

VINCENZO CATALIOTTI GIUSEPPE MORANA

IMPIANTI ELETTRICI DI ILLUMINAZIONE



Dario Flaccovio Editore

Vincenzo Cataliotti – Giuseppe Morana
IMPIANTI ELETTRICI DI ILLUMINAZIONE
ISBN 978-88-579-0014-8

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. – tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Terza edizione: luglio 2010

Cataliotti, Vincenzo <1936->
Impianti elettrici di illuminazione / Vincenzo Cataliotti, Giuseppe Morana. -
3. ed. -
Palermo : D. Flaccovio, 2010.
ISBN 978-88-579-0014-8
1. Impianti elettrici. I. Morana, Giuseppe <1939->.
621.32 CDD-22 SBN Pal0227709
CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, giugno 2010, Palermo.

RIFERIMENTI DISEGNI, TABELLE E FOTOGRAFIE

Tutti i disegni, tabelle e fotografie o sono degli Autori oppure sono estratti da Norme, Testi, Pubblicazioni richiamate in bibliografia.
Gli Autori desiderano ringraziare sentitamente la Philips Lighting per tutta la documentazione gentilmente fornita.

I seguenti paragrafi del presente testo sono caratterizzati da un significativo richiamo delle norme UNI, UNI EN, e ENV, con particolare riferimento a figure, tabelle e formule:

- paragrafo 4.3: norme UNI EN 40-3-1, 2001; UNI EN 40-3-3, 2004; ENV 1991-2-4; ENV 1993-1-1; ENV 1999-1-1
- paragrafi 7.1.1, 7.1.2, 7.1.4.1, 7.1.4.2 e 7.1.4.6: norme UNI EN 13201-2-2004; UNI EN 13201-3-2004; UNI EN 13201-4-2004; UNI 11248-2007
- paragrafi 9.1, 9.2, 9.2.1 e 9.2.2: norme UNI 11095-2003
- paragrafo 9.5: norme UNI 10439
- paragrafi 11.1 e 11.2: norma UNI EN 12464-1

Le immagini contenute nell'appendice sono catturate dal programma di riferimento Dialux, copyright, proprietà e marchio registrato della *Dial Light Building software*.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- files di aggiornamento al testo e/o al programma allegato
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'INDIRIZZO PER ACCEDERE AI SERVIZI È: WWW.DARIOFLACCOVIO.IT/SCHEDA/?CODICE=DF0014

Indice

Prefazione alla prima edizione.....	pag. XI
Prefazione alla seconda edizione	» XII
Prefazione alla terza edizione	» XIII

PARTE PRIMA

Riferimenti

CAPITOLO 1 – Richiami teorici e definizioni

1.1. Onde elettromagnetiche	» 3
1.2. La generazione della luce	» 5
1.3. La propagazione della luce	» 7
1.4. Natura della visione	» 12
1.5. Grandezze fotometriche	» 14
1.6. Curve fotometriche	» 21
1.7. Visibilità e prestazioni visive	» 29
1.8. Anomalie della percezione visiva	» 32
1.9. Elementi di colorimetria	» 35
1.10. Elementi di fotometria	» 48

PARTE SECONDA

Componenti

CAPITOLO 2 – Sorgenti luminose

2.1. Generalità	» 63
2.2. Lampade ad incandescenza	» 66
2.2.1. Lampade alogene	» 70
2.3. LED	» 73
2.4. Lampade a scarica	» 75
2.4.1. Lampade a scarica ad alta intensità (HID)	» 76
2.4.1.1. Lampade a vapori di mercurio	» 76
2.4.1.2. Lampade a vapori di mercurio a luce miscelata	» 78
2.4.1.3. Lampade ad alogenuri metallici	» 80
2.4.1.4. Lampade a vapori di sodio a bassa pressione (SBP)	» 83
2.4.1.5. Lampade a vapori di sodio ad alta e ad altissima pressione	» 85
2.4.2. Lampade a scarica a bassa intensità	» 88
2.4.2.1. Lampade tubolari fluorescenti	» 88
2.4.2.2. Lampade fluorescenti compatte	» 91
2.5. Lampade a induzione	» 93
2.6. Accessori delle lampade a scarica	» 94
2.6.1. Dispositivi di innesco	» 95
2.6.2. Dispositivi stabilizzatori	» 98
2.6.3. Alimentatori (dispositivi stabilizzatori e di innesco)	» 99
2.6.4. Regolatori di flusso luminoso	» 101
2.7. Criteri di scelta tecnico-economica delle sorgenti	» 102

CAPITOLO 3 – Apparecchi di illuminazione

3.1. Caratteristiche costruttive degli apparecchi di illuminazione	»	103
3.2. Classificazione degli apparecchi d'illuminazione	»	114
3.2.1. Classificazione in base al sistema ottico	»	114
3.2.2. Classificazione in base alla destinazione	»	115
3.2.3. Classificazione in base al sistema d'installazione	»	117
3.2.4. Classificazione in base alla limitazione dell'abbagliamento	»	118
3.2.4.1. Apparecchi per esterno	»	118
3.2.4.2. Apparecchi per interno	»	121
3.2.5. Classificazioni fotometriche degli apparecchi d'illuminazione per interni	»	124
3.2.6. Apparecchi di illuminazione a pavimento	»	124
3.2.7. Apparecchi per sorgenti LED	»	124
3.2.8. Apparecchi a illuminazione radente	»	125
3.3. Proiettori	»	125
3.4. Condotti ottici	»	129

CAPITOLO 4 – Sostegni per impianti di illuminazione esterna

4.1. Generalità	»	133
4.2. Caratteristiche dei sostegni per illuminazione	»	134
4.3. Calcolo meccanico dei pali di illuminazione	»	143
4.4. Verifica della deformabilità del palo	»	164
4.5. Verifica delle fondazioni	»	165

PARTE TERZA
Impiantistica elettrica

CAPITOLO 5 – Richiami di impianti elettrici

5.1. Generalità	»	171
5.2. Riferimenti normativi e definizioni fondamentali	»	171
5.3. Dimensionamento degli impianti	»	174
5.3.1. Generalità	»	174
5.3.2. Dimensionamento e verifica dei cavi	»	175
5.3.3. Protezione dai contatti diretti e indiretti	»	194
5.3.4. Protezione dei componenti degli impianti contro la penetrazione di corpi solidi e liquidi	»	197
5.3.5. Verifica della selettività dei dispositivi di protezione	»	197

CAPITOLO 6 – Alimentazione elettrica degli impianti d'illuminazione. Illuminazione di sicurezza

6.1. Generalità sull'alimentazione elettrica degli impianti d'illuminazione	»	199
6.2. Tipologie di impianti elettrici per sistemi di illuminazione di interni ed esterni	»	200
6.2.1. Illuminazione di interni	»	200
6.2.2. Illuminazione di esterni	»	200
6.3. Impianti elettrici di illuminazione di categoria I in corrente alternata in derivazione alimentati da cabina dell'ente distributore (sistema TT)	»	201
6.3.1. Generalità	»	201
6.3.2. Dimensionamento e verifica dei cavi	»	202

6.3.3. Protezione dai contatti diretti e indiretti	»	202
6.3.4. Protezione dei componenti degli impianti di illuminazione contro la penetrazione dei corpi solidi e liquidi	»	202
6.3.5. Verifica della selettività dei dispositivi di protezione	»	202
6.4. Impianti elettrici di illuminazione di categoria I in corrente alternata in derivazione alimentati da cabina propria (sistema TN)	»	203
6.4.1. Generalità	»	203
6.4.2. Dimensionamento e verifica dei cavi	»	203
6.4.3. Protezione dai contatti diretti e indiretti	»	203
6.4.4. Protezione dei componenti degli impianti di illuminazione contro la penetrazione dei corpi solidi e liquidi	»	203
6.4.5. Verifica della selettività dei dispositivi di protezione	»	203
6.4.6. Cabina di distribuzione	»	204
6.5. Impianti elettrici di illuminazione di categoria I in corrente alternata in derivazione alimentati da un sistema a neutro isolato (sistema IT)	»	204
6.5.1. Generalità	»	204
6.5.2. Dimensionamento e verifica dei cavi	»	204
6.5.3. Protezione dai contatti diretti e indiretti	»	205
6.5.4. Protezione dei componenti degli impianti di illuminazione contro la penetrazione dei corpi solidi e liquidi	»	205
6.5.5. Verifica della selettività dei dispositivi di protezione	»	205
6.6. Impianti elettrici di illuminazione di II categoria in derivazione derivati da cabina propria ...	»	206
6.6.1. Generalità	»	206
6.6.2. Dimensionamento e verifica dei cavi	»	206
6.6.3. Protezione dai contatti diretti e indiretti	»	206
6.6.4. Protezione dei componenti contro la penetrazione di corpi solidi e liquidi	»	207
6.6.5. Verifica della selettività dei dispositivi di protezione	»	207
6.6.6. Cabina di alimentazione	»	207
6.7. Impianti elettrici di illuminazione di categoria 0 e I in corrente continua alimentati da sorgente autonoma.....	»	207
6.7.1. Generalità	»	207
6.7.2. Dimensionamento e verifica dei cavi	»	207
6.7.3. Protezione dai contatti diretti e indiretti	»	208
6.7.4. Protezione dei componenti degli impianti di illuminazione contro la penetrazione di corpi solidi e liquidi	»	209
6.7.5. Verifica della selettività dei dispositivi di protezione	»	209
6.8. Impianti elettrici di illuminazione di categoria II in serie derivati da cabina propria.....	»	209
6.8.1. Generalità	»	209
6.8.2. Cabina di alimentazione	»	210
6.8.3. Dimensionamento e verifica dei cavi	»	220
6.8.4. Protezione contro le interruzioni del circuito di alimentazione negli impianti in serie ..	»	220
6.8.5. Protezione contro i contatti diretti e indiretti	»	223
6.8.6. Protezione contro la penetrazione di corpi solidi e liquidi	»	228
6.9. Gestione centralizzata e controllo degli impianti d'illuminazione	»	228
6.9.1. Impianti di illuminazione per interni	»	228
6.9.2. Impianti di illuminazione pubblica	»	230
6.10. Ottimizzazione economica degli impianti d'illuminazione	»	231
6.10.1. Generalità	»	231
6.10.2. Risparmi energetici negli impianti di illuminazione per interni	»	231
6.10.3. Risparmi energetici negli impianti di pubblica illuminazione	»	232
6.10.3.1. Impianti in derivazione	»	232

