

POLITECNICO DI MILANO



FACOLTA' DI ARCHITETTURA
CORSO DI LAUREA IN ARCHITETTURA

ILLUMINAZIONE A LED PER LO SPORT
CONFRONTO FRA TRADIZIONE E NUOVE TECNOLOGIE
APPLICATE AD UNA PISTA DI GHIACCIO TEMPORANEA

Tesi di Laurea di: Andrea Rovati
matricola: 182409

Relatore: Prof. Ing. Ruggero Guanella
Correlatore: Arch. Francesco Marelli

Anno accademico 2009-2010

00. Indice	3
Abstract.....	17
01. Introduzione	
1. Obiettivi.....	19
2. Le ragioni di questo studio.....	19
3. Strumenti di analisi e di progetto.....	21
4. Gli sport su pista di ghiaccio.....	23
4.1. Hockey.....	24
4.2. Pattinaggio di velocità.....	25
4.3. Pattinaggio di figura.....	26
4.4. Esigenze tecniche e scenografiche.....	26
5. La normativa in materia di illuminazione di impianti per sport su ghiaccio.....	28
02. Il pattinaggio su ghiaccio	
1. Elementi chiave: movimento, luce e ghiaccio.....	33
2. La percezione e la fruizione.....	34
2.1. Pista di ghiaccio a uso professionale..	34
2.2. Cenni sulle piste di ghiaccio mobili....	36
2.3. L'atleta e lo spettatore: percezione della pista.....	38
3. Conversazione con un pattinatore professionista.....	39
03. La luce e il ghiaccio: interazione	
1. La luce: generalità.....	47
2. Interazione della luce con la materia.....	52
2.1. Fenomeni semplici: rifrazione; riflessione speculare e diffusa; trasmissione; assorbimento e dispersione ottica.....	55
2.2. Fenomeni complessi: diffusione; estinzione.....	61
2.3. Altri fenomeni d'interazione.....	63
3. Il ghiaccio: generalità.....	64
4. Struttura microscopica: cristallografia e accenni alla classificazione.....	67
5. Struttura macroscopica: passaggi di stato e fenomeni naturali.....	70
6. Proprietà chimiche e fisiche.....	72
7. Caratteristiche ottiche.....	78

04. La piste di ghiaccio temporanea

1. Caratteristiche generali.....85
 - 1.1. Composizione dell'impianto.....86
 - 1.2. Realizzazione.....88
2. La pista.....89
3. L'impianto refrigerante.....90
4. L'impianto d'illuminazione: tipologia ricorrente e caratteristiche generali.....92

05. Ricerca tecnologica

1. Il Led (Light Emitting Diode).....95
 - 1.1. Generalità.....95
 - 1.2. Funzionamento.....100
 - 1.3. Colore.....103
 - 1.4. Parametri caratteristici.....105
 - 1.5. Alimentazione.....108
 - 1.6. Struttura e tipologie.....110
2. Confronto con le tipologie di lampade tradizionali.....112

06. Proposta progettuale

1. Premessa.....117
 - 1.1. Le ragioni di una nuova proposta: analisi e valutazione delle tecnologie a Led..117
2. Indagini sperimentali sull'interazione tra luce e ghiaccio.....119
 - 2.1. La diffusione luminosa.....119
 - 2.2. La piastra di ghiaccio campione.....120
 - 2.3. Misurazioni con luxmetro e valutazioni.....122
 - 2.4. La riflessione della luce.....130
3. Simulazione delle caratteristiche ottiche delle superfici nel software di calcolo.....134
4. La pista di ghiaccio di progetto.....140
5. Pista di ghiaccio e anello a bordo pista, compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led.....142
 - 5.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici, lampade; apparecchi e ottiche; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; anello a bordo pista; esiti illuminotecnici.....145
 - 5.2. Tecnologia di progetto a Led, sorgenti; apparecchi e ottiche; apparecchio scel-

to; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi, esiti illuminotecnici.....	156
6. Area di ingresso, compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led.....	172
6.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici, lampade; apparecchi e ottiche; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	172
6.2. Tecnologia di progetto a Led, apparecchi e ottiche; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	177
7. Area di installazione impianti, compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led...	182
7.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici: apparecchi e ottiche; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	183
7.2. Tecnologia di progetto a Led: numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	187
8. Area pertinenza delle gradinate, compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led..	191
8.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici: numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	191
8.2. Tecnologia di progetto a Led: apparecchi e ottiche; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	195
9. Gradinate, compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led.....	198
9.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici: lampade; apparecchi e ottiche; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	199
9.2. Tecnologia di progetto a Led: apparecchi e ottiche; numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi; esiti illuminotecnici.....	202

10. Illuminazione della pista con apparecchio teorico.....	206
11. Controllo e limitazione all'abbagliamento.....	208
12. Quadro elettrico.....	209
13. Condizioni di utilizzo e manutenzione....	210
14. Descrizione sintetica degli impianti.....	211
15. Illuminazione coreografica.....	215
15.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici.....	217
15.2. Tecnologia di progetto a Led.....	221

Conclusioni

1. La tecnologia Led: analisi delle caratteristiche.....	228
1.1. Caratteristiche illuminotecniche ed energetiche.....	228
1.2. Capacità coreografiche.....	235
2. Ipotesi di impianto ibrido a Led e ioduri metallici, per una pista indoor.....	235
.....La tecnologia Led come alternativa tecnologica e prospettive di sviluppo.....	240

Indice delle figure

Figura 1: alcuni esempi di Led a spina. Pagina 19.

Figura 2: un Led di Potenza. Pagina 20.

Figura 3: il ghiaccio che ricopre un lago. Pagina 21.

Figura 4: diffusione della luce attraverso il ghiaccio. Pagina 21.

Figura 5: pattinaggio praticato su uno specchio d'acqua ghiacciato. Pagina 23.

Figura 6: un incontro di hockey su ghiaccio. Pagina 24.

Figura 7: una gara di short track. Pagina 25.

Figura 8: un'atleta durante un'esibizione di pattinaggio di figura. Pagina 26.

Figura 9: riproduzione di un'antica lama da pattinaggio in osso. Pagina 33.

Figura 10: l'Energy solutions arena di Salt Lake City, riconvertito da stadio di basket a pista di ghiaccio nel 2002. Pagina 35.

Figura 11: il Bell Centre di Montreal: la pista ap-

pena rigenerata riflette l'interno del palazzo. Pagina 36.

Figura 12: una pista di ghiaccio mobile, Somerset House, Londra. Pagina 36.

Figura 13: una macchina rasaghiaccio. Pagina 36.

Figura 14: Angelo Dolfini durante i Campionati Europei di Losanna 2002. Pagina 40.

Figura 15: la pista di allenamento di Oberstdorf illuminata con la sola luce naturale. Pagina 41.

Figura 16: l'illuminazione artificiale di un palazzo del ghiaccio. Pagina 42.

Figura 17: un esempio d'illuminazione a scopo ricreativo di una pista di ghiaccio. Pagina 43.

Figura 18: lo spettro elettromagnetico e la porzione di luce visibile. Pagina 49.

Figura 19: rappresentazione schematica di un'onda elettromagnetica. Pagina 50.

Figura 20: rappresentazione schematica della riflessione speculare. Pagina 55.

Figura 21: rappresentazione schematica della riflessione diffusa. Pagina 55.

Figura 22: rappresentazione schematica della ri-

flessione mista. Pagina 56.

Figura 23: il fenomeno della rifrazione della luce. Pagina 56.

Figura 24: rappresentazione schematica della trasmissione e dell'assorbimento di un'onda. Pagina 57.

Figura 25: l'esperimento del prisma ottico. Pagina 57.

Figura 26: rappresentazione schematica della diffusione luminosa. Pagina 62.

Figura 27: Inclusioni d'aria e detriti nel ghiaccio. Pagina 65.

Figura 28: schema della struttura cristallina del ghiaccio. Pagina 68.

Figura 29: alcuni cristalli di ghiaccio; è evidente la matrice esagonale dei cristalli. Pagina 71.

Figura 30: i detriti di ghiaccio che generano per effetto dei pattini. Pagina 72.

