della superficie. Tuttavia, esattamente quale

parametrizzazione - e quindi quanti parametri - il sistema visivo umano utilizza rimane poco chiaro.

La valutazione completa di una BRDF variabile nello spazio, è realizzabile solitamente tramite tecniche complesse: sfruttando sorgenti di luce lineari in modo analitico (Aittala et al., 2013) oppure tramite un denso campionamento sia angolare sia spaziale (Torrance e Sparrow 1967) (Hsia e Richmond 1976) (Foo 1997) (Wang et al., 2008) (Dong et al. 2010). Il primo sistema è limitato dal potere rappresentativo dei modelli analitici e può sbagliare nel caratterizzare con precisione materiali anisotropi come un intonaco o un conglomerato faccia a vista. La seconda soluzione richiede spesso complicate configurazioni di acquisizione e la sua accuratezza è limitata dallo sforzo di acquisizione - la modellazione accurata della riflettanza superficiale speculare precisa richiede un campionamento molto denso che si traduce in Gigabyte di dati difficilmente gestibili.

In ogni caso questi metodi sono estremamente complessi per elementi estesi e articolati come nel caso di superfici di facciate. Per questo, in anni recenti sono state sviluppate tecniche di misura *image-based* poiché accelerano le misurazioni della riflettanza e riducono i costi trattandosi semplicemente di fare delle acquisizioni fotografiche (Marschner et al., 1999) (Han e Perlin 2003) (Francken et al., 2008) (Guarnera et al., 2012) (Riviere et al., 2016). In pratica vengono misurate la riflettanza diffusa, la lucentezza e la riflettanza speculare (figura 13).

Tuttavia, a questo punto, appare un nuovo grande problema da risolvere per definire l'aspetto. In generale la sua riproduzione può essere eseguita in due modi diversi:

1. un surrogato digitale che corrisponda strettamente all'originale e in cui ogni attributo può essere misurato e le metriche possano essere applicate in base a criteri quantitativi come dimensioni, forma, colore, peso, lucentezza e così via;
2. una rappresentazione virtuale percettivamente fedele in cui può non esservi una corrispondenza perfetta con l'originale in senso metrico.

Ci sono profonde implicazioni di questa dicotomia per la digitalizzazione e il rendering dei manufatti urbani.

Ai fini della documentazione, la precisione metrica è importante. Idealmente, l'insieme di dati digitali archiviati dovrebbe contenere tutte le informazioni su ogni aspetto dell'oggetto reale. La soluzione, in questo caso, è concettualmente facile ma oggi rimane un problema irrisolto: la replica digitale di un oggetto fisico.

D'altronde è vero che lo strumento principale che si utilizza è l'osservazione umana e quindi sono possibili semplificazioni per far coincidere la fedeltà

percettiva con l'affidabilità riproduttiva oggettiva. Tuttavia, i criteri per passare da metrico a percettivo, le procedure correlate e una chiara indicazione delle semplificazioni per gli operatori non sono definiti, standardizzati e condivisi.

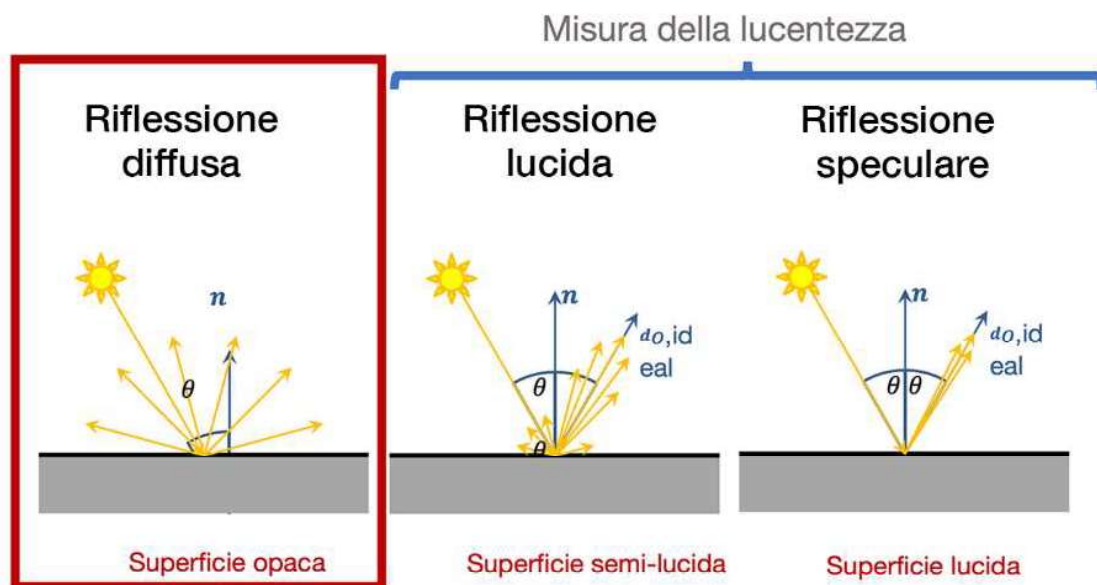


Figura 13. Semplificazione della BRDF, parametri usualmente misurati: riflessione diffusa, lucentezza, riflessione speculare.

Inoltre, il rilievo e la riproduzione dell'aspetto dell'ambiente urbano e delle facciate degli edifici è un'operazione difficile a causa di molti fattori oltre ai già citati aspetti soggettivi della percezione visiva: presenza di più fonti di illuminazione, effetti di illuminazione locale / globale, ombre dipendenti dal punto di vista e dalla sorgente luminosa, mesogeometria complessa (texture ruvide), parametri di riflessione microscopici variabili continuamente, occlusioni, conformazione geometrica degli edifici che può generare fenomeni di *color bleeding* e zone d'ombra, fenomeni di sporco e inquinamento. Ad esempio, una sequenza di sistemi voltati, come un portico può presentare un forte contrasto di luce tra le porzioni sottostanti i portici (cioè tutti gli spazi sotto la volta ad archi) e le parti esterne (cioè la facciata degli edifici), che può creare un disallineamento tra lo stesso colore in diverse aree (figura 14). Il colore può poi presentare tonalità diverse, poiché le parti interne ed esterne possono essere completamente diverse a causa dell' 'impatto ambientale'.

Per questo solitamente si opta per una semplice valutazione del colore a base colorimetrica.



Figura 14. Semplificazione della BRDF, parametri usualmente misurati: riflessione diffusa, lucentezza, riflessione speculare.

4.2 Metodi di valutazione del colore a base colorimetrica

La valutazione del colore a base colorimetrica si attua tramite una serie di tecniche tutte non-distruitive, riconducibili sostanzialmente a tre approcci principali (Santopuoli e Seccia, 2008):

- *Confronto visivo* tramite la comparazione tra la cromia in esame ed una serie di campioni standard, utilizzando atlanti o mazzette di colori. La comparazione può essere diretta o mediata tramite immagini fotografiche. I risultati di questa tecnica dipendono fortemente dall'esperienza e dalla capacità di osservazione visiva dell'esaminatore.
- *Misurazione strumentale ottica del colore* basata sull'elaborazione della misura della riflettanza diffusa dalla superficie. È una tecnica utilizzata principalmente entro lavori di restauro di edilizia storica e monumentale che, di solito, richiede la presenza di uno specialista esterno. I risultati che produce sono assai più accurati di quelli ottenibili con il *confronto visivo*, ma la tecnica non permette di coprire aree ampie, richiede innumerevoli letture in caso di colore non uniforme e risulta non facile la localizzazione dei punti rilevati.

Utilizzo di tecniche fotografiche per ottenere riproduzioni bidimensionali (semplici immagini della superficie o viste ortografiche colorate) oppure modelli digitali tridimensionali tramite sistemi fotogrammetrici o congiuntamente a tecniche di *active sensing* come il laser scanning. Queste tecniche sono capaci di ricoprire aree vaste, presentano bassi costi (basta una *digital camera* di qualità media), ma risultano potenzialmente capaci di elevata accuratezza. Quest'ultima è funzione del processo di acquisizione e della elaborazione dell'immagine acquisita.

4.3 Il metodo del confronto visivo

Il metodo del *confronto visivo* si basa sulla capacità dell'occhio umano di identificare l'analogia tra un colore della facciata o di un elemento di un edificio e quello di un campione tratto da una serie di colori di riferimento (figura 15). Questi ultimi sono dati da atlanti, libri o mazzette di colori organizzati secondo un ordinamento più o meno ampio. I limiti di questa impostazione stanno nel fatto che i campioni, accostati al colore da rilevare, andrebbero sempre osservati sotto un dato illuminante, con un adeguato sfondo neutro, rispettando una determinata geometria di illuminazione ed osservazione, e con ogni serie di confronti fatta dallo stesso operatore (Santopuoli, 2015).

Gli atlanti sono basati su sistemi di colori di vario tipo:

- *Sistemi di denominazione dei colori* in cui il colore è definito e specificato in base a un sistema di denominazione arbitrario. Ne sono esempi i sistemi Pantone e Trumatch.
- *Sistemi di miscelazione del colore* in cui il colore è definito in base alle proprietà di un dato sistema (ad esempio, RGB, CMYK, HSV, XYZ, ecc.).
- *Sistemi di aspetto del colore* in cui il colore è definito in base a vari attributi di aspetto (ad esempio, tonalità, luminosità (value), Chroma nel sistema Munsell; tonalità, nero, cromaticità nel sistema Natural Color System (NCS); differenze di colore nel sistema OSA UCS).
- *Sistemi di ordine del colore* che definiscono l'aspetto del colore secondo una disposizione ordinata per facilitare la denominazione e la comunicazione dei colori utilizzando variabili percettive. Sono organizzati in atlanti di campioni di colore piuttosto che attraverso relazioni matematiche con coordinate colorimetriche. Esistono svariati atlanti di questo tipo, ma sicuramente i più utilizzati sono il sistema Munsell (*Munsell Book of Color*), e il Natural Color System (NCS).

Il sistema Munsell è stato creato da Albert Munsell, un pittore di Boston che, nella prima decade del XX secolo, lo realizzò dipingendo ad acquarello ogni tassello (Munsell, 1905). Nel 1915 egli pubblicò il suo *The Munsell Atlas of Color*, il predecessore dell'odierno *Munsell Books of Color*. L'atlante dei colori mostrava campioni colorati con varie luminosità e saturazioni per dieci tonalità. Intorno al 1950, il numero di tonalità fu portato a quaranta (Cleland, 1921) (Kuehni, 2002).

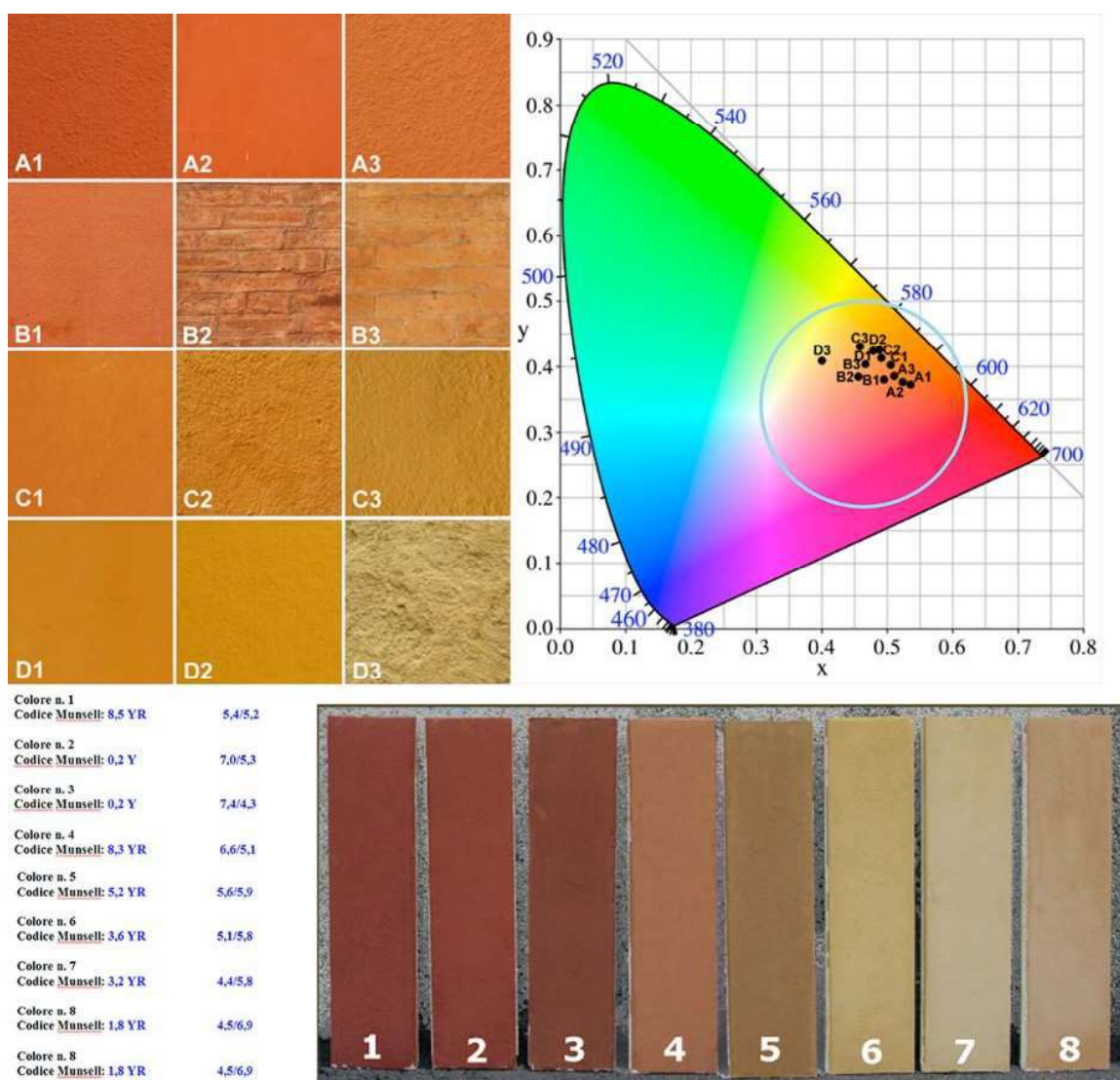


Figura 15. I colori delle facciate degli edifici del centro storico di Bologna: in alto rappresentazione nel diagramma CIE L*a*b*, in basso valutazione col sistema Munsell (parte in basso image courtesy Nicola Santopuoli).

Questo sistema definisce i colori in base a tre dimensioni indipendenti rappresentate da un sistema di coordinate cilindriche (Landa e Fairchild, 2005): tonalità (Hue), luminosità (Value o Lightness) e saturazione (Chroma) (figura 16). Munsell divise ogni cerchio orizzontale in cinque colori principali: R (red), Y (yellow), G (green), B (blue) e P (purple), e in altri cinque colori intermedi adiacenti ad essi. Ognuna di queste dieci suddivisioni è ulteriormente suddivisa in dieci sotto-suddivisioni in modo da dare alla tonalità uno di cento valori. La tonalità con un prefisso '10' alla fine di una zona corrisponde alla tonalità con un prefisso '0' della zona successiva. Ad esempio, la tonalità 10Y è la stessa di 0GY; in pratica la

notazione 10Y è quella preferita. I centri di ciascuna gamma di tonalità sono etichettati 5R, 5YR, 5Y, 5GY, 5G, 5BG, 5B, 5PB, 5P e 5RP. Lo zero è a 10RP (o 0R) e i numeri aumentano quando si va in senso antiorario. In pratica, le cartelle colori specificano convenzionalmente 40 tonalità, con incrementi di 2,5, procedendo ad esempio da 10R a 2,5YR.

Due colori, di uguale luminosità e saturazione, che si trovano opposti sulla circonferenza delle tonalità sono detti colori complementari e la loro mescolanza additiva genera il grigio della stessa luminosità.

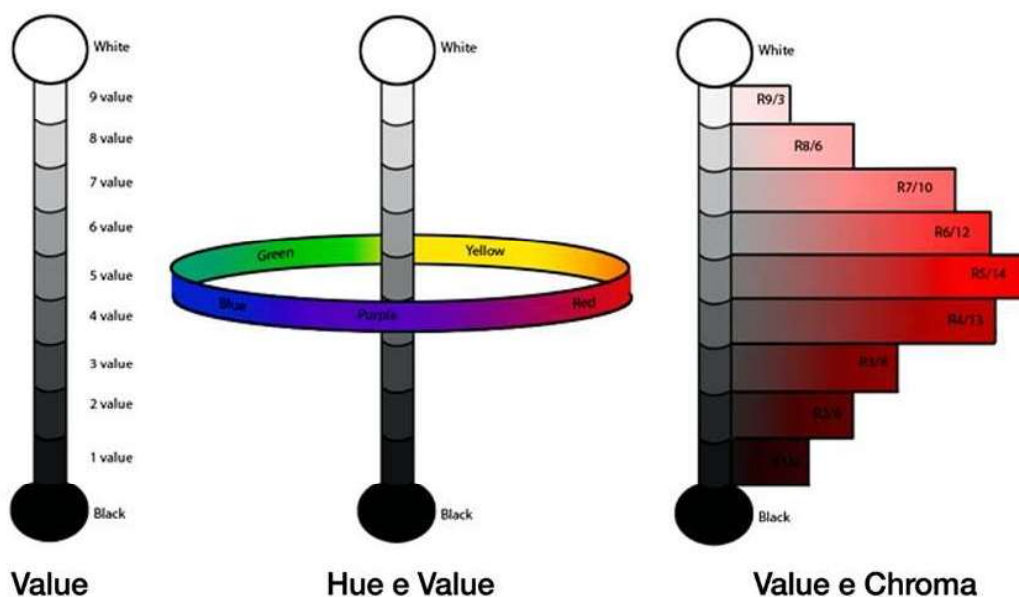


Figura 16. Munsell Book of Color: Hue, Value e Chroma.

La luminosità varia lungo l'asse verticale da 0 (corrispondente al nero) fino a 10 (corrispondente al bianco). tra questi due estremi si trovano tutte le tonalità di grigio. I colori rientrano nell'intervallo da 1 a 9.

La saturazione è misurata radialmente dal centro di ogni settore circolare e rappresenta il grado di 'purezza' del colore, dove valori più bassi corrispondono a colori più tenui e tendenti al grigio. Essa varia nell'intervallo tra 1 e 12, in cui un numero più alto corrisponde a un colore con una saturazione più alta. Nero, grigio e bianco hanno Chroma pari a 0. Per seguire la conformazione dell'occhio umano e la sua risposta agli stimoli cromatici, diversi toni hanno portato a diverse coordinate cromatiche massime. Ad esempio, i colori giallo chiari hanno un potenziale cromatico considerevolmente maggiore rispetto al viola chiaro. Ciò ha determinato una vasta gamma di possibili livelli di cromaticità, fino a trenta per alcune combinazioni di tonalità e valori.

Un colore è specificato elencando i tre numeri corrispondenti a tonalità, valore e cromaticità nell'ordine. Ad esempio, un ocra di media luminosità e abbastanza saturo sarebbe 10YR 5/6 con 10YR che significa il colore che separa la banda di tonalità gialla da quella rossa, 5/ significa valore medio (luminosità) e una croma di 6 (figura 17).

Un colore acromatico è specificato dalla sintassi N V /. Ad esempio, un grigio medio è specificato da 'N 5 /'.

Nei sistemi digitali i colori Munsell sono convertiti in un insieme di numeri 'HVC'. La V e la C sono uguali alla cromaticità e alla luminosità definiti analogamente. Il numero H (tonalità) viene convertito mappando gli anelli di tonalità in numeri compresi tra 0 e 100, dove sia 0 che 100 corrispondono a 10RP.

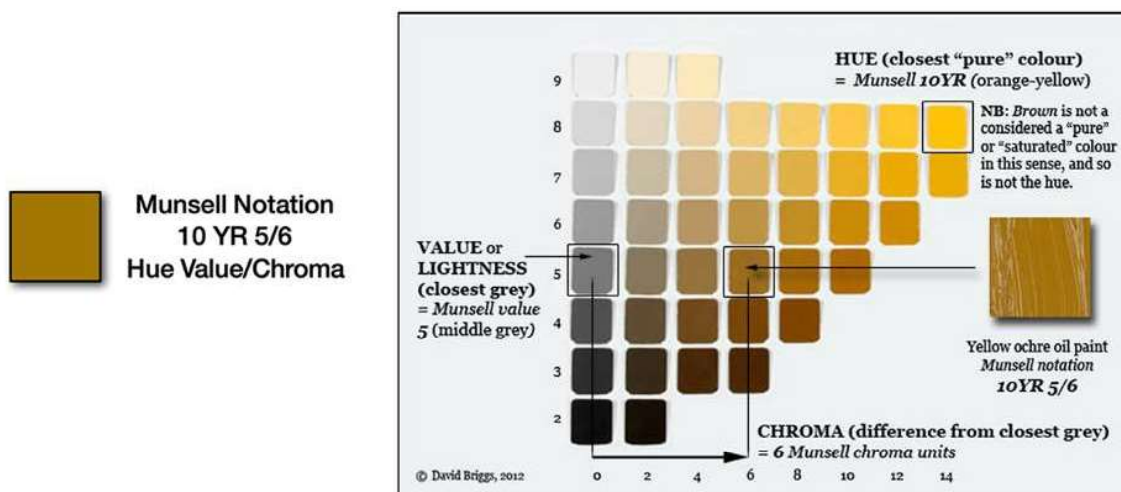


Figura 17. La notazione Munsell del colore giallo ocra scuro.

I *Munsell Books of Color* sono libri di campioni di colore che aiutano a selezionare e comunicare il colore (figura 18). Gli indici dei colori si basano sul sistema di ordine dei colori di Munsell e i colori sono organizzati come la popolare ruota dei colori, soluzione che semplifica la navigazione in ogni libro dei colori di Munsell. Il Munsell Book of Color ha tipicamente campioni con tonalità situate ogni 2,5 passi di tonalità. Ad esempio: 10RP (ovvero 0R), 2.5R, 5R, 7.5R e 10R per la gamma di tonalità del rosso. Per ogni parametro sono possibili valori frazionari: '5.2R 4.8 / 17.5' è una notazione Munsell valida.



Figura 18. Esempio di utilizzo del *Munsell Books of Color* per valutare i colori di una parete a finte lastre marmoree dell'atrio della casa di Sallustio a Pompei (image courtesy Patrizia Falzone).

Il Natural Colour System (NCS) è un sistema di ordine di colore percettivo proprietario che si basa sulla teoria dell'opponenza cromatica, sviluppata dal fisiologo tedesco Ewald Hering nella seconda metà dell'Ottocento. Il sistema si basa interamente sulla percezione umana dei colori e non sulla loro mescolanza ed è illustrato da un atlante a colori, commercializzato da NCS Color AB, che codifica le 1950 tonalità ufficiali del sistema. La versione attuale di NCS è stata sviluppata dallo Swedish Color Center Foundation a partire dal 1964 con un gruppo di ricerca composto da Anders Hård, Lars Sivik e Gunnar Tonnquist (Hård et al., 1996).

Il sistema NCS descrive ogni stimolo visivo in base al grado di somiglianza con sei colori, definiti elementari in quanto non associabili a livello percettivo ad alcun altro colore, come proposto dalla teoria dell'opponenza cromatica: bianco (W), nero (S), giallo (Y), rosso (R), blu (B) e verde (G). Le notazioni dei colori NCS si basano sulla somiglianza con questi sei colori elementari (figura 19). Gli ultimi quattro sono chiamati anche tonalità uniche. Tutti gli altri colori sono considerati percezioni composite, vale a dire esperienze che possono essere definite in termini di somiglianza con i sei colori elementari. Per esempio, un rosa saturo potrebbe essere definito dalla sua somiglianza visiva con il rosso, il blu, il bianco e il nero.

I colori NCS sono definiti da tre valori, espressi in percentuali, specificando il grado di oscurità (somiglianza visiva relativa al colore elementare nero),

cromaticità (somiglianza visiva relativa al colore ‘più forte’, più saturo pensabile), e la tonalità (relativa somiglianza a due dei colori elementari cromatici rossi, gialli, verdi e blu, espressa con due percentuali). Le notazioni NCS complete possono anche essere contrassegnate con una S, che indica che la versione corrente del colore normalizzato NCS è stata utilizzata per specificare il colore.

Graficamente, i sei colori elementari sono disposti in uno spazio tridimensionale dove è possibile rappresentare le relazioni tra tutti i colori in funzione della loro maggiore o minore somiglianza con i colori elementari stessi.

In questo modello tridimensionale, chiamato Spazio dei Colori NCS, tutti i colori immaginabili possono avere una specifica collocazione, e quindi una esatta notazione NCS.

Per rendere più facile la comprensione degli elementi che costituiscono la notazione NCS, il doppio cono è diviso in due modelli bidimensionali, il Cerchio dei Colori NCS e il Triangolo dei Colori NCS.

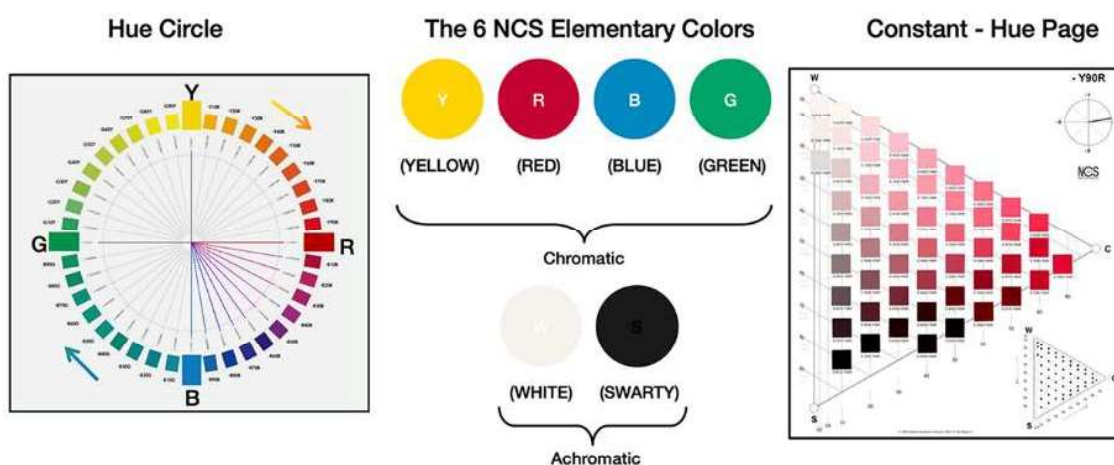


Figura 19. Natural Color System (NCS): elementi che definiscono i colori.