6.10.3.2. Impianti in serie	»	236
6.10.3.3. Manutenzione degli impianti di illuminazione.....	»	236
6.11. Caratteristiche realizzative degli impianti elettrici di alimentazione di sistemi di illuminazione	»	237
6.11.1. Impianti di illuminazione per esterno	»	237
6.11.1.1. Impianti in derivazione	»	237
6.11.1.2. Impianti in serie	»	244
6.11.2. Impianti di illuminazione per interno	»	245
6.12. Illuminazione di sicurezza	»	246
6.13. La compatibilità elettromagnetica degli impianti e degli apparecchi di illuminazione	»	251
6.13.1. Disturbi determinati da impianti e apparecchi di illuminazione	»	251
6.13.2. La direttiva CEE sulla compatibilità elettromagnetica e la marcatura CE.....	»	251
6.13.3. La direttiva CEE bassa tensione e la marcatura CE	»	252

PARTE QUARTA
Sistemi d'illuminazione

CAPITOLO 7 – Illuminazione stradale

7.1. Considerazioni preliminari	»	257
7.1.1. Classificazione delle strade. Requisiti illuminotecnici	»	261
7.1.2. Classificazione delle pavimentazioni stradali	»	273
7.1.3. Progetto illuminotecnico	»	277
7.1.3.1. Geometria dell'installazione	»	277
7.1.3.2. Metodo del flusso totale	»	283
7.1.4. Verifiche illuminotecniche	»	287
7.1.4.1. Aree e griglie di calcolo	»	287
7.1.4.2. Determinazione dell'intensità luminosa incidente in un punto di calcolo ..	»	290
7.1.4.3. Determinazione della luminanza in un punto di calcolo	»	292
7.1.4.4. Determinazione dell'illuminamento in un punto di calcolo	»	294
7.1.4.5. Calcoli di abbagliamento	»	298
7.1.4.6. Calcolo dell'indice di illuminazione delle aree circostanti (surround ratio) ..	»	299
7.1.5. Progetto elettrico e meccanico.....	»	300
7.1.5.1. Protezione di sostegni e torri faro contro le scariche atmosferiche	»	300

CAPITOLO 8 – Illuminazione di aree esterne

8.1. Illuminazione di aree residenziali e pedonali	»	305
8.1.1. Generalità.....	»	305
8.1.2. Parametri illuminotecnici: raccomandazioni e prescrizioni	»	305
8.2. Illuminazione di grandi aree all'aperto	»	306
8.2.1. Parametri illuminotecnici (raccomandazioni e prescrizioni).....	»	306
8.2.2. Considerazioni sul calcolo illuminotecnico.....	»	312
8.3. Illuminazione di forme architettoniche, monumenti e opere d'arte in esterno	»	312
8.3.1. Parametri illuminotecnici (raccomandazioni e prescrizioni).....	»	312
8.3.2. Considerazioni sul calcolo illuminotecnico.....	»	316
8.4. Illuminazione di parchi e giardini	»	316
8.4.1. Parametri illuminotecnici (raccomandazioni e prescrizioni).....	»	316
8.5. Risparmi energetici negli impianti di illuminazione all'esterno.....	»	317
8.6. Inquinamento luminoso.....	»	318

8.7. Cenni sulla gestione degli impianti di illuminazione all'esterno	»	322
8.8. Il Piano Regolatore Comunale dell'Illuminazione Pubblica (PRIC)	»	322

CAPITOLO 9 – Illuminazione delle gallerie

9.1. Considerazioni preliminari	»	325
9.2. Determinazione dei parametri fotometrici di progetto	»	329
9.2.1. Illuminazione diurna delle gallerie lunghe	»	329
9.2.2. Illuminazione diurna delle gallerie corte	»	336
9.2.3. Illuminazione notturna	»	336
9.2.4. Altri requisiti fotometrici	»	337
9.3. Il progetto di un impianto di illuminazione in galleria	»	338
9.3.1. Il progetto illuminotecnico	»	338
9.3.2. Il calcolo illuminotecnico	»	344
9.4. Il progetto elettrico	»	346
9.5. Calcolo delle prestazioni fotometriche e verifiche illuminotecniche	»	347
9.6. Dati da fornirsi da parte del committente	»	349
9.7. Manutenzione	»	350

CAPITOLO 10 – Illuminazione di impianti sportivi

10.1. Generalità	»	353
10.2. Parametri illuminotecnici (raccomandazioni e prescrizioni)	»	353
10.3. Il progetto degli impianti di illuminazione sportiva	»	365
10.3.1. Il progetto illuminotecnico	»	365
10.3.1.1. Tipologie di sostegni, apparecchi illuminanti, sorgenti luminose	»	365
10.3.2. Geometrie di installazione	»	367
10.3.2.1. Campi sportivi all'aperto	»	367
10.3.2.2. Campi sportivi al coperto	»	370
10.3.3. Metodi di calcolo illuminotecnico	»	371
10.3.3.1. Impianti sportivi all'aperto	»	371
10.3.3.2. Impianti sportivi al coperto	»	373
10.4. Problemi di installazione	»	373
10.4.1. Puntamento dei proiettori	»	374
10.5. L'alimentazione elettrica degli impianti di illuminazione sportiva	»	374

CAPITOLO 11 – Illuminazione di interni

11.1. Generalità	»	379
11.2. Il progetto illuminotecnico	»	398

CAPITOLO 12 – Applicazioni per illuminazione di interni

12.1. Generalità	»	439
12.2. Uffici	»	443
12.3. Alberghi e ristoranti	»	445
12.4. Locali di abitazione	»	446
12.5. Negozi e grandi magazzini	»	446
12.6. Scuole	»	448
12.7. Ospedali	»	450

12.8. Locali industriali	»	450
12.9. Musei	»	453
12.10. Considerazioni aggiuntive	»	455

CAPITOLO 13 – Integrazione di luce naturale e artificiale

13.1. Generalità	»	457
13.2. Illuminazione naturale	»	457
13.3. Valutazione dell'illuminazione diurna	»	459
13.4. Calcolo dei contributi della luce diurna	»	461
13.4.1. Calcolo del fattore puntuale di luce diurna	»	461
13.4.2. Calcolo semplificato del fattore medio di luce diurna	»	468
13.4.3. Calcolo semplificato del fattore di luce diurna	»	470
13.4.4. Valutazione dell'illuminamento naturale all'interno di un locale	»	470
13.4.5. Valutazione del contributo della luce diurna e modalità di integrazione fra luce naturale e artificiale	»	474
13.5. Valutazione del risparmio energetico	»	475

PARTE QUINTA

Collaudo

CAPITOLO 14 – Collaudo degli impianti di illuminazione per interno e per esterno

14.1. Considerazioni generali	»	479
14.2. Collaudo elettrico	»	479
14.3. Collaudo illuminotecnico	»	485

APPENDICE – Calcolo illuminotecnico a mezzo di software specialistico

A.1. Premessa	»	495
A.2. Generalità	»	495
A.3. Esempi di calcoli illuminotecnici svolti con software specialistici	»	497
A.3.1. Illuminazione d'interni	»	497
A.3.2. Illuminazione di aree esterne	»	501
A.3.3. Illuminazione di campi sportivi	»	504
A.3.4. Illuminazione stradale	»	507
A.4. Conclusione	»	508

Bibliografia	»	511
--------------------	---	-----

Indice analitico	»	521
------------------------	---	-----

Prefazione

alla prima edizione

“...potremmo supporre che all’origine dei tempi, all’indomani di un divino Fiat Lux, la luce, dapprima sola al mondo, abbia generato a poco a poco per condensazione progressiva questo universo materiale che oggi, grazie ad essa, noi possiamo contemplare. E forse un giorno, alla fine dei secoli, l’universo, ritrovando la sua purezza originale, si dissolverà nuovamente in luce”.

Louis de Broglie

Questo libro è stato concepito per costituire una guida organica per la progettazione, esecuzione e collaudo degli impianti di illuminazione e fornire una trattazione orientata ad affrontare e risolvere, secondo una visione integrata, le relative problematiche illuminotecniche, elettriche e, ove occorre, meccaniche. Pur nella necessaria sintesi di un’opera destinata prevalentemente ai progettisti, si è cercato di dare una chiara visione dei fenomeni fisici che stanno alla base dei problemi esaminati e raccogliere, in un contesto unico, raccomandazioni pratiche, prescrizioni normative e metodi di calcolo utili dal punto di vista applicativo.

Si inizia con il richiamo dei concetti di base sulle onde elettromagnetiche e la luce e la definizione delle grandezze fotometriche fondamentali, nonché dei parametri che caratterizzano la percezione visiva; vengono anche forniti gli elementi di fotometria e colorimetria necessari per una corretta interpretazione degli argomenti trattati.

Successivamente sono classificati ed analizzati i componenti degli impianti di illuminazione e quindi, in particolare, le sorgenti luminose (da quelle ad incandescenza alle più recenti a induzione), gli apparecchi illuminanti e i relativi sostegni.

Vengono quindi trattati, in dettaglio, gli impianti di illuminazione per esterno (strade, grandi aree, aree pedonali, giardini, gallerie, impianti sportivi, opere d’arte e fabbricati monumentali) e per interno (uffici, abitazioni, negozi, scuole, grandi magazzini, ospedali, locali industriali, musei, impianti sportivi) nella globalità degli aspetti che li caratterizzano, non trascurando il risparmio energetico. Un capitolo a parte è destinato al collaudo degli impianti di illuminazione nei suoi aspetti illuminotecnici ed elettrici.

In appendice, infine, viene svolta una sintetica analisi dei software oggi disponibili allo scopo di definire i limiti di una corretta applicazione.

La trattazione è rispondente agli indirizzi tecnici più recenti e tiene conto della normativa illuminotecnica (CIE, UNI) ed elettrica (CEI) più aggiornata.

Gli Autori, nel ringraziare l’Editore per la cura e la passione dedicata a questa loro opera, si augurano che questo testo, per la ricchezza di tabelle, dati, schemi e figure, per la completezza e l’aggiornamento dei richiami bibliografici e normativi, per la sua natura interdisciplinare, possa fornire una risposta adeguata ad una esigenza che è viva fra gli operatori del settore.

Gli Autori desiderano altresì ringraziare quanti, con indicazioni, suggerimenti e consigli, hanno contribuito allo sviluppo dell’opera e, in particolar modo, il prof. Vincenzo Ruisi, al quale si deve la trattazione del calcolo meccanico dei sostegni.

Vincenzo Cataliotti
Giuseppe Morana

Palermo, giugno 1993

Prefazione

alla seconda edizione

In questa seconda edizione, alla luce delle novità sopravvenute nel settore normativo e dell'esperienza didattica e professionale maturata in questi ultimi anni, si è provveduto a una completa revisione e aggiornamento del testo con l'approfondimento di alcuni argomenti prima trattati solo marginalmente.

Gli Autori desiderano ringraziare il nuovo Editore per la cura particolare dedicata a questa edizione.