Figura 31: la superficie usurata di una pista di ghiaccio outdoor. Pagina 72.

Figura 32: ghiaccio perfettamente puro e ghiaccio con inclusioni d'aria a confronto. Pagina 80.

Figura 33: un semplice esperimento realizzato per documentare il fenomeno della diffusione della luce nel ghiaccio nella completa oscurità. Pagina 82.

Figura 34: una pista temporanea di medie dimensioni. Pagina 85.

Figura 35: rappresentazione schematica della stratificazione di una pista. Pagina 88.

Figura 36: Il manto di fondo e il tappeto di serpentine. Pagina 89.

Figura 37: le balaustre fanno da bordo di contenimento laterale per l'acqua. Pagina 90.

Figura 38: un chiller per piste di grandi dimensioni. Pagina 91.

Figura 39: il reticolo di apparecchi sospesi sopra la pista di ghiaccio, in un impianto indoor. Pagina 92.

Figura 40: una torre faro illumina una pista di ghiaccio outdoor. Pagina 93.

Figura 41: un Led a spina; sono visibili anodo e catodo. Pagina 95.

Figura 42: lo spettro di emissione cromatica del Led. Pagina 103.

Figura 43: schema strutturale di un Led SMT. Pagina 111.

Figura 44: il fenomeno della diffusione della luce attraverso la lastra di ghiaccio campione. Pagina 119.

Figura 45: il vetro, privo di particelle diffondenti, si lascia attraversare dalla luce da un capo all'altro. Pagina 120.

Figura 46: schema di realizzazione della piastra di ghiaccio campione. Dall'alto si trovano la piastra, lo stampo e il pannello di irrigidimento. Pagina 121.

Figura 47: schema delle misurazioni con luxmetro. Dal basso si trovano il telo di fondo, i supporti in gomma, la lastra e la sorgente. Pagina 123.

Figura 48: rappresentazione schematica del fenomeno della diffusione luminosa. Pagina 127.

Figura 49: fibra ottica immersa nel ghiaccio, Fung Collaborative, Sestriere 2006. Pagina 130.

Figura 50: schema delle osservazioni sulla riflessione. Pagina 131.

Figura 51: alla riflessione diffusa si associa una parziale riflessione speculare. Pagina 132.

Figura 52: il riflesso speculare misto, appare sempre più nitidamente. Pagina 132.

Figura 53: il riflesso speculare è nitido, ma ancora associato a un alone diffuso. Pagina 132.

Figura 54: ecco come il raggio laser è riflesso sul foglio di riferimento, quando la superficie del ghiaccio comincia a sciogliersi. Pagina 133.

Figura 55: rappresentazione schematica della valutazione del coefficiente di riflessione. Pagina 133.

Figura 56: visualizzazione Ray-Trace della pista di ghiaccio con le caratteristiche ottiche approssimate. Pagina 138.

Figura 57: suddivisione dell'impianto sportivo in aree funzionali. Pagina 140.

Figura 58: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione della pista e dell'anello circostante. Pagina 149.

Figura 59: schema delle altezze e delle distanze minime dei centri luminosi dal centro della pista. Pagina 150.

Figura 60: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione della pista. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 151.

Figura 61: distribuzione degli illuminamenti sulla pista di ghiaccio. Pagina 154.

Figura 62: un led da 1,5 W circa. Pagina 155.

Figura 63: un chip da 100 W. Pagina 156.

Figura 64: un singolo diodo a 20 W installato in un riflettore. Pagina 156.

Figura 65: una piastra multichip priva della lente a fosfori. Pagina 147.

Figura 66: un apparecchio equipaggiato con piastra multichip a fosforo remoto. Pagina 158.

Figura 67: un apparecchio a Led orientati. Pagina 159.

Figura 68: apparecchio a Led con lenti di precisione. Pagina 160.

Figura 69: una serie di lenti di precisione per il Led. Pagina 160.

Figura 70: un apparecchio con 104 Led bianchi. Pagina 161.

Figura 71: un apparecchio stradale modulare. Pagina 162.

Figura 72: l'apparecchio scelto montato su palo; sono visibili le barre Led modulari. Pagina 163.

Figura 73: barra da 20 Led di progetto. Pagina 163.

Figura 74: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione della pista e dell'anello circostante. Pagina 167.

Figura 75: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione della pista. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 168.

Figura 76: distribuzione degli illuminamenti sulla pista di ghiaccio. Pagina 171.

Figura 77: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di ingresso. Pagina 175.

Figura 78: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione dell'area d'ingresso. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 176.

Figura 79: distribuzione degli illuminamenti nell'area di ingresso. Pagina 177.

Figura 80: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di ingresso. Pagina 179.

Figura 81: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione dell'area di ingresso. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e pros-

petti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 180.

Figura 82: distribuzione degli illuminamenti nell'area di ingresso. Pagina 181.

Figura 83: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area impianti. Pagina 184.

Figura 84: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione dell'area impianti. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 185.

Figura 85: distribuzione degli illuminamenti nell'area di installazione impianti. Pagina 187.

Figura 86: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area impianti. Pagina 187.

Figura 87: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione dell'area impianti. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 188.

Figura 88: distribuzione degli illuminamenti nell'area di installazione impianti. Pagina 189.

Figura 89: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate. Pagina 192.

Figura 90: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 193.

Figura 91: distribuzione degli illuminamenti nell'area di pertinenza delle gradinate. Pagina 194.

Figura 92: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate. Pagina 195.

Figura 93: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 196.

Figura 94: distribuzione degli illuminamenti nell'area di pertinenza delle gradinate. Pagina 187.

Figura 95: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione delle gradinate. Pagina 200.

Figura 96 : disposizione degli apparecchi per l'illuminazione delle gradinate. Pagina 201.

Figura 97: distribuzione degli illuminamenti nelle gradinate. Pagina 202.

Figura 98: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione delle gradinate. Pagina 204.

Figura 99: distribuzione degli illuminamenti nelle gradinate. Pagina 204.

Figura 100: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione delle gradinate. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20. Pagina 205.

Figura 101: distribuzione degli illuminamenti sulla pista di ghiaccio. Pagina 208.

Figura 102: collocazione degli osservatori per il calcolo delle luminanze di velo. Pagina 209.

Figura 103: un esempio di illuminazione a scopo ricreativo su una pista di ghiaccio indoor. Pagina 215.

Figura 104: l'elaborato allestimento scenografico di un celebre spettacolo sul ghiaccio. Pagina 216.

Figura 105: un esempio di illuminazione coreografica durante un'esibizione. Pagina 216

Figura 106: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione coreografica nell'impianto ad alogenuri. Pagina 221.

Figura 107: disposizione degli apparecchi per

l'illuminazione coreografica nell'impianto a Led. Pagina 225.

Figura 108: rappresentazione schematica dell'installazione degli apparecchi a Led e a ioduri metallici sopra la pista di ghiaccio indoor. Vista prospettica e apparecchi con curve fotometriche in scala 1:20. Pagina 234.

Indice delle tabelle

Tabella 01: ILLUMINAMENTI MINIMI RICHIESTI. Pagina 31.

Tabella 02: ACQUA – CLASSIFICAZIONE. Pagina 76.

Tabella 03: CONFRONTO TRA APPARECCHI (equipaggiati con sorgenti a Sodio, Ioduri e Led). Pagina 113.

Tabella 04: CONFRONTO TRA APPARECCHI (equipaggiati con sorgenti a Sodio, Ioduri e Led). Pagina 114.

Tabella 05: CONFRONTO TRA APPARECCHI (cambiacolore). Pagina 114.

Tabella 06: ILLUMINAMENTI SU LASTRA DI GHIACCIO. Pagina 123.

Tabella 07: ILLUMINAMENTI SU PIANO LIBERO. Pagina 124.

Tabella 08: REQUISITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO. Pagina 143.

Tabella 09: REQUISITI ILLUMINOTECNICI SULL'ANELLO A BORDO PISTA. Pagina 144.

Tabella 10: LAMPADA A IODURI METALLICI CON

BRUCIATORE AL QUARZO. Pagina 146.

Tabella 11: APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello1- illuminazione della pista. Pagina 147.