Il Cerchio dei Colori NCS è una sezione orizzontale che taglia nel mezzo lo Spazio dei Colori NCS; in tale cerchio i quattro colori elementari sono situati ai quattro punti cardinali. Spostandosi sul Cerchio dei Colori NCS si individuano i diversi piani di tinta (Hue) che sono definiti attraverso la loro somiglianza con uno o due colori elementari cromatici. Per individuare la tinta è necessario specificare i colori elementari coinvolti e indicare con un numero i relativi valori. La somma dei valori deve sempre dare 100. Il valore relativo al primo colore viene sottointeso. Ad esempio, R40B indica una tonalità con 40% di blu e 60% di rosso.

Il Triangolo dei Colori NCS è una sezione verticale dello spazio dei colori NCS. La base del triangolo è la scala dei grigi che va dal bianco (W) al nero (S), e il vertice del triangolo rappresenta la massima cromaticità (C) per un particolare piano di tinta. Sul Triangolo NCS si individua la nuance di un colore, ovvero il rapporto tra la sua parte cromatica e la relativa parte acromatica. La parte acromatica è data dalla somiglianza con il bianco (W) e con il nero (S) elementari. La Cromaticità (C) è invece un parametro unico. Nell'esempio in figura 20 lo stimolo ha un grado di nerezza (S) di 30, un grado di bianchezza (W) di 20 e un grado cromaticità (C) di 50 (30 + 20 + 50 = 100).

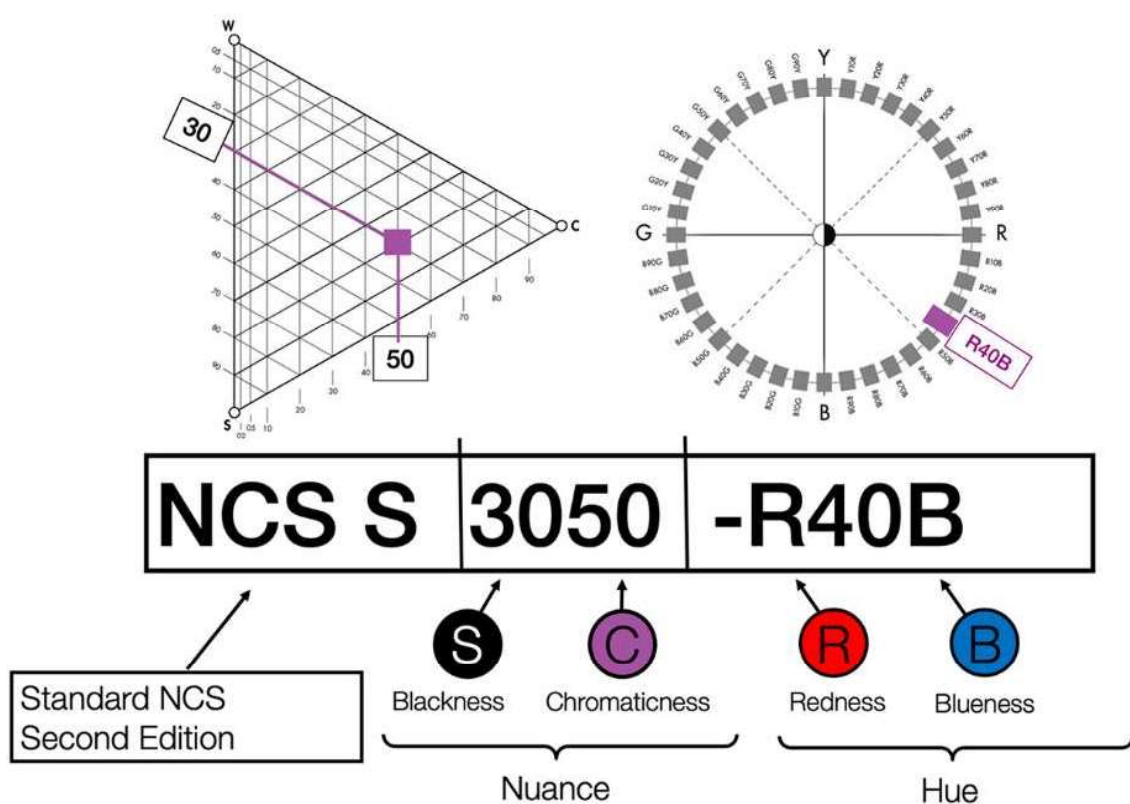


Figura 20. Esempio di notazione NCS.

Un sistema di colori sempre più utilizzato è il PANTONE creato da un'azienda del New Jersey negli Stati Uniti fondata nel 1962, quando la società - all'epoca una piccola impresa che produceva carte colore per aziende cosmetiche - fu acquistata da Lawrence Herbert, dipendente dal 1956. Herbert, subito dopo l'acquisto cambiò direzione all'azienda, rivolgendola al controllo del colore e così commercializzò il primo sistema di corrispondenza dei colori nel 1963. Alla base di questo sistema era l'intuizione che lo spettro dei colori è visto e interpretato in modo diverso da ciascuna persona e per questo occorreva un riferimento visivo unico. Fu così

che nacque il PANTONE Matching System (PMS), un libro di colori standard organizzato secondo un ventaglio. L'idea alla base del PMS è quella di consentire ai progettisti di 'abbinare il colore' a colori specifici quando un progetto entra nella fase di produzione, indipendentemente dall'attrezzatura utilizzata per produrre il colore. Per la sua semplicità il sistema è oggi largamente adottato dai grafici e dalle case di riproduzione e stampa. Negli ultimi cinquant'anni poi, PANTONE ha ampliato il suo concetto di sistema di corrispondenza del colore ad altri settori tra cui tecnologia digitale, tessile, plastica, architettura e interni per il settore *contract*.

Fondamentalmente il sistema mira a classificare i colori e 'tradurli' nel sistema di stampa a quadricromia CMYK (ciano, magenta, giallo e nero) semplicemente grazie a un codice. I colori, coi relativi codici, sono quindi inseriti in un catalogo, denominato in italiano 'mazzetta', dove è possibile 'sfogliarli' e selezionarli (figura 21).

A differenza del CMYK o del RGB, il codice pantone è un codice arbitrario composto da due campi, nel primo dei quali può essere presente una parola (ad esempio 'RED' -rosso-) o un numero di due cifre che si riferisce alla famiglia di appartenenza (es. 18 per la famiglia dei Rossi). Per i colori più comuni è disponibile anche una definizione più classica. Il sistema PANTONE è dato da 1144 colori di cui dal 2001 esiste anche la traduzione per la loro rappresentazione a schermo. I colori 'Screen-based' usano il sistema RGB.

Il prodotto principale dell'azienda sono le Guide Pantone, che consistono in tanti piccoli fogli di cartoncino di circa 15 × 5 cm, stampati su un lato con una serie di campioni di colore correlati e quindi rilegati in una 'mazzetta'. Sono disponibili diverse guide per supporti specifici (patinata, non patinata, ecc.).

I PANTONE solid Colours sono costituiti da una combinazione di 14 colori base, mentre i colori di quadricromia sono formati da soli 4 colori (CMYK), per questo solo il 60% dei colori solidi PANTONE può essere riprodotto adeguatamente utilizzando il sistema CMYK.



PMS 130 giallo



Figura 21. La mazzetta PANTONE e la notazione PANTONE per un colore giallo ocre chiaro.

Inoltre, i colori PANTONE sono solo un riferimento visivo e non costituiscono una scala di colore.

Un sistema di designazione dei colori molto diffuso nel campo edile è il RAL, in origine acronimo di Reichs-Ausschuß für Lieferbedingungen (Comitato del Reich Tedesco per termini e condizioni di vendita) un organismo che, nel 1927, ha inventato una collezione di quaranta colori denominati 'RAL 840'. RAL è un termine oggi usato per definire una scala di colori normalizzata usata principalmente nell'ambito delle vernici e dei rivestimenti sviluppata a partire dall'originale 'RAL 840' portando il numero di toni differenti a 210. Nel 1960 ai colori vennero dati nomi aggiuntivi per evitare confusione nel caso dell'utilizzo di sole cifre.

Oggi esistono due scale RAL Classic, la RAL 840-HR per colori opachi comprendente 213 colori, e la RAL 841-GL per colori brillanti comprendente 196 colori. Accanto ad esse nel 1993 è stato introdotto un nuovo sistema di colori, su misura per rispondere alle esigenze di architetti, designer ed inserzionisti: la collezione RAL Design che comprende 1.625 colori.

La classificazione RAL è costituita da 4 cifre, la prima delle quali identifica la gradazione di colore principale: ad esempio il giallo comprende i colori da RAL 1000 beige verdastro a RAL 1034 giallo pastello (figura 22).

Anche i RAL come i PANTONE sono organizzati in 'mazzette' e rappresentano un riferimento visivo senza formare scale di aspetto.

RAL 1032 Broom yellow



Figura 22. I colori gialli RAL e il colore ocre RAL 1032.

4.4 Misurazione strumentale ottica del colore

La misurazione strumentale ottica del colore consente di rilevare in modo oggettivo, riproducibile e quantitativamente accurato un colore, rilevando la riflettanza diffusa.

Le strumentazioni di più frequente utilizzo sono il colorimetro e lo spettrofotometro che, in modi diversi, analizzano la luce riflessa da una superficie.

I *colorimetri* sono strumenti pionieri della misurazione del colore. Si tratta di dispositivi tristimolo che utilizzano filtri rossi, verdi e blu per emulare la risposta dell'occhio umano alla luce e al colore. I colorimetri misurano la quantità di luce riflessa dal campione e fatta passare attraverso ciascuno dei filtri. Sono incapaci di separare il colore puro dall'aspetto di un oggetto e, per questo, forniscono essenzialmente le coordinate misurate otticamente come valori CIE L*a*b*. In pratica lavorano a contatto con un punto della superficie (in realtà, un'area circolare variabile di alcuni millimetri di diametro), di cui misura le tre coordinate cromatiche (ad esempio L*a*b*).

Gli *spettrofotometri* differiscono dai colorimetri in quanto misurano la riflettanza, la trasmittanza o l'assorbanza per varie lunghezze d'onda nello spettro. Sono quindi sensori sensibili a ogni lunghezza d'onda e presentano maggiore precisione rispetto all'uso di tre filtri come nei colorimetri.

Nel caso del rilievo del colore dei complessi urbani interessa la misura della riflettanza che gli spettrofotometri quantificano stimando il *Fattore di Riflettanza* definito come la riflettanza del campione ad una data lunghezza d'onda rispetto alla riflettanza del bianco diffuso perfetto misurata nelle stesse identiche condizioni:

$$RF(\lambda) = R(\lambda) (\text{campione}) / R(\lambda)(\text{riferimento})$$

comunemente espresso come percentuale. I valori di riflettanza ottenuti sono valori relativi e sono indipendenti dalla qualità e quantità della luce utilizzata per illuminare il campione. Lo spettro di riflettanza di un campione può essere utilizzato, in riferimento all'osservatore standard CIE e alla relativa distribuzione di energia spettrale di un illuminante, per calcolare i valori tristimolo CIE XYZ per quel campione sotto quell'illuminante.

Anche lo spettrofotometro lavora a contatto con un punto della superficie (in realtà, un'area circolare variabile di alcuni millimetri di diametro), di cui fornisce la curva (spettro) della riflettanza diffusa nella banda del visibile: da questa curva, con un procedimento di integrazione numerica eseguito automaticamente dal processore interno allo strumento, si deduce subito la misura delle coordinate cromatiche CIE XYZ (figura 23).

Da un punto di vista costruttivo le principali componenti di uno spettrofotometro sono:

- una sorgente luminosa
- un sistema ottico che definisce le condizioni geometriche per la misurazione

Model	CM-26dG	CM-26d	CM-25d	
Color	Illumination/ viewing system	di:8°, de:8° (complies to DIN5033-7, JIS Z 8722c, ISO7724/1, CIE No.15)		
	Integrating sphere	Ø 54mm		
	Wavelength range	360-740 nm	360-740 nm	400-700nm
	Measurement area	MAV: Ø8.0 mm	MAV: Ø8.0 mm	MAV : Ø8.0 mm
	Measurement time	approx.1sec (SCI or SCE + gloss measurement)	approx. 0.7sec (SCI or SCE)	approx. 0.7sec (SCI or SCE)
	Repeatability	Standard deviation within ΔE^*_{ab} 0.02	Standard deviation within ΔE^*_{ab} 0.02	Standard deviation within ΔE^*_{ab} 0.04
	Observer	2°, 10°		
	Illuminants	A, C, D50, D65, F2, F6, F7, F8, F10, F11, F12, ID50, ID65, User Illuminant		
	Color difference formulas	ΔE^*_{ab} (CIE1976), ΔE_{94} (CIE1994), ΔE_{00} (CIE2000), $\Delta E_{CMC}(l:c)$, Hunter ΔE , ΔE_{990} (DIN6172)		



Figura 23. Caratteristiche degli spettrofotometri portatili a sfera Minolta CM-25 e CM-26 a una o due aperture.

- un sistema di dispersione della luce
- un detettore
- un sistema di elaborazione del segnale che converte la luce in segnali analizzabili.

Tutto il sistema può essere organizzato secondo quattro possibili disposizioni geometriche specificate dalla CIE (figura 24):

- a. 0/45
- b. 45/0
- c. 0/Diffuse
- d. Diffuse/0.

In esse il primo numero è l'angolo di illuminazione relativo alla perpendicolare al piano del campione da misurare che quindi può essere un angolo di 0° o 45°. Il secondo numero è l'angolo di osservazione espresso ancora rispetto all'angolo normale del campione da misurare. Il termine *Diffuse* è utilizzato per indicare che l'illuminazione o la visione non sono direzionali ma omnidirezionali, situazione che viene generata solitamente utilizzando una sfera di integrazione. In pratica tutti gli strumenti utilizzano la disposizione Diffuse/0 (o 0/Diffuse) in cui l'illuminazione è in realtà posta non a 0° ma è più vicina a 6-8° rispetto al normale, per consentire l'inclusione di un'apertura all'angolo speculare all'interno della sfera di integrazione.

Le misurazioni con strumenti a sfera (che consiste essenzialmente in una sfera di Ulbricht) sono quindi designate come Speculare inclusa (SCI, SPIN) o Speculare esclusa (SCE, SPEX). In pratica la misurazione SCI include tutti

gli angoli di illuminazione ed è indipendente dalle proprietà di riflettanza della superficie (lucida o texturizzata) (figura 25).

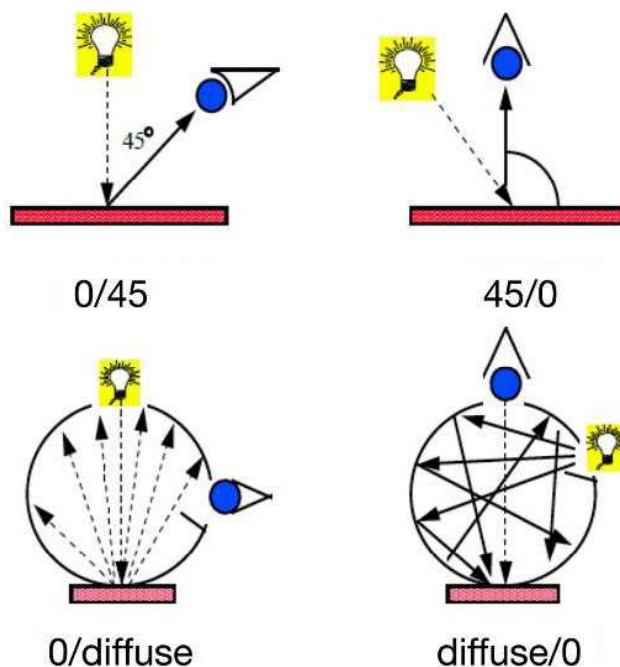


Figura 24. Le disposizioni geometriche di uno spettrofotometro secondo la CIE.

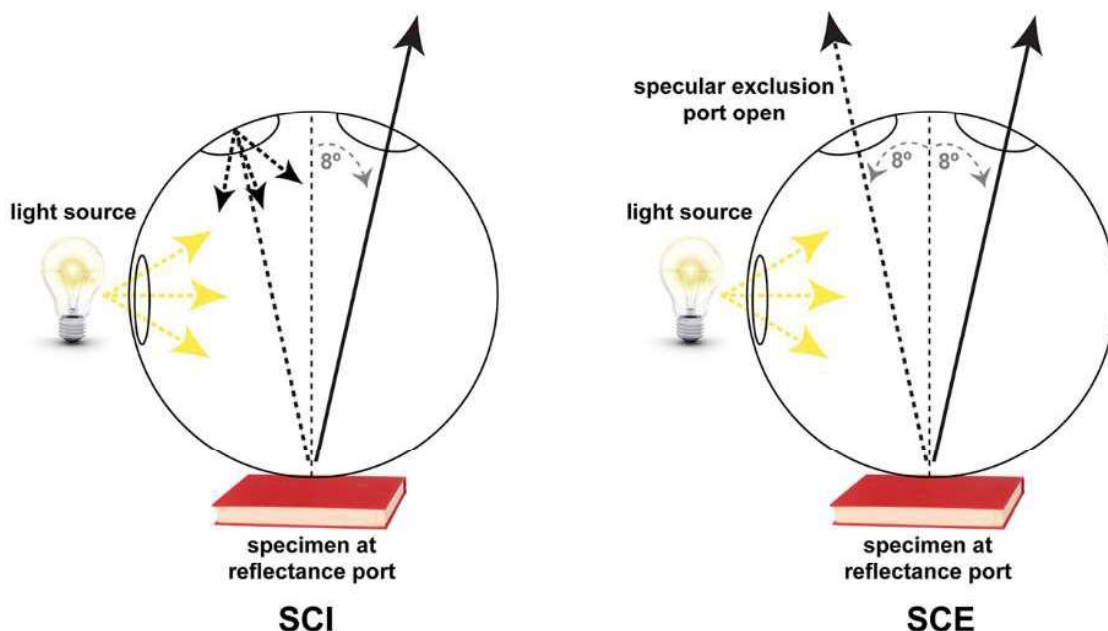


Figura 25. Misurazioni con spettrofotometri a sfera: riflessione speculare inclusa (SCI), riflessione speculare esclusa (SCE).

In essa il campione deve toccare la sfera ed è una misura del colore effettivo. La misurazione SCE, di contro, presenta buona correlazione con la valutazione visiva, caratterizza gli effetti della superficie del campione, può essere realizzata senza contatto e fornisce valori simili a quelli della configurazione 0/45. Operativamente il campione da misurare viene illuminato con luce bianca ed è calcolata la quantità di luce riflessa dal campione ad ogni intervallo di lunghezza d'onda. La misurazione viene eseguita facendo passare la luce riflessa attraverso un dispersore che suddivide la luce in intervalli di lunghezza d'onda differenti. In genere, i dati vengono misurati per 31 intervalli di lunghezza d'onda distanziati uno dall'altro di 10 nm: 400 nm, 410 nm, 420 nm, ..., 700 nm. Lo strumento è calibrato utilizzando una *patch* bianca la cui riflettanza, rispetto ad una perfetta superficie riflettente diffusa, è nota ad ogni lunghezza d'onda. Come accennato, lo svantaggio principale di queste tecniche strumentali è che poiché coprono una piccola area, richiedono innumerevoli letture in caso di colore non uniforme, una situazione consueta nel costruito outdoor dove sporco, inquinamento ed esposizione ai raggi solari portano spesso alterazioni al colore originale fino a 8-10 ΔE entro facciate originariamente colorate uniformemente (Apollonio, Gaiani e Baldissini, 2011).

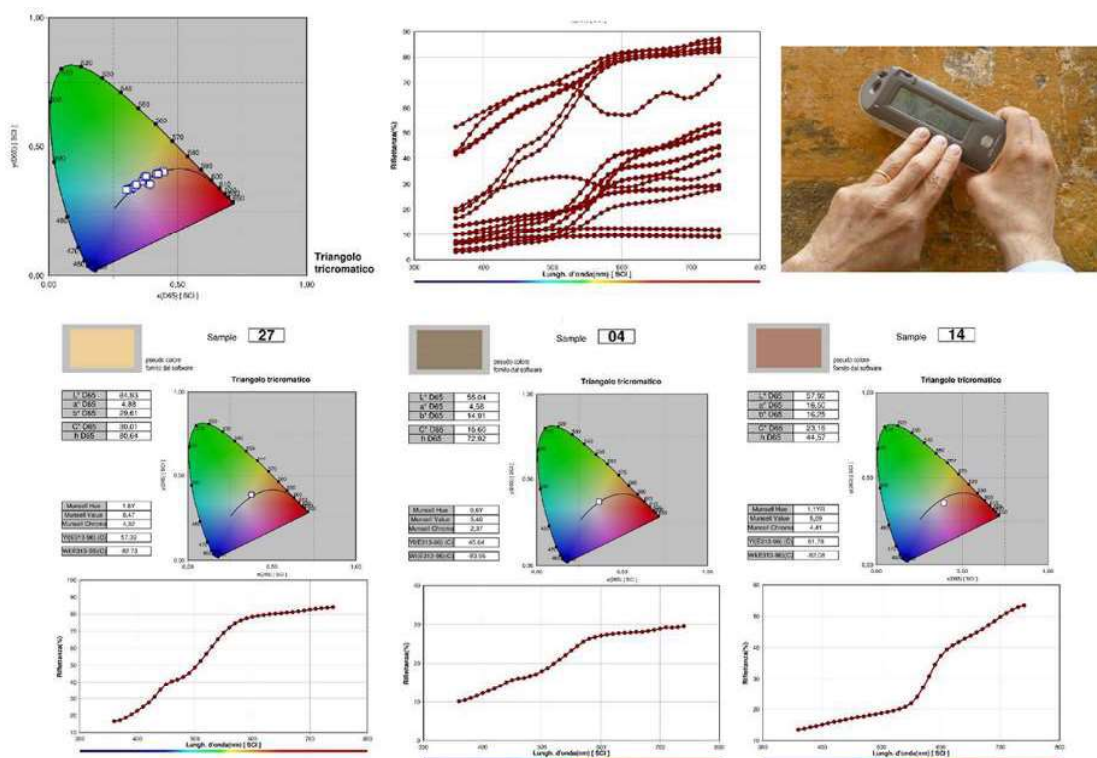


Figura 26. Analisi spettrofotometrica sui fronti del centro storico di Ceglie Messapica (BR): in alto le curve di riflettanza dei colori individuati, in basso le curve di riflettanza di quattro singoli colori (image courtesy Nicola Santopuoli).

Non sono quindi in grado di garantire un corretto controllo del colore su una superficie ampia con colore non uniforme.

Inoltre, esse non sono capaci di garantire la corretta percezione di un colore appartenente ad un edificio su un monitor RGB e la sua fedele riproduzione su un supporto stampato, il mezzo usuale degli operatori.

4.5 Tecniche fotografiche per la valutazione del colore

Una tecnica progressivamente sempre più impiegata è data dall'utilizzo di tecniche fotografiche digitali.

I loro grandi progressi tecnologici degli ultimi anni offrono nuove possibilità per superare i problemi tipici della caratterizzazione cromatica e della riproduzione delle superfici dei manufatti.

I sistemi odierni, muovendosi entro il tradizionale 'flat matte, diffuse paradigm' (Maloney e Brainard, 2010), permettono di acquisire e riprodurre i colori in modo controllato e fedele, con soluzioni capaci di appropriati risultati documentativi indipendentemente dalle diverse condizioni.

Le prime soluzioni sviluppate, sfruttando tecniche di *imaging* digitale, consistevano semplicemente in una riproduzione 2D di campioni di colore o di un intero alzato di un edificio utilizzando ortofoto, una forma rappresentativa che costituisce un utilissimo supporto per la documentazione dei sistemi urbani e del Patrimonio poiché permette di combinare le informazioni radiometriche con la misura reale, ottenendo rappresentazioni assai più complete dell'oggetto analizzato rispetto ai consueti semplici disegni al contorno.

Più recentemente, le informazioni sul colore sono state incorporate in modelli 3D digitali ottenuti dal campionamento dei manufatti reali per avere una visualizzazione del colore entro la relativa geometria nell'intero contesto in cui il manufatto è inserito (Gaiani et al., 2016).

Le motivazioni alla base di questa scelta sono innumerevoli, di cui la più ovvia è quella per cui, quando si deve selezionare un colore per una facciata, si preferisce realizzare una campionatura di varie tonalità sul muro piuttosto che osservare una mazzetta di colori (figura 27). Più in generale e compiutamente, il mondo in cui viviamo è tridimensionale e molti studi hanno dimostrato che i giudizi visivi relativi a rugosità, lucentezza e colore non sono indipendenti dalle condizioni di osservazione o da altre proprietà della superficie (ad esempio Billmeyer e O'Donnell, 1987) (Ferwerda et al., 2001) (Fleming et al., 2003) (Ho et al., 2006) (Obein et al., 2004).

Per questo un'alternativa fruttuosa per avere una definizione del colore non è esaminare semplicemente campioni piatti, ma esaminare la percezione umana del colore in scene tridimensionali che contengono indicatori effettivi.



Figura 27. Campionatura cromatica di una facciata del centro storico di Bologna (image courtesy Nicola Santopuoli).

D'altra parte, oggi, i modelli 3D da dati rilevati sono una tecnica consolidata per documentari manufatti in ambiente esterno (Scopigno et al., 2011) e possono generare differenti tipi di output, tutti assai appropriati per valutare e comunicare il colore degli spazi urbani: visualizzazioni in real-time, animazioni 3D, immagini frutto di calcoli di illuminazione basati sulle leggi della fisica, ortoimmagini.