Vincenzo Cataliotti
Giuseppe Morana

Palermo, marzo 1997

Prefazione

alla terza edizione

In questa terza edizione gli Autori hanno mantenuto l'originale impostazione della prima e, pertanto, il libro rimane *concepito per costituire una guida organica per la progettazione, esecuzione e collaudo degli impianti di illuminazione e fornire una trattazione orientata ad affrontare e risolvere, secondo una visione integrata, le relative problematiche illuminotecniche, elettriche e ove occorre meccaniche*. In dipendenza del lungo periodo trascorso dall'ultima edizione, si è però ritenuto utile procedere a una totale riscrittura del testo, con l'approfondimento di alcuni argomenti e l'aggiunta di nuovi, l'aggiornamento dei riferimenti normativi, l'introduzione di ulteriori dati, schemi, figure e richiami bibliografici per tener conto di tutte le novità maturate in campo tecnologico e normativo e di tutto quanto le esperienze didattiche e professionali hanno consigliato.

In questo modo si ritiene, ancora più che nelle precedenti edizioni, di fornire ai progettisti, ai quali fundamentalmente il libro è dedicato, uno strumento che, per la sua natura interdisciplinare, consente di affrontare in modo completo e consapevole tutti gli aspetti teorici e costruttivi che possono presentarsi nella progettazione degli impianti di illuminazione.

Il testo è articolato in cinque parti e una appendice.

La prima parte *Richiami e definizioni*, comprende un capitolo, fornisce i richiami teorici di base (natura fisica della luce e della visione) e le definizioni delle grandezze fotometriche fondamentali e tratta gli aspetti della visibilità, le anomalie della percezione visiva, la colorimetria e la fotometria.

La seconda parte *Componenti*, comprende tre capitoli. Il primo tratta le sorgenti luminose (a incandescenza, a scarica, a luce miscelata, a induzione, LED e relativi accessori) fornendo di ognuna le caratteristiche essenziali; il secondo gli apparecchi di illuminazione visti nelle loro diverse tipologie con dati costruttivi e prestazionali facendo anche riferimento alle fibre ottiche e alla guide di luce; il terzo i sostegni visti nelle loro diverse tipologie con una trattazione completa del loro calcolo meccanico alla luce della normativa attualmente vigente.

La terza parte *Impiantistica elettrica*, comprende due capitoli. Il primo fornisce in modo succinto richiami di impianti elettrici (norme, definizioni, criteri di dimensionamento e di verifica); il secondo analizza l'alimentazione elettrica degli impianti di illuminazione in derivazione e in serie (con una trattazione diffusa di questi ultimi per i quali in letteratura si hanno pochi elementi di riferimento). Nel contesto vengono anche esaminati gli aspetti relativi al risparmio energetico, alle caratteristiche realizzative degli impianti e all'illuminazione di sicurezza.

La quarta parte *Sistemi di illuminazione*, comprende sette capitoli. Il primo tratta l'illuminazione stradale con la definizione dei suoi necessari requisiti illuminotecnici e la conseguente esposizione dei criteri di progetto illuminotecnico e di verifica alla luce della normativa in atto vigente; il secondo tratta l'illuminazione delle aree esterne (aree residenziali e pedonali, grandi aree all'aperto, forme architettoniche e monumenti all'esterno parchi e giardini) fissandone i requisiti illuminotecnici e i criteri di progetto. In questo capitolo si fa riferimento anche all'inquinamento luminoso e al piano regolatore comunale dell'illuminazione pubblica (PRIC); il terzo tratta l'illuminazione delle gallerie lunghe e corte con la definizione e l'analisi dei loro dati fotometrici e la trattazione dei relativi criteri di progettazione; il quarto tratta la illuminazione degli impianti sportivi all'aperto (campi di calcio, tennis, ...) e al coperto definendone i parametri illuminotecnici e i criteri di progetto con lo sviluppo di alcune applicazioni signifi-

cative; il quinto tratta l'illuminazione di interni con la definizione dei parametri illuminotecnici e l'analisi dei vari metodi di progettazione; il sesto tratta le più significative applicazioni per le illuminazioni di interni (uffici, alberghi e ristoranti, abitazioni, negozi e grandi magazzini, scuole, ospedali, locali industriali, musei) fornendo dati e raccomandazioni utili per le relative progettazioni; il settimo esamina il problema della integrazione della luce naturale con quella artificiale.

La quinta parte *Collaudo*, comprende un capitolo che tratta tutti gli aspetti tecnici del collaudo elettrico e illuminotecnico degli impianti di illuminazione.

Nell'*Appendice* infine vengono analizzate le modalità di calcolo illuminotecnico svolto a mezzo di software specialistico con specifico riferimento al SW DIALux.

In conclusione un grazie sincero all'Editore e alla sua equipe per la cura dedicata a questa pubblicazione e al P.I. Salvatore Longo per la preziosa collaborazione prestata in particolare nella stesura dell'Appendice.

Palermo, giugno 2010

Vincenzo Cataliotti
Giuseppe Morana

PARTE PRIMA

Riferimenti

CAPITOLO 1

RICHIAMI TEORICI E DEFINIZIONI

1.1. ONDE ELETTROMAGNETICHE

Natura della luce	La luce è una forma di energia radiante che, propagandosi sotto forma di onde elettromagnetiche, ha la proprietà di eccitare i fotorecettori della retina oculare.
Onde elettromagnetiche	Quando una perturbazione, generalmente a carattere oscillatorio, originata in una parte dello spazio, si trasmette alle zone circostanti, si parla di propagazione per onde. Se la perturbazione è data da un campo elettrico oscillante in un punto dello spazio, nei punti immediatamente vicini viene generato un campo magnetico oscillante che, a sua volta, determina in altri punti vicini un campo elettrico oscillante. Nasce, così, una onda elettromagnetica che si propaga nello spazio trasportando energia. A differenza delle onde acustiche o di quelle sull'acqua, che si propagano soltanto attraverso un mezzo materiale, le onde elettromagnetiche si propagano anche attraverso lo spazio vuoto.
Lunghezza d'onda (λ)	La lunghezza d'onda (λ) è la distanza percorsa da una onda durante un ciclo completo di oscillazione. Essa distingue una radiazione elettromagnetica da un'altra. Viene espressa in nanometri ($\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$).
Frequenza (ν)	La frequenza (ν) è il numero di cicli completi di oscillazione che si hanno in un secondo. Viene espressa in Hertz (Hz).
Velocità di propagazione (c_0)	La velocità di propagazione (c_0) è il rapporto tra la lunghezza d'onda e il tempo necessario a compiere una oscillazione completa. Nel vuoto vale $c_0 = 299.792.458 \text{ m/s}$. In un mezzo qualsiasi vale $c_m = c_0/n_m$, dove n_m è l'indice di rifrazione del mezzo riferito al vuoto. Nel vuoto, fra c_0 , ν e λ sussiste la relazione $c_0 = \nu\lambda$, che in un mezzo qualsiasi diventa $c_m = \nu\lambda_m$. Se si passa da un mezzo all'altro, non cambia la frequenza della radiazione, bensì la sua lunghezza d'onda.
Tipi di onde elettromagnetiche	Le onde elettromagnetiche sono classificabili sulla base della loro lunghezza d'onda (figura 1.1). Il campo delle radiazioni visibili all'occhio umano (luce) è compreso tra 380 e 780 nm. Al di sopra di questo campo vi sono le radiazioni infrarosse (IR) e, al di sotto, quelle ultraviolette (UV). Tali limiti si riferiscono all'occhio medio internazionale stabilito dalla Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Il campo di visibilità di alcune categorie animali può presentare estensione diversa.
Ottica geometrica	L'ottica geometrica si applica quando le dimensioni degli ostacoli sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica. Nell'ambito dell'ottica geometrica, il raggio luminoso viene rappresentato con un segmento uscente dalla sorgente. In tale ambito valgono le leggi della riflessione e della rifrazione.

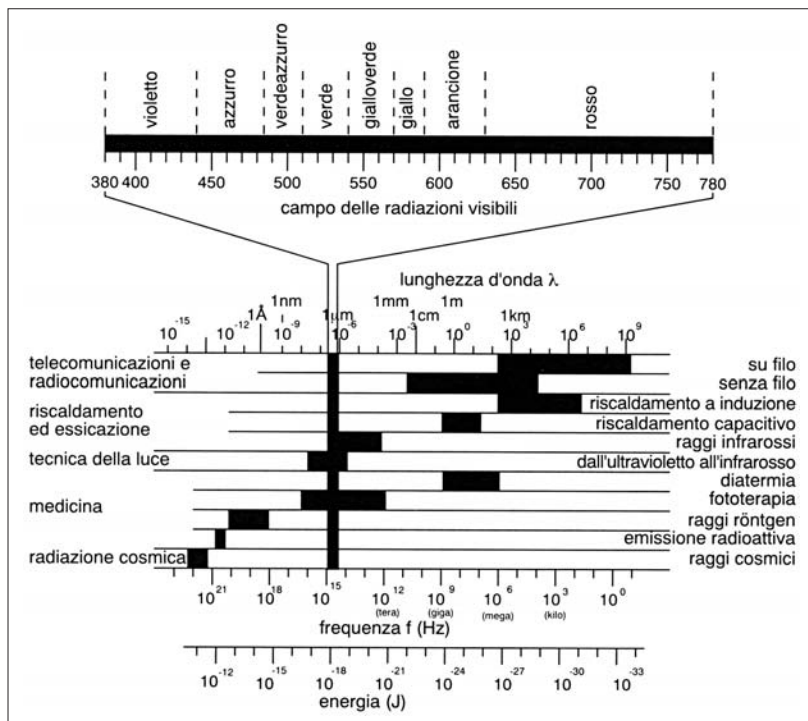


Figura 1.1. Radiazioni elettromagnetiche e spettro visibile

Tabella 1.1. Classificazione CIE delle radiazioni comprese nella banda spettrale infrarossa

Radiazioni infrarosse	Intervalli di lunghezza d'onda (nm)
IR-A	780 ÷ 1400
IR-B	1400 ÷ 3000
IR-C	3000 ÷ 1.000.00

Tabella 1.2. Classificazione CIE delle radiazioni comprese nella banda spettrale ultravioletta

Radiazioni ultraviolette	Intervalli di lunghezza d'onda (nm)
UV-A	315 ÷ 400
UV-B	280 ÷ 315
UV-C	100 ÷ 280

Ottica ondulatoria

L'ottica ondulatoria si applica quando le dimensioni degli ostacoli sono confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica. Nell'ambito dell'ottica ondulatoria, è possibile considerare la luce come formata da onde e interpretare fenomeni come l'interferenza e la diffrazione.

Ottica quantistica (corpuscolare)

L'ottica quantistica si applica quando le dimensioni degli ostacoli sono molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica. Nell'ambito dell'ottica quantistica, l'energia trasportata dalla luce può essere interpretata a mezzo di spostamenti di fotoni (quanti di luce) e si possono spiegare, fra l'altro, molti dei fenomeni di interazione radiazione-materia (si vedano, di seguito, i paragrafi dedicati alla fotoionizzazione, alla fluorescenza e alla fosforescenza).