Tabella 12: APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello1A- illuminazione della pista. Pagina 148.

Tabella 13: LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista outdoor- Pagina 152

Tabella 14: ESITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO tecnologia a ioduri metallici. Pagina 154.

Tabella 15: ESITI ILLUMINOTECNICI SULL'ANELLO A BORDO PISTA tecnologia a ioduri metallici. Pagina 155.

Tabella 16: LED BIANCO. Pagina 164.

Tabella 17: APPARECCHIO LED -modello1A- illuminazione della pista. Pagina 165.

Tabella 18: APPARECCHIO LED -modello1- illuminazione della pista. Pagina 166.

Tabella 19: ESITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO tecnologia a Led. Pagina 169.

Tabella 20: ESITI ILLUMINOTECNICI SULL'ANELLO A BORDO PISTA tecnologia a Led. Pagina 170.

Tabella 21: REQUISITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INGRESSO. Pagina 172.

Tabella 22: LAMPADA A IODURI METALLICI CON BRUCIATORE AL QUARZO. Pagina 173.

Tabella 23: APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello2- illuminazione dell'area di ingresso. Pagina 174.

Tabella 24: ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INGRESSO tecnologia a ioduri metallici. Pagina 177.

Tabella 25: APPARECCHIO LED -modello2- illuminazione dell'area di ingresso. Pagina 178.

Tabella 26: ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INGRESSO tecnologia a Led. Pagina 181.

Tabella 27: REQUISITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INSTALLAZIONE DEGLI IMPIANTI. Pagina 182.

Tabella 28: APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello3- illuminazione dell'area impianti. Pagina 183.

Tabella 29: ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA IMPIANTI tecnologia a ioduri metallici. Pagina 186.

Tabella 30: ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA IMPIANTI tecnologia a Led. Pagina 189.

Tabella 31: REQUISITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI PERTINENZA DELLE GRADINATE. Pagina 189.

Tabella 32: ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI PERTINENZA DELLE GRADINATE tecnologia a ioduri metallici. Pagina 193.

Tabella 33: APPARECCHIO LED -modello3- illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate. Pagina 194.

Tabella 34: ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI PERTINENZA DELLE GRADINATE tecnologia a Led. Pagina 197.

Tabella 35: REQUISITI ILLUMINOTECNICI SULLE GRADINATE. Pagina 199.

Tabella 36: LAMPADA A IODURI METALLICI CON BRUCIATORE AL QUARZO. Pagina 195.

Tabella 37: APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello4- illuminazione delle gradinate. Pagina 200.

Tabella 38: ESITI ILLUMINOTECNICI NELLE GRADINATE tecnologia a ioduri metallici. Pagina 202.

Tabella 39: APPARECCHIO LED -modello4- illuminazione delle gradinate. Pagina 202.

Tabella 40: ESITI ILLUMINOTECNICI NELLE GRADINATE tecnologia Led. Pagina 204.

Tabella 41: LED BIANCO TEORICO. Pagina 205.

Tabella 42: APPARECCHIO LED TEORICO illuminazione della pista. Pagina 208.

Tabella 43: ESITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO tecnologia a Led. Pagina 203.

Tabella 44: DESCRIZIONE SINTETICA DEGLI IMPIANTI. Pagina 211.

Tabella 45: CONFRONTO PRESTAZIONALE TRA APPARECCHI. Pagina 213.

Tabella 46: LAMPADA A ALOGENURI METALLICI. Pagina 218.

Tabella 47: TESTA MOBILE AD ALOGENURI METALLICI. Pagina 218.

Tabella 48: LAMPADA A SCARICA COMPATTA. Pagina 219.

Tabella 49: SCANNER AD ALOGENURI METALLICI. Pagina 219.

Tabella 50: SCANNER A SCARICA. Pagina 220.

Tabella 51: LAMPADA A IODURI METALLICI. Pagina 220.

Tabella 52: SCANNER MULTIPLIO A SCARICA. Pagina 221.

Tabella 53: LED RGB. Pagina 222.

Tabella 54: TESTA MOBILE A LED 1. Pagina 222.

Tabella 55: LED BIANCO. Pagina 223.

Tabella 56: TESTA MOBILE A LED 2 pagina 228.

Tabella 57: SCANNER A LED RGB. Pagina 223.

Tabella 58: CAMBIACOLORI A LED RGB. Pagina 223.

Tabella 59: CONFRONTO TRA SORGENTI. Pagina 228.

Tabella 60: CONFRONTO TECNOLOGICO PER LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista outdoor. Pagina 232.

Tabella 61: CONFRONTO TECNOLOGICO PER LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista outdoor. Pagina 233.

Tabella 62: CONFRONTO COSTI di installazione impianto e oneri manutentivi in pista (attività ricreativa). Pagina 236.

Tabella 63: CONFRONTO IMPIANTI PER LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista indoor. Pagina 237.

Indice dei grafici

Grafico 1: esempio di relazione generica tra la temperatura di giunzione (C°) e la durata di un diodo (h). Pagina 107.

Grafico 2: rappresentazione cartesiana delle curve di illuminamento. Pagina 125.

Grafico 3: rappresentazione cartesiana delle curve di flusso entrante diffuso. Pagina 128.

Indice delle tavole

Tavola 1. Pista di ghiaccio temporanea: planimetria e prospetti. scala 1:200.

Tavola 2. Pista di ghiaccio temporanea: prospetti, viste ed esplosi delle gradinate.

Tavola 3. Pista di ghiaccio temporanea: sezioni e schemi.

Tavola 4. Impianto di riferimento a ioduri metallici: generalità.

Tavola 5. Impianto di riferimento a ioduri metallici: installazioni.

Tavola 6. Impianto di riferimento a ioduri metallici: calcolo illuminotecnico.

Tavola 7. Impianto di progetto a Led: generalità.

Tavola 8. Impianto di progetto a Led: Installazioni.

Tavola 9. Impianto di progetto a Led: calcolo illuminotecnico.

Tavola 10. Dettagli costruttivi.

Tavola 11. Confronto tra impianti per livello di attività.

ABSTRACT

La tecnologia a Led sembra essere destinata a un grande sviluppo e ad una altrettanto grande diffusione ma alcune tecnologie tradizionali, in campi di applicazione specifici, sono ancora superiori dal punto di vista prestazionale.

Lo scopo di questo lavoro è verificare la validità di quest'affermazione, mettendo alla prova contemporaneamente la tecnologia a Led e quella a ioduri metallici in un preciso campo di applicazione: gli sport su ghiaccio.

L'illuminazione d'impianti sportivi, da una parte richiede elevati e omogenei illuminamenti su grandi superfici, dall'altra è un ambito in cui la tecnologia ad alogenuri metallici, fino ad oggi, si è dimostrata la soluzione più valida; si pone quindi come un interessante banco di prova per le prestazioni del Led.

Il Led, pur non avendo le grandi doti emissive delle lampade a scarica ad alogenuri, è caratterizzato da un'efficienza luminosa rilevante, compattezza, durata e versatilità: in queste pagine si è cercato di comprendere se queste doti siano sufficienti per ottenere una buona illuminazione in una pista di ghiaccio temporanea outdoor.

La scelta di una pista esterna dipende dalle oggettive difficoltà dovute al tipo di struttura e alla possibilità di ritenere tutte le considerazioni fatte per essa, come valide anche per un impianto fisso.

A questo scopo, sono state approfonditamente analizzate le caratteristiche ottiche del ghiaccio, sia attraverso una ricerca bibliografica, sia tramite un'osservazione sperimentale diretta.

Grazie ad un software di calcolo illuminotecnico è stato possibile simulare ragionevolmente queste caratteristiche e mettere a confronto, in modo efficace, l'impianto a ioduri metallici di riferimento e quello a Led di progetto.

Da questo confronto sono emersi tutti i vantaggi e gli svantaggi della tecnologia a Led, rispetto a quelle tradizionali; caratteristiche che, ad oggi, non rendono il Led ancora idoneo all'illuminazione funzionale di impianti sportivi che accolgono eventi di risonanza nazionale, ma che permettono, invece, di considerarlo una ragionevole alternativa per l'illuminazione funzionale destinata ad attività non agonistiche e per quella a scopo coreografico.