I modelli digitali tridimensionali di manufatti reali possono essere generati utilizzando sia tecniche basate su immagini sia metodi basati su sensori attivi, a seconda delle caratteristiche della superficie, della precisione richiesta, delle dimensioni e della posizione del manufatto, del budget del progetto, dell'esperienza del gruppo di lavoro, ecc. I metodi attivi (ad esempio scansione laser) possono essere combinati con metodi passivi (es. fotogrammetria terrestre) per sfruttare i reciproci punti di forza. Entrambe le tecniche presentano un flusso di lavoro ben standardizzato (Benedetti, Gaiani e Remondino, 2010) (figura 28).

Negli ultimi anni si è assistito a un progressivo miglioramento delle tecniche di fotogrammetria automatica basate sulle tecnologie di Structure from Motion (SfM) (Ullman, 1979), oggi in grado di garantire una precisione paragonabile agli scanner laser (Remondino, 2012) (Seitz, 2006).

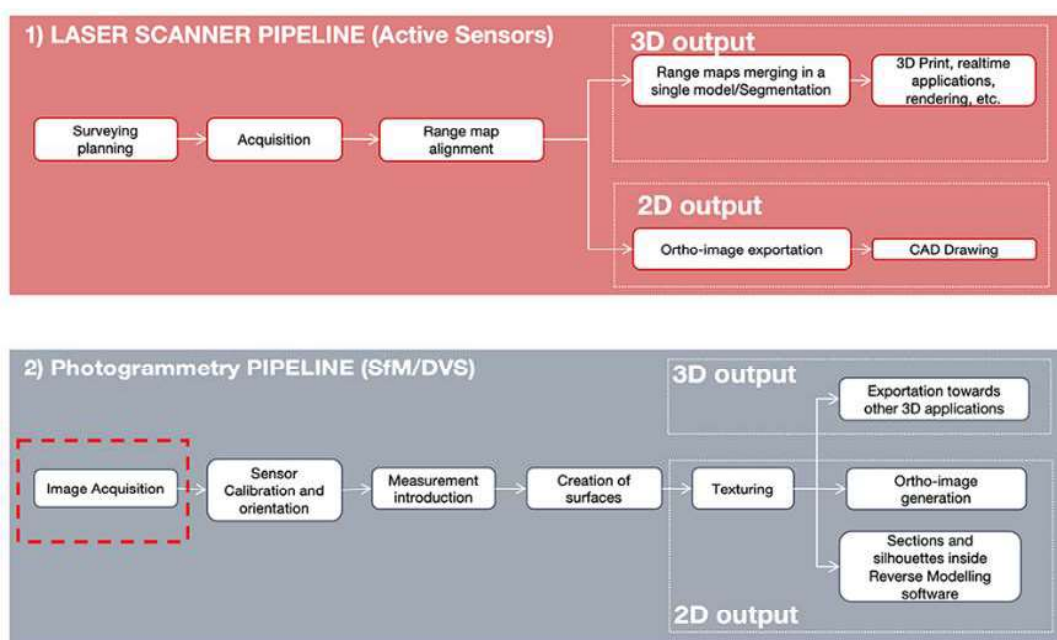


Figura 28. Le filiere di acquisizione e produzione dei modelli 3D digitali: con metodi attivi (ad esempio scansione laser) (in alto) e con metodi passivi (ad esempio fotogrammetria automatica) (in basso).

Utilizzando queste tecniche è possibile ottenere in una soluzione unica la determinazione automatica e simultanea dei parametri della fotocamera, la geometria dell'oggetto rilevato e il suo colore. Ciò consente di evitare il problema tipico dell'acquisizione 3D nel campo del rilevamento urbano, ovvero la necessità di integrare dati provenienti da più fonti. Varie indagini hanno dimostrato che l'automazione nei metodi fotogrammetrici ha raggiunto un livello molto efficiente in innumerevoli campi d'applicazione tra cui quello di riferimento di questo capitolo (Wenzel et al., 2013) (Toschi et al., 2014) (Macher et al., 2017), al di là di alcune problematiche di elaborazione aperte (Remondino et al., 2017).

La semplicità operativa e i costi sempre più bassi, la progressiva accuratezza delle procedure spingono alla ricerca di tecniche di definizione del colore utilizzando modelli 3D, con l'obiettivo di avere tecniche in grado di simulare la visione umana, cioè una fedeltà di riproduzione percettiva.

L'approccio di base consiste nell'acquisizione e mappatura del colore apparente al modello 3D come triplette RGB. Cercando di evitare ombre e sovrailluminazioni, sono scattate una serie di foto, poi mappate sulla superficie dell'oggetto (Beraldin et al., 2002). Il metodo di mappatura assegna le coordinate della texture a ciascun vertice o punto del modello 3D utilizzando le equazioni di collinearità che descrivono l'orientamento della vista della camera 2D rispetto all'oggetto 3D. La riflettanza della superficie

è quindi risolta utilizzando una texture che rappresenta la riflettanza diffusa sul modello geometrico. In questa semplice forma, la riflettanza di ogni punto è espressa in termini di colore della sua superficie lambertiana (figura 29).

Se l'identificazione del colore tramite immagini consente di superare il problema del campionamento sparso del rilievo strumentale, tuttavia l'uso dei sensori delle macchine fotografiche digitali per determinare un colore non è un problema semplicemente risolvibile pigiando un pulsante.

La fedeltà della riproduzione del colore utilizzando le immagini dipende da diverse variabili come le caratteristiche tecniche del sistema di acquisizione, la rappresentazione matematica delle informazioni sul colore in tutto il *workflow* di acquisizione e riproduzione, e il livello di illuminazione durante la fase di acquisizione (Apollonio, Gaiani e Baldissini, 2017).

Il rilievo degli ambiti urbani implica caratteristiche della luce naturale estremamente complesse e mutevoli; scene caratterizzate da molti elementi appartenenti a piani diversi come superfici curve che reagiscono alla luce in modi diversi e ricevono la luce riflessa dagli oggetti vicini; si ha a che fare con una vasta gamma di materiali caratterizzati da diversi livelli di riflettività, porosità, trasparenza, ecc.; non è possibile conoscere con sicurezza le condizioni di illuminazione poiché la sorgente luminosa cambia in posizione continuamente. Pertanto, l'acquisizione del colore e l'estrazione di valori cromatici corretti delle facciate e degli altri elementi dell'organismo architettonico esterni utilizzando immagini è una questione complessa.

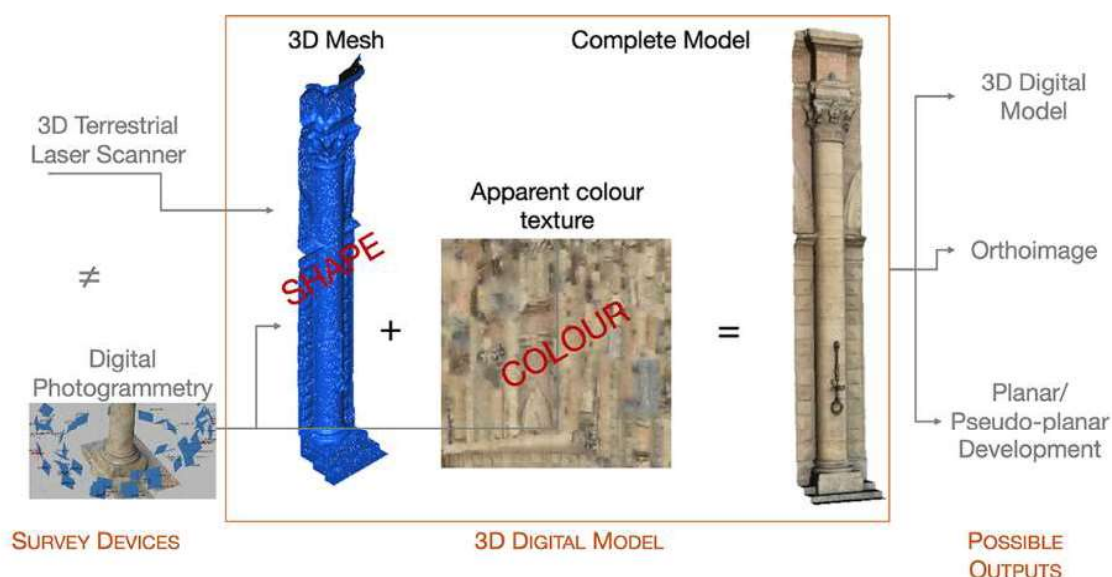


Figura 29. Il metodo di restituzione della riflettanza in un modello 3D digitale tramite acquisizione e mappatura del colore apparente (image courtesy Silvia Bertacchi).



Figura 30. Ortofoto ottenute da modelli 3D: fronti di una via a Bologna.

Negli ultimi tempi, grazie a progressi tecnologici straordinari, sta emergendo come strumento di acquisizione delle immagini lo smartphone, un dispositivo generico costantemente connesso a Internet, che integra sensori attivi e passivi, utilizzato in combinazione con app. Gli smartphone odierni sono dotati di una o più fotocamere che migliorano anno dopo anno, tali da consentire agli utenti di raggiungere livelli di risoluzione dell'immagine, nitidezza e accuratezza del colore molto vicini alle fotocamere reflex prosumer. L'attuale tecnologia di comunicazione 5G consente di trasferire facilmente e rapidamente tramite tecnologie cloud i pixel registrati su server remoti per ulteriori elaborazioni e ricostruzioni 3D. Inoltre, gli smartphone implementano sensori aggiuntivi – accelerometri, giroscopi, *depth cameras* – che, in un futuro prossimo, possono fornire ulteriori possibilità alle ricostruzioni 3D (Kos et al., 2016).

Queste caratteristiche consentono agli smartphone di poter avere un ruolo di primo piano ai fini di una documentazione massiva e a basso costo di facciate urbane e manufatti all'aperto.

Tuttavia, le fotocamere digitali sugli smartphone sono un dispositivo molto diverso rispetto alle fotocamere reflex: invece di un obiettivo e un sensore di alta qualità si basano su un'organizzazione basata su più obiettivi e sensori piccoli ed economici ognuno di diversa lunghezza focale. Questo sistema di fotocamere è supportato da un efficiente software e un potente sistema di elaborazioni delle immagini *on-board* per migliorare la limitata qualità dell'hardware.

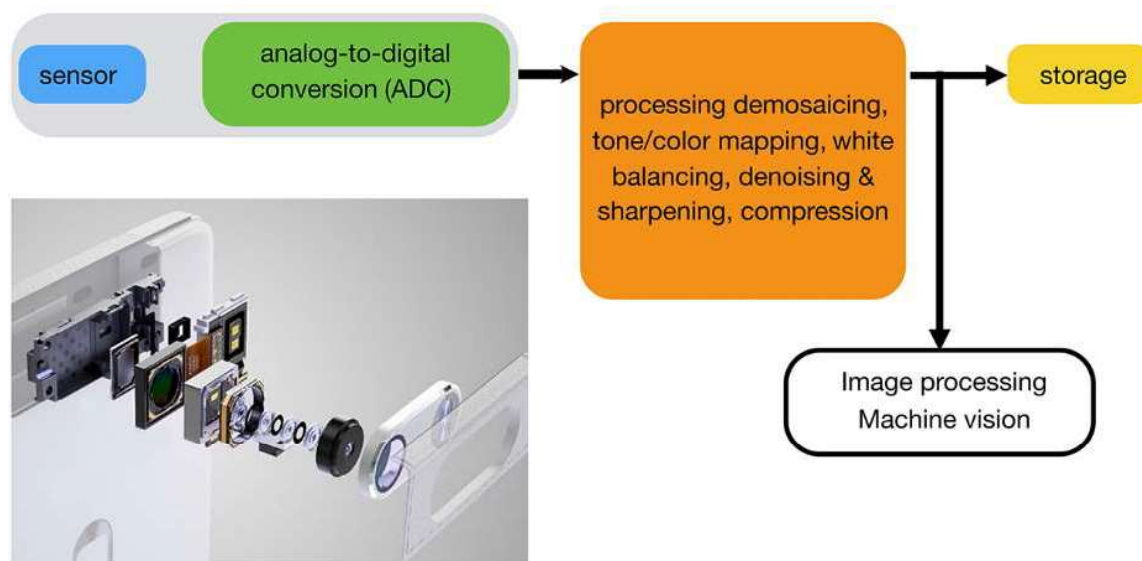


Figura 31. Imaging in-camera pipeline per gli smartphone.

In questo tipo di fotocamere, mentre problemi come la distorsione geometrica, l'ombreggiatura dell'obiettivo (un tipo di vignettatura) e l'aberrazione cromatica possono essere in gran parte risolti automaticamente, persistono due problemi principali per il loro uso documentativo.

Il primo dipende da un vincolo costruttivo. I piccoli sensori delle fotocamere degli smartphone non possono catturare tanta luce quanto i grandi sensori delle fotocamere SLR. Inoltre, presentano perdite di luce per l'alta densità dei diodi: la loro vicinanza fa sì che la luce influenzi gli elementi adiacenti. Il ripristino della luce persa per questi limiti costruttivi si ottiene aumentando il guadagno, a scapito di un forte aumento del rumore nell'immagine.

La quantità di questo rumore generato dal guadagno è direttamente correlata alla quantità totale di luce acquisita in un'immagine, e può essere quantificata in 4,5 EV (f-stop) della luce ricevuta da un sensore full frame da 35 mm con lo stesso tempo di esposizione (Cardinal, 2020).

Per migliorare la qualità dell'immagine e ridurre il rumore, i produttori di smartphone hanno sviluppato varie soluzioni come aumentare il tempo di esposizione compensando il movimento della fotocamera tramite sofisticati sistemi di stabilizzazione ottica e sovrapporre più acquisizioni utilizzando tecniche di *imaging* computazionale (figura 31). Tuttavia, nonostante gli enormi progressi in queste soluzioni (figura 32), rimangono problemi per l'uso nel processo di documentazione fotografica (ad esempio, nell'allineamento delle immagini sovrapposte che possono presentare esposizioni e quindi luminosità diverse).



Figura 32. Fotografie in presenza di basso livello di illuminazione scattate da varie generazioni di iPhone dotate dello stesso sensore (image courtesy DXOMARK).

Per risolvere i problemi tipici delle smartphone camera e quindi avere un'accurata acquisizione e riproduzione del colore è necessaria un'accurata filiera di post-processing dell'immagine che minimizzi gli artefatti senza intaccare i valori acquisiti.

4.5 Output

Da un punto di vista degli output che si ottengono utilizzando queste tecniche esse sostanzialmente consistono in:

- immagini georeferenziate di campioni di colore organizzati in database o in schede con l'uso di campioni cromatici di riferimento (come *patches* dell'Atlante Munsell);
- immagini con campioni cromatici di riferimento collegate a disegni CAD bidimensionali;
- modelli tridimensionali texturizzati.

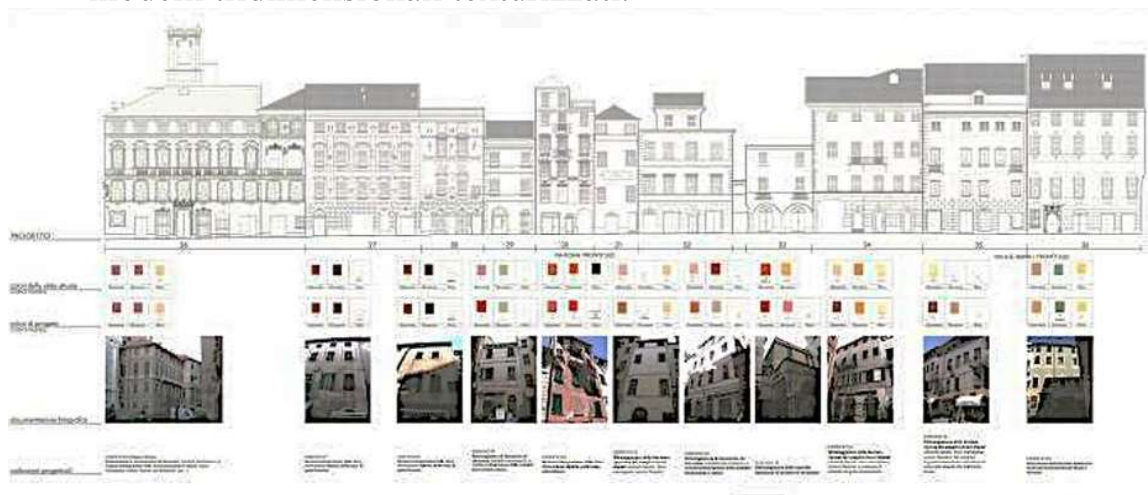


Figura 33. Esempio di mappatura del colore alla scala dell'isolato mediante disegni di alzati, Atlante Munsell e fotografie: il caso del Progetto del colore redatto per il Comune di Finalmarina (SV) nel 2006. Elaborati relativi a via Roma (image courtesy Patrizia Falzone).

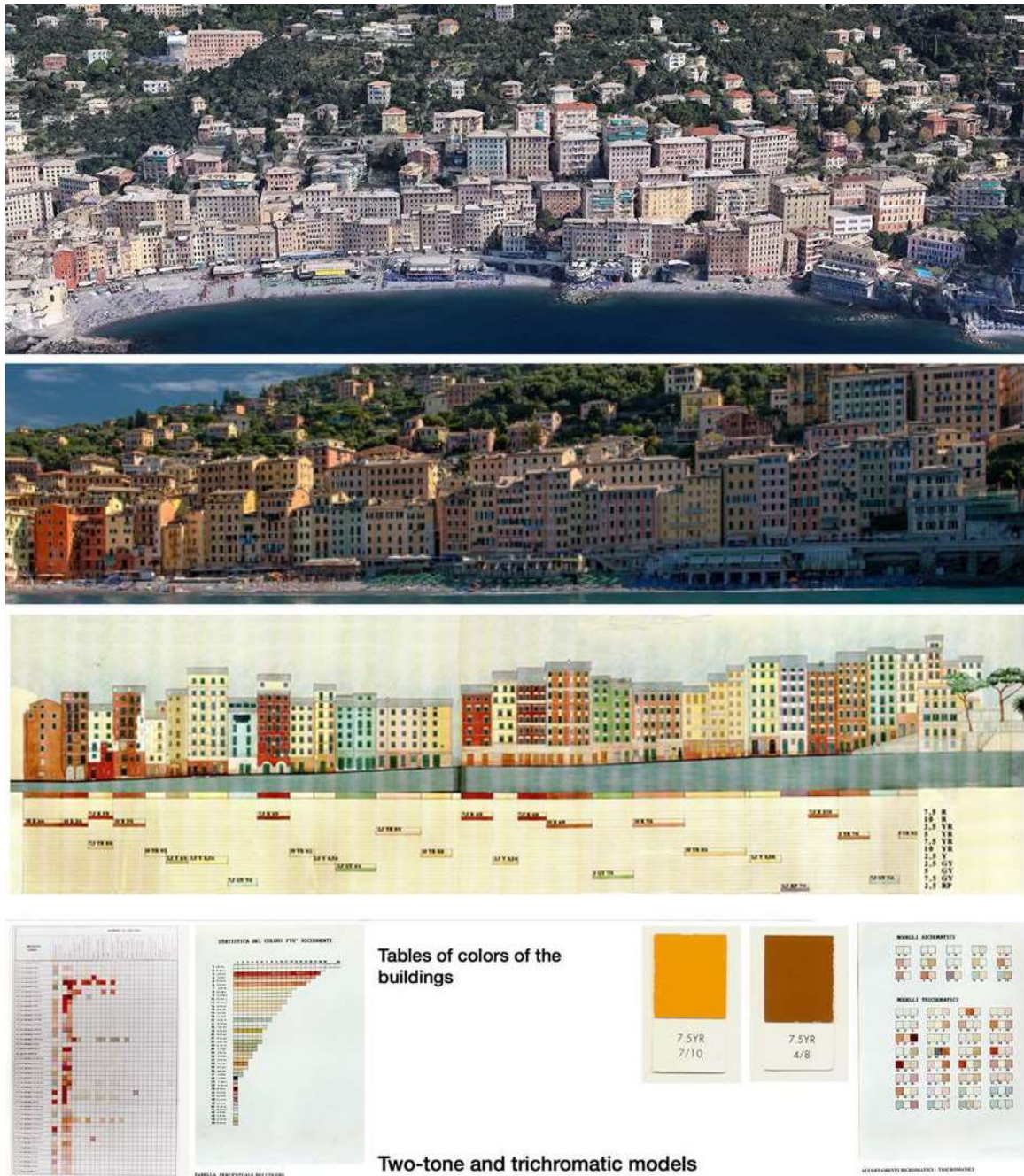


Figura 34. Esempio di mappatura del colore alla scala urbana mediante disegni di alzati e Atlante Munsell: dei rilievi del colore delle facciate dei centri storici delle coste liguri 1992-1996, studio redatto nell'ambito dell'Università degli studi di Genova. Elaborati relativi la Palazzata a mare a Camogli (GE) (image courtesy Patrizia Falzone e Google Earth).

Nel caso di disegni CAD e foto di solito il lavoro è organizzato a più scale:

- scala urbana: piante e alzati alle scale 1:500 - 1:200 (o/e mappe e *street views* come quelle di Google), immagini delle facciate, schemi e schede supportate da sistemi di colori, oppure ortofoto delle facciate;
- scala dell'edificio: alzati alle scale 1:100 - 1:25, immagini delle facciate e di dettagli, schemi e schede supportate da sistemi di colori e relativa stratigrafia, o ortofoto delle facciate, schede dei materiali utilizzati.



Figura 35. Esempio di mappatura del colore dei fronti urbani mediante disegni con texture mapping fotogrammetrico. Elaborato del rilievo dei fronti urbani di Cesena.

Progetto, Realizzazione e Coordinamento della Soluzione: Patrizia Fabiani
 Informazione Scheda: Carlo Coradi
 Redazione della Scheda: Patrizia Fabiani

FINALMARINA - PROGETTO DEL COLORE
 Comune di FINALE LIGURE - Provincia di SAVONA

Edificio 42bis - Palazzo Cosmelli		Via A. Barrili	civ. n.11	EDIFICIO 42bis
				SCHEDA 3.6
3. INDIVIDUAZIONE DELLA FACCIATA				
3.6. RILIEVO COLORIMETRICO DELLA FINITURA DIPINTA - CAMPIONE				
ELEMENTI DI FACCIATA		CAMPIONE		CORNICI MENSILI
Zoccolo				
<input type="checkbox"/> 1° Strato	<input type="checkbox"/> lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> 2° Strato	<input type="checkbox"/> lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input checked="" type="checkbox"/> Ultimo Strato visibile	<input checked="" type="checkbox"/> lapideo ARDESIA	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
Barramento				
<input type="checkbox"/> 1° Strato di finitura	<input type="checkbox"/> rivestito lapideo	<input type="checkbox"/> rivestito a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato intonacato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Fondo bugata 1° Strato				
<input type="checkbox"/> Fondo bugata 2° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso 1° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso porta 1° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso porta 2° Strato				
<input type="checkbox"/> 2° Strato di finitura	<input type="checkbox"/> rivestito lapideo	<input type="checkbox"/> rivestito a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato intonacato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Fondo bugata 2° Strato				
<input type="checkbox"/> Fondo bugata 2° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso 2° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso porta 2° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso porta 2° Strato				
<input checked="" type="checkbox"/> Ultimo Strato di finitura visibile	<input type="checkbox"/> rivestito lapideo	<input type="checkbox"/> rivestito a stacco	<input checked="" type="checkbox"/> intagliato intonacato	<input checked="" type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Fondo bugata Ultimo Strato vis.				10 YR 5/6
<input type="checkbox"/> Fondo bugata Ultimo Strato vis.				3 Y 9/2
<input type="checkbox"/> Chiuso Ultimo Strato visibile				5 Y 8/6
<input type="checkbox"/> Chiuso porta Ultimo Strato vis.				7 Y 8/6
<input type="checkbox"/> Chiuso porta Ultimo Strato vis.				
Elevazione				
<input type="checkbox"/> Fondo 1° Strato di finitura	<input type="checkbox"/> riv. lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Fondo 2° Strato di finitura	<input type="checkbox"/> riv. lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Chiuso Ultimo Strato visibile	<input type="checkbox"/> riv. lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
Rilievi				
<input type="checkbox"/> elemento architettonico				
<input type="checkbox"/> 1° Strato	<input type="checkbox"/> liscio	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato intonacato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Fondo 1° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso porta 1° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso porta 1° Strato				
<input type="checkbox"/> 2° Strato	<input type="checkbox"/> lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato intonacato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Fondo 2° Strato				
<input type="checkbox"/> Strato 2° Strato				
<input type="checkbox"/> Chiuso porta 2° Strato				
<input checked="" type="checkbox"/> Ultimo Strato visibile	<input type="checkbox"/> lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input checked="" type="checkbox"/> intagliato intonacato	<input checked="" type="checkbox"/> decoraz. policroma
<input type="checkbox"/> Fondo Ultimo Strato visibile				2.5 Y 8.5/6
<input type="checkbox"/> Chiuso porta Ultimo Strato vis.				7.5 YR 6/6
<input type="checkbox"/> Chiuso porta Ultimo Strato vis.				2.5 YR 4/8
<input type="checkbox"/> Altro				3.5 Y 8/6
<input type="checkbox"/> Altro				
Cornicione di gronda				
<input type="checkbox"/> Ultimo Strato visibile	<input type="checkbox"/> lapideo	<input type="checkbox"/> a stacco	<input type="checkbox"/> intagliato intonacato	<input type="checkbox"/> decoraz. policroma

Figura 36. Esempio di mappatura del colore alla scala dell'edificio mediante schedatura, Atlante Munsell e fotografie: il caso del Progetto del colore redatto per il Comune di Finalmarina (SV) nel 2006. Elaborati relativi a Palazzo Cosmelli (image courtesy Patrizia Falzone).

5. Problemi e soluzioni nel rilievo e riproduzione del colore utilizzando macchine fotografiche digitali

5.1 Generalità

Oggigiorno, il problema di un'accurata descrizione e riproduzione del colore mediante immagini può essere descritto come il problema di determinare fedelmente il colore e il livello tonale (Reinhard et al., 2008).

La fedeltà della riproduzione del colore dipende da diverse variabili come il livello di illuminazione durante la fase di acquisizione, le caratteristiche tecniche del sistema di acquisizione e la rappresentazione matematica delle informazioni sul colore in tutta la filiera di acquisizione e riproduzione.