Contenuto energetico di una radiazione	L'energia E dei fotoni, ossia il contenuto energetico di una radiazione, è legata alla frequenza ν dalla relazione $E = h\nu$, dove $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ è la costante di Planck. Il contenuto energetico aumenta con la frequenza (figura. 1.1).
Assorbimento	Si definisce <i>assorbimento</i> il fenomeno per il quale un mezzo, attraversato da un'onda elettromagnetica, trasforma in calore parte dell'energia da essa trasportata. Detta i_0 l'intensità della radiazione incidente, l'intensità i al termine di un percorso x vale $i = i_0^{-\alpha x}$. Il coefficiente α dipende dalla natura del mezzo e dalla lunghezza d'onda della radiazione. Il coefficiente $L = 1/\alpha$ prende il nome di <i>lunghezza d'assorbimento</i> .
Mezzi opachi e trasparenti	Un mezzo può essere considerato trasparente a una radiazione se il suo spessore è $s \ll L$. Se, invece, s è paragonabile ad L o maggiore, il mezzo viene considerato opaco.
Colore delle radiazioni luminose	Secondo la definizione CIE, il <i>colore</i> è quell'attributo della percezione visiva che può essere descritto tramite il nome dei colori (rosso, verde, blu, ecc.) o da combinazioni di questi. Nel campo del visibile, ogni lunghezza d'onda, e quindi ogni frequenza, viene percepita dall'occhio umano sotto forma di un determinato colore (figura 1.1).
Luce bianca	La luce bianca si ottiene dalla miscelazione, secondo opportune proporzioni, di luci di vari colori. Nel caso di miscele con prevalenza del rosso, si parlerà di luce bianco-calda. Nel caso di miscele con prevalenza del blu-violetto, si parlerà di luce bianco-fredda.
Raggio monocromatico	Si definisce <i>raggio monocromatico</i> quel raggio formato da una radiazione elettromagnetica nel visibile di definita lunghezza d'onda.
Propagazione di un raggio monocromatico	In un mezzo omogeneo trasparente (vuoto, aria) la luce si propaga in linea retta. In un mezzo non omogeneo si possono avere fenomeni di riflessione, rifrazione e dispersione (vedi 1.3).
Superfici speculari o scabre	Si ha una superficie speculare quando le rugosità in essa presenti hanno una dimensione molto minore (almeno dieci volte) della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Se le rugosità hanno dimensioni paragonabili o maggiori della lunghezza d'onda, si ha, invece, una superficie scabra. Le scabrosità possono avere distribuzione casuale o regolare.

1.2. LA GENERAZIONE DELLA LUCE

Spettri di emissione e di assorbimento	Si definisce <i>spettro</i> un insieme di radiazioni, emesse o assorbite da atomi o o molecole sottoposti ad opportune sollecitazioni energetiche, espresse per mezzo di lunghezze d'onda o di frequenze. Gli spettri di emissione caratterizzano le radiazioni emesse da corpi incandescenti solidi, liquidi e gassosi fortemente compressi. Nel campo del visibile una sorgente luminosa emette uno spettro continuo se presenta tutti i colori dal rosso al violetto sfumati l'uno nell'altro (spettro solare, spettro emesso da una lampada ad incandescenza), o discreto (a righe). Gli spettri di emissione a righe pre-
---	---

sentano un certo numero di righe colorate (righe spettrali) su sfondo nero. Sono emessi da sostanze gassose o rese gassose a bassa pressione. Ogni spettro è caratteristico di ogni sostanza, e le righe spettrali costituiscono una sorta di firma degli atomi che la compongono. Se la successione di righe è molto fitta, si parla di spettro a banda.

Corpo nero

Il corpo nero è un perfetto radiatore termico, in quanto la distribuzione delle potenze irradiate dipende solo dalla temperatura, e possiede, inoltre, la capacità di assorbire totalmente tutte le radiazioni che incidono su di esso. Tale corpo ideale, realizzabile in laboratorio con buona approssimazione, riproduce in modo soddisfacente il comportamento medio della generalità dei corpi solidi. I gas fortemente compressi, in ragione della compattezza della materia, hanno un comportamento in qualche modo vicino a quello di un corpo solido. Nel caso dei gas non fortemente compressi, si ha emissione di luce quando il gas è investito da una corrente di elettroni portati a sufficiente velocità (scarica elettrica fra due elettrodi). Quando uno degli elettroni facenti parte dell'atomo di gas viene colpito da un altro elettrone dotato di sufficiente energia cinetica, esso può passare ad una orbita più lontana dal nucleo, acquisendo energia; questa seconda orbita, transitoria, viene abbandonata subito dopo l'urto, e l'elettrone ritorna alla sua orbita abituale emettendo fotoni. Se un gas o una sostanza resa gassosa, a temperatura inferiore a quella di una sorgente di luce bianca, è interposto tra detta sorgente e uno strumento di osservazione (spettroscopio), si ottiene uno spettro di assorbimento caratterizzato dalle frequenze che vengono assorbite. Tutte le altre frequenze attraversano il gas senza interagire. Lo spettro continuo della luce bianca ha, in corrispondenza delle lunghezze d'onda assorbite, delle righe d'assorbimento. Pertanto uno spettro di assorbimento è caratterizzato da uno sfondo colorato continuo e dalle righe di assorbimento. Per una stessa sostanza, le righe di assorbimento sono sovrapponibili, ovvero hanno la stessa lunghezza d'onda delle righe colorate dello spettro di emissione. Nel settore illuminotecnico le caratteristiche di emissione vengono rappresentate a mezzo della distribuzione della potenza spettrale relativa in funzione della lunghezza d'onda (figura 1.2).

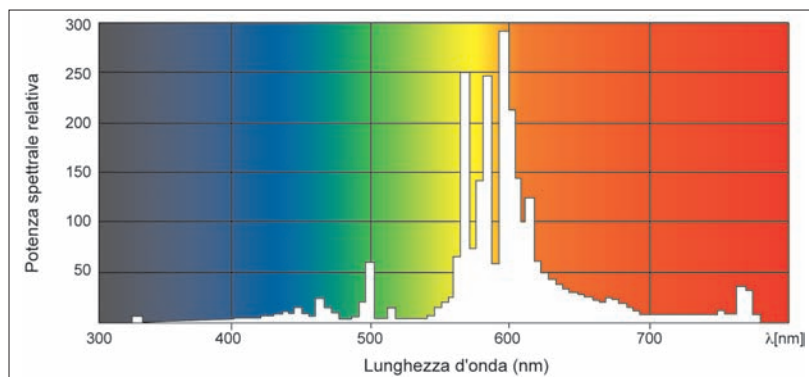


Figura 1.2. Distribuzione della potenza spettrale di una lampada a scarica

Fotoelettricità

Si definisce *fotoelettricità* l'insieme dei fenomeni che comportano la liberazione di cariche elettriche (elettroni) da parte di materiali solidi, liquidi e gassosi quando sono investiti da radiazioni elettromagnetiche, in particolare dalla luce. Tale fenomeno può essere interpretato considerando la radiazione luminosa inci-

dente costituita da fotoni che interagiscono, con cessione della loro energia, con gli elettroni del materiale interessato, e consentono la liberazione di elettroni se l'energia fornita dai fotoni è sufficiente per superare la barriera di potenziale superficiale. Quando la radiazione elettromagnetica, incidendo su un gas, provoca la liberazione di elettroni e la formazione di ioni, si ha la fotoionizzazione. Nel caso in cui, invece, sia interessato un semiconduttore, si ha un aumento del numero di elettroni di conduzione (effetto fotoconduttivo).

Fosforescenza e fluorescenza Un atomo il cui elettrone sia stato eccitato con un fotone di frequenza ν , ritornando allo stato fondamentale, emette solitamente l'energia ricevuta tramite un fotone di eguale frequenza. L'emissione spontanea è pressoché istantanea, spettro di emissione e spettro di assorbimento coincidono. Alcune volte, però, l'elettrone viene portato su un livello E_2 da un fotone di frequenza opportuna ν_2 . Poi, tramite una transizione detta *non-radioattiva*, che avviene, cioè, senza emissione di fotoni (per esempio urto fra atomi con trasferimento di energia vibrazionale o rotazionale), l'elettrone transita su un livello intermedio $E_1 < E_2$. Da questo livello decade sullo stato fondamentale emettendo un fotone di frequenza ν_1 . Quindi, questo particolare atomo sarebbe in grado di assorbire una radiazione, per esempio, nell'ultravioletto e di emettere nel visibile. Quando la transizione avviene a ritroso, ovvero l'emissione di un fotone a frequenza inferiore si ha quasi subito dopo l'assorbimento del fotone di eccitazione, il processo si definisce *fluorescenza*. È il caso, ad esempio, delle vernici fluorescenti adoperate nelle lampade a scarica, che concentrano nel visibile le radiazioni provocate dalla scarica nel gas. Quando l'emissione di un fotone a frequenza inferiore avviene qualche secondo dopo l'eccitazione, il processo si definisce *fosforescenza*. In entrambi i casi, lo spettro di emissione non coincide con lo spettro di assorbimento.

1.3. LA PROPAGAZIONE DELLA LUCE

Riflessione Quando un raggio luminoso monocromatico incide su una superficie perfettamente levigata (speculare), l'angolo di incidenza (rispetto alla normale alla superficie nel punto di incidenza) e l'angolo di riflessione sono complanari e uguali fra di loro. Questa proprietà viene utilizzata nei riflettori. Se la superficie è scabra, il raggio viene riflesso in diverse direzioni (diffusione per riflessione). Questa proprietà viene utilizzata nei riflettori-diffusori.

Specchi piani, concavi e convessi Le superfici speculari possono essere piane (specchi piani), concave (specchi concavi) o convesse (specchi convessi). Facendo riferimento a specchi di forma sferica, e considerando un fascio di luce parallelo, poiché ogni raggio obbedisce alla legge di riflessione, si ha che in uno specchio concavo tutti i raggi convergono in un punto F (fuoco), mentre in uno specchio convesso tutti i raggi divergono in modo che i loro prolungamenti convergano sul fuoco (figura 1.3).