01 INTRODUZIONE

I. OBIETTIVI

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di valutare lo stato attuale dello sviluppo della tecnologia a Led, verificandone le prestazioni applicate agli impianti d'illuminazione dedicati agli sport su ghiaccio.

Oggi, la ricerca tecnologica e lo sviluppo di sorgenti luminose innovative, sono costantemente orientati verso soluzioni capaci di garantire risparmio energetico, facilità ed economicità di realizzazione e smaltimento, nonché elevato flusso luminoso; in sostanza si insegue la lampada a più alta efficienza luminosa, di maggior durata, di minor costo ed ecologicamente migliore possibile.

La ricerca tecnologica e scientifica e la stagione d'innovazioni in cui viviamo, suggeriscono quale sia, ad oggi, la sorgente luminosa protagonista del prossimo decennio di sviluppo e successo commerciale: il Led.

La natura del Led, la sua facilità di realizzazione,

i suoi costi, la sua efficienza e la sua versatilità ne fanno certamente un prodotto che nei prossimi anni vivrà un grande sviluppo e una massiccia diffusione; in queste pagine esso, come altre sorgenti luminose, sarà preso in considerazione e analizzato; si cercherà di verificare se sia o meno adatto ad applicazioni in ambito sportivo e se sia una valida alternativa alle sorgenti luminose che lo hanno preceduto con successo.

2. LE RAGIONI DI QUESTO STUDIO

Il Led è ormai prepotentemente entrato nelle nostre case: a partire dalle spie luminose degli elettrodomestici, alle torce elettriche, per poi passare agli apparecchi di illuminazione, ai televisori e i display ecc. e si è fatto spazio con

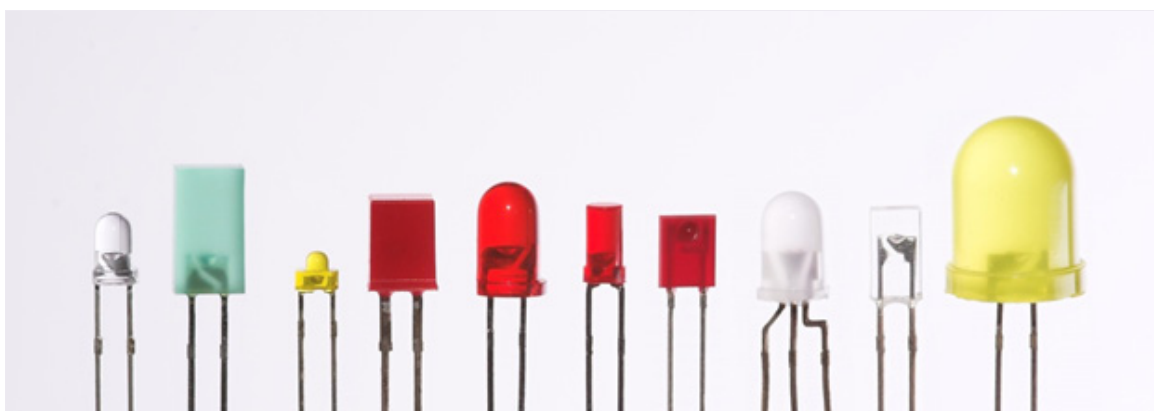


Figura 1: alcuni esempi di Led a spina.

successo in moltissimi altri campi di applicazione persino prima di essere utilizzato come sorgente luminosa, ambito nel quale, oggi, sembra essere considerato la soluzione migliore per l'illuminazione nei luoghi di lavoro, nelle strade, nei grandi ambienti, a bordo delle automobili e molto altro ancora.

Tuttavia, sebbene i vantaggi di questo tipo di sorgente siano ormai evidenti a tutti, essa pare ancora ben lontana dalla possibilità di soppiantare completamente tutte le altre sorgenti luminose a oggi utilizzate proficuamente.

Uno degli ambiti in cui il Led pare ancora faticare a trovare uno spazio proprio è l'illuminazione di grandi superfici, come gli impianti sportivi; è in quest'ambito che le lampade tradizionali, a scarica, a incandescenza o a fluorescenza, sono ancora padrone del mercato.

Questo dipende dalla differenza di flusso luminoso offerto dai Led rispetto alle lampade tradizionali: In queste pagine si cercherà di comprendere se questa differenza è stata colmata o

quanto si sia assottigliata e in sintesi se il Led sia capace di sostituire le sorgenti tradizionali.

Per rispondere a queste domande si è scelto di applicare la tecnologia Led a uno degli ambiti sportivi più complessi: gli sport su ghiaccio, che traggono la loro unicità e la loro attrattiva proprio dal ghiaccio, l'elemento che li rende possibili e li caratterizza.

E' apparso chiaro fin da subito che il binomio luce-ghiaccio costituisce un fenomeno di grande interesse scientifico, che si manifesta in natura come nelle attività umane: un ghiacciaio può apparire bianco, persino azzurro cielo; le calotte polari sono avvolte da un bagliore accecante, in grado di ferire l'occhio; attraverso il ghiaccio che ricopre un lago, l'acqua appare scura.

E' dunque naturale chiedersi come possa tale sostanza assumere caratteristiche così diverse.

In altri termini, al nostro occhio le varie forme di ghiaccio appaiono diverse, in ragione della presenza della luce; per questo sarà indagata la natura del ghiaccio e la sua capacità di lasciarsi attraversare dalla luce, o di ostacolarla e diffonderla.

Dunque il binomio luce-ghiaccio ha interesse scientifico, ma di certo anche pratico, poiché, come accennato brevemente poco fa, entrambi i membri del binomio insistono fortemente nella vita umana di tutti i giorni.

Le attività umane in cui il ghiaccio è presente ed ha un ruolo predominante sono innumerevoli, e certamente gli sport su ghiaccio sono tra quelle che si addicono maggiormente allo studio di questo fenomeno: per definizione essi avvengo-

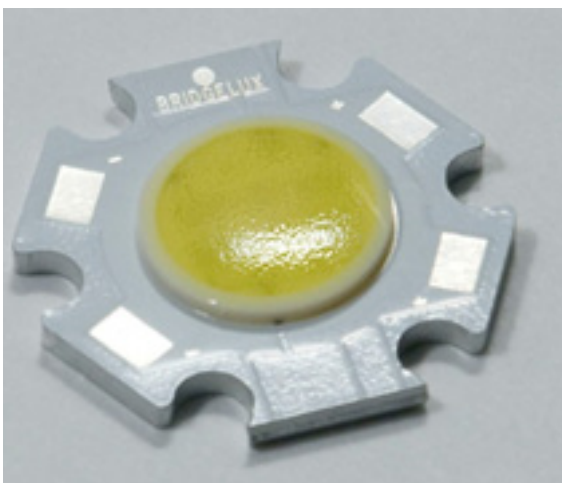


Figura 2: un Led di potenza

no alla presenza di ghiaccio, e solo in sua presenza; esso perciò è protagonista tanto quanto l'atleta e la performance stessa.

Questa tesi si prefigge quindi di verificare se il Led offra un sistema tecnologicamente e scenograficamente valido per eventi sportivi che si fondano sia sull'elemento tecnico sia su quello scenografico in egual misura.



Figura 3: il ghiaccio che ricopre un lago.

Lo sport in esame richiede prestazioni visive alte, un'illuminazione uniforme e diffusa, requisiti con i quali, fino ad ora il Led non è stato sfidato, essendo utilizzato per lo più con scopi decorativi o illuminotecnici più semplici-La sfida è dunque applicarlo all'illuminazione di una superficie particolare come il ghiaccio, con l'obiettivo di ottenere la migliore illuminazione possibile.



Figura 4: diffusione della luce attraverso il ghiaccio.

3. STRUMENTI DI ANALISI E DI PROGETTO

Un risultato, che possa definirsi "valido" in qualunque campo presuppone impegno e lavoro di conoscenza del problema e dell'ambito in cui ci si trova a operare.