Il colore è ottenuto in una fotocamera digitale a sensore CMOS utilizzando il Color Filter Array (CFA) che filtra la luce su un sensore monocromatico e genera pixel colorati secondo tre canali: verde, rosso e blu (RGB). Un algoritmo di demosaicizzazione successivamente interpola il colore di un singolo pixel dai valori dei pixel monocolori che lo circondano. In seguito, algoritmi di bilanciamento del bianco e correzione del colore implementati via software in-camera o off-camera stimano la luce ambientale e correggono i colori di conseguenza. La precisione del colore finale è una combinazione di tutti questi fattori. Inoltre, il sistema di lenti dell'obiettivo può modificare i colori a causa degli effetti della vignettatura e degli artefatti di ombreggiatura del colore.

La precisione del colore è assai problematica perché i colori di una scena sono una combinazione della luce ambientale e dei colori originali degli oggetti ripresi. Il sistema di visione umana sa come compensare l'effetto della luce ambientale, ma per una fotocamera il compito è difficile. In pratica, essa deve stimare la temperatura della luce ambientale o anche il suo spettro e regolare i colori di conseguenza.

Nel realizzare questa valutazione i sistemi di *imaging* basati su tre colori primari RGB presentano diversi limiti, risultanti dalla limitata risoluzione spettrale dei sistemi di *imaging* convenzionali:

- i chip RGB violano la regola di Lutero o Lutero-Ives (Ives, 1915) (Luther, 1927) che afferma che un sensore può distinguere i colori allo stesso modo dell'occhio umano solo se le risposte spettrali di questo sensore possono

essere ottenute da una combinazione lineare delle risposte dei tre tipi di coni oculari S, M e L;

- a causa del metamerismo, due superfici con spettri fortemente diversi possono apparire identiche sotto un dato illuminante e completamente diverse sotto un altro;
- l'uso delle informazioni sul colore nelle immagini è limitato dal fatto che i segnali RGB registrati dipendono dai dispositivi di acquisizione, dagli illuminanti e dalla preelaborazione dell'immagine.

Per superare questi limiti sono stati introdotti sistemi di *imaging* multispettrali capaci di un'elevata risoluzione spettrale (ad esempio campioni nella gamma visibile ogni 5-10 nm in un intervallo da almeno 400 nm a 700 nm) e High-Dynamic-Range (HDR).

Tuttavia, i sistemi di acquisizione multispettrali sono complessi, costosi, attualmente limitati ad un uso laboratoriale e a progetti dotati di considerevoli risorse economiche (Simon et al., 2013). Inoltre, le immagini multispettrali sono difficilmente interpretabili dalla visione umana e devono essere renderizzate, qualora si pensi di utilizzarle per riprodurre il colore (Hunt, 1970) (Fairchild, 2013).

Anche una visualizzazione accurata delle immagini HDR è complicata perché richiede un display HDR e la renderizzazione dell'aspetto del colore, che richiede modelli accurati di percezione visiva per tradurre i dati di radianza della scena in segnali appropriati che tengono conto dell'adattamento locale, luminoso e cromatico (Fairchild e Johnson, 2004) (Kuang et al., 2007). Inoltre, l'acquisizione di immagini HDR in ambiente urbano non è facile. Poiché la creazione di un'immagine HDR richiede più scatti con differenti esposizioni che devono essere poi fusi, è facile avere sfocature o effetti di *ghosting* dovuti a oggetti in movimento. Infine, le tecniche HDR presentano l'ovvio problema che, mirando ad ampliare la gamma dinamica delle immagini, sono focalizzate a migliorare solo l'accuratezza della luminanza.

A causa di queste difficoltà la semplice acquisizione RGB rimane la soluzione più adottata nel nostro campo di riferimento.

Utilizzando immagini RGB, al fine di ottenere una riproduzione del colore fedele almeno percettivamente, è necessario avvalersi del file RAW prodotto dalla camera, cioè dell'immagine minimamente elaborata in-camera rispetto alla acquisizione grezza da parte del sensore in cui è registrata solo l'informazione di intensità luminosa incidente sui singoli photodetector R, G e B, anziché già sviluppata e modificata in-camera e salvata nel formato JPEG o nel formato TIFF.

Nell'elaborazione in-camera dei dati grezzi rilevati dal sensore possono infatti nascere svariati problemi di cui, oggi, i principali sono legati al

fatto ogni produttore utilizza algoritmi differenti e proprietari, la sequenza di elaborazione può variare e il risultato non è trasparente all'utente. Queste difficoltà sono particolarmente rilevante per le smartphone camera in cui l'introduzione di algoritmi di intelligenza artificiale (AI) si propone di generare immagini 'piacevoli' e non documentazioni fedeli di un colore.

L'utilizzo di file RAW consente di evitare la perdita di informazioni colore, giacché i segnali digitali provenienti dalla conversione da analogico a digitale del segnale di ogni fotodetettore sono codificati a 10, 12, 14 o 16 bit per ogni pixel del sensore, anziché agli 8 bit in cui di solito avviene la codifica dei formati JPEG e TIFF (quest'ultimo può essere anche a 16 bit, ma quasi nessuna macchina fotografica li supporta) e regolazioni generiche o troppo specifiche date dai preset impostati sulla digital camera in merito a esposizione, bilanciamento del bianco, contrasto, etc. Inoltre, si evita la perdita di informazione dovuta alla compressione *lossy* del formato JPEG.

Le immagini acquisite in formato RAW permettono di evitare ogni tipo di rendering delle immagini nelle fasi di elaborazione e compressione delle immagini integrate (Schewe, 2013). È mantenuta solo l'elaborazione di base nella fotocamera: sottrazione del punto nero; rimozione dei pixel neri; correzione dell'equilibrio del canale verde.

La registrazione dei dati in uscita dal sensore senza perdita di informazioni e con una elevata profondità colore (dettaglio cromatico), fra l'altro, permette di elaborare l'immagine con un campo di variazione delle regolazioni (esposizione, bilanciamento del bianco, contrasto, *denoising*, correzione della gamma, ecc.) molto maggiore rispetto alla registrazione con altri formati compressi anche di tipo *lossless*. Dunque, con una maggiore profondità colore si ha una maggiore potenzialità di elaborazione delle immagini e quindi si sfruttano al massimo le capacità del sensore e dell'ottica.

La disponibilità di dati RAW dalle attuali fotocamere SLR e degli smartphone consente quindi di evitare la presenza di qualsiasi processo aggiuntivo e indesiderato (ad esempio, bilanciamento del bianco e correzione della gamma), fornendo una relazione lineare rispetto alla luminosità della scena che permettono di ottenere fotografie possono essere confrontate quantitativamente senza conoscere le caratteristiche del sistema di *imaging* che le ha generate (Chakrabarti et al., 2009) e un'accurata riproduzione dei colori.

5.2 Color management

A partire dal file RAW per ottenere immagini colorimetricamente accurate è necessario introdurre un preciso workflow di renderizzazione ed elaborazione dell'immagine, assieme ad un'accurata gestione dei colori (*color*

management), cioè ad un'accurata comunicazione dei dati associati all'immagine necessari per l'interpretazione inequivocabile del contenuto del colore e la conversioni dei dati del colore al fine di ottenere le riproduzioni desiderate su qualunque periferica (fotocamera, scanner, monitor, stampante).

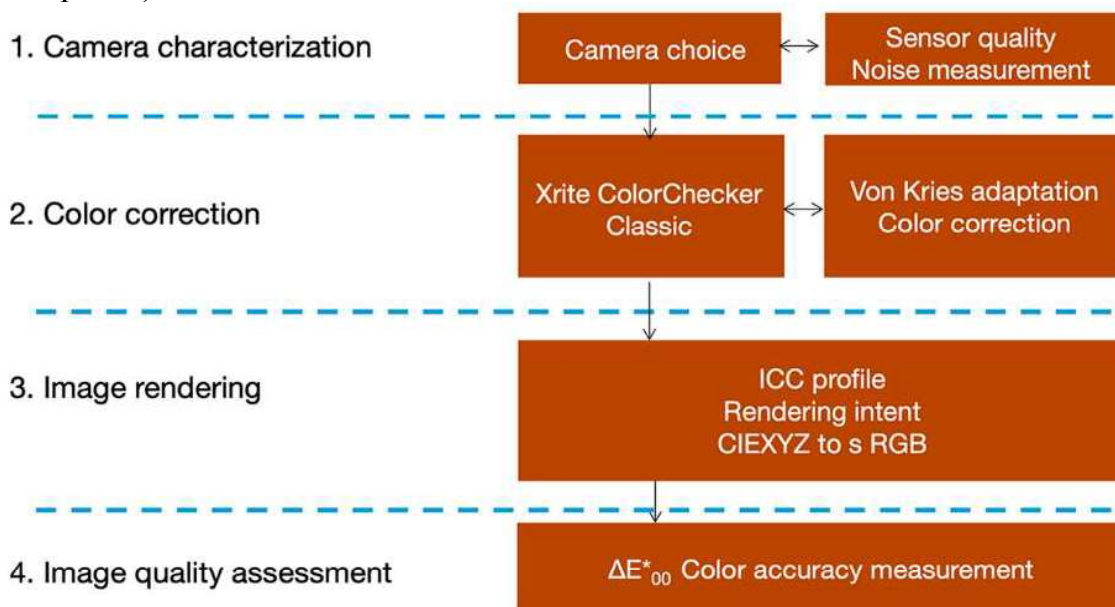


Figura 37. Esempio di color workflow.

In figura 37 è riassunto un generale *color workflow* che permette di ottenere buona corrispondenza tra colore reale e colore misurato fotometricamente. La filiera ricalca sostanzialmente quella in-camera ma pone enfasi su fasi come la correzione del colore e la misurazione dell'accuratezza colorimetrica della riproduzione, oltreché sulla accurata eliminazione del rumore, operazione particolarmente importante per il caso dei sensori di smartphone camera che risultano particolarmente rumorosi per la limitata dimensione dei diodi che li compongono.

La tecnologia di gestione digitale del colore si propone di evitare che i numeri (RGB o CMYK) di cui è costituita un'immagine generino colori diversi su periferiche differenti. Poiché è la periferica che dà il significato (cioè il colore) ai numeri, affinché non cambi il significato (cioè il colore), è necessario cambiare i numeri.

La gestione digitale del colore è realizzata attraverso un software detto *Color Management System* (CMS), il cui principio generale consiste nell'assegnare ad ogni periferica un cosiddetto *profilo di colore* che ne indica le caratteristiche cromatiche. I profili descrivono quindi la relazione tra i valori RGB o CMYK di un dispositivo e il colore effettivo che produce. Ad ogni immagine prodotta da uno scanner o da una fotocamera digitale viene

associato il profilo colore della periferica che associa alle coordinate di periferica (RGB) le relative coordinate cromatiche (XYZ o Lab). Quando l'immagine è inviata ad un monitor o ad una stampante il CMS calcola una conversione di colore tra il profilo dell'immagine e il profilo della periferica in modo che le coordinate colorimetriche dei colori di ingresso corrispondano alle coordinate colorimetriche della periferica di uscita. In questo modo i colori originali e quelli dell'immagine stampata o visualizzata corrispondono. I profili possono descrivere un unico dispositivo, come un singolo scanner, monitor o stampante, oppure una classe di dispositivi, come gli Apple Cinema Display, le macchine da stampa Euroscale, ecc, oppure uno spazio colore astratto, come l'Adobe RGB o l'sRGB. Ma qualunque cosa descriva, un profilo è solo una tabella di numeri che descrive corrispondenze.

I profili colore possono essere realizzati dai produttori (tramite una fase di calibrazione) o è l'utente stesso che provvede a crearli tramite appositi programmi e strumenti (colorimetri e spettrofotometri).

In questo contesto è chiamato CMM (*Color Matching Method*) il metodo con cui i colori sono combinati per ottenere uno specifico colore. In un CMS è il 'motore' che realizza il lavoro di gestione del colore e contiene il codice che usa le informazioni contenute nel profilo fornito dall'utente per trasformare i colori di un'immagine.

Per rendere generale il processo è stato introdotto il concetto di gestione del colore indipendente dal dispositivo per cui i profili di un dispositivo possono essere utilizzati per tradurre i dati del colore creati su un dispositivo nello spazio colore nativo di un altro dispositivo.

Esistono due principali tecnologie di gestione digitale del colore *device independent*: quella dell'International Color Consortium (ICC) e quella di Adobe PostScript, chiamata PostScript Color Management (PCM).

In particolare, il sistema ICC definisce quattro componenti:

- uno standard aperto per un CMM (*Color Matching Module*) a livello di sistema operativo
- la descrizione dei profili colore per i dispositivi
- gli spazi colore di lavoro in cui i dati di colore devono essere manipolati
- degli intenti di rendering.

Un profilo ICC è un insieme di dati che descrivono, secondo regole e standard promulgate dall'ICC, il modo in cui i colori sono rappresentati numericamente in un determinato spazio dei colori. Lo scopo del profilo ICC è quello di fornire le regole di trasformazione, basate sulla colorimetria D50 e l'osservatore standard CIE, fra i valori dello spazio colore descritto dal profilo e un determinato spazio colore standard detto 'spazio di connessione fra profili', cioè *Profile Connection Space* (PCS), che secondo le specifiche

ICC può essere il CIE L*a*b*o il CIE XYZ, entrambi spazi riferiti all'osservatore standard CIE 1931, all'illuminante di riferimento D50 e, nel caso di supporti riflettenti, sulla base di misure bidirezionali (cioè 0°/45° o 45°/0°) e non a sfera di integrazione (figura 38).

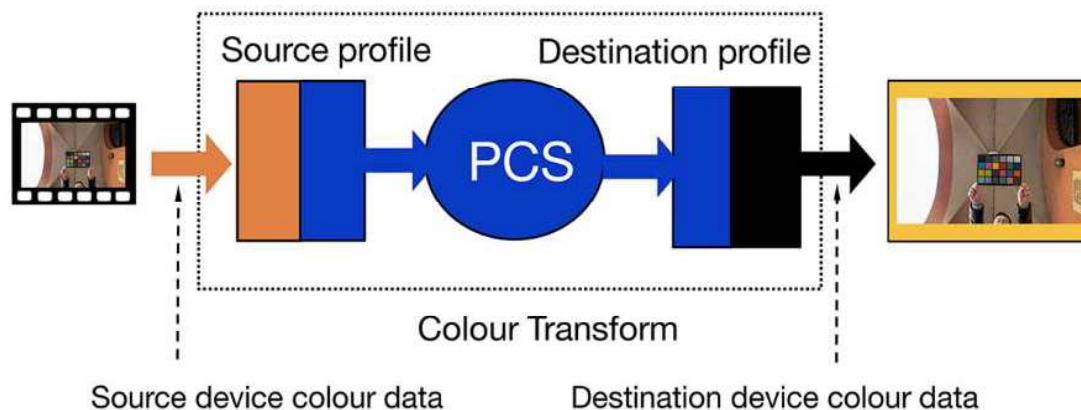


Figura 38. Device independent color management.

In realtà il PCS non è semplicemente uno spazio colorimetrico standard ma più precisamente uno stato di adattamento cromatico dell'osservatore.

La prima descrizione di un profilo ICC è stata data nelle specifiche ICC.1 pubblicate nel 1996. Oggi l'architettura ICC è divenuta parte dello standard ISO 15076-1:2010 (ISO, 2010) ed è supportata da tutti i sistemi operativi. In Mac OS e iOS la gestione del colore secondo le specifiche ICC è demandata al sottosistema ColorSync; in Microsoft Windows è affidata al Windows Color System (WCS).

5.3 Spazi colore e intenti di rendering

Uno spazio dei colori è la combinazione di un modello di colore e di una appropriata funzione di mappatura di questo modello. Un modello di colore è un modello matematico astratto che descrive un modo per rappresentare i colori come combinazioni di numeri, tipicamente come tre o quattro valori detti componenti colore. Questo modello è una rappresentazione astratta, per questo viene perfezionato da specifiche regole adatte all'utilizzo che se ne andrà a fare, creando uno spazio dei colori. Così, ad esempio, spazi di colore come Adobe RGB e sRGB sono diversi, pur basandosi entrambi sullo stesso modello di colore RGB.

Ai fini della fedeltà colorimetrica un aspetto importante riguarda la scelta dello spazio colore renderizzato RGB *device-independent* di output per il quale sono possibili varie soluzioni codificate a 8 e/o a 16 bit/canale. Questi

sono dati da un sottospazio dello spazio colore CIE XYZ e possono variare tra spazi colore estremamente ampi e soluzioni potenzialmente capaci di mostrare meno colori ma più efficienti rispetto ai dispositivi in commercio (figura 39).

Rec. 2020	75.8%
DCI-P3	53.6%
Adobe RGB	52.1%
sRGB/Rec. 709	35.9%

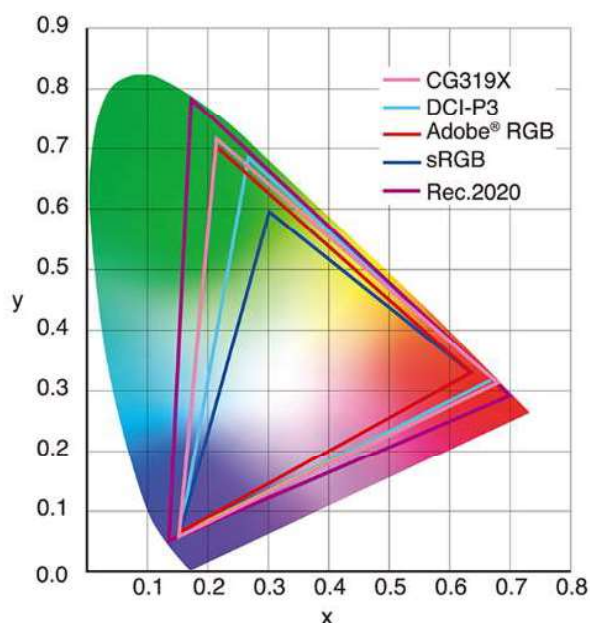


Figura 39. Confronto degli spazi colore indipendenti dal dispositivo basati sul sistema RGB.

Il più ampio spazio colore solitamente utilizzato – supporta oltre il 90% dei colori dello spazio CIE L*a*b - è certamente il ProPhoto RGB, sviluppato nel 1999 da Eastman Kodak come spazio di lavoro per l’elaborazione e l’editing di immagini fotografiche (Spaulding et al., 2000). Noto anche come ROMM RGB (Reference Output Medium Metric), è descritto nella specifica tecnica ISO/TS 22028-2:2006 (ISO, 2006a), presenta una gamma di 1.8, e un punto di bianco a 5000K (D50). I suoi primari sono stati scelti per minimizzare la perdita di informazioni nel rappresentare il colore di oggetti acquisiti in uno spazio di colore non renderizzato. La elevata ampiezza richiede una codifica a 16-bit per canale e ne costituisce anche il limite principale perché non è visualizzabile completamente su nessun display commerciale.

Lo spazio colore più piccolo oggi comunemente utilizzato è lo sRGB, introdotto nel 1995 da Ricardo Motta e Michael Stokes, due informatici che lavoravano alla Hewlett-Packard, al fine di consentire una comunicazione fedele delle immagini per l’utente comune (Beretta, 1999). Oggi lo sRGB, standardizzato più tardi come IEC 61966-2-1:1999 (IEC, 1999) è lo spazio colore predefinito per applicazioni multimediali su tutti i nostri PC. Lo sRGB usa primari ITU-R BT.709-5, gli stessi che vengono usati nei monitor da

studio e nell'HDTV, cioè nella televisione in alta definizione, e i suoi valori sono definiti rispetto all'illuminante CIE D65, cioè con un punto di bianco alla temperatura di 6504K. È uno spazio colore non-lineare - presenta infatti un gamma approssimativamente di 2.2 cioè simile alla sensibilità umana alla luminanza – ed è assai più ristretto dello spazio colore percepito dall'uomo (particolarmente, non mostra correttamente i colori saturi come il giallo cadmio e il blu cobalto) (figura 40). Di contro è il solo spazio colore supportato dalle API grafiche 3D e il solo color space visualizzabile al 100% sui monitor consumer odierni (Anderson et al., 1996) (Stokes et al., 1996).

Una scelta frequente da parte di fotografi è quella dell'AdobeRGB, sviluppato da Adobe Systems nel 1998. Si tratta di uno spazio colore più ampio dell'sRGB, principalmente nei toni ciano-verde, capace di rappresentare accuratamente i colori acquisiti da una digital camera e che può essere visualizzato interamente su un monitor professionale, facilitando l'elaborazione del colore sia a 8 bit sia a 16 bit senza perdita di informazioni. La maggior parte delle fotocamere SLR lo offre come scelta dello spazio colore in cui renderizzare le immagini JPEG. La gamma di AdobeRGB è 2.2, simile a sRGB nei valori dei toni medi (~50% di luminanza), ma differenze sono evidenti sia nelle ombre (~25% di luminanza) sia nelle sovrailluminazioni (~75% di luminanza). Infine, il punto di bianco è definito a 6500K (D65).

Uno spazio colore sempre più utilizzato, per la capacità di ben rappresentare colori vividi è il DCI-P3, definito dall'organizzazione Digital Cinema Initiatives (DCI) e pubblicato dalla Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE) nel 2011. Il DCI-P3 ha una gamma pari a 2.6, un punto di bianco a 5000K (D50) ed è definito a una profondità di colore di 16 bit/canale. È stato adottato da Apple col nome Display P3 nel 2015, che differisce dall'originale per l'illuminante (D65 al posto della D50) e la gamma posta a 2.2. Il DCI-P3 è il 25% più ampio dello spazio colore sRGB, rappresenta bene colori saturi al di fuori dello spazio colore sRGB, è supportato dalle API di grafiche 3D (ad esempio Vulkan, Apple Metal) ed è visualizzabile quasi completamente sulla maggior parte degli smartphone di fascia medio-alta e totalmente su monitor professionali come l'Apple XDR. La correttezza della selezione dello spazio colore di output dipende dall'uso specifico dell'immagine e dai colori da codificare.

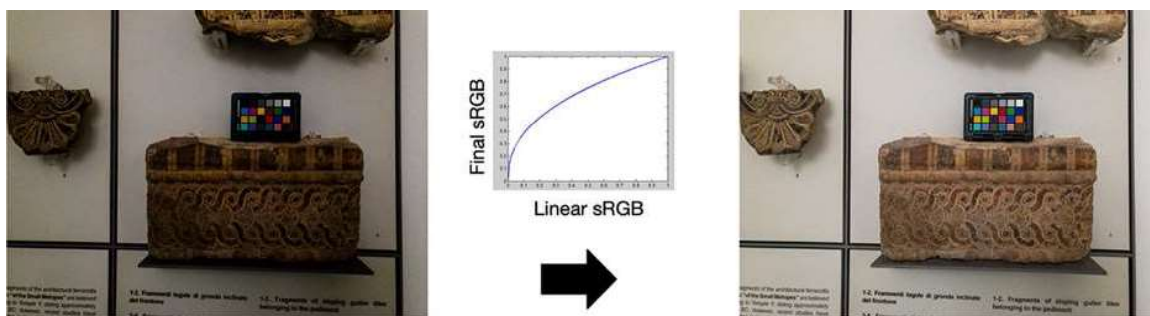


Figura 40. Correzione della gamma: applicazione del gamma dello spazio colore sRGB a un'immagine.

Per effettuarla si devono considerare innanzitutto i seguenti parametri:

1. estensione della gamma di colori;
2. codifica percettivamente lineare della scala tonale per ridurre al minimo la profondità di bit richiesta per codificare un'immagine;
3. gamma dinamica;
4. punto di bianco dell'illuminante;
5. condizioni di visibilità;
6. quantizzazione ed efficienza di compressione.

Nel caso dei colori degli spazi urbani deve essere considerato come parametro base il requisito di limitare la discrepanza tra la gamma dinamica del reale e la gamma dinamica della tecnologia del display con cui si visualizzano le immagini. Questo può essere ottenuto lavorando nello spazio lineare, più ampio di quello utilizzato dalle fotocamere e capace di permettere l'elaborazione senza perdita di informazioni, e convertendo le coordinate colorimetriche dell'immagine in uno spazio colore non lineare riferito alla scena solo alla fine della pipeline di acquisizione ed elaborazione dell'immagine. In particolare, l'sRGB come spazio colore renderizzato finale presenta pochi limiti, in quanto copre la quasi totalità dei colori presenti nelle facciate degli edifici nei centri storici e può garantire coerenza nella visualizzazione in *real-time rendering* su più dispositivi.

Quando la gamma dello spazio colore sorgente supera quella della destinazione, è possibile che i colori saturi non possano essere rappresentati o siano rappresentati in modo impreciso. Il modulo di gestione del colore può affrontare questo problema in quattro modi chiamati intenti di rendering:

- Colorimetrico assoluto
- Colorimetrico relativo
- Percettivo
- Saturazione.

Di essi gli ultimi due non mirano all'accuratezza colorimetrica ma a mantenere rispettivamente una accuratezza percettiva comprimendo o espandendo l'intera gamma dell'immagine per riempire la gamma del dispositivo di destinazione, e conservare la saturazione dei pixel nell'immagine. Quindi non sono utilizzabili per il rilievo e riproduzione dei colori degli agglomerati urbani.

Gli intenti di rendering colorimetrici si propongono di riprodurre esattamente i colori stampabili (che sono la stragrande maggioranza) e di approssimare gli altri.

In particolare, nell'intento di rendering colorimetrico assoluto il punto di bianco del dispositivo di origine è mappato al punto di bianco dell'illuminante di riferimento ed i colori di conseguenza. Questa tecnica riproduce esattamente i colori in-gamut e ritaglia i colori fuori gamma al limite più vicino al limite della gamma. Tuttavia, poiché col metodo colorimetrico assoluto il bianco sembra avere una dominante di colore e la variazione della relazione tra i colori dentro e fuori gamma causa l'eliminazione di dati dell'immagine, in pratica si usa solo l'intento di rendering colorimetrico relativo. In esso il punto di bianco dell'immagine scala al punto di bianco dell'illuminante di riferimento e i colori vengono mappati di conseguenza. Inoltre, la luminosità è modificata in modo che tutti i livelli di luminosità rientrino nell'intervallo di luminosità della gamma di destinazione.