Rifrazione La rifrazione si presenta quando il raggio luminoso passa da un primo a un secondo mezzo trasparente, di natura differente, con superficie di separazione perfettamente liscia. L'angolo di incidenza e quello di rifrazione sono, allora, complanari. Il rapporto tra i seni di tali angoli è una costante che prende il nome di *indice di rifrazione* del secondo mezzo rispetto al primo (figura 1.4) e dipende dalla frequenza di radiazione (colore del raggio). Questa proprietà viene utilizzata nei rifrattori. Se la superficie di separazione tra i due mezzi è scabra, la

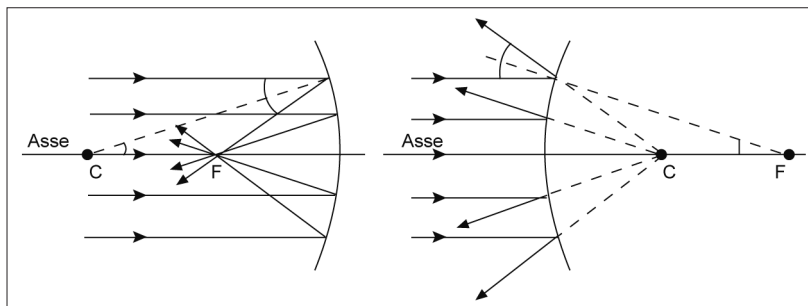


Figura 1.3. Riflessione di uno specchio concavo e di uno specchio convesso

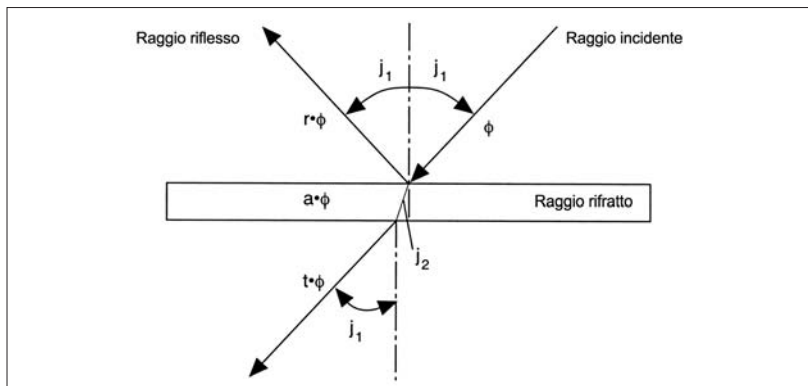


Figura 1.4. Riflessione, assorbimento, rifrazione: un raggio di luce che incide su una superficie piana trasparente viene in parte riflesso, in parte assorbito e in parte trasmesso

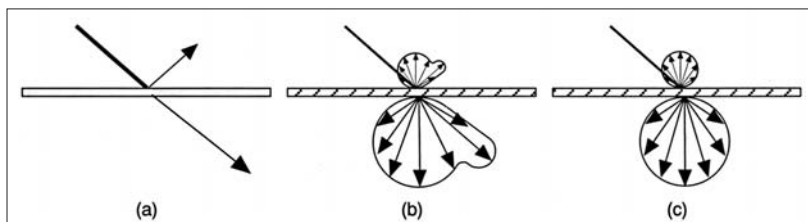


Figura 1.5. Diversi tipi di riflessione e trasmissione:
(a) superfici piane; (b) e (c) superfici scabre

rifrazione avviene secondo più direzioni (diffusione per rifrazione, figura 1.5). Questa proprietà viene utilizzata nei rifrattori-diffusori.

Diottro

Si definisce *diottro* un oggetto rappresentabile come una superficie di separazione tra due mezzi di indice di rifrazione diverso (aria-vetro). Se tale superficie è di forma sferica, si parlerà di *diottro sferico*.

Lenti

Le lenti sono costituite da due superfici curve di interfaccia tra due mezzi di indice di rifrazione diverso, solitamente aria-vetro. Le lenti possono essere, quindi, pensate come due diottri uniti insieme, e le combinazioni dovute alla curvatura dei due diottri danno luogo a due tipologie di lenti, convergenti e divergenti. Nelle cosiddette *lenti convergenti* le convessità sono rivolte verso il

mezzo aria; nelle *lenti divergenti*, invece, le convessità sono rivolte verso il mezzo vetro. Facendo riferimento alle cosiddette *lenti sottili*, ovvero quelle lenti per le quali lo spessore risulta trascurabile a confronto con le altre grandezze (distanza oggetto-lente, distanza focale, ecc.), una lente presenta due punti focali F ed F' , detti rispettivamente *punto focale primario* e *punto focale secondario*. Nelle lenti convergenti, il punto focale primario è un punto sull'asse ottico avente la proprietà che ogni raggio emergente da esso, che incide sulla lente, dopo la rifrazione emerge parallelamente all'asse ottico (figura 1.6). Il punto focale secondario è un punto sull'asse ottico avente la proprietà che ogni raggio che si propaga parallelamente all'asse ottico e incide sulla lente, dopo la rifrazione, emerge diretto verso tale punto.

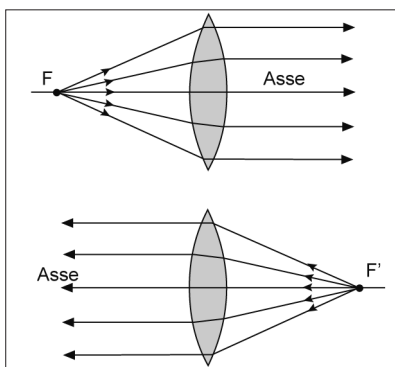


Figura 1.6. Lenti convergenti

Nelle lenti divergenti la stessa regola si applica non ai raggi, bensì al prolungamento degli stessi (figura 1.7).

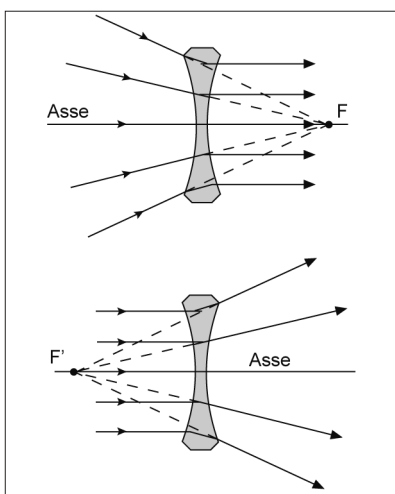


Figura 1.7. Lenti divergenti

Per poter costruire una lente che abbia una precisa distanza focale, i parametri che possono essere variati per ottenere lo scopo sono l'indice di rifrazione del materiale utilizzato e i raggi di curvatura delle due superfici.

Diffrazione

Si consideri un sottile fascio luminoso che attraversi un diaframma contenente una fenditura di larghezza d , e che si proietti su uno schermo posto a distanza L dal diaframma. Se d è molto maggiore della lunghezza d'onda λ , il fascio prosegue il suo cammino proiettando sullo schermo l'immagine della fenditura. Se si riduce notevolmente d portandola a valori paragonabili con λ , si vedrà, allora, che la macchia luminosa sullo schermo, anziché stringersi, andrà ad allargarsi, dando luogo sullo schermo ad un'alternanza di zone luminose (di diversa luminosità e di diversa larghezza) e di zone buie. L' n -esima zona buia si troverà ad una distanza x dal punto centrale dello schermo, definita dalla relazione $x = n\lambda L/d$, mentre l'intensità delle zone luminose andrà decrescendo molto rapidamente via via che ci si allontana dal centro (punto più luminoso).

Il limite superato il quale si presenta tale fenomeno (limite di diffrazione) definisce il confine oltre il quale non è più possibile trattare la propagazione della luce con i metodi dell'ottica geometrica ma è necessario ricorrere alla teoria ondulatoria.

Nel settore illuminotecnico è possibile ottenere ottiche cosiddette *diffrattive*, ossia che lavorano diffrangendo la luce. Di solito, tali ottiche si ottengono realizzando, su un materiale sottile, scalini ravvicinati con una profondità di poche decine di nanometri, in modo da avere dimensioni paragonabili con la lunghezza d'onda visibile. La struttura a scalini ha un'area di pochi micron e si ripete molte volte sulla lente.

Interferenza

Si ha interferenza quando due o più onde, sovrapponendosi, danno luogo a un'unica onda risultante; in seguito a tale fenomeno, due onde possono intensificarsi o eliminarsi vicendevolmente, a seconda della differenza di fase tra di esse, che dipende dalla differenza di percorso compiuto dalle onde e anche dal diverso materiale in cui possono propagarsi. In particolare, se due onde partono con la stessa fase e compiono esattamente lo stesso percorso, giungeranno in fase tra loro e si avrà un'interferenza costruttiva, ma, se risultano sfasate di mezza lunghezza d'onda, la loro interferenza sarà distruttiva.

Si consideri ora un sottile fascio luminoso che, attraversando un diaframma contenente due fenditure di larghezza d e interdistanza D , si proietti su uno schermo posto a distanza L dal diaframma. Si osserverà su questo una successione di frange luminose equidistanti alternate a frange scure. La luce, passando attraverso ciascuna fenditura, subisce la diffrazione, con l'ulteriore sovrapposizione della luce diffratta da una delle due fenditure a quella diffratta dall'altra. Nella regione di sovrapposizione, le onde luminose interferiranno costruttivamente (luce intensa) nei punti in cui esse giungono in fase; interferiranno, invece, distruttivamente (buio) laddove giungono sfasate di mezza lunghezza d'onda. L' n -esima zona luminosa si troverà ad una distanza x dal punto centrale dello schermo, definita dalla relazione $x = n\lambda L/D$.

Filtri interferenziali

Un esempio tipico di interferenza si ha nei cosiddetti *filtri interferenziali*. Un filtro interferenziale è costituito da un materiale plastico o vetroso (mezzo ottico) su cui viene sovrapposto uno strato sottilissimo di un materiale con un diverso indice di rifrazione (è, questo, il cosiddetto *trattamento*). Si consideri, per semplicità, un singolo raggio che incide sul trattamento; una parte del raggio verrà riflessa, mentre una parte entrerà nel trattamento e inciderà sul mezzo ottico, dove si avrà di nuovo un raggio riflesso e un raggio trasmesso. Si sono ottenuti, così, due raggi riflessi, che compiono un percorso diverso e che non sono più necessaria-

mente in fase. A seconda dello spessore del trattamento, alcune lunghezze d'onda del fascio risulteranno in opposizione di fase e si elideranno a vicenda, mentre altre risulteranno in fase. L'opposizione di fase genererà un'assenza di riflessione per quelle lunghezze d'onda e una conseguente trasmissione. In questo modo, è possibile realizzare un filtro che faccia passare solo alcune lunghezze d'onda. Sovrapponendo strati diversi di trattamenti è possibile, inoltre, ottenere filtri a banda più larga che lasciano passare un gruppo di lunghezze d'onda.

Riflettore dicroico

Un'applicazione illuminotecnica di quanto sopra indicato si ha nel cosiddetto *riflettore dicroico*, in cui lo spessore del trattamento è realizzato in modo tale che la luce visibile viene riflessa, mentre la parte infrarossa attraversa il riflettore e non raggiunge l'oggetto illuminato.

Polarizzazione

La luce emessa dalle normali sorgenti luminose non è polarizzata, poiché contiene onde elettromagnetiche e, quindi, campi elettrici e magnetici che oscillano in tutti i piani perpendicolari alle direzioni di propagazione della luce. In una luce polarizzata, invece, il campo oscilla solo su un piano. La cosiddetta *polarizzazione* può ottenersi con alcuni materiali (quarzo, tormalina, ecc.) che, interposti sul cammino di un fascio di luce normale, lasciano passare solo le onde giacenti in un piano parallelo all'asse di polarizzazione degli stessi. In questo caso, si viene a determinare un filtro polarizzatore che funziona di fatto come una griglia che lascia passare esclusivamente una direzione di oscillazione, assorbendo le altre.