Lo scopo di questa tesi è mettere alla prova una tecnologia d'impianto d'illuminazione che sia alternativa rispetto a quelle ora utilizzate, nell'ambito delle piste di ghiaccio per sport invernali; il primo passo, perciò, è studiare tali discipline, per comprenderne le sia caratteristiche tecniche che quelle più squisitamente scenografiche.

Questo primo, e introduttivo, passo ha lo scopo di comprendere l'ambito nel quale dovranno essere compiute le scelte progettuali e con quali finalità si dovrà agire per ottenere il miglior risultato.

Secondariamente lo studio si concentrerà sul

pattinaggio sul ghiaccio, cercando di distinguere tra l'attività agonistica e lo sport a scopo puramente ricreativo. Gli elementi chiave di questa disciplina, che è fatta di aspetti sia tecnici, che artistici, che coreografici, saranno indagati, così come la percezione che atleti e spettatori hanno della pista.

La percezione della pista avviene tramite la luce, per questo motivo si faranno brevi cenni alla sua natura, soprattutto al fine di comprendere quali aspetti di questo fenomeno sono più rilevanti nell'interazione con la materia e le superfici, e che effetti queste relazioni possono avere sulla visione umana.

Il successivo passo è studiare il ghiaccio sotto tutti i suoi aspetti, comprenderne la natura chimica e fisica, al fine di poter valutare come esso interagisca con la luce.

L'interazione tra la luce e il ghiaccio è uno dei più complessi oggetti d'indagine di questo lavoro, poiché il ghiaccio è un materiale mutevole, capace di assumere molteplici caratteristiche in relazione alle condizioni in cui esso si è generato.

Il ghiaccio è virtualmente trasparente, ma spesso si presenta opaco; la sua superficie è al tempo stesso lucida e riflettente come il vetro ma anche assorbente e può lasciarsi attraversare diversamente dalla luce, in relazione al colore stesso del raggio luminoso.

In questa fase sarà necessario procedere attraverso misurazioni sperimentali e indagini su campioni di ghiaccio, sottoposti a raggi luminosi emessi da sorgenti note.

Lo studio poi si concentra su una pista di ghiaccio mobile, questo per via delle sue varianti applicative, della facilità con cui è possibile operare su questa tecnologia, suggerendo molteplici variazioni, ma anche per via della sua sostanziale analogia con qualunque altra pista di ghiaccio. Questa analogia, consente di estendere le soluzioni valide per piste temporanee outdoor anche a quelle stabili.

Si utilizza quindi questo tipo di pista come fosse un ridotto campione di materia su cui fare esperimenti e sviluppare teorie che poi, per estensione, come in qualunque processo scientifico, varranno come regola generale, a sua volta suscettibile di eccezioni e modifiche, ma sostanzialmente utile per comprendere ed affrontare qualunque caso di studio analogo.

Una volta raccolti e ordinati tutti questi strumenti sarà possibile procedere alle scelte progettuali di natura tecnologica, vagliando le soluzioni Led e altre tecnologie al giorno d'oggi disponibili nell'ambito dell'illuminazione, cercando così le soluzioni più valide, dal punto di vista tecnico, tecnologico, illuminotecnico ed energetico, estetico e coreografico.

Come anticipato in precedenza, questo studio vaglierà le proposte tecnologiche che al giorno d'oggi si presentano con le migliori caratteristiche illuminotecniche ed energetiche, confrontandole con quelle attualmente più diffuse per un impianto per sport su ghiaccio.

Si cercherà di ottenere un impianto che sia in grado di favorire la migliore percezione della pista, sia da parte dell'atleta sia da parte dello

spettatore, che offra flessibilità di utilizzo e versatilità di soluzioni anche dal punto di vista scenografico, che sia economicamente vantaggioso nel consumo energetico e nella manutenzione programmata, sfruttando la tecnologia Led al fine di comprenderne le potenzialità applicative, dalle arene sportive professionistiche agli spazi ricreativi per il pubblico amatoriale.

4. GLI SPORT SU PISTA DI GHIACCIO

La tradizione degli sport invernali si compone di numerose discipline, dalle più antiche e gloriose, alle più giovani e accattivanti; è inutile spiegare la ragione della definizione “invernali”, nè



Figura 5: pattinaggio praticato su uno specchio d'acqua ghiacciato.

quanto sostanziale essa sia.

Non vi è alcuno sport invernale che non faccia della capacità del ghiaccio di far scivolare e accelerare un corpo, una delle sue caratteristiche principali, se non la più importante: tutti i tipi di

discesa sulla neve, tutti i tipi di discesa su ghiaccio, tutti i giochi di squadra, tutte le competizioni di velocità sfruttano la durezza e scivolosità del ghiaccio.

Già da questa prima e superficiale considerazione si comprende quale sia la principale caratteristica degli sport invernali rispetto agli sport tradizionali: la velocità.

Attraverso il ghiaccio e pochi semplici strumenti l'atleta raggiunge velocità altrimenti impensabili, senza l'ausilio di cavalcature o ruote.

Una volta compreso che gli sport invernali fanno della velocità e delle possibilità che da essa dipendono, la loro caratteristica principale, è possibile analizzare le più note tipologie praticate in relazione al supporto che le rende possibili: la neve e il ghiaccio.

Gli sport sulla neve, tutte le discipline sugli sci o slitte, si basano sul principio che una superficie levigata possa scivolare, per effetto della gravità o della spinta muscolare, sulla massa nevosa, raggiungendo velocità elevatissime e grande spettacolarità. Questo è possibile grazie al bassissimo attrito che si genera dallo sfregamento tra la neve e la superficie del caso, ad esempio uno sci.

Gli sport su ghiaccio si basano sul principio analogo della velocità, che in questo caso, combinando la scivolosità del ghiaccio e l'uso di lame, possono essere elevatissime anche in piano. Tuttavia esistono anche sport di discesa su ghiaccio, come il bob, che raggiungono facilmente velocità di oltre 130 km/h, tra le più alte raggiungibili in uno sport non su ruote.

Nel caso degli sport su ghiaccio è più complesso fare una catalogazione delle tipologie: esistono infatti sport di squadra come l'hockey, di velocità su pattini o con altri strumenti come il bob, lo slittino, lo skeleton, o sport come il pattinaggio di figura, la danza o il sincronizzato.

In queste pagine l'analisi si concentrerà sugli sport su ghiaccio in pista piana: principalmente hockey, pattinaggio di velocità e pattinaggio di figura, poichè la pista su cui si svolgono è la più diffusa.

L'ovvia origine di questi sport, li vede praticati su formazioni di ghiaccio naturali, come stagni o laghi congelati. Questo tipo di superfici, solcate da lame metalliche, consente di ridurre notevolmente l'area d'appoggio ad una vera e propria linea monodimensionale; questo aumenta notevolmente la pressione generata dall'appoggio; tuttavia la durezza del ghiaccio non permette all'atleta o allo strumento di sprofondare.

Sempre per via delle caratteristiche del supporto e della superficie d'appoggio ridottissima è possibile diminuire l'attrito dovuto alla frizione e raggiungere velocità altissime.

La natura del ghiaccio inoltre, e questo vale anche per gli sport sulla neve, genera un fenomeno di scioglimento localizzato e superficiale nel punto di contatto tra la lama e il ghiaccio.

In questo punto si viene a generare un sottile film d'acqua, che riduce ulteriormente il freno dovuto all'attrito.

Tuttavia, le caratteristiche di ciascuno di questi sport sono largamente differenti, così come lo sono gli equipaggiamenti che li accompagnano;

segue una breve analisi di ciascuno di questi sport.

4.1. Hockey

L'hockey su ghiaccio, è uno sport di squadra di tradizione nordica, originario del Canada, nato e codificato nella seconda metà del XIX secolo, derivando da giochi più antichi come lo scozzese Bandy e il nord europeo Shinney, sport ancora praticati in alcuni paesi del Nord ed Est Europa. Secondo le regole codificate nel 1879, e sostanzialmente invariate da allora, sulla pista si affrontano due squadre da sei giocatori ciascuna,



Figura 6: un incontro di hockey su ghiaccio.

cinque di movimento ed un portiere.