Tuttavia possono comunque sorgere problemi: sistemi differenti producono colori diversi a causa di differenze intrinseche nei sistemi di acquisizione e nell'illuminazione; molte immagini non sono ottenute mediante il supporto di un processo di *color management* per cui i computer interpretano erroneamente i dati RGB; anche la stampa può distorcere il colore se la mappatura non è corretta (Beretta, 1991); infine il produttore stesso del dispositivo può aver introdotto distorsioni, come accade oggi per gli schermi degli *smartphone*.

Quindi vi sono molte cause che possono determinare inaccurately: oggettive, soggettive, tecnologiche, o solo legate a sbadataggini o approssimazioni umane e queste, proprio perché consistono in una vasta gamma non sempre controllabile, sono certamente uno dei principali problemi nella riproduzione digitale dei colori tramite immagini fotografiche.

6. Problemi e soluzioni nel rilievo e riproduzione del colore utilizzando macchine fotografiche digitali

6.1 Generalità

Nel caso degli ambienti urbani la riproduzione dei colori con fedeltà colorimetrica servendosi del *workflow* illustrato nel paragrafo precedente presenta una serie di problemi specifici, di cui i principali sono legati alla presenza di:

- illuminazione naturale variabile rapidamente nello spazio e nel tempo
- ombre
- riflessioni speculari
- *color bleed* (figura 41).

Ad essi sono date due differenti tipi di soluzioni che risultano particolarmente efficienti se integrate e che consistono in una serie di accorgimenti pratici per minimizzarli e in elaborazioni software specifiche.



Figura 41. Il fenomeno del *color bleed* in un'immagine di un fronte urbano del centro storico di Bologna (image courtesy of Francobraso).

Tra i principali arrangiamenti pratici si ricordano:

- scattare le foto nelle condizioni operative più omogenee possibile (apertura / esposizione, direzione e intensità della luce) senza introdurre filtri o automazioni nella fotocamera;
- scattare le foto con cielo coperto, in modo da avere un'illuminazione diffusa e uniforme senza evidente colore dominante della luce solare, e senza formazione di ombre;
- riprendere le superfici illuminate con un angolo di incidenza con la luce solare al massimo di 20°.

Esistono poi soluzioni software per eliminare automaticamente le ombre portate come quella descritta in (Cun et al., 2020) e le riflessioni speculari come quella illustrata in (Apollonio, Ballabeni e Gaiani, 2017).

I problemi relativi agli effetti della temperatura dell'illuminante e quelli di *color bleed* possono essere minimizzati servendosi di tecniche di bilanciamento del bianco e, più accuratamente, di *color correction*.

6.2 Bilanciamento del bianco

Le tecniche di bilanciamento del bianco si propongono, sostanzialmente di correggere la temperatura del bianco a quella desiderata aggiungendo il colore opposto all'immagine nel tentativo di riportare la temperatura del colore a un valore neutro, sostanzialmente stimando l'illuminante e adattando l'immagine ad esso (figura 42).

Esistono molti metodi per realizzare il bilanciamento del bianco.



Figura 42. Esempio di bilanciamento del bianco dell'immagine di una facciata di un edificio, in basso prima e in alto dopo l'operazione.

Quelli implementati in-camera consistono generalmente nell'impostare un pulsante della *digital camera* per indicare al processore la natura dell'illuminazione della scena oppure cercano di individuare la temperatura di colore dell'illuminante automaticamente con algoritmi di *color constancy*. Questi ultimi possono essere guidati utilizzando un cartoncino griglio rispetto

al quale andare a realizzare la neutralizzazione dell'illuminante di cui il sensore legge i valori RGB per riportarli al neutro. Quest'ultima tecnica può essere realizzata, oltreché in-camera anche successivamente off-camera sull'immagine RAW tramite software come Adobe Camera Raw.

Da un punto di vista algoritmico la soluzione più semplice per realizzare il bilanciamento del bianco consiste nell'adottare il metodo di adattamento cromatico di von Kries che consiste nell'applicare separatamente guadagni adattivi ai tre tipi di coni umani (L, M, S) in modo da mantenere costante l'aspetto adattato del bianco di riferimento. Una matrice 3×3 converte quindi l'RGB o l'XYZ nello spazio colore LMS che rappresenta l'effettivo stimolo per i tre tipi di coni come adattantisi in maniera indipendente. Quindi i tre valori primari LMS sono scalati in modo da bilanciare il colore neutro; infine, il colore può essere convertito allo spazio dei colori voluto, ad esempio l'sRGB. Utilizzando le misure di Viggiano (Viggiano, 2004) ed il suo modello gaussiano di sensibilità spettrale della fotocamera, se i valori RGB dell'immagine RAW prodotta dalla fotocamera sono noti, si può utilizzare la matrice diagonale 3×3 :

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 255/R'_w & 0 & 0 \\ 0 & 255/R'_w & 0 \\ 0 & 0 & 255/R'_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

e convertire ad uno spazio colore RGB adatto all'uso successivo dopo il bilanciamento, come, ad esempio, il DCI-P3.

Da un punto di vista pratico il modo migliore per realizzare il *white balance* è utilizzare un cartoncino grigio, o comunque neutro, dedurre il peso di ogni canale misurato r_w, g_w, b_w e usare come pesi $k/r_w, k/g_w, k/b_w$, in cui k controlla l'esposizione (figura 43).

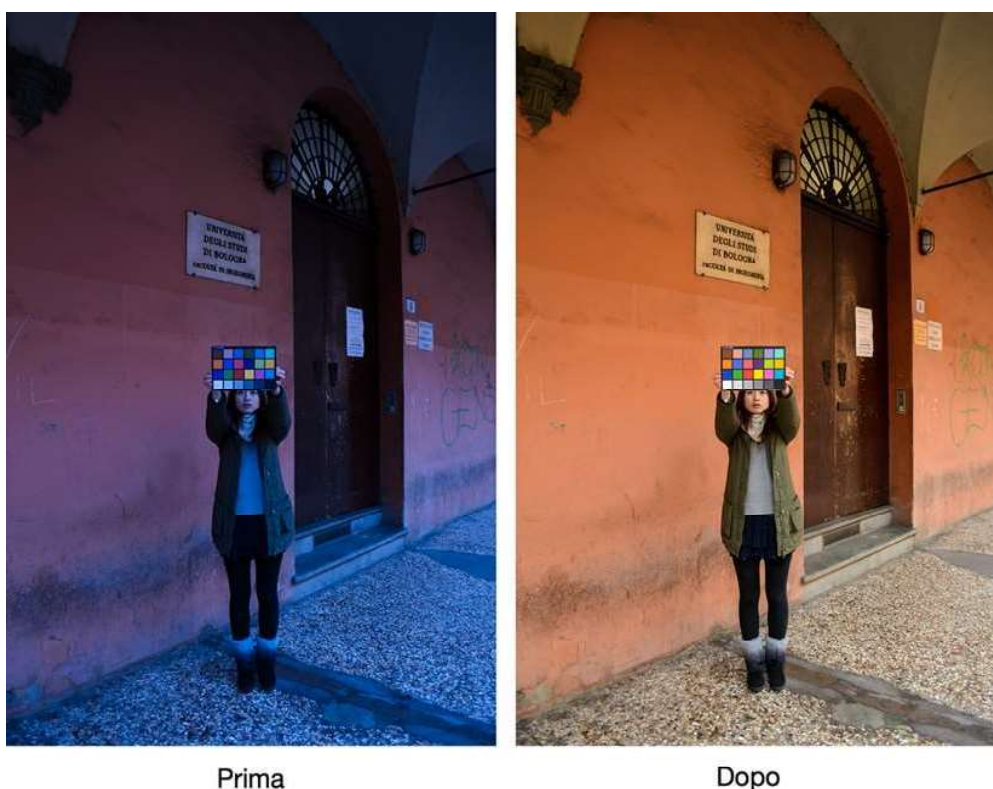


Figura 43. Esempio di bilanciamento del bianco di un'immagine servendosi di un target di cui sono sfruttate le *patches* a scala di grigio del target X-Rite ColorChecker.

6.3 Color correction

Ai fini di una acquisizione accurata del colore, la caratteristica più importante di una fotocamera digitale è la sua sensibilità spettrale, cioè la sensibilità (o risposta) del suo sensore in funzione della lunghezza d'onda. Idealmente, la sensibilità spettrale del sensore dovrebbe assomigliare molto alla sensibilità spettrale del sistema visivo umano, cioè, matematicamente, le sensibilità spettrali di una fotocamera dovrebbero essere una trasformazione lineare delle sensibilità spettrali del sistema visivo umano. Questo perché, se la differenza tra i due sistemi è solo quella di una trasformazione lineare, le sensibilità al rosso, al verde e al blu sono ben stimate. Tuttavia, per la maggior parte dei sensori delle fotocamere, questa caratteristica critica è raramente raggiunta e quindi la maggior parte delle sensibilità spettrali delle fotocamere digitali non sono quindi trasformazioni lineari delle sensibilità spettrali di un sistema visivo umano medio (IEC, 2000). In altre parole, attraverso una mappatura lineare, la fotocamera e un osservatore standardizzato non 'vedono' il colore in modo identico (Jiang et al., 2013). Questo può generare fenomeni di metamerismo tra macchina fotografica e occhio (Lyon e Hubel, 2002) e in ciò è il motivo principale delle imprecisioni di riproduzione del colore nelle immagini digitali.

Obiettivo dell'operazione di *color correction* è correggere le misure del colore della fotocamera verso spazi colore correlati al sistema visivo umano, modellizzando la non-linearità introdotta dall'elaborazione in-camera da parte dei produttori di fotocamere, così da rendere più fedele la qualità della riproduzione del colore.

Da un punto di vista matematico questo si traduce nel ritrovare una relazione lineare tra i valori di irradianza e la codifica in genere non lineare dei pixel prodotta dalla fotocamera. Questa trasformazione del segnale assume solitamente la forma di un profilo ICC in uno spazio colore come sRGB o DCI-P3.

Nella riproduzione dell'immagine, la correzione del colore comporta la mappatura degli spazi colore indipendenti dal dispositivo di acquisizione sugli spazi colore del dispositivo di riproduzione dell'immagine (Ramanath et al., 2005). Per i monitor, questo può essere l'RGB specifico del display; per le stampanti, questo può essere il CMYK specifico della stampante (Yule e Field, 2000).

Correzione del colore si riferisce dunque alle tecniche che consentono di convertire le risposte della fotocamera (ad esempio RGB) in una rappresentazione colorimetrica indipendente dal dispositivo (CIEXYZ) (ISO, 2006a).

Le tecniche di *color correction* in letteratura sono divise in due gruppi: basate sulla sensibilità spettrale e basate su target colore, un metodo codificato dalla norma ISO17321 (ISO, 2006b).

I metodi basati sulla sensibilità spettrale collegano spazi colore dipendenti e indipendenti dal dispositivo mediante una combinazione lineare di curve di sensibilità spettrale della fotocamera e funzioni di corrispondenza dei colori. La soluzione più diffusa per realizzare la *color correction* consiste nell'utilizzare target colore dati da tabelle di *patches* dalla riflettanza spettrale nota, solitamente misurata con uno spettrofotometro (Hong et al., 2001) (figura 44). Dalla loro descrizione colorimetrica e dai corrispondenti valori dei pixel acquisiti non elaborati, è possibile calcolare i parametri di correzione necessari per avere immagini a colori accurate.

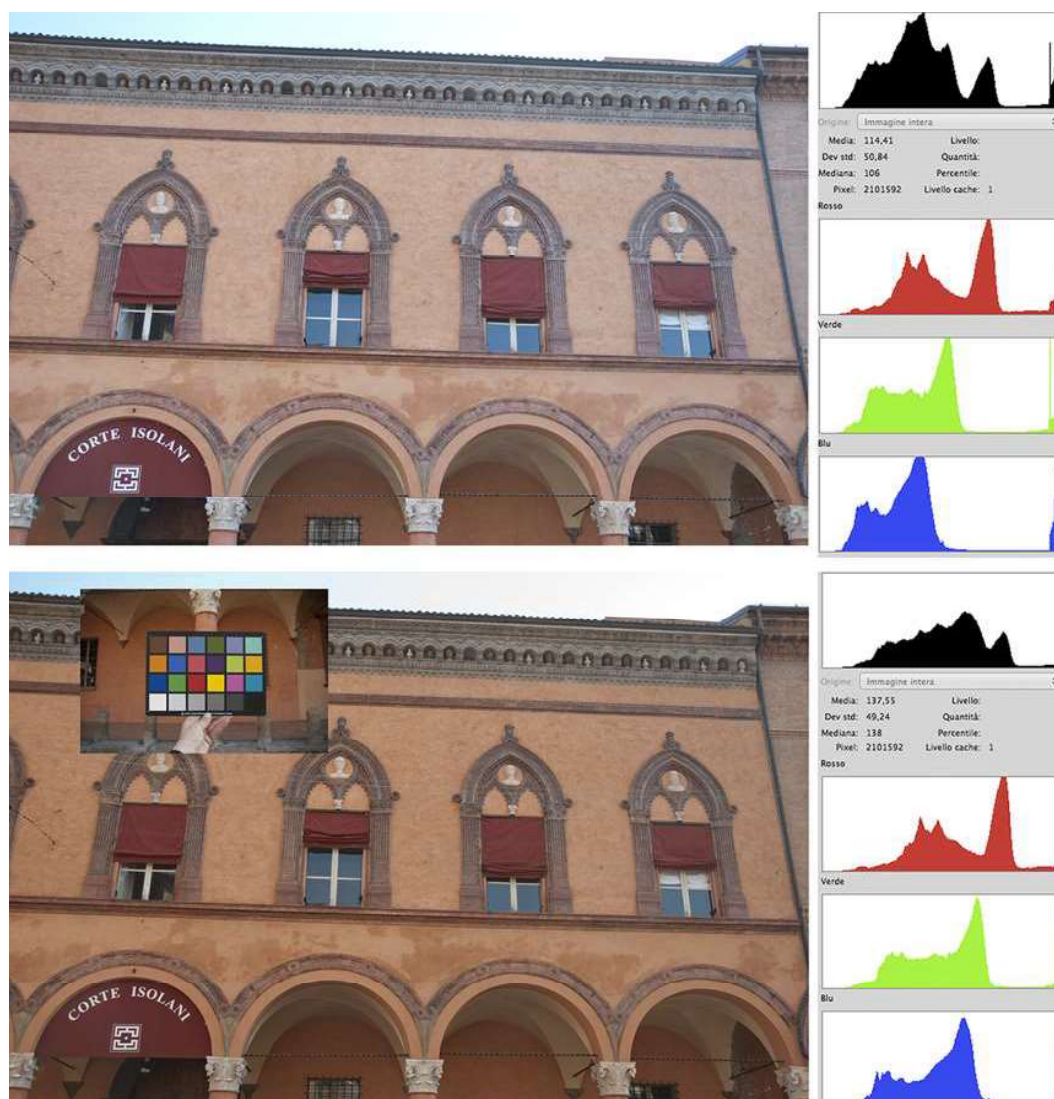


Figura 44. Esempio di *target-based color correction*. In alto l'immagine prima della correzione, in basso l'immagine corretta.

I risultati ottenuti da questo metodo sono specifici di un determinato illuminante (Borrino et al., 2017) e molto sensibili alla tecnica utilizzata e agli errori dell'operatore nel processo di acquisizione: un'illuminazione non uniforme sul target, un'inquadratura non corretta ed effetti di *glare* possono influenzare erroneamente i risultati (Lanaro et al., 2018). A questi si aggiungano le incertezze sulla trasformazione matematica necessaria e sul metodo di misurare la distanza tra il colore atteso e il colore acquisito, su cui gli studiosi, pur nella comune ipotesi che i sistemi di *imaging* con elevata precisione del colore producono un'immagine più accurata rispetto ai sistemi con una minore precisione del colore e che l'entità della differenza cromatica totale prevede la qualità della percezione dell'immagine a colori, continuano confrontarsi, senza una soluzione definitiva (Melgosa et. al., 2017). In ciò un

problema fondamentale deriva dall'osservazione che le formule di differenza del colore possono essere impiegate per due campionamenti solo sotto le stesse 'condizioni di riferimento', altrimenti si devono considerare trasformazioni di adattamento cromatico per analizzare i cambiamenti di colore, aggiungendo in pratica complessità non gestibili sul campo.

6.4 Target colore

La scelta del target da utilizzare per la *color correction* non è univoca anche se lo storico X-Rite (2021) ColorChecker Classic progettato alla metà degli anni 1970 da Calvin MacCamy è certamente la scelta più diffusa per la sua consistenza di risultati (MacCamy et al., 1976) (figura 45). Si tratta di un rettangolo di dimensioni 21,59 x 27,94 cm che consiste di 24 quadrati colorati di riflettanza nota applicati su carta e poi montati su un supporto di cartone con una cornice nera. I colori delle *patches* sono rappresentativi di vari oggetti naturali con toni problematici per la riproduzione (approssimazioni di pelle umana mediamente chiara e scura, il blu cielo, il verde foglia e il blu fiore di cicoria), dei primari additivi e sottrattivi (rosso, verde, blu, ciano, magenta e giallo), e infine sei patch formano una scala uniforme di luminosità grigia, con densità ottiche tra 0.05 e 1.50 e un intervallo di 4.8 f-stops (EV) a un gamma di 2.2.

Una nuova versione dello stesso target, l'X-Rite ColorChecker Passport Photo, con coloranti identici ma una dimensione ridotta di 125 x 90 mm con ogni patch di lato di 10 mm anziché i 40 mm originali, è stata realizzata per tenere conto di soggetti di dimensioni ridotte.

Per le fotocamere digitali, è stata sviluppato, sempre da X-Rite, il target Digital SG ColorChecker, con 140 campioni anziché 24 e una finitura semilucida, anziché opaca. Il target SG include gli stessi 24 colori del ColorChecker originale oltre a 17 toni di grigio e 16 tonalità della pelle.

A1 115 82 68	B1 194 150 130	C1 98 122 157	D1 87 108 67	E1 133 128 177	F1 103 189 170
A2 214 126 44	B2 80 91 166	C2 193 90 99	D2 94 60 108	E2 157 188 64	F2 224 163 46
A3 56 61 150	B3 70 148 73	C3 175 54 60	D3 231 189 31	E3 187 86 149	F3 8 133 161
A4 243 243 242	B4 200 200 200	C4 160 160 160	D4 122 122 121	E4 85 85 85	F4 52 52 52

Figura 45. Il target X-Rite ColorChecker Classic con i valori RGB nello spazio colore sRGB di ogni *patch*.

I vantaggi del Digital SG sono molto tuttavia limitati nell'area del rilievo del colore urbano dove è utilizzata la stessa correzione del colore per molte immagini, inoltre il grande numero di patch crea più problemi che vantaggi aumentando il rischio di non uniformità di esposizione entro il target con conseguenti risultati non corretti. Peraltro, studi rivolti all'aumento dei colori hanno mostrato come i vantaggi rispetto ai soli 24 del ColorChecker Classic siano trascurabili (Cheung e Westland, 2006).

6.5 Valutazione della precisione della riproduzione del colore

Nella valutazione della qualità dell'immagine corretta colorimetricamente, è necessaria una validazione volta a determinare la bontà dell'operazione di correzione del colore. Essa comporta il confronto dei risultati ottenuti dalla correzione del colore del target con le misure strumentali.

Questa operazione richiede l'uso di uno spazio colore indipendente dal dispositivo in cui il colore è definito. La scelta più comune è l'utilizzo dello spazio colore percettivo CIE L*a*b* e la misurazione rappresenta una differenza cromatica percettiva tra i valori di colore misurati e stimati (Wyszecki e Stiles, 2000).

L'utilizzo di valori L*a*b* permette di misurare rapidamente la luminanza che esprime quanto bene l'immagine è stata acquisita e rappresenti la luminosità della scena originale. La luminanza è quindi un parametro fondamentale e deve essere quanto più accurata possibile: un'immagine troppo scura o troppo chiara può impedire una riproduzione fedele dei colori.

Per questo l'esposizione dell'immagine all'atto dello scatto gioca un ruolo importante, soprattutto per i piccoli sensori delle fotocamere degli smartphone.

La precisione del colore viene calcolata in termini di cromaticità media della fotocamera rispetto alla cromaticità ideale media. Per la misura della differenza visiva del colore vengono utilizzate diverse formule.

Una soluzione usata comunemente è calcolarla per ogni campione di colore come differenza di colore CIE L*a*b*, DeltaE (ΔE^*), distanza lineare (euclidea) tra i punti che rappresentano valore misurato e valore atteso dei singoli colori delle *patches* del target. DeltaE è quindi definita come la differenza tra due colori nello spazio colore CIE L*a*b*. È da notare che la metrica DeltaE contiene sia l'errore di luminosità ($\Delta L = L_2 - L_1$) con L_2 e L_1 rispettivamente valore della luminanza rilevato e misurato, sia gli errori di colore.

Valori di DeltaE riconosciuti sono:

- 0 - 1: una differenza normalmente invisibile
- 1 - 2: una differenza molto piccola, evidente solo a un occhio esperto
- 2 - 3: una differenza media, evidente anche ad un occhio inesperto
- 3,5 - 5: un'ovvia differenza
- > 6: una differenza molto evidente.

Tra le varie metriche DeltaE sviluppate nel tempo per il caso delle superfici dell'architettura urbana risulta assai appropriata la metrica del colore CIE del 2000 (ISO, 2014) che, anche se mostra alcune discontinuità, è raccomandata dalla CIE stessa per le differenze di colore all'interno del range 0–5 unità, cioè entro i valori adeguati al campo qui di interesse (Melgosa et al., 2013). In essa la differenza di colore tra due campioni viene misurata dalla formula:

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C} \frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}}$$

dove ΔL , ΔC , ΔH rappresentano rispettivamente l'errore di luminosità, l'errore di cromaticità e l'errore di tonalità; S_L , S_C , e S_H rappresentano le funzioni di ridimensionamento dipendenti da luminosità, cromaticità e tonalità. I valori dei coefficienti k possono essere utilizzati per compensare ambienti sperimentali. R_T è una funzione di rotazione che dipende dalla tonalità e dalla cromaticità e compensa le caratteristiche dell'angolo di tonalità soprattutto in caso di colore blu.

L'equazione è, in pratica, la distanza euclidea nello spazio colore L*a*b* tra i valori dell'immagine acquisita e i valori misurati con alcuni fattori di

correzione e compensa tramite una serie di coefficienti le non uniformità percettive dello spazio colore $L^*a^*b^*$ e quindi si correla meglio con la differenza cromatica percettiva rispetto ad una misura di distanza euclidea semplice (Mokrzycki e Tatol, 2012).

Nel nostro caso i valori $L^*a^*b^*$ sono valori medi delle *patches* colorate in modo uniforme del target X-Rite ColorChecker Classic, i cui valori di colore sono noti con precisione. Valori attesi delle coordinate RGB a 8 o 16 bit (solitamente 8 bit nello spazio colore sRGB) delle *patches* si possono avere:

- da X-Rite che fornisce i dati di riferimento dei differenti target (X-Rite, 2021)
- misurandole con uno spettrofotometro
- dalle misurazioni di Danny Pascale per i target costruiti prima del 2014 (Pascale, 2006).

Per misurare i valori di DeltaE esistono vari strumenti che possono variare da quelli professionali come Imatest Master (IMATEST, 2021) (figura 46) a quelli open source come il tool on-line di ColorMine.org (Colormine, 2021) o quello di Bruce Lindbloom (Lindbloom, 2021).

Per il rilievo di colori appartenenti ad ambienti urbani di solito si ritengono i risultati accettabili se ΔE^*_{00} è inferiore a 3.0.

In questo processo di misurazione dell'errore di valutazione del colore, una questione critica riguarda l'acquisizione del target che deve essere illuminato uniformemente. Questo richiede il posizionamento del target in posizione ortogonale all'asse ottico della fotocamera e possibilmente su sfondo scuro per ridurre al minimo gli effetti di *glare* che danno risultati inaspettati nel processo di calibrazione. Inoltre, l'immagine del target deve avere una larghezza compresa tra 500 e 1500 pixel (IMATEST, 2021).

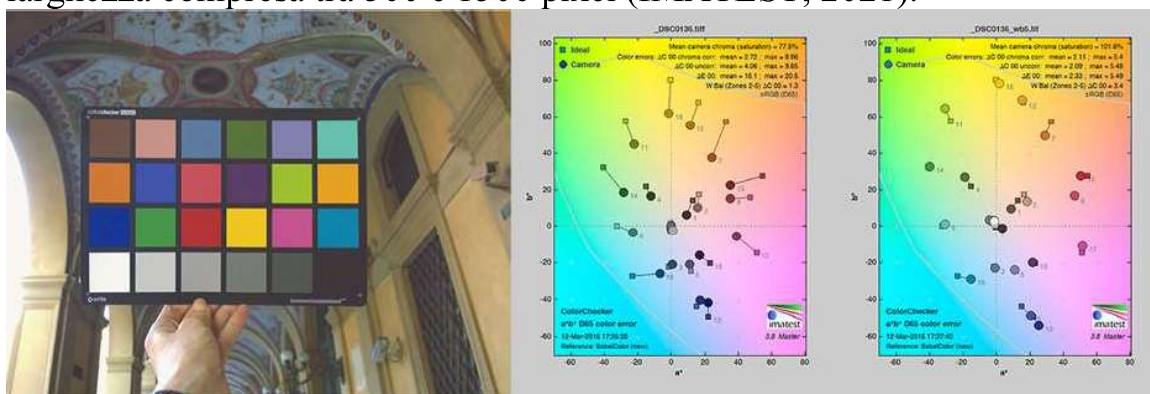


Figura 46. Valutazione del DeltaE relativa al target X-Rite ColorChecker Classic nella foto. A sinistra prima e a destra dopo la correzione del colore.

Altre questioni pratiche relative alla fotografia del target che possono influire sulla qualità della correzione del colore sono:

- un posizionamento decentrato del target nella foto;
- un ampio angolo tra l'asse della telecamera e la normale al piano su cui giace il target;
- una differenza rimarchevole tra il suo indice di riflessione alla luce e quello del manufatto da rilevare che fa riflettere più o meno luce rispetto al materiale su cui è posto.

Nonostante questi problemi, la correzione del colore basata su target è la tecnica preferita nel campo del rilievo urbano e dell'architettura attuale e storica, essenzialmente per la loro flessibilità e facilità d'uso che implica una semplice acquisizione di un campione di colore standard dal costo estremamente limitato.