Se si colloca lungo il tragitto della luce, polarizzata da un filtro polarizzatore, un secondo filtro polarizzatore con l'asse di polarizzazione perpendicolare al piano di polarizzazione della luce polarizzata, non si ha alcun passaggio di luce. Se, invece, l'asse di polarizzazione del secondo filtro è parallelo al piano di polarizzazione della luce, la maggior parte della luce viene trasmessa. Pertanto, un filtro polarizzatore può essere utilizzato per analizzare una data luce e stabilire se è, o meno, polarizzata. In tal caso, il filtro polarizzatore viene detto *analizzatore*.

Dispersione (separazione cromatica della luce)

Quando un fascio di luce bianca viene inviato su un prisma di vetro con le pareti perfettamente lisce, si verifica il fenomeno della scomposizione spettrale della luce incidente (figura 1.8). Tale fenomeno è dovuto al diverso indice di rifrazione delle radiazioni luminose che compongono il fascio originario.

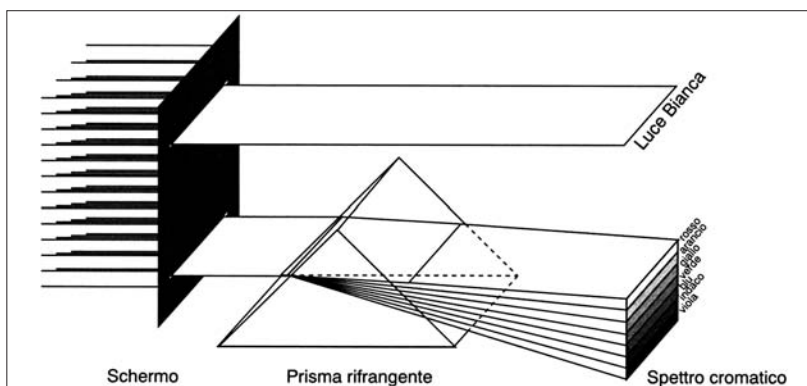


Figura 1.8. Separazione cromatica della luce bianca con un prisma

Reticoli dispersivi

Si definisce *reticolo dispersivo in riflessione* un componente ottico costituito da un substrato con una molteplicità di solchi paralleli (600-1200 linee/mm), su cui viene depositato uno strato riflettente. Si ha, quindi, una configurazione “a dente di sega”, nella quale due raggi che incidono su due denti successivi del reticolo vengono riflessi con un differente cammino ottico. Per avere interferenza costruttiva dei due raggi, la differenza dovrà essere uguale a un numero m intero di lunghezze d'onda. Il numero m è l'ordine di diffrazione. Nel caso di un fascio, fissato l'angolo di incidenza e il numero m , si avrà che ogni lunghezza d'onda verrà deviata di un angolo diverso, ottenendo, così, la separazione spaziale delle componenti spettrali del fascio incidente. Per $m = 0$ si ha, invece, la riflessione speculare del fascio incidente, che non risulta, quindi, disperso spettralmente.

1.4. NATURA DELLA VISIONE

L'occhio umano L'occhio umano racchiude in sé un sistema ottico e una parte sensibile, la retina, collocata dietro il sistema ottico e posta in connessione con il cervello tramite il nervo ottico. Il sistema ottico permette il formarsi delle immagini sulla retina, alla quale è affidata la percezione visiva.

la percezione delle radiazioni elettromagnetiche visibili

Prendendo in considerazione il sistema ottico e seguendo il percorso di una radiazione luminosa proveniente dall'esterno, il primo elemento che si incontra è la cornea. Questa è costituita da uno strato trasparente alle radiazioni visibili, ma in grado di assorbire le radiazioni UV-B, che contribuisce per circa due terzi al potere diottrico complessivo dell'occhio.

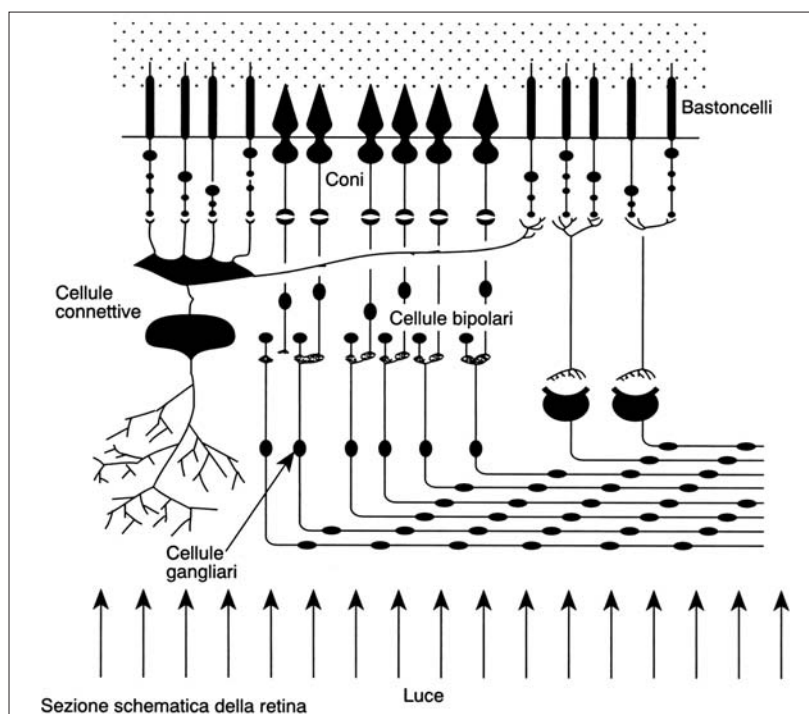


Figura 1.9. Struttura della retina dell'occhio umano

Proseguendo il suo percorso, la radiazione luminosa incontra l'umor acqueo e quindi la pupilla che, contornata dall'iride, si dilata o si contrae in funzione della quantità di luce che la colpisce. La radiazione luminosa giunge quindi al cristallino, che è in grado di variare la propria forma e il proprio indice di rifrazione e, di conseguenza, il proprio potere diottrico (per circa un terzo del potere diottrico complessivo dell'occhio), per permettere l'accomodazione di oggetti posti a distanza molto diversa tra loro. Il cristallino è in grado di assorbire le radiazioni UV-A. Dopo avere attraversato l'umor vitreo, la radiazione giunge infine sulla retina.

La retina ha una struttura a tre strati (figura 1.9), il primo dei quali è composto da due tipi di fotorecettori, i coni e i bastoncelli. I coni, preposti alla visione fotopica (diurna), sono sensibili a tutte le scale cromatiche e sono in grado di cogliere i minuti dettagli del campo di osservazione. I bastoncelli consentono, invece, la visione scotopica (crepuscolare), con basse luminanze di adattamento dell'occhio e modesti livelli di illuminamento, senza la precisione dei dettagli data dai coni, e senza la loro stessa capacità di registrare le scale cromatiche. Nella retina umana vi sono all'incirca 7 milioni di coni e 120 milioni di bastoncelli; i coni sono presenti in maniera estremamente densa soprattutto al centro della retina, in una zona denominata *fovea*, mentre i bastoncelli sono distribuiti soprattutto sul bordo della retina stessa. Una regione della retina attorno alla fovea viene detta *macula* e si estende per circa 10° orizzontalmente e 6° verticalmente. Tale zona contiene un pigmento giallo, con un massimo di assorbimento a circa 460 nm. La diversa distribuzione spaziale di coni e bastoncelli e la presenza dei pigmenti della macula sono alla base delle differenze nell'uguagliamento dei colori e nella discriminazione cromatica tra la fovea e la zona attorno ad essa.

Il secondo strato (formato dalle cellule bipolari) e il terzo strato (composto dalle cellule gangliari) permettono il passaggio del segnale verso il cervello e favoriscono la percezione dei contrasti. Anche se dal punto di vista del percorso del segnale questi due strati seguono i fotorecettori, dal punto di vista fisiologico essi si trovano davanti al primo strato retinico. Per questa ragione il segnale nervoso, per raggiungere il cervello, deve riattraversare lo strato dei fotorecettori; tale strato è, infatti, buco, e una parte della retina, il cosiddetto *punto cieco*, è priva di sensibilità.

Negli esseri umani, i coni hanno tre diverse classi di fotopigmenti, che sono sensibili a zone diverse dello spettro luminoso. I massimi di sensibilità si collocano in prossimità dei 560 nm per i coni L (long) che coprono le lunghezze d'onda più lunghe; dei 530 nm per i coni M (medium) e dei 420 nm per i coni S (short), che sono sensibili alle lunghezze d'onda più corte.

Se la retina riceve un raggio luminoso composito (contenente radiazioni con diverse lunghezze d'onda contemporaneamente), non riesce a distinguere le singole tonalità di colore e percepisce un effetto di insieme dipendente dalle radiazioni componenti. La luce che l'occhio percepisce come bianca è, in realtà, un miscuglio di radiazioni di differente frequenza.

Curve di visibilità fotopica e scotopica

L'occhio umano presenta sensibilità diverse in dipendenza della lunghezza d'onda della radiazione e a seconda che la percezione avvenga in ore notturne o diurne.

In figura 1.10 sono riportate due curve di *visibilità relativa* $V(\lambda)$, una delle quali

(A) è la curva di visibilità fotopica per la visione diurna, e l'altra (B) è la curva di visibilità scotopica per la visione crepuscolare. Tali curve evidenziano la natura psicofisica della percezione, e consentono di rilevare che il valore dell'energia radiante non può essere l'unico parametro significativo ai fini della valutazione della percezione degli effetti di una radiazione luminosa.

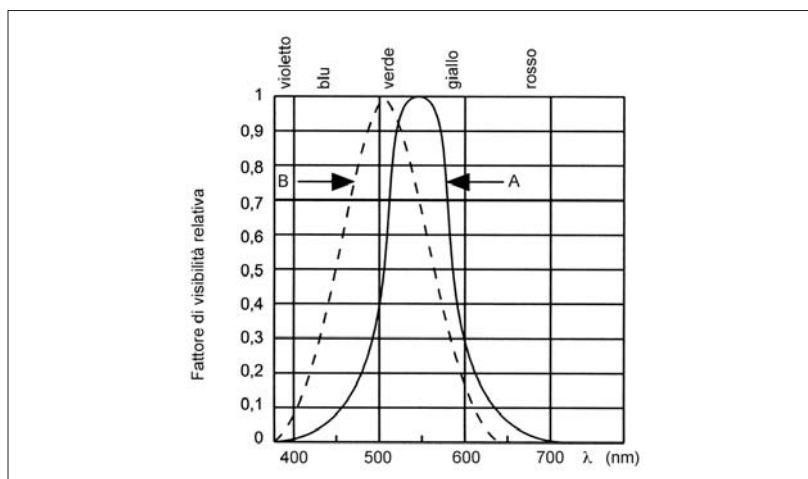


Figura 1.10. Curve di visibilità relativa $V(\lambda)$ dell'occhio umano: fotopica (A) e scotopica (B)

La sensibilità dell'occhio umano dipende dal funzionamento dei fotorecettori. In condizioni in cui il sistema visivo è adattato a un alto livello di luminanza (maggiore di 3 cd/m^2) la risposta sarà dominata dai coni (*visione fotopica*); quando, invece, il sistema visivo è adattato a luminanze molto basse (minori di $0,001 \text{ cd/m}^2$) i coni non potranno contribuire alla visione, mediata dai soli bastoncelli (*visione scotopica*); lo stadio intermedio è detto *visione mesopica*.