Tradizionalmente la pista di hockey è un rettangolo di lunghezza compresa tra 56 e 61 m, e larghezza compresa tra 26 e 30 m, con angoli arrotondati secondo un raggio variabile tra 7 e 8,5 m; il perimetro della pista è cinto da balau-

stre di protezione che emergono direttamente dal ghiaccio, di altezza compresa tra 1,17 e 1,22 m, sovrastate da pannelli di plexiglass a protezione del pubblico, che raggiungono un'altezza massima di 4 m dietro le porte.

La pista è suddivisa in una zona neutra centrale, una zona difensiva e una offensiva, più due fasce dietro le porte.

Trattandosi di uno sport molto fisico, fatto di velocità, forza ed esplosività nello scatto, richiede una superficie d'appoggio di particolare durezza, capace quindi di resistere saldamente alle potenti incisioni e solchi praticati dalla lama del pattino durante le frenate e i cambi di direzione dell'atleta, e agli urti del bastone e del disco.

Per ottenere il manto adatto si opera sullo spessore e sulla temperatura ambientale.

Per evitare infortuni, è prescritto un equipaggiamento protettivo completo.

Appare evidente come, per effetto della velocità, degli urti del bastone, dei pattini e del disco, la superficie della pista sia soggetta a solchi, graffi e incisioni di ogni sorta; come si è già accennato, nella pratica si è soliti utilizzare una temperatura di refrigerazione più bassa rispetto ad altri sport su ghiaccio, nonché uno spessore più elevato, al fine di consentire al giocatore un appoggio sicuro e al disco un attrito quasi nullo. La prima partecipazione dell'hockey ai giochi olimpici, risale alle gare di Chamonix del 1924, retroattivamente designate come "Giochi Olimpici Invernali" negli anni seguenti.

4.2. Pattinaggio di velocità

Analogamente all'hockey, gli sport di velocità su ghiaccio, utilizzano una pista di elevato spessore e durezza, garantendo un'accelerazione esplosiva e un'elevata velocità.



Figura 7: una gara di short track.

La storia e la tradizione di queste discipline sono lunghe e gloriose; è facile immaginare che, come spesso accade per gli sport di velocità pura, il pattinaggio di velocità sia tra le prime discipline invernali praticate a livello agonistico in campo internazionale.

Infatti, fin dal 1893 vengono organizzati campionati mondiali di pattinaggio di velocità.

Gli sport di velocità su ghiaccio si distinguono in sport a pista lunga o breve.

Il pattinaggio di velocità su pista lunga si pratica su ovali di ghiaccio, sia all'aperto che al coperto, anche con ghiaccio artificiale.

La pista è lunga 400 m e consente di praticare gare su tutte le distanze ufficiali.

Le distanze ufficiali sono 500 m, 1.000 m, 1.500, 3.000 m per le donne, 5.000 m e 10.000 m.

I pattini utilizzati in questo tipo di competizioni sono dotati di lame molto più lunghe rispetto a quelle di altri sport su ghiaccio, in grado di solcare profondamente la pista.

Dagli anni '80 cominciano a diffondersi i clap skates, ovvero pattini la cui lama non è interamente solidale allo scarponcino, bensì fissata solamente con un cardine alla punta.

Questo tipo di tecnologia consente alla lama di non staccarsi mai dalla superficie del ghiaccio, rendendo molto fluido lo scivolamento e minimizzando urti e interruzioni nel contatto con la pista. Dall'introduzione di questa tecnologia la disciplina ha vissuto una nuova ed entusiasmante stagione di record e un rinnovato fervore innovativo, con l'introduzione di piste in ghiaccio sintetico e tute aerodinamiche.

Gli sport su pista corta, lo short track appunto, sono invece praticati esclusivamente al coperto, su un ovale di 111 m.

A differenza delle discipline su pista lunga, gli atleti partono in massa e non a coppie.

Le distanze percorse sono solitamente i 500 m, i 1.000 m, i 1.500 m e i 3.000 m, sia maschili sia femminili, più i 5.000 m a staffetta.

Questa disciplina, sebbene praticato già dagli albori del pattinaggio di velocità, soprattutto negli Stati Uniti e in Canada, è entrata nel circuito internazionale nel 1976.

Generalmente queste discipline non richiedono alcuna attrezzatura particolare, eccezion fatta per i clap skates, ultimamente tuttavia sono state introdotte tute aderenti, che riducono l'attrito dell'aria e caschi aerodinamici con visiera,

con il duplice scopo di favorire la velocità e garantire sicurezza in caso di caduta.

4.3. Pattinaggio di figura

Il pattinaggio di figura, in tutte le sue discipline, ha anch'esso una lunghissima tradizione; il primo campionato mondiale, costituito da prove individuali maschili, si svolse nel 1896.



Figura 8: un'atleta durante un'esibizione di pattinaggio di figura.

Rispettivamente dieci e dodici anni dopo furono introdotti l'individuale femminile e l'artistico a coppie. La danza invece è la disciplina con una storia olimpica più breve, essendo stata introdotta nel circuito dei campionati mondiali nel 1952.

Le discipline di cui si compone il pattinaggio di figura sono il pattinaggio artistico su ghiaccio individuale e a coppie, la danza e il sincronizzato,

non ancora disciplina olimpica.

La caratteristica che distingue questa disciplina dalle altre su ghiaccio è la presenza di musica, sulla quale è tracciata una coreografia di elementi e figure derivati dalla danza; dunque si tratta di una disciplina in cui il gesto atletico è coniugato all'espressione artistica.

Quest'aspetto, che fa del pattinaggio di figura uno sport unico tra quelli praticati su ghiaccio, presuppone un utilizzo di elementi che nello sport puro, come una gara di velocità, non hanno ragione di apparire, ovvero la musica e la luce.

Trattandosi di un'esibizione caratterizzata da difficoltà codificate di tipo atletico, valutate con un punteggio specifico e unite in una vera e propria coreografia, è evidente che l'uso delle luci a scopo coreografico e della musica siano aspetti del tutto imprescindibili, sia nella competizione olimpica che nella semplice esibizione.

Tecnicamente, l'atleta del pattinaggio di figura, ha necessità molto diverse da quelle degli atleti dell'hockey o della velocità: la bellezza, la precisione e l'efficacia del gesto atletico sono lo scopo ultimo della sua esibizione, perciò si predilige un ghiaccio più morbido, che consenta di eseguire movimenti più fluidi.

Dopo questa prima e semplice analisi degli sport praticati su pista di ghiaccio, e un semplice confronto tra essi, appare evidente che le differenze sono molteplici: in prima istanza di ordine tecnico, per via del fatto che la pista può avere dimensioni differenti a seconda della disciplina considerata, per lo scopo stesso della disciplina,

per l'equipaggiamento a disposizione dell'atleta e di ordine scenografico.

4.4. Esigenze tecniche e scenografiche

La varietà di discipline sportive su pista di ghiaccio fin qui analizzate, dimostra che ciascuna di esse richiede un apparato di strumenti che ne consenta il perfetto svolgimento e la migliore fruizione da parte degli spettatori e degli atleti.

Quest'apparato comprende l'impianto di refrigerazione, d'illuminazione e l'impianto di diffusione audio, usati in maniera differente per ciascuna delle attività considerate: nel caso dell'hockey e del pattinaggio di velocità l'impianto d'illuminazione ha il compito di garantire piena e uniforme visibilità in ogni punto della pista; l'impianto audio ha il solo scopo di comunicare al pubblico risultati, penalità, cambi o altro; l'impianto refrigerante ha il compito di generare e mantenere la pista alle condizioni di spessore e durezza più adatte.

La scenografia si può ridurre ai soli marchi sportivi e commerciali sul fondo della pista e le linee di demarcazione del campo e della corsia di gara.

Il pattinaggio di figura ha necessità molto diverse: l'impianto refrigerante è regolato su temperature più alte; l'impianto audio trasmette, oltre che informazioni tecniche, i brani musicali su cui sono costruiti i programmi di gara e le esibizioni;

l'impianto d'illuminazione è invece chiamato a svolgere compiti differenti: illuminare diffusamente e uniformemente, per consentire una visione ottimale, ma anche accompagnare con effetti scenici e colori un'esibizione.