6.6 Il problema del rumore delle immagini

Come accennato in precedenza, un problema fondamentale, soprattutto se si utilizza una smartphone camera, nella riproduzione fotografica del colore è quello legato alla presenza nelle immagini di rumore, inevitabile nelle immagini naturali, a causa dei limiti tecnologici dei sensori, del mezzo (cioè l'aria), dello sporco sugli oggetti, dovuti ad esempio a polvere e altre forme d'inquinamento.

Per stimare in modo affidabile i colori in scene esterne un passo fondamentale consiste nella sua analisi e filtraggio (Kawakami et al., 2005) (figura 47).

Il rumore di un'immagine è definito dallo standard ISO 15739 come "variazioni indesiderate nella risposta di un sistema di imaging" (ISO, 2013) e può causare artefatti diretti o indiretti all'immagine: può sfocare

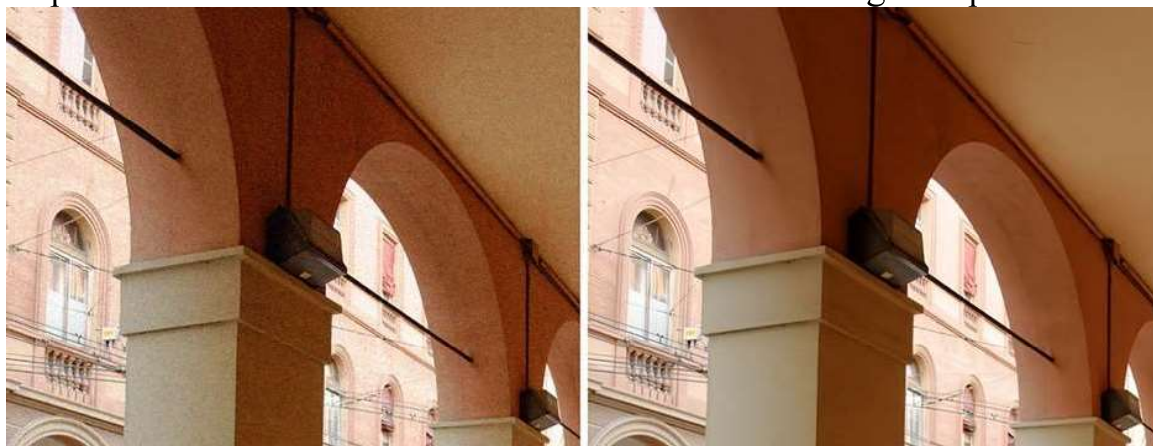


Figura 47. Immagine di smartphone scattata a basso livello di ISO prima e dopo l'applicazione di un filtro di riduzione del rumore.

l'immagine diminuendone il contrasto e, soprattutto ai nostri fini, far diminuire la precisione di acquisizione del colore poiché può generare colori errati dei pixel.

Si forma quando la luce che colpisce il sensore viene convertita in un segnale elettrico e dipende dalle caratteristiche del sensore della fotocamera, dalla sua sensibilità e dal tempo di esposizione, nonché dall'elaborazione digitale (o da tutti questi fattori insieme). Nelle fotocamere digitali il rumore è costituito da due parti: rumore fisso che dipende dalle caratteristiche costruttive del sensore e non varia e rumore dello scatto, che aumenta con la radice quadrata del numero medio di fotoni che colpiscono i pixel. Va notato che il valore del rumore totale è una mix complesso che proviene da diverse sorgenti: il sistema di lenti, la dimensione dei pixel, la tecnologia e il processo produttivo dei sensori, il processo di elaborazione delle immagini, la velocità ISO, il tempo di esposizione, la tecnica di conversione del file RAW in un file renderizzato.

In particolare, il rumore varia con la dimensione dei diodi che costituiscono il sensore. Può essere molto basso nelle macchine fotografiche SLR, che hanno diodi circa di 3 μm , e può diventare rilevante nelle smartphone camera che hanno sensori di circa 1 μm , specialmente a velocità ISO elevate o in condizioni di scarsa illuminazione (Peltoketo, 2015).

La quantità di rumore può essere parzialmente controllata dai parametri della fotocamera, come la velocità ISO e il tempo di esposizione, e dagli algoritmi di *denoising*, un'elaborazione digitale applicata all'immagine acquisita che cerca di eliminare, o almeno minimizzare, gli effetti di degrado e l'introduzione di artefatti nell'immagine causati dal rumore preservandone le strutture nitide. Tuttavia, la separazione delle differenti sorgenti di rumore è un compito difficile e le tecniche di riduzione del rumore devono essere utilizzate con attenzione per evitare di avere, anziché una riduzione degli artefatti, un danneggiamento dell'informazione contenuta nell'immagine, ad esempio la sua trama. Strategie come utilizzare ISO bassi e tempi di esposizione lunghe per acquisire un'immagine 'priva di rumore' non sono poi applicabili alle smartphone camera: il rumore rimane rilevante anche con le migliori impostazioni della fotocamera (Abdelhamed et al., 2018).

Per applicare correttamente algoritmi di riduzione del rumore senza perdere informazione è necessario un processo in due passaggi:

- misurazione del rumore
- riduzione del rumore basata sulle misure fatte.

Le misurazioni del rumore devono idealmente essere correlate con il suo aspetto percepito riferito alla scena originale, quindi non influenzato dalla risposta tonale della fotocamera o del convertitore RAW, e devono essere abbastanza semplici da poter essere interpretate senza difficoltà.

Le misurazioni del rumore si riferiscono tipicamente alla deviazione standard del segnale S :

$$N = \sigma(S)$$

dove σ indica la deviazione standard e S è il segnale e sono valutate solitamente come rapporto segnale / rumore (SNR)

$$SNR = S/N$$

che, seguendo la ISO 15739, può essere valutato per le fotocamere tramite un target uniformemente grigio correttamente illuminato. In questo caso tutte le variazioni nell'immagine acquisita rispetto al grigio uniforme possono essere giudicate come rumore. Questa valutazione non può isolare in modo specifico la fonte del rumore, tuttavia, è possibile distinguere il rumore fisso e il rumore temporale e calcolare i valori SNR corrispondenti.

Una tecnica semplice per valutare il rumore senza dover ricorrere alle complesse procedure della ISO 15739 o dello standard IEEE CPIQ P1858 (IEEE CPIQ, 2016), certo più accurati, ma in modo trascurabile nel campo della valutazione del colore dei sistemi urbani, è quello di utilizzare le sei *patches* in scala di grigio del target X-Rite ColorChecker Classic leggendo i valori misurati 1-255 nello spazio colore RGB renderizzato selezionato (ad esempio sRGB) e poi normalizzandoli, cosicché il rapporto segnale / rumore diventa:

$$SNR = 100\% * (\text{Noise nei pixel}) / (\text{A4 patch pixel level} - \text{F4 patch pixel level})$$

La tecnica comporta un minor numero di misurazioni e calcoli meno complessi rispetto alle soluzioni proposte dagli standard ISO e IEEE, ma è abbastanza accurata, poiché fa riferimento al rumore alla scena: le prestazioni del rumore non sono influenzate dal contrasto della fotocamera consentendo l'identificazione accurata dei parametri dell'algorithmo di *denoise* ottimali per le immagini acquisite.

La riduzione del rumore susseguente può essere realizzata sia con gli algoritmi implementati dei software commerciali come Adobe Camera Raw, oppure open source tra cui si cita la soluzione stato dell'arte *Block Matching 3D (BM3D)* (Dabov et al., 2007), (Mäkinen et al., 2020) su cui anche il nostro gruppo di ricerca ha costruito una variante efficiente chiamata *CBM3D-new* (Gaiani et al., 2016), che consiste nell'implementazione di tre diversi profili di parametri corrispondenti a differenti SNR, richiamabili automaticamente a partire dalla misura del rumore. Questa soluzione è più tradizionale dei moderni metodi di *denoise* che impiegano reti neurali. Ma anche se il *deep learning* può rappresentare immagini complesse e proprietà di rumore,

tuttavia l'addestramento di questi modelli richiede grandi insiemi di dati congruenti con le immagini su cui applicare gli algoritmi di riduzione del rumore. Per questo, nonostante il grande lavoro compiuto sulla progettazione di reti neurali per il *denoise*, recenti benchmark (Plötz e Roth, 2017) rivelano che ancora i modelli di *deep learning* sono quasi sempre superati dai tradizionali algoritmi quando valutati su immagini RAW reali.

6.7 Un piccolo riepilogo operativo

Riepilogando possiamo affermare come, al fine di avere immagini colorimetricamente affidabili per valutare il colore dei sistemi urbani, sia necessaria un'operazione di correzione del colore che permetta di scaricare l'illuminante dai valori misurati fotograficamente. Questo può essere fatto con un processo basato sull'utilizzo di un target colore in due fasi: nella prima è realizzata la neutralizzazione rispetto a una patch di colore grigio (per evitare i tipici problemi del bianco dovuti a una esposizione eccessiva), nella seconda la correzione del colore rispetto ad un insieme di patch colore i cui valori colorimetrici sono noti a-priori. Questa *color correction* è realizzata ritrovando la matrice 3x3 che mappa con la miglior approssimazione possibile le risposte della fotocamera alle risposte corrette (distanza minima tra valori misurati e valori attesi).



Figura 48. Flusso di lavoro per la correzione radiometrica dei fotogrammi: in alto a sinistra, immagine originale; al centro, bilanciamento dell'immagine con riferimento colore X-Rite ColorChecker Classic; a destra, definizione del profilo ICC. In basso, valutazione del risultato della procedura con il software Imatest Master. Workshop "Colour Measurement and Documentation in Architectural Paint Research", 21-25/10/2019, Estonian Academy of Arts (image courtesy Silvia Bertacchi).

La valutazione della bontà della misura è fatta nello spazio colore CIEL*a*b* misurando la distanza euclidea DeltaE.

La procedura applicabile per ogni insieme di fotografie che presentino le stesse condizioni di scatto può quindi essere riassunta come segue:

1. determinare l'illuminante
2. applicare von Kries
3. applicare la matrice di colore
4. applicare qualsiasi non linearità (gamma) desiderata
5. visualizzare l'immagine.

7. Conservazione e tutela del colore: il quadro normativo

7.1 L'evoluzione storica

I Piani del Colore nascono, in Italia, come risposte entro il più generale problema di indirizzare o regolamentare in maniera prescrittiva gli interventi riguardanti i “lavori di riparazione, modificazione e di costruzione all'esterno dell'edificio”, come li indica il ‘Regolamento Disciplinare d'Ornato e Polizia Stradale per la Città e Sobborghi di Cesena’, allestito da Giacomo Guidi e Giuseppe Gallessi, per conto del Consiglio Comunale nel 1857.

Fin dalla prima metà dell'Ottocento in Piemonte, nell'allora Regno di Sardegna, furono adottati strumenti normativi che avevano lo scopo prioritario di regolamentare gli interventi edilizi e uniformare la scena urbana, dando nuovo decoro e una degna definizione ai fronti. Al fine di ottenere una quinta omogenea si ammetteva la ricomposizione degli allineamenti ai profili stradali, anche con avanzamento, ove necessario, degli edifici esistenti. Prioritario, al di là dei singoli e specifici vincoli di altezza o distanza o delle condizioni igienico sanitarie degli edifici, era l'obiettivo di fissare e controllare in quale modo si andasse configurando il ‘volto della città’, ovvero l'immagine che in questo modo poteva assumere la scena degli accadimenti quotidiani.

L'amministrazione comunale aveva la possibilità di imporre ai proprietari l'intervento sui prospetti degradati e tutti gli elementi che componevano la facciata erano regolamentati per posizione, misura e colore.

Uno dei primi (se non addirittura il primo) istituti/commissioni di vigilanza urbanistica preposti a operare con funzioni consultive in materia di “ingrandimenti e abbellimenti interni della città, sobborghi e loro vicinanze” era il Consiglio degli Edili della città di Alessandria, operativo a partire dal 1822. In altre città, come ad esempio Verona, operava la Commissione d'Ornato o ancora la Commissione Conservatrice dei Monumenti, Belle Arti e Antichità, istituite entrambe presso la Prefettura.

Giovanni Brino (Brino e Pascolati, 2007) documenta che a Torino e Asti, nel cortile del palazzo del governo cittadino - analogamente a quanto era accaduto per le unità di misura - fosse presente una tavolozza con i campioni ('moduli') dei colori, progressivamente numerati con codici numerici, e a cui il Consiglio di Ornato poteva fare riferimento nella prescrizione dei colori da utilizzare nella decorazione e tinteggiatura delle facciate, nuove o da restaurare (figura 49).

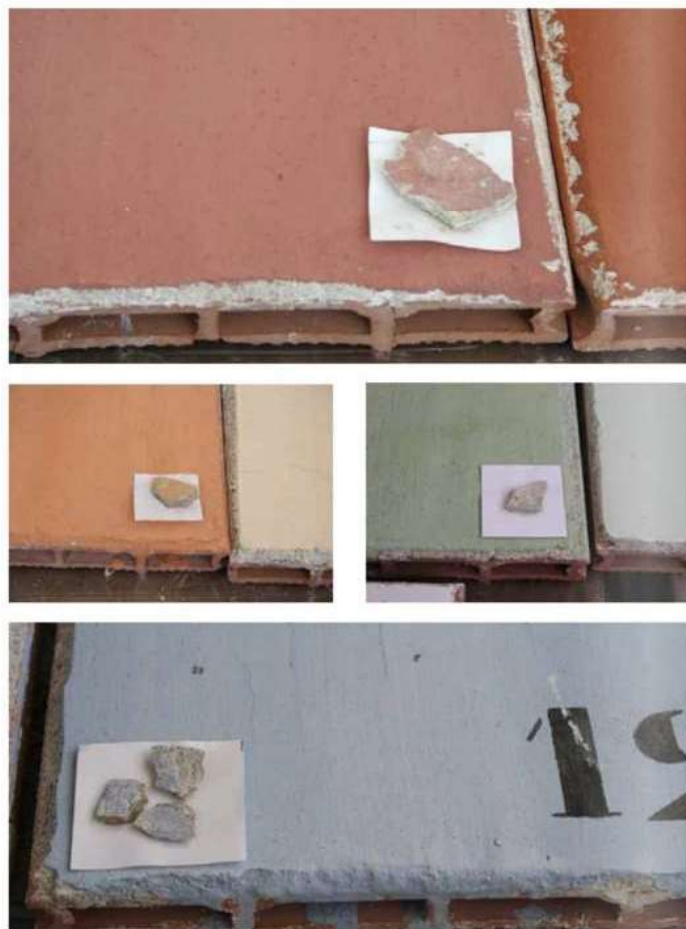


Figura 49. Piano del colore di Asti. Particolare della "Tavolozza dei colori" della città di Asti (da Brino e Pascolati, 2007).

Questo governo dell' 'ornato delle fabbriche', che si afferma in numerose città italiane all'inizio dell'Ottocento, non basa il proprio operato sulla definizione di determinate quantità (ad esempio misure, superfici o volumi), ma piuttosto sulla modalità del costruire, non sulla definizione di indici volumetrici e distanze, ma di altezza e allineamento, non sulla predisposizione di apparati normativi, ma di 'regole di buona maestria'. Gli esiti qualitativi avuti sulla

città ottocentesca ne attestano l'indubbia efficacia nella costruzione della scena e dell'immagine urbana.

Col passare degli anni e con il cambiare delle politiche, mutano anche le finalità dello strumento regolatore e degli strumenti attuativi. Nel periodo fascista si afferma, di fatto, il concetto della 'razionalizzazione' della forma della città. L'illuminazione naturale degli spazi pubblici condiziona anche il colore degli edifici: era concesso infatti un colore chiaro solo per quelli prospicienti le vie più strette e quindi meno luminose.

Nelle città con edifici porticati, il colore di questi ultimi doveva essere lo stesso degli edifici appartenenti alla medesima via o piazza: in questo modo si estendeva il carattere di omogeneità e di uniformità all'intero isolato unito dal portico. Inoltre, in alcuni casi il Comune contribuiva a proprie spese a raggiungere questo obiettivo prendendosi l'onere di pavimentare i portici stessi. Nelle condizioni economiche e sociali difficili che caratterizzarono, per quasi un quarto di secolo il secondo dopoguerra, l'intento politico fu quello di consentire la ricostruzione e la ripresa del paese. Solo con gli anni Sessanta, quando il sistema industriale italiano raggiunse un grado di maturazione e di sviluppo internazionale ormai consolidato, si assistette alla rinascita di un nuovo dibattito urbanistico. È in questo periodo che lo sguardo torna a rivolgersi anche verso i centri storici e al tessuto consolidato, vedendo crescere un nuovo interesse finalizzato all'intervento sull'esistente.

Il problema del recupero edilizio e dei centri storici diventa centrale nel dibattito culturale e negli anni '70 anche nel dibattito politico. I comuni italiani iniziano a recuperare e adeguare i propri regolamenti edilizi - con indicazioni precise sull'intervento di recupero del tessuto storico - che guideranno tutti gli interventi di ristrutturazione dei primi anni '80 come il PEEP (Piano di Edilizia Economica Popolare) per il centro storico del Comune di Bologna del 1973 (Cervellati e Scannavini, 1973). Se i regolamenti edilizi precedenti ponevano l'attenzione verso prescrizioni ed indicazioni destinate al singolo edificio, pensato come isolato dal suo contesto, e ponendo in secondo piano l'obiettivo dell'uniformità e di un organico inserimento in una struttura urbana consolidata, i nuovi programmi sono viceversa volti a considerare l'immagine urbana - costituita dall'insieme delle facciate della città storica - come elemento testimoniale e di valore culturale e storico.

È proprio negli anni Settanta, sollecitati dal dibattito sulla conservazione dei centri storici che nascono sia un crescente interesse scientifico verso gli intonaci e le coloriture nell'edilizia storica - ben dimostrato dal Convegno promosso dal Ministero per i Beni Culturali e Ambientali 'Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica' del 1984 i cui atti furono pubblicati due anni

più tardi sul Bollettino d'arte (sul supplemento al n. 35-36 del 1986) - sia numerosi piani di regolamentazione dedicati in maniera specifica al colore.

7.2 Il quadro normativo italiano attuale

In Italia gli strumenti che regolamentano, oggi, a livello comunale gli interventi di rifacimento o tinteggiatura delle facciate di edifici esistenti, con particolare riferimento al tema del colore (cioè i cosiddetti Piani del Colore o strumenti simili), rientrano nella disciplina dei Regolamenti edilizi. Si tratta, infatti, di strumenti normativi – non urbanistici - che disciplinano e regolamentano gli aspetti tecnico-estetici relativi ad alcune parti di un immobile (prioritariamente le facciate con i relativi componenti edilizi). Le amministrazioni comunali, nel rispetto della propria discrezionalità e delle sovraordinate e specifiche norme statali e regionali che dettano i principi legislativi generali, possono redigerli e adottarli.

I Piani del Colore sono quindi strumenti che si integrano con il Piano Regolatore, con il Piano Urbanistico Generale o il Piano Strutturale Comunale vigente, definendo le procedure e le modalità che regolamentano gli interventi che interessano i piani verticali degli edifici ricadenti, in genere, all'interno delle perimetrazioni dei Centri Storici, o di aree di particolare e significativo interesse. Nel caso di eventuali discordanze tra le differenti normative, proprio per la rilevanza degli aspetti tecnico-estetici di cui tratta, può prevedere la prevalenza delle norme contenute nel Piano del Colore, rispetto alle altre che corredano gli strumenti urbanistici.

Il Piano del Colore ha come scopo la salvaguardia dei piani verticali degli edifici ricadenti all'interno dell'area di interesse (prioritariamente il Centro Storico, ma non esclusivamente), pertanto, oltre a normare gli interventi di restauro e manutenzione straordinaria di facciata, sia globale sia per parti omogenee, si propone di eliminare le cause del degrado esistente, indicando in maniera puntuale le tecniche da utilizzare nel restauro delle pareti verticali del Centro Storico.

La normativa o regolamento che lo costituiscono si può comporre o essere integrato anche da una serie di elaborati tecnici, grafici o descrittivi riguardanti differenti tematiche di approfondimento, come ad esempio:

- Tavolozza dei colori
- Abaco degli elementi tecnico-morfologici
- Elaborati dimostrativi/esemplificativi di rilievo, documentazione e intervento
- Abaco fotografico degli elementi tecnico-morfologici
- Abaco degli elementi in pietra naturale e/o laterizio faccia vista

- Abaco delle alterazioni cromatiche e dei depositi su pietre e laterizi faccia vista
- Guida pratica agli interventi di restauro/manutenzione/rifacimento ecc.

Nel 2008 Massimo Ballabeni nell'ambito del progetto di rilievo e mappatura del colore nel centro storico di Cesena ha realizzato un'analisi comparativa tra i principali e più significativi piani del colore adottati tra il 1978 e il 2008 (Ballabeni, 2008) con finalità classificatorie che risulta, ancora oggi, molto chiara e efficace. Secondo tale classificazione i piani del colore possono essere suddivisi in funzione del tipo di prescrizioni che essi prevedono:

- *deterministico*, che pianifica puntualmente ogni intervento per ogni edificio (mappe cromatiche) e stabilisce il colore utilizzabile entro una gamma prestabilita (tavolozza);
- *vincolato*, che definisce delle linee guida puntuali di intervento basandosi sull'analisi del rilievo del costruito (mappe e tavolozza) entro le quali devono muoversi i soggetti per la proposta di progetto e le amministrazioni per il controllo;
- *orientativo*, che individua degli elementi cromatici base (tavolozza) e criteri generali, lasciando la formulazione del progetto ai privati, soggetto al controllo da parte dell'Amministrazione;

e in funzione dell'autonomia della scelta cromatica dell'intervento:

- *colore imposto*, che stabilisce colori e modi di applicazione degli interventi definiti molto puntualmente;
- *colore parzialmente imposto*, che individua più livelli di libertà d'intervento in funzione della tipologia dell'edificio;
- *colore proposto*, che individua criteri di accostamento e una gamma cromatica ma lascia al privato la scelta quando non si tratti di emergenze architettoniche.

Un caso particolare è quello degli immobili che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico (Beni Culturali vincolati) gli interventi sulle facciate sono eseguiti e regolamentati ai sensi del Decreto Legislativo 22 gennaio 2004 n. 42 (Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137) e successive modificazioni e integrazioni e di eventuali (laddove vigenti) leggi regionali (come quelle relative alla individuazione, tutela e valorizzazione dei Beni Culturali architettonici). Questi interventi, inoltre, devono essere autorizzati dalla competente Soprintendenza all'Archeologia Belle Arti e Paesaggio.

7.3 Il Piano del colore alla scala urbana e dell'edificio: esempi di applicazione

Ripercorrendo, brevemente, la storia dei Piani del Colore, certamente l'antesignano è il già citato Piano del Colore per la città di Torino, del 1978, curato da Giovanni Brino (Brino, 1986) (Rosso e Brino, 1980) e nato sulla scia di alcune esperienze condotte negli anni precedenti in Europa (Versaci e Cardaci 2016), ma soprattutto come naturale sbocco di una serie di studi condotti dallo stesso Brino sul colore nel campo dell'architettura (Brino, 1968).

Con questo piano Brino definisce, per la prima volta in Italia, un nuovo strumento normativo che ha l'obiettivo di affrontare i problemi di 'manutenzione' urbana delle facciate della città storica, cercando soluzioni operative alle questioni legate alle trasformazioni delle caratteristiche cromatiche del paesaggio urbano, ma anche di porre rimedio all'incuria e all'oblio, così come al degrado dovuto alla stessa azione dell'uomo.

Il Piano per la città di Torino si distingue dalle esperienze coeve per il suo pragmatismo e l'implementazione della metodologia proposta mediante una serie di passaggi sequenziali, poi divenuti un solido modello di riferimento per i piani seguenti:

1. ricerca d'archivio per identificare i colori antichi delle facciate (o almeno fino all'epoca in cui è possibile risalirvi dal punto di vista storico);
2. individuazione delle ricette tecniche per produrre colore e intonaco e i materiali utilizzabili;
3. definizione della 'tavolozza dei colori';
4. redazione delle 'mappe cromatiche' che visualizzano i colori su base planimetrica (a scala urbana);
5. elaborazione delle cosiddette 'strisce' delle strade che rappresentano i prospetti con le relative indicazioni cromatiche (a scala di edificio).

Questa solidità d'impianto permise lo scaturire da questo 'prototipo', negli anni seguenti, di una serie di piani adottati da altre città piemontesi come Asti (1982), Saluzzo (1982) (Brino, 1985) o Novara (1999). Tuttavia, essa non impedì il sorgere di varie problematiche, che portano alla sua sospensione, già nel 1983: difficoltà di impiego dei materiali previsti (intonaci e tinte), mancanza di un'adeguata preparazione da parte degli operatori preposti a metterlo in atto, mancanza di una struttura amministrativa di consulenza, controllo e coerenza per gli interventi in grado di garantire la sua corretta applicazione, difficoltà di garantire la coerenza stilistica auspicata dal Piano. Una delle principali critiche che furono rivolte al Piano di Brino riguardarono il modo di intendere il 'restauro', contestando la legittimità di una ricerca del

colore 'originario' per le fabbriche di Torino. Il piano, infatti, anche se fondato su basi 'oggettive' derivanti dalle indagini storiche e stratigrafiche, finiva per tradurre in norme attuative essenzialmente la mappa cromatica del 'Consiglio degli Edili' della prima metà dell'Ottocento.

Il carattere operativo del Piano del Colore per la città di Torino, che si sostanziava in norme procedurali prescrittive che definivano gli interventi vietati, quelli possibili (mappa cromatica), i materiali e le tinte utilizzabili (tavolozza), fu ripreso e ulteriormente sviluppato nel Piano del Colore di Alessandria del 1999-2000, che si caratterizzò a sua volta per un approfondimento delle fasi di analisi e rilievo, unitamente alla completa informatizzazione di tutti gli apparati. In questo piano, come in quello per Asti del 1982 in cui Brino fu consulente, emerge una grande attenzione per lo stato attuale, per i materiali e le specificità di ogni singola fabbrica che costituisce una risposta alla critica alla generalizzazione data dall'impiego dei modelli cromatici applicati per tipologie di intervento (figura 50).