1.5. GRANDEZZE FOTOMETRICHE

La fotometria è la disciplina che studia la misurazione della luce. La luce è una forma di energia, e come tale potrebbe essere studiata e misurata con le abituali grandezze e unità di misura usate per tutte le altre forme di energia. Tuttavia, poiché la luce viene percepita direttamente dall'occhio umano, si è resa necessaria la definizione di specifiche grandezze fotometriche per tenere in conto della risposta prodotta sull'occhio umano dalle radiazioni luminose. Essendo esse legate a fenomeni psicofisici, le relative unità di misura non possono, pertanto, essere derivate dalle grandezze di riferimento dei sistemi di misura consueti (MKS, Giorgi).

Grandezze fotometriche fondamentali

Le grandezze fotometriche fondamentali nell'ambito dell'illuminotecnica sono le seguenti:

- il flusso luminoso;
- l'intensità luminosa;
- l'illuminamento;
- la luminanza.

Ad ogni grandezza è associata una unità di misura derivata dall'unità fotometrica fondamentale definita dal Sistema Internazionale (SI) delle unità di misura, ovvero la *candela*, che rappresenta l'unità di misura dell'intensità luminosa. Grandezze e unità di misura sono state stabilite per convenzione internazionale dalla CIE, che ne ha normalizzato definizioni, simbologia, metodi di misura e così via.

Solo una parte dell'energia consumata in una sorgente luminosa si trasforma in radiazioni elettromagnetiche e, di queste, solo una parte è compresa nello spettro del visibile.

Si definisce *flusso energetico* (Φ_e) la quantità di energia al secondo (potenza) emessa o trasmessa sotto forma di radiazioni in tutte le direzioni dalla sorgente. Il flusso energetico Φ_e è espresso in W e viene definito come:

$$\Phi_e = \int_0^\infty \frac{dP_\lambda(\lambda)}{d\lambda} = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda$$

dove $P_\lambda(\lambda)$ è la potenza associata a ciascuna lunghezza d'onda, espressa in W, mentre $\Phi_\lambda(\lambda)$, che rappresenta la potenza spettrale specifica, è espressa in W/nm. La porzione di flusso energetico irradiata nel campo del visibile si otterrà riducendo l'intervallo di integrazione tra 380 nm e 780 nm.

In campo illuminotecnico, energie uguali, irradiate su lunghezze d'onda diverse nello spettro del visibile, non producono sull'occhio umano lo stesso effetto. Di ciò si tiene conto attraverso la definizione del flusso luminoso Φ , che viene definito come potenza complessiva nel campo del visibile pesata con i fattori di visibilità relativa $V(\lambda)$ come definiti dalla CIE (figura 1.10):

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} \Phi_\lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Flusso luminoso Il *flusso luminoso* Φ viene misurato in *lumen* (lm); K_m è il coefficiente di visibilità massima che permette di passare da W a lm, e vale circa 683 lm/W (un flusso luminoso di 683 lm, alla lunghezza d'onda di 555 nm, per la quale il fattore di visibilità relativa è 1 in visione fotopica, corrisponde alla potenza di 1 W).

Efficienza luminosa Si definisce *efficienza luminosa* il rapporto tra potenza luminosa irradiata dalla sorgente di luce e potenza elettrica assorbita (lm/W).

Se si considera una lampada al sodio a bassa pressione da 180 W, si constata che soltanto 63 W è la potenza delle due radiazioni nel visibile, 5 W è la potenza delle radiazioni nell'infrarosso, e i restanti 112 W sono perdite in calore disperso. L'emissione luminosa (flusso) di tale lampada è di 33.130 lm, per cui l'efficienza è $\Phi/P = 33.130/180 = 184$ lm/W. Se al denominatore si aggiunge la potenza dissipata nell'alimentatore di cui, come vedremo nel seguito, ogni lampada a scarica nel gas necessita, si ha l'efficienza del complesso lampada più alimentatore.

Angolo solido L'*angolo solido* è la grandezza geometrica che definisce gli angoli nello spazio (figura 1.11). L'angolo solido unitario è quello racchiuso da un cono che ha il vertice in una sfera di raggio r , che intercetta sulla stessa sfera un'area di estensione r^2 . Nel Sistema Internazionale l'unità di misura dell'angolo solido è lo *steradiano* (sr).

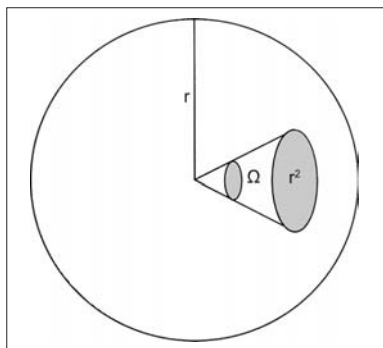
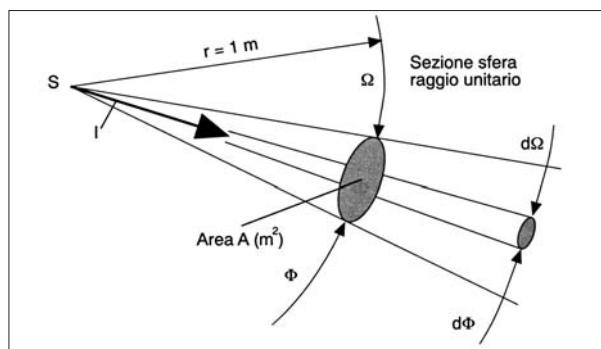


Figura 1.11. Angolo solido

Figura 1.12. Definizione di flusso luminoso Φ e di intensità luminosa

Intensità luminosa

L'*intensità luminosa* viene utilizzata per valutare quanta parte del flusso luminoso di una sorgente si propaga in una determinata direzione. Viene definita dal rapporto tra il flusso luminoso infinitesimale $d\Phi$ emesso entro l'angolo solido $d\Omega$, e lo stesso angolo solido (figura 1.12):

$$I = d\Phi/d\Omega$$

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura dell'intensità luminosa è la *candela* (cd), che costituisce l'unità fotometrica primaria. Essa corrisponde alla intensità luminosa di una sorgente che emetta entro l'angolo solido di 1 sr, una radiazione monocromatica di 555 nm con una potenza $\Phi_\lambda = 1/683$ W. Tale radiazione monocromatica ha il flusso di 1 lm.

Illuminamento

L'*illuminamento* (E) viene utilizzato per valutare l'entità della luce che investe una superficie, e definito a mezzo del rapporto fra il flusso infinitesimale $d\Phi$ incidente su una superficie dS ortogonale ad esso e la superficie stessa:

$$E = d\Phi/dS$$

L'unità di misura è il *lux* (lx), che equivale al flusso di 1 lm ricevuto da una superficie ortogonale di 1 m².

Si ottiene sempre l'illuminamento di 1 lx, anche nel caso di un fascio luminoso dell'intensità di 1 cd che intercetti una superficie ortogonale al fascio, posta a una distanza d dalla sorgente e avente dimensioni d^2 .

$$E = I/d^2$$

Nel caso in cui la superficie non è perpendicolare alla direzione del fascio (figura 1.13)

$$E = I/d^2 \cos \gamma$$

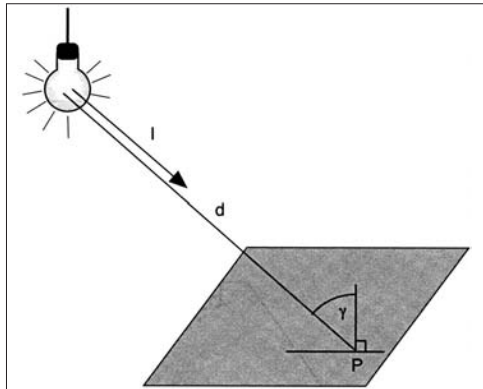


Figura 1.13. Illuminamento

Nella pratica, l'espressione dell'illuminamento viene particolareggiata in relazione alla disposizione della superficie illuminata. Si distinguono, così, un illuminamento orizzontale, un illuminamento verticale e un illuminamento emicilindrico.

Illuminamento orizzontale

L'illuminamento orizzontale si riferisce a superfici illuminate orizzontali (figura 1.14):

$$E_0 = (I/h^2) \cos^3 \gamma$$

L'illuminamento verticale si riferisce a superfici illuminate verticali (figura 1.15):

$$E_v = (I/h^2) \sin \alpha \cos^2 \alpha \cos \beta$$

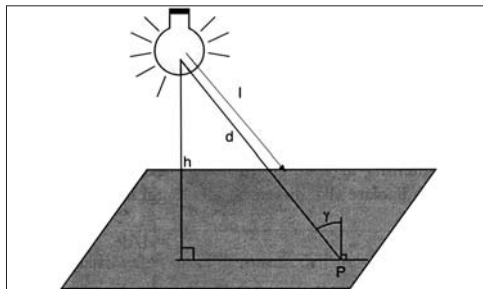


Figura 1.14. Valutazione dell'illuminamento orizzontale

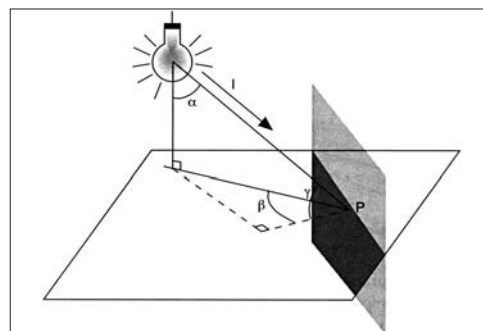


Figura 1.15. Valutazione dell'illuminamento verticale

Illuminamento emicilindrico L'illuminamento emicilindrico si riferisce a superfici illuminate emicilindriche verticali (figura 1.16):

$$E_e = (I/\pi h^2) \sin\alpha \cos^2\alpha(1 + \cos\beta)$$

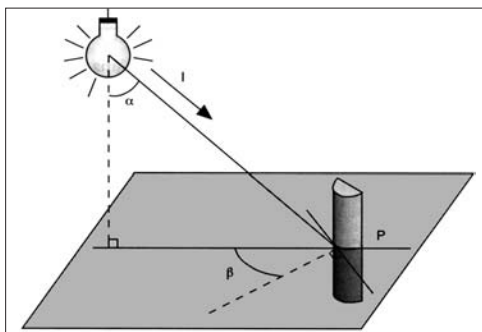


Figura 1.16. Valutazione dell'illuminamento emicilindrico

Luminanza L'intensità luminosa è molto utile per valutare gli effetti nello spazio dell'energia luminosa proveniente da una sorgente. Tuttavia, essa non è in grado di fornire informazioni sufficienti riguardo all'apparenza di una sorgente, e nemmeno riguardo alle sensazioni visive direttamente provocate dalla sorgente sull'occhio. Infatti, una sorgente che emetta una certa intensità da una superficie molto piccola, produce sull'occhio una sensazione molto più forte di una sorgente che, a pari intensità, emetta da una superficie molto più ampia.