E' evidente che l'impianto d'illuminazione sia quello, tra tutti quelli che compongono l'apparato tecnologico di una pista di ghiaccio, che necessita della maggiore versatilità perché deve avere le apparecchiature necessarie per soddisfare ogni tipo di esigenza, nonché quello da cui dipende in larga parte, la sicurezza per spettatori e atleti.

5. LA NORMATIVA IN MATERIA DI ILLUMINAZIONE DI IMPIANTI PER SPORT SU GHIACCIO

Per meglio comprendere la provenienza e la validità delle norme, cui si farà riferimento in queste pagine, sarà brevemente riassunto il sistema di organi, nazionali e internazionali, da cui dipendono la ricerca, la formulazione e la pubblicazione di una normativa.

I documenti di riferimento nel campo della fotometria e dell'illuminotecnica sono emessi da tre organismi: la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a livello internazionale, il CEN (European Committee for Standardization) in Europa e l'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) in Italia, mentre l'ISO (International

Organization for Standardization) è, di fatto, assente dal settore, se non per alcune norme a carattere fondamentale che pubblica insieme alla CIE. Questi enti lavorano in modo coordinato secondo uno schema che può essere così esemplificato: la CIE pubblica documenti che costituiscono la base scientifica per la normativa; il CEN prepara le norme per l'Europa su mandato della Commissione Europea o al fine di armonizzare il mercato; l'UNI partecipa all'attività del CEN, ne pubblica le norme in italiano e le prepara in assenza di norme CEN.

Si tratta, per la precisione, di norme prestazionali, perché il settore della sicurezza elettrica, fa parte del campo di azione di altri organi.

In particolare, nel CEN i lavori sono affidati al Comitato tecnico TC169 "Light and lighting", cui corrisponde in Italia la Commissione tecnica "Luce ed illuminazione" dell'UNI.

Alla base del lavoro di CEN e UNI vi è il lavoro scientifico dei ricercatori che operano nel campo della fotometria e dell'illuminotecnica in tutti i paesi.

A livello internazionale, quest'attività si traduce nelle pubblicazioni della CIE, organismo scientifico di cui sono membri una cinquantina di Paesi tra cui tutti quelli industrializzati: il CEN TC 169 ha a questo proposito emesso una risoluzione che chiede a chiunque si discosti dalle pubblicazioni della CIE di giustificarne i motivi.

In Italia, il CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) svolge funzioni di sorveglianza su CEI e UNI in base alla legge 96/53.

Inoltre, il CNR è membro della CIE e collabora

alla sua attività nell'ambito della propria Commissione italiana per illuminazione (CIPI), che della CIE costituisce il Comitato nazionale italiano.

Attraverso queste iniziative confluiscono nell'attività normativa, a cui UNI e CEN assicurano il supporto organizzativo, da un lato i risultati delle ricerche condotte dagli istituti scientifici, quali in Italia le università, l'Istituto elettrotecnico nazionale G. Ferraris di Torino (IEN), l'Istituto Nazionale di Ottica applicata di Arcetri (INOA); dall'altro le esigenze emergenti dall'amministrazione statale, come il Ministero dei lavori pubblici, dalle associazioni culturali, come l'AIDI, ed industriali, come l'ANIE e l'ASSIL, e da parte di tutti gli interessati: senza l'apporto di competenze ed esperienze proveniente da esperti, associazioni ed istituti scientifici non potrebbe esistere alcuna attività normativa.

Il CEN prepara norme su mandato della Commissione europea, in attuazione delle direttive europee; queste ultime, vere e proprie leggi che devono essere recepite da tutti gli stati membri, si limitano infatti ad indicare i criteri essenziali di prodotti o di servizi, delegando al CEN la normativa in merito con l'indicazione del campo di valori in cui una determinata caratteristica di un prodotto o di un servizio deve cadere, o dei metodi di misura da impiegare, o di altre questioni tecniche al cui rispetto ci si deve attenere per attestare la conformità alla direttiva.

Ciò è fatto nell'ambito di una corretta suddivisione delle competenze politiche della Commissione e tecniche del CEN, che permette inoltre un

più agevole aggiornamento delle caratteristiche tecniche di cui sopra, quando sorga la necessità di adeguarle allo sviluppo delle conoscenze scientifiche e all'innovazione tecnologica.

Le norme pubblicate su mandato della Commissione europea, perché completamento delle direttive, hanno carattere obbligatorio.

Viceversa, anche il CEN norme in maggioranza mirate a motivi di armonizzazione del mercato: anche se si tratta di norme volontarie, non vi è alcun dubbio che esse costituiscono il riferimento per costruzioni, installazioni, servizi e come tali sono applicate da tutti gli interessati.

Come noto, in base alle procedure europee gli enti normatori nazionali non possono emettere norme autonome nei settori e nei periodi in cui il CEN sta preparando una norma: è il così detto "status quo" (stand still in inglese), giustificato dalla necessità di evitare confusione nel mercato globale. L'UNI, come gli altri enti normatori europei, è chiamato a partecipare alla preparazione delle norme CEN, che adotta e traduce in italiano dopo la loro pubblicazione da parte del CEN.

Inoltre, in assenza di "status quo", l'UNI può intraprendere iniziative autonomamente dal CEN, in particolare in campo fotometrico e illuminotecnico: il riferimento è costituito comunque dalle pubblicazioni della CIE.

La CIE pubblica documenti che solo raramente hanno un carattere direttamente normativo, e in questi casi sono emessi congiuntamente con l'ISO. Tuttavia, la conoscenza delle pubblicazioni della CIE è fondamentale sia per la compresio-

ne delle norme CEN e UNI, sia come guida nei settori in cui non esistono norme CEN e UNI.

In particolare, la CIE, tramite i suoi membri, coordina studi e ricerche in settori in cui le conoscenze scientifiche sono insufficienti per preparare una norma: vale la pena citare il recente caso delle esigenze fotometriche collegate alla segnaletica stradale, in cui CEN si è trovato nell'impossibilità di agire per mancanza di dati sperimentali, ed ha quindi chiesto un intervento della CIE.

Come già detto, in Italia la sede di collegamento con la CIE è il CNR tramite la CIPI.

Le pubblicazioni della CIE sono disponibili presso l'AIDI.

Il Comitato tecnico TC169 ha iniziato la sua attività all'inizio degli anni '90, mettendo in cantiere numerose norme, di cui tre soltanto a oggi pubblicate. I tempi del CEN sono purtroppo molto lunghi, a causa della necessità da un lato di raggiungere il consenso tra i paesi membri, sempre più numerosi, e dall'altro di rispettare le numerose procedure europee, quali le traduzioni nelle tre lingue ufficiali (francese, inglese e tedesco), le inchieste pubbliche, il voto dei paesi membri, ecc.

Come già detto, in campo illuminotecnico il CEN opera in stretto contatto con la CIE, con la quale si è resa necessaria la firma di un accordo, anche per l'utilizzazione dei testi della CIE e del relativo copyright.

Attualmente la regolamentazione in materia di illuminazione di piste di ghiaccio fa capo a quattro distinte norme UNI, riassunte nelle norme

suggerite dalla FISG (Federazione Italiana Sport Ghiaccio) con delibera del 28 maggio 1999, ed in seguito assunte dal CONI (Comitato Olimpico Internazionale Italiano), nel luglio dello stesso anno e poi ulteriormente ratificate dalla FHIP (Federazione Italiana Hockey e Pattinaggio) con delibera del Consiglio Federale del 23 aprile 2010.

- UNI sport 9316 del 1989, illuminazioni per le riprese televisive a colori, prescrizioni (ritirata senza sostituzione).
- UNI sport 9217 del 1990, illuminazione degli spazi destinati al pubblico (attualmente in vigore).
- UNI 9821 del 1991, impianti sportivi, collaudo illuminotecnico (ritirata senza sostituzione).
- UNI EN 12193 del 2008, illuminazione di installazioni sportive (attualmente in vigore).

Senza sostanziali variazioni, tutte le indicazioni riportate dalle norme UNI sport 9316 e 9217, sono state poi riassunte dal CONI nella delibera 851 del 15 luglio 1999.