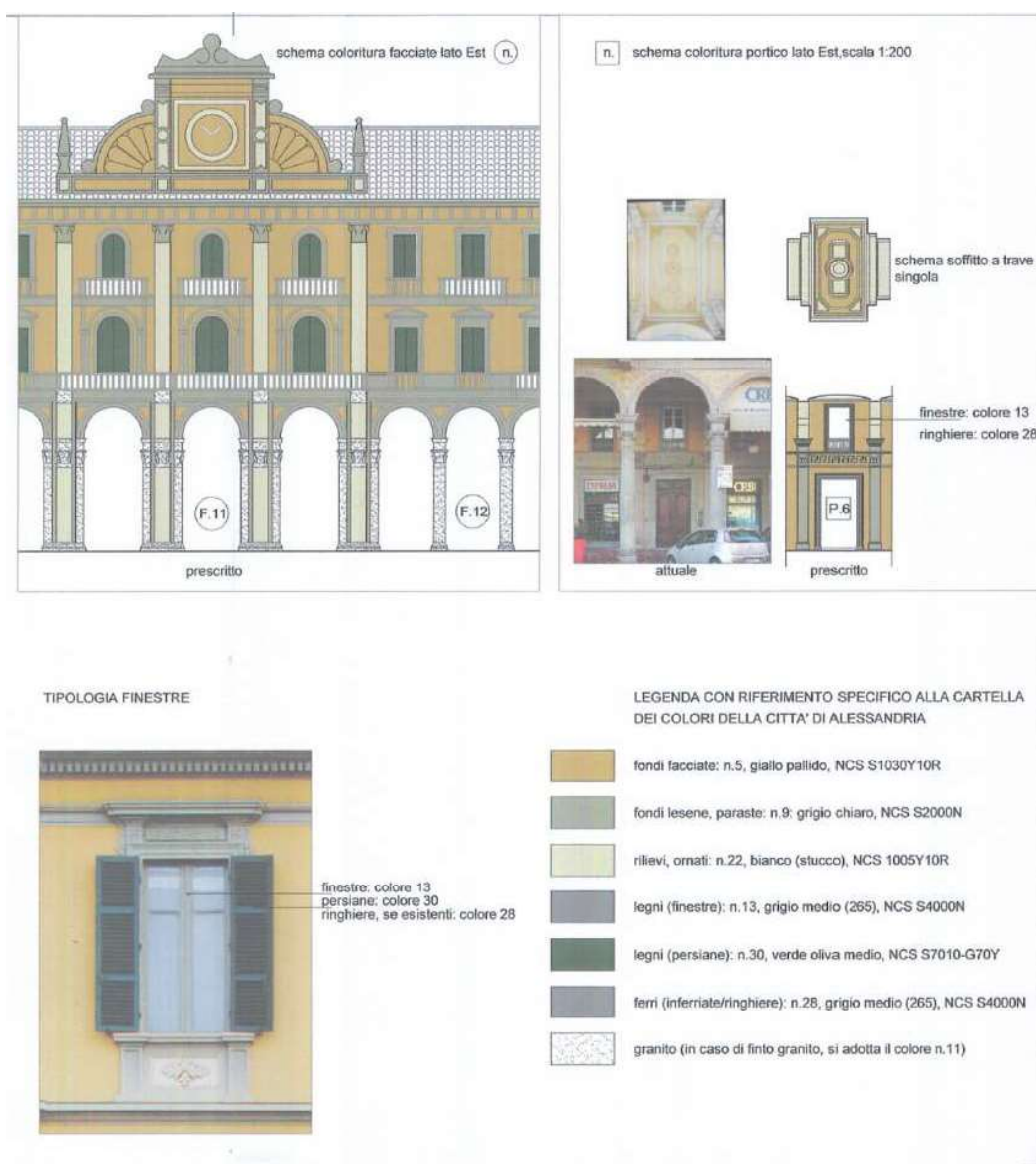


Figura 50. Piano del colore di Alessandria. Schema coloriture e legenda con i colori della città.

Dal punto di vista operativo, i passi che portano a definire gli interventi furono due:

1 – Analisi, costituita da:

- documentazione fotografica dello stato di fatto dei dipinti / intonaci;
- analisi e stratigrafia estesa ad elementi architettonici (cornicioni e cornicioni, plinti, lesene), finestre ed elementi metallici (inferriate, balaustre) atti a identificare la presenza di colori originali o tradizionali ancora presenti sulle facciate e la natura dei materiali originali / tradizionali impiegati;

- realizzazione di uno speciale schizzo pittorico con indicazione dei cromatismi proposti.

2 - Interventi correttivi, da attuare:

- in caso emergano elementi cromatici originali, definendo una proposta che tenga conto dei colori trovati;
- in caso contrario, definendo le varie parti architettoniche e accessorie (cioè sfondo, rilievi, elementi decorativi semplici o complessi, infissi, sistemi di oscuramento, elementi in ferro o ghisa, ecc.) facendo riferimento alla tavolozza dei colori predisposta dall'ufficio e parte integrante dello stesso regolamento.

Da presupposti diversi nasce il Piano del Colore di Reggio Emilia del 1987-89 che si caratterizza per l'attenzione rivolta alla condivisione e divulgazione delle scelte effettuate, oltre che per l'obiettivo dell'integrazione in un sistema più ampio riguardante l'ambiente costruito che si relaziona all'Arredo Urbano e alle diverse scale della pianificazione (urbanistica-architettonica). Il piano di Reggio Emilia parte dal presupposto dell'inattuabilità in maniera programmata a favore di un iter procedurale più aperto e attento al coinvolgimento dei vari soggetti (commercianti, categorie di settore, ecc.) e alla comunicazione dello sviluppo e delle scelte adottate del piano.

Nel primo decennio di questo secolo, il lavoro di ricerca che ha interessato il centro storico di Cesena (Apollonio, 2008) ha rappresentato la prima applicazione in maniera estensiva delle tecniche di rilievo digitale dei fronti urbani della città. Attraverso i metodi e gli strumenti propri del rilievo e del disegno la ricerca ha indagato il rapporto – complesso, articolato e contraddittorio – tra singole individualità architettoniche ed edilizia di base, tra spazi urbani e definizione della forma della città.

L'obiettivo principale è stato quello di definire un metodo che, approfondendo un momento del processo di conoscenza della realtà, potesse fornire valutazioni critiche già orientate verso l'intervento progettuale.

Il progetto, I Colori di Cesena, ha avuto per obiettivo il rilievo, la restituzione e la schedatura del sistema dei fronti che costituiscono la Scena Urbana del centro storico della città di Cesena.

L'indagine è stata impostata al fine di raccogliere e sistematizzare, attraverso l'impiego dei mezzi informatici per l'acquisizione, la gestione e l'interrogazione di una base di dati, non solo i dati quantitativi, ma anche e soprattutto gli aspetti qualitativi (attraverso il rilievo del colore) che connotano l'architettura degli spazi urbani.

Dal punto di vista metodologico, il lavoro fu organizzato secondo una successione di operazioni che, alla fine, portarono alla produzione dei tre tipi di elaborati:

- Fotopiani e restituzioni grafiche dei fronti stradali;
- Panoramiche VR dei nodi urbani più significativi e confronto fotografico diacronico tra il 1973 e il 2007;
- Il data-base delle Schede di analisi dei singoli edifici.

Dal rilievo architettonico sono stati elaborati e restituiti i fotopiani delle cortine urbane che, nella loro unitarietà e con un livello di dettaglio alla scala di 1/100, fornirono le informazioni e gli strumenti utili alla lettura del sistema delle facciate che definiscono gli spazi urbani.

Il rilievo diretto ha permesso di raccogliere i dati fondamentali per la costruzione del data-base informatizzato delle schede degli edifici.

La banca di dati si compose, alla conclusione delle tre campagne di rilevamento, di oltre 2000 schede sullo stato di conservazione e di degrado del sistema delle facciate. Essa era consultabile, aggiornabile e interrogabile, permettendo la ricerca e l'estrazione delle informazioni relative ai singoli edifici o i dati raggruppati per categorie di catalogazione.

La volontà di suggerire un percorso progettuale più che dogmatico si ritrova nel Piano del Colore di Siena, città Patrimonio dell'Umanità UNESCO, redatto nel 2016. Nelle intenzioni degli estensori del Piano non si fissano norme e divieti, ma si punta piuttosto sulla conoscenza del costruito, della sua storia e degli aspetti che regolano la percezione del colore da cui si sintetizzano scelte di intervento corrette. Il metodo proposto trasferisce la responsabilità in capo ai soggetti attuatori degli interventi, che in prima persona diventano responsabili del processo conoscitivo della fabbrica e devono formulare una proposta corretta, anche 'eticamente' per il loro radicamento ai luoghi. Il Piano ha un approccio indicativo, fornendo un metodo, non prescrittivo o vincolante, che si traduce in una serie di indicazioni di carattere propositivo. Non sono previsti, quindi, elaborati previsionali chiusi, come le mappe cromatiche, ma sono solo individuate linee guida ed è introdotto un metodo progettuale e di controllo da seguire in caso di interventi. Le procedure previste per la definizione delle proposte progettuali prevedono che le scelte cromatiche derivino dall'incrocio delle informazioni derivanti dalla storia dell'edificio con le valutazioni basate sull'analisi dei fenomeni che influenzano la visione (il contrasto di simultaneità, la differenziazione, la saturazione e la luminosità), con lo scopo di raggiungere una 'armonia cromatica' che permetta di vivere più pienamente l'ambiente costruito.

Le sole norme contenute nel Piano senese prevedono che (figure 51, 52):

- La pittura negli edifici storici sia eseguita con tecniche tradizionali;
- I colori siano composti da terre naturali, riconducibili alla gamma naturale dell'architettura senese;
- Il colore da utilizzare, di regola, sia scelto in relazione alle tracce di colorazione riscontrate sulle facciate e quindi, salvo documentazione comprovante la tinteggiatura dell'impianto originario, sulla base di un'accurata analisi stratigrafica dell'esterno delle superfici della muratura, valutando la collocazione dell'edificio nel suo contesto;



Figura 51. Piano del Colore di Siena. Rilievo cromatico della facciata oggetto di intervento.

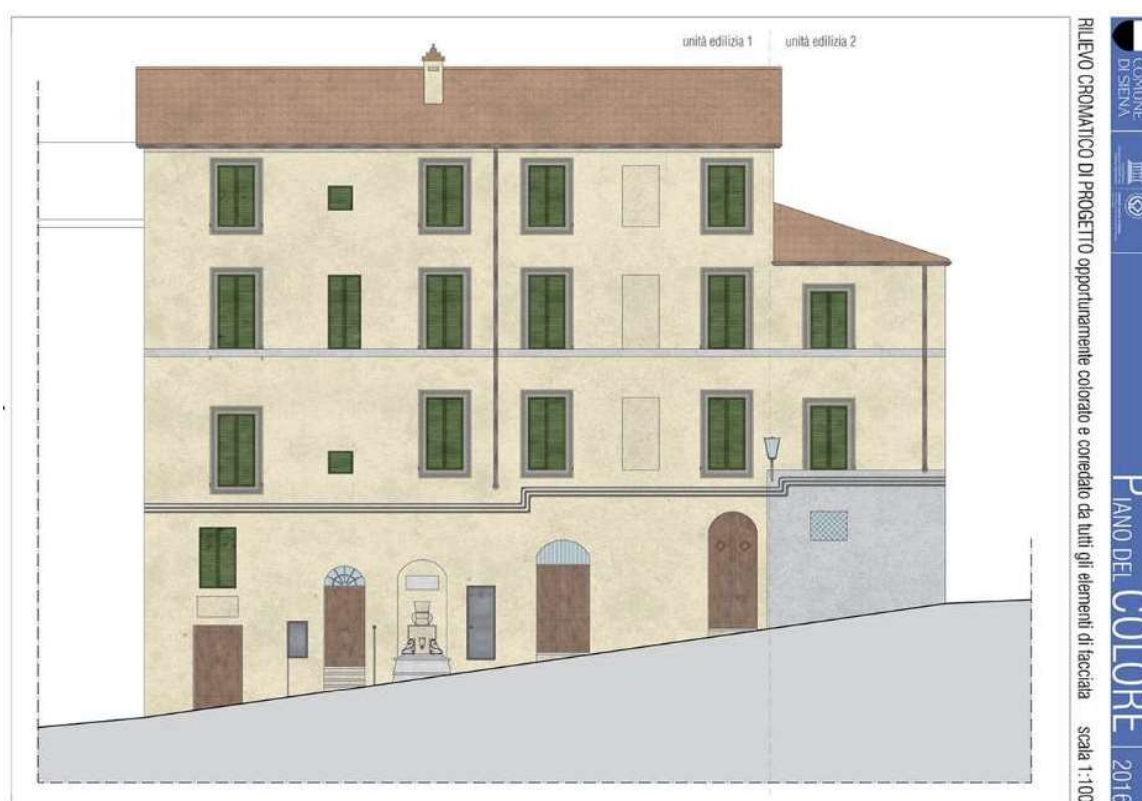


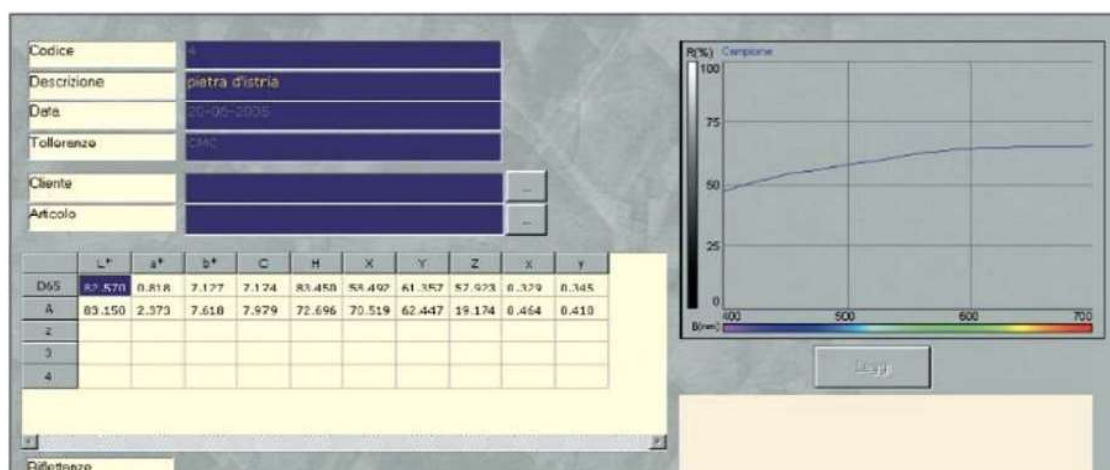
Figura 52. Piano del Colore di Siena. Rilievo cromatico di progetto della facciata oggetto di intervento.

- La proposta cromatica del progetto nasca attraverso indagini conoscitive (rilievo cromatico della facciata, documentazione fotografica completa e dettaglio degli elementi caratteristici).

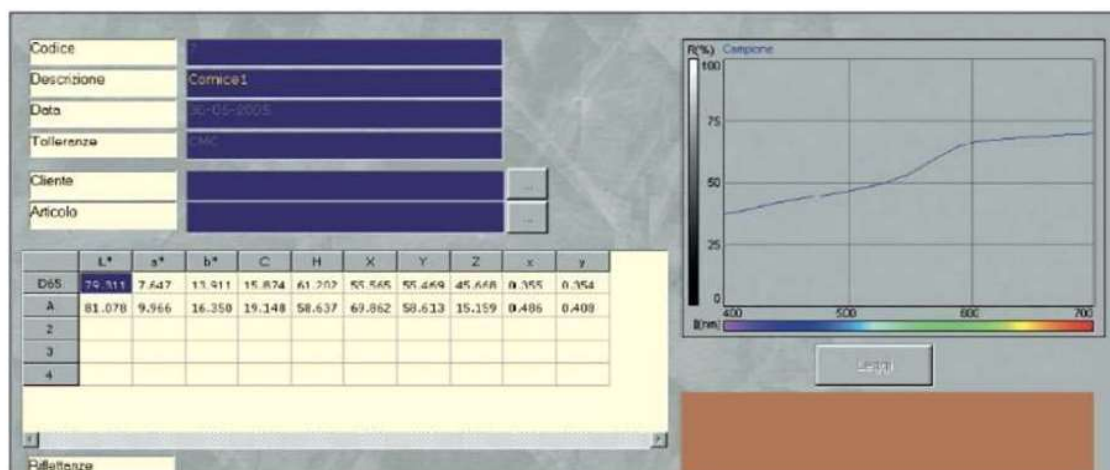
Non sono fornite tavolozze o soluzioni preconfigurate e anche il progetto del colore non richiede l'indicazione dei colori riferendosi ad alcun sistema di ordine dei colori.

Il Piano fornisce, come indicazione metodologica, l'esempio di un 'Rilievo cromatico' (stato di fatto) di una facciata oggetto di intervento, dal quale discende il 'Rilievo cromatico di Progetto'.

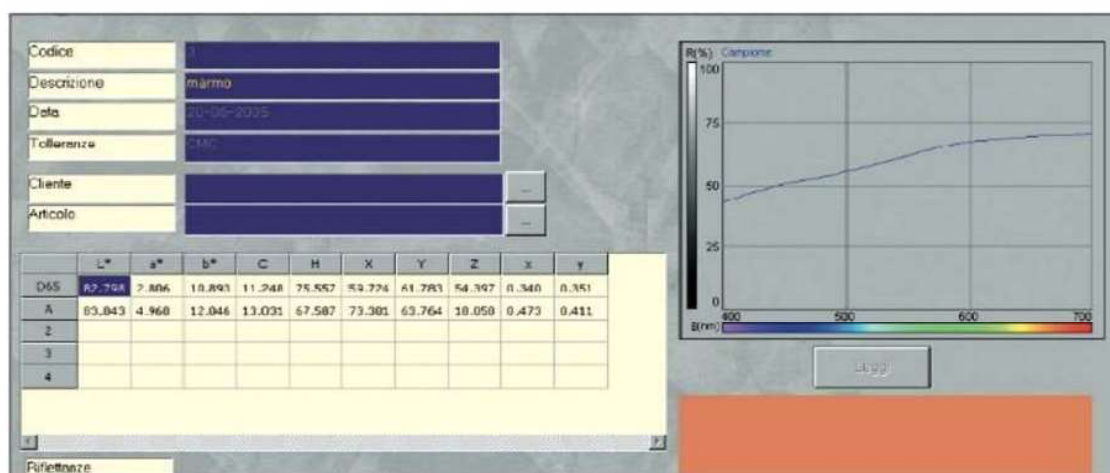
Un ottimo esempio della cristallizzazione degli assunti di tutte queste esperienze è dato dal Piano del colore del 2007 di Castelfranco Veneto, la città di Giorgione - come sottolinea il titolo di un volume curato da Manlio Brusatin (Brusatin, 2005) che descrive i caratteri e i presupposti teorici del piano adottato. Si trattava di un piano in linea con tutte le altre iniziative che lo avevano preceduto in Italia, motivato dalla necessità di riqualificare l'immagine della città allo scopo di regolare la corretta manutenzione e rifacimento delle coloriture degli edifici ricadenti nell'ambito del Centro Storico.



Pietra d'Istria



Cotto



Rosso Asiago

Figura 53. Piano del Colore di Castelfranco Veneto. Caratteristiche cromatiche, rilevate con uno spettrofotometro, di tre materiali caratteristici di Castelfranco Veneto: Pietra d'Istria (alto); Cotto (centro); Rosso Asiago (basso).

Il volume curato da Brusatin, pubblicato due anni prima dell'adozione, ne descrive l'approccio metodologico, i valori culturali e storici da preservare, racconta gli studi, le ricerche e le analisi condotte per giungere all'articolato del regolamento e delle norme attuative successivamente adottate, come integrazione a quelle del Regolamento Edilizio Comunale del P.R.G. all'epoca vigente. Il lavoro preparatorio era in perfetta sintonia con l'approccio metodologico ormai consolidato, e prevedeva le seguenti fasi:

- Analisi storica archivistica
- Sintesi e analisi storica dell'attività della Commissione di Abbellimento Pubblico della città di Castelfranco Veneto (1811-1870)
- Rilievo fotografico
- Assemblaggio fronti / prospetti stradali, ai fini della definizione della tavolozza cromatica
- Indagini colorimetriche / Esame locale utilizzando uno spettrofotometro su alcuni edifici selezionati, assunti come casi esemplificativi (figure 53 e 54).

Sul fronte degli interventi, il regolamento prevedeva tra gli adempimenti per il rifacimento della tinteggiatura l'esecuzione di indagini colorimetriche, sulle principali tinteggiature presenti sulle facciate, ponendo particolare attenzione agli strati pittorici originari e mediante l'utilizzo dello spettrofotometro, su aree da campionare che presentassero un adeguato stato di conservazione e di omogeneità di coloritura.

L'obiettivo di tale esame era quello di ottenere le scale cromatiche relative ai singoli edifici (sulla falsariga delle schede campione, fornite come esempio) e sulla base delle quali progettare gli interventi di tinteggiatura possibili: manutenzione straordinaria, manutenzione ordinaria, interventi su nuovi fabbricati, ecc.

Dal quadro fin qui ricomposto emergono diversi approcci e differenti orientamenti che hanno indirizzato e strutturato, nel corso dei decenni, i tanti piani del colore elaborati e adottati in Italia. Tuttavia, rimane a fattore comune un preciso approccio metodologico e una sequenza – ormai consolidata - di fasi operative:

1. analisi storica
2. rilievo e acquisizione dati
3. elaborazione e progetto
4. divulgazione
5. attuazione e controllo.



D C B A



A

B



C

D

A. balcone

B. parete in alto

C. parete in basso

D. giallo sopra l'arco

Figura 54. Piano del Colore di Castelfranco Veneto. Palazzo Vecchiato Girardi Pisanello: individuazione dei relativi punti di rilievo (alto) e scala cromatica (basso).

Questo flusso di lavoro conferma come elemento fondamentale per la costituzione di un piano del colore nei contesti urbani consolidati una adeguata consapevolezza dei fattori storici, culturali e ambientali attraverso i quali la componente colore si è andata sedimentando e configurando nel corso dei secoli. Inoltre, in tutte queste esperienze si può riconoscere come sia fondamentale ricomporre il contesto all'interno del quale l'immagine della scena urbana si sia sviluppata nel corso del tempo, ma soprattutto adottare metodologie e tecniche appropriate per il rilievo e l'acquisizione della componente cromatica che è giunta sino ai nostri giorni, considerando in maniera adeguata tutti i fattori, cronologici e ambientali, che l'hanno inevitabilmente alterata.

8. Dichiarazione dei conflitti di interesse

Gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse.

9. Dichiarazione della fonte di finanziamento

La ricerca non ha utilizzato fondi di finanziamento pubblici o privati.

10. Ringraziamenti

Gli scriventi ringraziano tutti coloro che hanno generosamente offerto propri materiali per la stesura e l'illustrazione del capitolo, in particolare Massimo Ballabeni, Patrizia Falzone e Nicola Santopuoli.

11. Breve biografia degli autori

Fabrizio Ivan Apollonio is Full Professor of Architectural Representation at Alma Mater Studiorum University of Bologna, Department of Architecture. His main research topics lie in virtual reconstruction, semantic modelling, and applications in the field of ICT to cultural heritage, and development of information/cognitive systems aimed at fruition of study and documentation of CH.

Marco Gaiani. is Full Professor of Architectural Representation at Alma Mater Studiorum University of Bologna, Department of Architecture. A specialist in 3D computer imaging, modelling and visualization, he was one of the first developers/user of laser scanning technology in the heritage field and developed photogrammetry- and photography-related technologies.

Bibliografia

- Abdelhamed, A., Lin, S. e Brown, M.S. (2018) 'A High-Quality Denoising Dataset for Smartphone Cameras', in 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, pp. 1692-1700.
- Aittala, M., Weyrich, T. e Lehtinen, J. (2013) 'Practical SVBRDF capture in the frequency domain', *ACM Transaction on Graphics*, 32(4), articolo 110, p. 12. doi: 10.1145/2461912.2461978.
- Anderson, M. et al. (1996) 'Proposal for a Standard Default Color Space for the Internet-sRGB', in 4th IS&T/SID Color Imaging Conference, Springfield, VA, IS&T e SID, pp. 263-270.
- Apollonio F.I. (a cura di) (2007-2008) 'I colori di Cesena. La scena urbana della città', Volumi 1, 2, 3, Bologna: CLUEB.
- Apollonio, F.I., Gaiani, M. e Baldissini, S. (2011) 'A color processing for displaying reality-based three-dimensional digital models in RTR', in Rossi, M. (a cura di), *Colour and Colorimetry Multidisciplinary Contributions - VIIB*. Santarcangelo: Maggioli, pp. 260-267.
- Apollonio, F.I., Ballabeni, A. e Gaiani, M. (2017) 'Specular reflection removal in the context of SFM techniques for Architectural Heritage 3D models construction', *Color Culture and Science Journal*, 07, pp. 39-57. doi: 10.23738/ccsj.i72017.04.
- Apollonio, F.I., Gaiani, M. e Baldissini, S. (2017) 'Color definiton of open-air Architectural heritage and Archaeology artworks with the aim of conservation', *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 7, pp. 10-31. doi: 10.1016/j.daach.2017.09.002.
- Ashikhmin, M. e Shirley, P. (2000) 'An anisotropic phong BRDF model', *Journal of Graphics Tools*, 5(2), pp. 25-32. doi: 10.1080/10867651.2000.10487522.
- Ballabeni M. (2008) 'I piani per il colore della città: il rilievo e il progetto', in Apollonio F.I. (a cura di), *I colori di Cesena. La scena urbana della città*. 3. Area Duomo, Bologna: CLUEB, pp. 22-33.
- Barragán, L. (1980) Acceptance Speech, Pritzker Architecture Prize. Available at: <https://www.pritzkerprize.com/laureates/1980> (Accessed: 25 March 2021).
- Benedetti, B., Gaiani, M. e Remondino, F. (a cura di) 2010. 'Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei'. Pisa: Edizioni della Normale.
- Beraldin, J.A. et al. (2002) 'Virtualizing a byzantine crypt by combining high-resolution textures with laser scanner 3D data', in *Proceedings of VSMM 2002*, Gyeongju, South Korea: Creative Digital Culture, 3-14.
- Beretta, G.B. (1991) 'Color strategy', Palo Alto, CA: Canon Palo Alto Technical center.
- Beretta, G.B. (1999) 'Step-by-Step Instructions to Use ITD's GA Workstation', technical report HPL-1999-110, Palo Alto, CA: Hewlett-Packard Company. Available at: https://www.researchgate.net/publication/260402094_Step-by-step_instructions_to_Use_ITD's_GA_workstation (Accessed: 25 March 2021).
- Biederman, I., e Cooper, E.E. (1991) 'Priming contour deleted images: evidence for intermediate representations in visual object recognition', *Cognitive Psychology*, 23, pp. 393-419.
- Billmeyer, F.W., e O'Donnell, F.X.D. (1987) 'Visual gloss scaling and multidimensional scaling analysis of painted specimens', *Color Research & Applications*, 12(6), pp. 315-326. doi: 10.1002/col.5080120606.
- Bollettino d'arte (1986), Supplemento al n. 35-36.