È la *luminanza* che consente di stimare la quantità di intensità luminosa prodotta o riflessa da una superficie, così come appare all'osservatore. Essa, infatti, è definita come il rapporto tra l'intensità emessa da una sorgente luminosa in una data direzione e l'area apparente di quella superficie. La sorgente può essere primaria (trasmette luce) o secondaria (riflette la luce proveniente da una sorgente primaria).

Analiticamente, la luminanza viene definita dal rapporto tra l'intensità luminosa infinitesimale dI in una direzione assegnata e l'area elementare entro cui è compresa l'emissione, così come essa appare ad un soggetto che guarda lungo tale direzione, valutata, cioè, proiettando detta superficie su un piano perpendi-

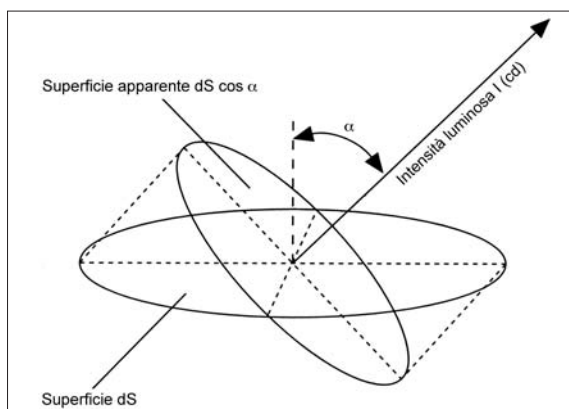


Figura 1.17. Luminanza

colare all'asse che ha per estremi il baricentro dell'area e il centro dell'occhio (figura 1.17):

$$L = \frac{dI}{dS \cos \alpha} = \frac{d^2 \Phi}{d\Omega dS \cos \alpha}$$

È, quindi, possibile definire la luminanza come rapporto tra il flusso luminoso emesso o trasmesso in una determinata direzione, contenuto in un angolo solido elementare, originato in un punto di un elemento di superficie, rispetto all'angolo solido elementare e la proiezione ortogonale dell'elemento di superficie su un piano normale alla direzione del flusso considerato.

La luminanza viene espressa in *nit* (nt). 1 nt = 1 cd/m².

Radianza

La visione di un oggetto è legata a variazioni luminose nel campo visivo (contrasto). Durante le ore diurne, il contrasto si manifesta in termini di variazioni di colore e di luminanza; nella visione notturna, invece, il contrasto si manifesta sostanzialmente come variazione di luminanza.

Se, al posto del flusso luminoso, si fa riferimento al flusso energetico Φ_e , si può definire la *radianza* (espressa in W/sr · m²) come:

$$L_e = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dS \cos \alpha}$$

Fattori di assorbimento, riflessione e trasmissione

I fattori di assorbimento, riflessione e trasmissione vengono definiti per valutare la risposta di una superficie colpita da un fascio alla sollecitazione luminosa.

Quando un fascio di luce colpisce un corpo (ad esempio, una parete), una quota Φ_a del flusso luminoso incidente Φ_0 viene assorbita in relazione alla natura del materiale costituente. Si definisce *fattore di assorbimento* il rapporto:

$$\alpha = \Phi_a / \Phi_0$$

Le lunghezze d'onda della radiazione assorbita determinano le caratteristiche cromatiche della superficie stessa. Se una quota Φ_r del flusso incidente Φ_0 viene riflessa, si definisce *fattore di riflessione* il rapporto:

$$\rho = \Phi_r / \Phi_0$$

A seconda che si sia in presenza di superfici speculari, lucide o scabre, si avrà una riflessione regolare, mista o diffusa (uniforme e non) (figure 1.18a e 1.18b).

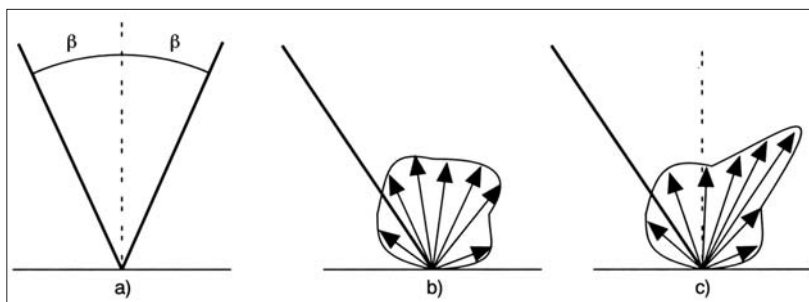


Figura 1.18a. Modalità di riflessione di un fascio luminoso: a) riflessione regolare (o speculare); b) riflessione diffusa non uniforme; c) riflessione mista (diffusa e regolare)

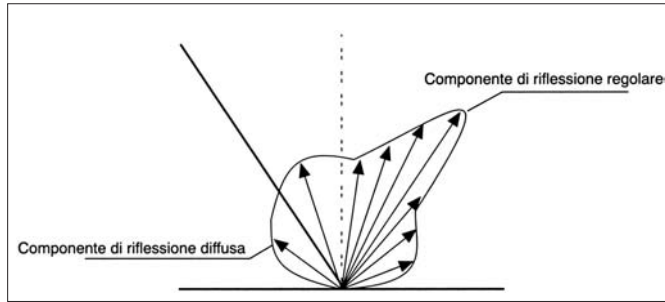


Figura 1.18b. Componenti di riflessione regolare e diffusa

Il fenomeno della riflessione diffusa uniforme è regolato dalla legge di Lambert, per la quale l'intensità luminosa I_d (figura 1.19) in una direzione qualsiasi è data da:

$$I_d = I_n \cos \alpha$$

in cui I_n è l'intensità luminosa del raggio riflesso in direzione normale alla superficie, α è l'angolo tra I_d e I_n .

Le superfici il cui comportamento si avvicina a quello della riflessione diffusa uniforme vengono chiamate *matte*.

Nel caso di materiali trasparenti (ad esempio, lastre di vetro, di policarbonato, ecc.), una quota Φ_t del flusso incidente Φ_0 viene trasmessa; pertanto, si definisce *fattore di trasmissione* il rapporto:

$$\tau = \Phi_t / \Phi_0$$

Per tali materiali si ha, quindi, $\alpha + \rho + \tau = 1$.

Per superfici perfettamente diffondenti, dall'applicazione della Legge Lambert deriva la seguente relazione tra luminanza L , fattore di riflessione ρ e illuminamento E :

$$L = \rho E / \pi$$

Per superfici che non abbiano caratteristiche di diffusione uniforme, si può definire un *fattore di luminanza* β come rapporto tra luminanza L della superficie in una direzione assegnata e la luminanza L_r di una superficie bianca uniformemente diffondente soggetta allo stesso illuminamento:

$$\beta = L / L_r$$

In tale ipotesi la relazione tra luminanza e illuminamento diventa:

$$L = \beta E / \pi$$

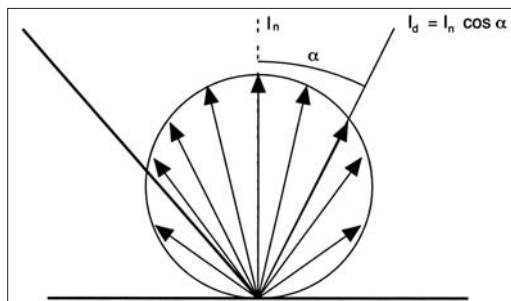


Figura 1.19. Riflessione di tipo regolare uniforme (secondo la legge di Lambert o legge del coseno)

Altre grandezze In alcune circostanze, è utile definire le seguenti altre grandezze, quali:

- l'esposizione luminosa;
- l'emittanza luminosa;
- la quantità di energia luminosa.

Esposizione luminosa L'*esposizione luminosa* si indica con la lettera H e si misura in lux \cdot secondo ($\text{lx} \cdot \text{s}$). Rappresenta la quantità di energia luminosa ricevuta in un intervallo di tempo da un oggetto. È molto utile per valutare il degrado indotto dalle radiazioni luminose su determinati oggetti come opere d'arte o reperti organici.

Emittanza luminosa L'*emittanza luminosa* rappresenta la densità di flusso emesso da una superficie (rapporto tra il flusso emesso da una superficie e la superficie stessa). Si misura in lumen al metro quadro (lm/m^2) e si indica con la lettera M .

Quantità di energia luminosa La *quantità di energia luminosa* rappresenta la quantità di energia emessa, nel campo del visibile, da una sorgente in un intervallo di tempo. Si indica con la lettera Q e si misura in lumen \cdot secondo ($\text{lm} \cdot \text{s}$).

1.6. CURVE FOTOMETRICHE

Sorgenti puntiformi Nella trattazione dei problemi di illuminotecnica si fa spesso riferimento a sorgenti puntiformi. Si tratta di un'astrazione alla quale si ricorre allorché le dimensioni della sorgente luminosa sono trascurabili rispetto a quelle della superficie da illuminare e/o alla distanza da questa.

Solido fotometrico Il solido fotometrico è la presentazione tridimensionale del luogo delle intensità luminose emesse da una sorgente puntiforme in tutte le direzioni (figura 1.20).

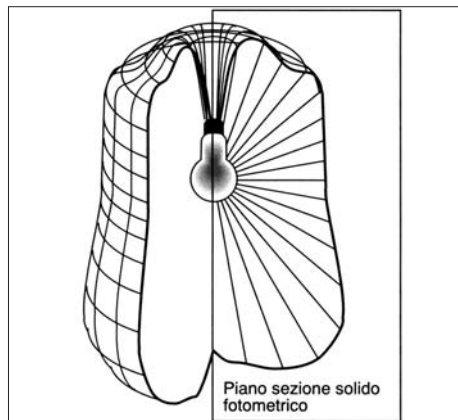


Figura 1.20. Rappresentazione del solido fotometrico di una lampada ad incandescenza

Allorché la sorgente luminosa è una lampada, il relativo solido fotometrico può essere alterato vincolando la distribuzione spaziale delle intensità luminose a mezzo di un apparecchio (apparecchio illuminante) che sfrutta in modo opportuno i fenomeni di diffusione e/o riflessione e/o rifrazione. L'insieme apparecchio-sorgente costituisce il corpo illuminante.