- Borrino, K. et al. (2017) 'Sensitivity analysis applied to ISO recommended camera color calibration methods to determine how much of an advantage, if any, does spectral characterization of the camera offer over the chart-based approach', *Electronic Imaging, Digital Photography and Mobile Imaging*, XIII, pp. 32-36(5). doi: 10.2352/ISSN.2470-1173.2017.15.DPMI-072.
- Brady, T.F. et al. (2013) 'Real-world objects are not represented as bound units: Independent forgetting of different object details from visual memory', *Journal of Experimental Psychology: General*, 142, pp. 791-808. doi: 10.1037/a0029649.
- Brino, G. (1968) 'Crystal Palace', *Quaderni di Studio della Facoltà di Architettura*, Torino.
- Brino, G. (1985) 'Il piano del colore di Saluzzo', Milano: Gruppo Editoriale Forma.
- Brino, G. (1986) 'Il Piano del Colore di Torino e altre esperienze professionali, didattiche e di ricerca nel campo del colore urbano in Italia e all'estero', supplemento a *Bollettino d'arte*, 35-36 (vol. II), pp. 203-206.
- Brino, G. e Pascolati, P. (2007) 'Corso di formazione professionale. Restauro delle facciate storiche di Palazzo Mazzola', Asti: Espansione grafica.
- Brusatin M. (a cura di) (2005) 'I colori della città di Giorgione', Castelfranco Veneto: Comune di Castelfranco Veneto.
- Caivano, J.L. (2006) 'Research on color in architecture and environmental design: Brief history, current developments, and possible future', *Color Research and Application*, 31, pp. 350-363, doi: 10.1002/col.20224.
- Callet, P. et al. (2010) 'Natural Lighting, Gilts and Polychromy of Notre-Dame de Paris Cathedral, Proceedings of the 11th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST'10), Goslar, DEU: Eurographics Association, pp. 63-70.
- Cardinal, D. (2020) 'Smartphones vs Cameras: Closing the gap on image quality', 19 March. Available at: <https://www.dxomark.com/smartphones-vs-cameras-closing-the-gap-on-image-quality/> (Accessed: 25 March 2021).
- Carmona, M. et al. (2003) 'Public Places-Urban Spaces: The Dimensions of Urban Design'. Oxford: Architectural Press.
- Cave, C.B., Bost, P.R. e Cobb, R.E. (1996) 'Effects of color and pattern on implicit and explicit picture memory'. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 22(3), pp. 639-653. doi: 10.1037//0278-7393.22.3.639.
- Cervellati P.L. e Scannavini R. (a cura di) (1973) 'Interventi nei centri storici. Bologna: politica e metodologia del restauro', Bologna: Il Mulino.
- Chakrabarti, A., Scharstein, D. e Zickler, T.E. (2009) 'An Empirical Camera Model for Internet Color Vision', in Cavallaro, A., Prince, S. e Alexander, D.C. (a cura di), *Proceedings of the British Machine Vision Conference, BMVC 2009*. UK: BMVA Press, pp. 51.1-51.11. doi: 10.5244/C.23.51.
- Cheung, V. e Westland, S. (2006) 'Methods for Optimal Color Selection', *Journal of Imaging Science and Technology*, 50(5), pp. 481-488. doi: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.(2006)50:5(481).
- Cleland, T.M. (1921) 'A practical description of the Munsell color system, with suggestions for its use', Boston: Munsell Color Company.
- Colormine (2021) Colormine DeltaE calculator. Available at: <http://colormine.org/delta-e-calculator/cie2000> (Accessed: 25 March 2021).

- Cook, R.L. e Torrance, K.E. (1981) 'A reflectance model for computer graphics' in SIGGRAPH '81 Proceedings, New York: ACM, pp. 307-316.
- Cullen, G. (1976) 'Il paesaggio urbano. Morfologia e progettazione', Bologna: Calderini Editore.
- Cun, X., Pun, C.-M., e Shi, C. (2020) 'Towards Ghost-Free Shadow Removal via Dual Hierarchical Aggregation Network and Shadow Matting GAN', in Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 34(07), pp. 10680-10687. doi: 10.1609/aaai.v34i07.6695.
- Dabov, K. et al. (2007) 'Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering', IEEE Transactions on Image Processing, 16(8), pp. 2080-2095. doi: 10.1109/TIP.2007.901238.
- Dong, Y. et al. (2010) 'Manifold bootstrapping for svbrdf capture', ACM Transactions on Graphics, 29 (4), pp. 98:1-98:10. doi: 0.1145/1833349.1778835.
- Dorsey, J., Rushmeier, H. e Sillion, F. (2007) 'Digital modeling of material appearance'. Morgan Kaufmann/Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-221181-2.X5001-0.
- Fairchild, M.D. (2013) 'Color Appearance Models', 3rd edition, Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Fairchild, M.D. e Johnson, G.M. (2004) 'iCAM framework for image appearance, differences, and quality', Journal of Electronic Imaging, 13(1), pp. 126-138. doi: 10.1117/1.1635368.
- Falzone, P. (a cura di) (2008) 'Colore architettura ambiente', Roma: Kappa.
- Farah, M.J. (2000) 'The Cognitive Neuroscience of Vision'. Hoboken, New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Ferwerda, J.A., Pellacini, F., e Greenberg, D.P. (2001) 'Psychophysically-based model of surface gloss perception', in Proceedings of SPIE 4299, Human Vision and Electronic Imaging VI, Bellingham, WA: SPIE Press, pp. 291-301. doi: 10.1117/12.429501.
- Fleming, R.W., Dror, R.O. e Adelson, E.H. (2003) 'Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties' Journal of Vision, 3(5), pp. 347-368. doi: 10.1167/3.5.3.
- Foo, S. C. (1997) 'A gonioreflectometer for measuring the bidirectional reflectance of material for use in illumination computation', Doctoral dissertation, Cornell University.
- Francken, Y. et al. (2008) 'High quality mesostructure acquisition using specularities', 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, AK, pp. 1-7, doi: 10.1109/CVPR.2008.4587782.
- Fridell Anter, K. (2005) 'Colours in Pompeian cityscape. In search of a lost treasure, AIC Colour 05, Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association, vol 1, Granada (Spain): Sociedad Española de Optica, pp. 391-396.
- Gage, J. (1993) 'Color and culture', Boston: Little, Brown & Co.
- Gaiani, M. et al. (2016) 'An Advanced Pre-Processing Pipeline to Improve Automated Photogrammetric Reconstructions of Architectural Scenes', Remote Sensing, 8(3), 178. doi: 10.3390/rs8030178.
- Greene, M.R. e Oliva, A. (2009) 'The briefest of glances: The time course of natural scene understanding', Psychological Science, 20(4), pp. 464-472. doi: 10.1111/j.1467-9280.2009.02316.x.
- Guarnera, G.C. et al. (2012) Estimating surface normals from spherical stokes reflectance fields, in Computer Vision - ECCV 2012. Workshops and Demonstrations, vol. 7584 of Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 340-349. doi: 10.1007/978-3-642-33868-7_34.

- Guarnera, D. et al. (2016) 'BRDF Representation and Acquisition', *Computer Graphics Forum*, 35(2), pp. 625-650. doi: 10.1111/cgf.12867.
- Han, J.Y. e Perlin, K. (2003) 'Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope', *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), pp. 741-748. doi: 10.1145/1201775.882341.
- Hanna, A. e Remington, R. (1996) 'The representation of color and form in long-term memory' *Memory & Cognition*, 24, 322-330. doi: 10.3758/bf03213296.
- Hård, A., Sivik, L. e Tonnquist, G. (1996) 'NCS Natural Color System - from Concepts to Research and Applications. Part I and II', *Color Research and Application*, 21, pp. 180-220. doi: 10.1002/(SICI)1520-6378(199606)21:3<180:AID-COL2>3.0.CO;2-O.
- Hershberger, R.G. (1992) 'A study of meaning and architecture', in J.L. Nasar (a cura di), *Environmental aesthetics: Theory, research and application*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Ho, Y.-X., Landy, M.S. e Maloney, L.T. (2006) 'How direction of illumination affects visually perceived surface roughness', *Journal of Vision*, 6(5), pp. 634-648. doi: 10.1167/6.5.8.
- Hong, G., Luo, M.R. e Rhodes, P.A. (2001) 'A Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling', *Color Research and Application*, 26(1), pp. 76-84. doi: 10.1002/1520-6378(200102)26:1<76::AID-COL8>3.0.CO;2-3.
- Hsia J.J. e Richmond J.C. (1976) 'Bidirectional reflectometry. Part I: A high resolution laser bidirectional reflectometer with results on several optical coatings', *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*, 80A(2), pp. 189-205. doi: 10.6028/jres.080A.021.
- Hunt, R.W.G. (1970) 'Objectives in colour reproduction', *The Journal of Photographic Science*, 18(6), pp. 205-215. doi: 10.1080/00223638.1970.11737557.
- Hunter, R.S. e Harold, R.W. (1987) 'The Measurement of Appearance', 2nd edition, Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Hutchings, J.B. (1999) 'Food colour and appearance', 2nd edition. New York: Aspen Publishers.
- IEC (1999) IEC 61966-2-1:1999 Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space – sRGB. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- IEC (2000) IEC 61966-9: Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 9: Digital cameras. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- IEEE (2016) IEEE 1858-2016 - IEEE Standard for Camera Phone Image Quality.
- IMATEST (2021). <http://www.imatest.com/home> (Accessed 25 March 2021).
- ISO (2006a) ISO/TS 22028-2:2006 Photography and graphic technology — Extended colour encodings for digital image storage, manipulation and interchange — Part 2: Reference output medium metric RGB colour image encoding (ROMM RGB). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2006b) ISO 17321-1:2006 Graphic technology and photography — Colour characterisation of digital still cameras (DSCs) - Part 1: Stimuli, metrology and test procedures. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2010) ISO 15076-1:2010 Image technology colour management - Architecture, profile format, and data structure. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- ISO (2013) ISO 15739: 2013 Photography—Electronic Still-Picture Imaging—Noise Measurements. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2014) ISO/CIE 11664–6:2014 Colorimetry—Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Ives, H.E. (1915) ‘The transformation of color-mixture equations from one system to another’, *Journal of the Franklin Institute*, 180(6), pp. 673-701. doi: 10.1016/S0016-0032(15)90396-4.
- Jennings C. (2016) ‘Chromophobia: Men in Black. The Fear of Color in Western Culture’, *Refractions*, Feb. 1, 2016. Available at: <https://www.refractionsblog.com/single-post/2016/04/14/men-in-black> (Accessed: 25 March 2021).
- Jiang, J., et al. (2013) ‘What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?’, *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, Clearwater Beach, FL, USA, pp. 168-179. doi: 10.1109/WACV.2013.6475015.
- Joubert, O., Rousselet, G. e Fize, D. (2007) ‘Processing scene context: Fast categorization and object interference’, *Vision Research*, 47, pp. 3286-3297. doi: 10.1016/j.visres.2007.09.013.
- Kawakami R., Ikeuchi K. e Tan R.T. (2005) ‘Consistent surface color for texturing large objects in outdoor scenes’, in *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’05)*, Beijing, China, pp. 1200-1207, doi: 10.1109/ICCV.2005.62.
- Kos, A., Tomažič, S. e Umek, A. (2016) ‘Evaluation of Smartphone Inertial Sensor Performance for Cross-Platform Mobile Applications’, *Sensors*, 16(4), 477, doi: 10.3390/s16040477.
- Kuang, J. et al. (2007) ‘Evaluating HDR rendering algorithms’, *ACM Transactions on Applied Perception*, 4(2), Article 9, pp. 1-27. doi: 10.1145/1265957.1265958.
- Kuehni, R.G. (2002) ‘The early development of the Munsell system’, *Color Research and Application*, 27 (1), pp. 20-27. doi: 10.1002/col.10002.
- Lanaro M.P., et al. (2018) ‘Fidarsi o no del ColorChecker?’ in Marchiafava, V. e Luzzatto L. (a cura di), *Colore e Colorimetria - Contributi Multidisciplinari*, vol XIVa, Milano, Italy: Gruppo del Colore - Associazione Italiana Colore, pp. 13-24.
- Landa, E.R. e Fairchild, M.D. (2005) ‘Charting Color from the Eye of the Beholder’, *American Scientist*, 93(5), pp. 436-443. doi: 10.1511/2005.5.436.
- Lenclos, J. P. (2009) ‘The geography of colour’, in Porter T. e Mikellides B. (a cura di), *Colour for architecture today*, London, UK: Taylor & Francis, pp. 30–35.
- Lindbloom B. (2021) DeltaE calculator. Available at: <http://www.brucelindbloom.com/index.html?ColorDifferenceCalc.html> (Accessed: 25 March 2021).
- Livingstone M. (2002) ‘Vision and Art: The Biology of Seeing’, New York: Abrams.
- Ludwig, M. e Meyer, G. (2016) ‘Effects of Mesoscale Surface Structure on Perceived Brightness’, in *Electronic Imaging, Measuring, Modeling, and Reproducing Material*, 9, 1-7(7). doi: 10.2352/ISSN.2470-1173.2016.9.MMRMA-367.
- Luther, R. (1927) ‘Aus dem gebiet der farbreizmetrik’, *Zeitschrift Technische Physik*, 8, pp. 540-558.
- Lynch, K. (1960) ‘The Image of the City’, Cambridge: The Technology Press & Harvard University Press.
- Lyon R.F. e Hubel P.M. (2002) ‘Eyeing the camera: Into the next century’, in *10th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings*, pp. 349-355.

- Macher, H. et al. (2017) 'Photogrammetric recording and reconstruction of town scale models – The case of the plan-relief of Strasbourg', *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W5), pp. 489-495. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-489-2017.
- Mäkinen Y., Azzari L. e Foi A. (2020) 'Collaborative Filtering of Correlated Noise: Exact Transform-Domain Variance for Improved Shrinkage and Patch Matching', *IEEE Transactions on Image Processing*, 29, pp. 8339-8354. doi: 10.1109/TIP.2020.3014721.
- Maloney, L.T. e Brainard, D.H. (2010) 'Color and material perception: Achievements and challenges', *Journal of Vision*, 10, pp. 9-19, doi:10.1167/10.9.19.
- Marschner S.R. et al. (1999) 'Image-based BRDF measurement including human skin', in Lischinski D. e Larson G.W. (a cura di), *Rendering Techniques' 99. EGSR 1999*, Vienna: Eurographics - Springer, pp. 131-144. doi: 10.1007/978-3-7091-6809-7_13.
- Marr D. (1982) 'Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information', Cambridge (MA): MIT Press.
- McCamy, C.S., Marcus, H. e Davidson, J.G. (1976) 'A Color Rendition Chart', *Journal of applied photographic engineering*, 11(3), pp. 95-99.
- Melgosa, M. et al. (2013) 'Practical demonstration of the CIEDE2000 corrections to CIELAB using a small set of sample pairs', *Color Research & Application*, 38(6), pp. 429-436, doi: 10.1002/col.21751.
- Melgosa, M. et al. (2017) 'Color-quality control using color-difference formulas: progress and problems', *Proc. SPIE 10453, Third International Conference on Applications of Optics and Photonics*, 104530U (22 August 2017). doi: 10.1117/12.2271956.
- Mokrzycki, W.S. e Tatol, M. (2012) 'Color difference Delta E - A survey', *Machine graphics and vision*, 20(4), pp. 383-411.
- Motoyoshi, I. et al. (2007) 'Image statistics and the perception of surface qualities', *Nature*, 447/10, pp. 206-209. doi: 10.1038/nature05724.
- Moughtin, C., Oc, T. e Tiesdell, S. (1999) 'Urban Design: Ornament and Decoration', 2nd edition, Oxford: Architectural Press.
- Munsell, A.H. (1905) 'A Color Notation', Boston: G.H. Ellis Co.
- Nasar, J. (1994) 'Urban design aesthetics: The evaluative qualities of building exteriors', *Environment and Behaviour*, 26 (3), pp. 377-401. doi: 0.1177/001391659402600305.
- Ngan, A., Durand, F. e Matusik, W. (2005) 'Experimental analysis of BRDF models', in *Eurographics Symposium on Rendering (2005)*, Goslar: The Eurographics Association, pp. 117-126. doi: 0.2312/EGWR/EGSR05/117-126.
- Ngan, A., Durand, F. e Matusik, W. (2006) 'Image-driven navigation of analytical BRDF models' in *Eurographics Symposium on Rendering (2006)*, Goslar: The Eurographics Association, pp. 399-407. doi: 10.2312/EGWR/EGSR06/399-40.
- Nicodemus, F.E. (1965) 'Directional reflectance and emissivity of an opaque surface', *Applied Optics*, 4(7), pp. 767-775. doi: 10.1364/AO.4.000767.
- O'Connor, Z. (2006) 'Bridging the Gap: Façade Colour, Aesthetic Response and Planning Policy', *Journal of Urban Design*, 11(3), pp. 335-345, doi: 10.1080/13574800600888251.
- Obein, G., Knoblauch, K. e Viénot, F. (2004) 'Difference scaling of gloss: Nonlinearity, binocularity, and constancy', *Journal of Vision*, 4(9), pp. 711-720. doi: 10.1167/4.9.4.

- Oleari C. (a cura di) (1998) 'Misurare il Colore – Spettrofotometria, fotometria e colorimetria – Fisiologia e percezione', Milano: Hoepli editore.
- Oliva, A. (2013) 'Scene Perception', in Werner J.S. e Chalupa L.M. (a cura di) *The New Visual Neurosciences*, Cambridge (MA): MIT Press, pp. pp. 725-732.
- Ozenfant A. e Le Corbusier (1918) 'Après le Cubisme', Paris: Edition des Commentaires.
- Pascale, D. (2006) 'RGB Coordinates of the Macbeth ColourChecker', Montreal, Canada: The BabelColour Company, pp. 1-16. Available at: https://www.babelcolor.com/index_htm_files/RGB%20Coordinates%20of%20the%20Macbeth%20ColorChecker.pdf (Accessed: 25 March 2021).
- Peltoketo, V.-T. (2015) 'SNR and Visual Noise of Mobile Phone Cameras', *Journal of Imaging Science and Technology*, 59(1), pp. 10401-1-10401-7(7). doi: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2015.59.1.010401.
- Plötz, T. e Roth, S. (2017) 'Benchmarking Denoising Algorithms with Real Photographs', in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, pp. 2750-2759, doi: 10.1109/CVPR.2017.294.
- Porter, T. (1997) 'Environmental colour mapping', *Urban Design International*, 2(1), pp. 23-31, doi: 10.1080/135753197350849.
- Porter T., Mikellides B. (a cura di) (2009) 'Colour for architecture today', London, UK: Taylor & Francis.
- Ramanath, R. et al. (2005) 'Color image processing pipeline', *IEEE Signal Processing Magazine*, 22, pp. 34-43. doi: 10.1109/MSP.2005.1407713.
- Reinhard, E. et al. (2008) 'Color Imaging Fundamentals and Applications', Boca Raton, FL: A. K. Peters/CRC Press.
- Remondino, F. (2012) 'Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation - A Critical Overview', in: Ioannides, M., et al. (a cura di), *Progress in Cultural Heritage Preservation. EuroMed 2012. Lecture Notes in Computer Science, Volume 7616*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 40-54. doi: 10.1007/978-3-642-34234-9_540-54.
- Remondino, F., et al. (2017) 'A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets', *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2/W5), pp. 591-599. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017.
- Reppa, I. et al. (2020) 'The relative contribution of shape and colour to object memory', *Memory & Cognition*, 48, pp.1504-1521. doi: 10.3758/s13421-020-01058-w.
- Riggen Martínez, A. (1997) 'Luis Barragan. 1902-1988', Milano: Electa.
- Riviere, J., Peers P. e Ghosh, A. (2016) 'Mobile surface reflectometry', *Computer Graphics Forum*, 35(3), pp. 191-202.
- Rosso, F. e Brino, G. (1980) 'Colore e città: il piano del colore di Torino, 1800-1850', Torino: Idea Editions.
- Saito, Y. (1994) 'Luis Barragán', Ciudad de México, México: Noriega Editores.
- Santopuoli, N., Seccia, L. (2008) 'Il rilievo del colore nel campo dei beni culturali' in *Trattato di Restauro Architettonico*, 10, Torino: UTET: pp. 141-163.
- Santopuoli, N. (2015) 'Il rilievo del colore per il restauro delle superfici architettoniche', *DISEGNARECON*, 8, pp. 11.1-11.10.
- Schewe, J. (2013) 'The Digital Negative: Raw Image Processing in Lightroom, Camera Raw, and Photoshop', Berkeley, CA: Peachpit Press.

- Scopigno, R. et al. (2011) '3D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization', *Computer*, 44(7), pp. 48-55. doi: 10.1109/MC.2011.196.
- Seitz, S.M. (2006) 'A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms', in *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2006)*, Vol. 1, Washington: IEEE Computer Society, pp. 519-528. doi: 10.1109/CVPR.2006.19.
- Simon, C. et al. (2013) 'Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications: survey and perspectives', *Image and Vision Computing*, 31(1), pp. 91-102. doi: 10.1016/j.imavis.2012.10.006.
- Spaulding, K.E., Woolfe, G. J. e Giorgianni, E. J. (2000) 'Reference Input/Output Medium Metric RGB Color Encoding (RIMM/ROMM RGB)', in *Proceedings of IS&T/SID 8th Color Imaging Conference*, pp. 155-163.
- Spillmann, W. (2009) 'Unity in diversity at Kirchsteigfeld, Potsdam', in Porter T. e Mikellides B. (a cura di), *Colour for architecture today*, London, UK: Taylor & Francis, pp. 36-38.
- Stamps, A.E. (2000) 'Psychology and the aesthetics of the built environment', Boston, MA: Kluwer.
- Stevens, K.A. (2012) 'The vision of David Marr', *Perception*, 41(9), pp. 1061-1072. doi: 10.1068/p7297.
- Stokes, M. et al. (1996) 'A Standard Default Color Space for the Internet: sRGB', Version 1.10, Available at: <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html> (Accessed: 25 March 2021).
- Torrance, K.E. e Greenberg, D. (1997) 'Non-Linear Approximation of Reflectance Functions', in *SIGGRAPH '81 Proceedings*, New York: ACM, pp. 117 - 126. doi: 10.1145/258734.258801.
- Torrance K. E. e Sparrow E. M. (1967) 'Theory for off-specular reflection from roughened surfaces', *Journal of the Optical Society of America*, 57(3), pp. 1105-1112. doi: 10.1364/JOSA.57.001105.
- Toschi, I. et al. (2014) 'On the evaluation of photogrammetric methods for dense 3D surface reconstruction in a metrological context', *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5, pp. 371-378. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-371-2014.
- Ullman, S. (1979) 'The interpretation of Structure from Motion', in *Proceedings of Royal Society London, Series B, Biological Sciences* 203(1153), London: Royal society, pp. 405-426. doi: 10.1098/rspb.1979.0006.
- Vernon, D. e Lloyd-Jones, T.J. (2003) 'The role of colour in implicit and explicit memory performance', *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 56, 779-802. doi: 10.1080/02724980244000684.
- Versaci, A. e Cardaci, A. (2016) 'The restoration of color in the French historic cities: approaches, methods and experiences', *Color Culture and Science Journal*, 06, pp. 23-36. doi: 10.23738/ccsj.i62016.02.
- Viggiano, J.A.S. (2004) 'Comparison of the accuracy of different white balancing options as quantified by their color constancy' in *Proceedings of the SPIE*, 5301, Bellingham, WA: SPIE, pp. 323-3339. doi: 10.1117/12.524922.
- Wang, J. et al. (2008) 'Modeling anisotropic surface reflectance with example-based microfacet synthesis', *ACM Transactions on Graphics*, 27(3), pp. 41:1-41:9, doi: 10.1145/1360612.1360640.

- Ward, G. (1992) 'Measuring and modeling anisotropic reflection', in SIGGRAPH '92 proceedings, New York: ACM, pp. 265 - 272.
- Wenzel, K. et al. (2013) 'Image acquisition and model selection for multi-view stereo', Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, XL(5/W1), pp. 251-258, doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-251-2013.
- Weyrich, T. et al. (2008) 'Principles of Appearance Acquisition and Representation', Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 4(2), pp. 75-191. doi: 10.1561/06000000022.
- Westin, S.H., Arvo, J. e Torrance, K.E. (1992) 'Predicting reflectance functions from complex surfaces, in SIGGRAPH '92 proceedings, New York: ACM, pp. 255-264.
- Wyszecki, G. e Stiles, W.S. (2000) 'Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae', 2nd edition, Hoboken, New Jersey: Wiley.
- X-Rite (2021) Colorchecker color specification. Available https://www.xrite.com/service-support/new_color_specifications_for_colorchecker_sg_and_classic_charts (Accessed 25 March 2021).
- Yule, J.A. e Field G.G. (2000) 'Principles of color reproduction: Applied to photomechanical reproduction, color photography, and the ink, paper, and other related industries', GATF Press, 2000.
- Zeki S. (1993) 'A Vision of the Brain', Oxford: Blackwell.
- Zeki S. (1999) 'Inner Vision: An Exploration of Art and the Brain', Oxford: Oxford University Press.
- Zeki S. (2005) 'Behind the Seen: The functional specialization of the brain in space and time', Phil. Trans. R. Soc. B, 360, pp. 1145-1183. doi: 10.1098/rstb.2005.1666.