In queste pagine, per semplicità, si farà riferimento alla suddetta delibera del CONI, delibera che, per completezza, non fa riferimento esclusivo all'illuminazione di un impianto sportivo, ma che ha lo scopo di individuare i livelli minimi, qualitativi e quantitativi, da rispettare nella

realizzazione di nuovi impianti, o nella ristrutturazione di quelli già esistenti.

Questa delibera prende il nome di “Norme CONI per l’impiantistica sportiva, approvate dalla GE del CONI con deliberazione n°851 del 15 luglio 1999” e ad essa sono soggetti tutti gli impianti sportivi destinati alla pratica di discipline regolamentate dalle Federazioni sportive nazionali e dalle loro affiliate, di attività propedeutiche, formative e di mantenimento di tali discipline.

Il CONI, sebbene la norma UNI sport 9316 sia stata ritirata senza sostituzione, non ha rilasciato altre delibere sostitutive o integrative.

La norma UNI 9821, relativa al collaudo illuminotecnico non è più in vigore e non è stata sostituita da alcun’altra norma, ne consegue che, fatta eccezione per la delibera del CONI, che comprende le prescrizioni di due norme UNI, le norme attualmente valide sono la UNI 9217 del 1990 e la UNI EN del 2008, ovvero la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 12193 (edizione dicembre 2007) che fornisce i valori per la progettazione ed il controllo dell’illuminazione delle installazioni sportive in termini di illuminamento, uniformità, limitazione dell’abbagliamento e proprietà di colore delle sorgenti di luce.

Tutti i requisiti sono intesi come requisiti minimi. La norma fornisce inoltre i metodi di misurazione di tali valori. Essa precisa anche le limitazioni della posizione degli apparecchi d’illuminazione nelle applicazioni particolari, per la limitazione dell’abbagliamento.

La delibera del CONI e quelle FISG e FIHP sug-

geriscono i valori d’illuminamento orizzontale necessari per un impianto di illuminazione artificiale per gli sport su ghiaccio, e i valori di uniformità di illuminamento orizzontale espressi dal rapporto tra illuminamento minimo e medio.

La distinzione è legata al tipo di sport considerato, alla collocazione dell’attività all’aperto o al chiuso e alla tipologia dell’attività: agonistica, allenamento o ricreazione.

Sono riportati, per chiarezza, i valori suggeriti:

01 ILLUMINAMENTI MINIMI RICHIESTI

Outdoor	E_m (lux)	$E_{min/Em}$ (lux)
Attività agonistica	500	0,6
Allenamento	300	0,5
Ricreazione	100	0,4
Indoor	E_m (lux)	$E_{min/Em}$ (lux)
Attività agonistica	750	0,7
Allenamento	500	0,5
Ricreazione	300	0,5

Gli illuminamenti sono intesi, salvo specifiche, sul piano orizzontale, coincidente con la superficie dello spazio di attività.

Il rapporto tra illuminamento orizzontale e verticale deve essere compreso tra 0,5 e 2.

Le piste di ghiaccio mobili, rientrano nella categoria di attività svolte all’aperto; questo genere d’impianti è pensato per ospitare soprattutto attività ricreative, anche se non è escluso che possano ospitare allenamenti, esibizioni e competizioni.

Le delibere suggeriscono l’utilizzo d’illuminazione naturale per gli impianti indoor, ma precisa-

no che dovranno essere evitate, anche tramite schermature mobili, superfici finestrate normali all'asse longitudinale del campo di attività e l'incidenza diretta dei raggi solari sul piano della pista.

I riferimenti normativi necessari per una corretta progettazione di una pista di ghiaccio, non si limitano a quelli fino ad ora elencati; vanno, infatti, annoverate anche una serie di leggi regionali e di delibere della giunta regionale.

Per quello che riguarda la Lombardia, vanno elencate:

- L.R. Lombardia 17/2000
- D.G.R. 2611/2000
- D.G.R. 7/6162/2001
- L.R. Lombardia 38/2004
- L.R. Lombardia 19/2005
- L.R. Lombardia 5/2007

Tutte votate al risparmio energetico ed alla limitazione dell'inquinamento luminoso.

In particolare, per l'uso di riflettori o torri faro, si considera idonea una sorgente che emetta da 0 cd a 0,49 cd per 1.000 lm entro un angolo compreso tra 0 e 90° e di tipo asimmetrico, al fine di non disperdere luce al di fuori dell'area di interesse ed eventualmente schermati; si richiede inoltre su tutte le superfici illuminate, una luminanza omogenea non superiore a 1 cd/m².

In fine, è da considerarsi la norma UNI 9316 del 1989 dal titolo "Impianti sportivi, Illuminazione

per le riprese televisive a colori. Prescrizioni", che suggerisce i valori di illuminamento idonei per garantire riprese televisive ad alta definizione: alzando a 800 lx l'illuminamento medio, una temperatura colore delle lampade maggiore di 5.500 K e una resa cromatica maggiore di 80 (preferibilmente 90).

I. ELEMENTI CHIAVE: MOVIMENTO, LUCE E GHIACCIO

Durante la prima analisi da compiere per valutare quali siano le caratteristiche distintive degli sport della famiglia del pattinaggio su ghiaccio, si deve innanzi tutto fermare un punto chiave: il pattinaggio è uno sport in cui la fluidità del gesto ha grande importanza.

Il ghiaccio, percorso sulle lame dei pattini, suggerisce velocità, ampiezza di linee e fluidità; è una suggestione istintiva e tecnica; perciò da qui si partirà per le successive considerazioni.



Figura 9: riproduzione di un'antica lama da pattinaggio in osso

Prima che uno sport, il pattinaggio su ghiaccio era un metodo di spostamento; le sue origini sono antiche e si rintracciano in Svezia circa dodici secoli fa. Allora non si utilizzavano lame me-

talliche, bensì lame artigianali in osso, di scarsa efficacia, tanto che per procedere spesso si utilizzava l'ausilio di un bastone.

E' evidente quale fosse il vantaggio di questo tipo di tecnologia per attraversare laghi, fiumi e bracci di mare congelati.

Da metodo di spostamento su superfici difficili divenne un passatempo in Olanda nel XVII secolo, dove era diffusa l'abitudine di pattinare sui canali congelati, da qui, nell'arco di un secolo e mezzo divenne uno sport conosciuto in tutta Europa.

Come si è già detto, il pattinaggio è reso possibile dallo scarsissimo attrito tra il ghiaccio e la lama, che consente di avere una velocità elevata; l'atleta controlla il movimento attraverso inclinazioni laterali o frontali della lama, disegnando quindi traiettorie rette o curve.

Il pattinatore può anche eseguire movimenti, salti, pirouette e passi, che sono gli elementi distintivi del pattinaggio di figura.

E' noto che la danza sia una delle tre arti sceniche principali; è altrettanto noto come il pattinaggio di figura sia lo sport che più degli altri abbia mutuato elementi da quest'arte e come invece il pattinaggio di velocità non abbia con essa quasi nulla in comune.

Ciò che accomuna il pattinaggio di figura a quello di velocità, intesi entrambi come sport, è il movimento.

Il movimento di un pattinatore, inteso semplicemente come moto, è molto rapido; le velocità raggiunte possono essere elevate; se lo si intende in senso più ampio, è un movimento molto articolato e complesso, simile alla danza.

In entrambi i casi può essere considerato uno sport caratterizzato da una armonia intrinseca, per via delle sue ampie curve e delle traiettorie fluide. Il solo pattinaggio di velocità appare come molto più aggraziato rispetto ad un altro sport di velocità.

Il ghiaccio è la seconda variabile fondamentale in questa disciplina, è il mezzo sul quale essa avviene, ma anche la condizione che la rende possibile, oltre a questo è anche lo scenario sul quale il pubblico vede muoversi l'atleta.

La pista è un rettangolo sostanzialmente bianco, eccezion fatta per le righe dei campi da hockey e i loghi di sponsor e associazioni sportive in esso immersi, uno schermo chiaro, quasi luminoso, che si accende per effetto della luce che lo illumina.

La luce è il terzo elemento utile per descrivere questo sport, essa è la testimone imparziale nelle prove agonistiche, o una interprete appassionata nelle esibizioni, capace di isolare l'atleta, nascondere, mostrarne i contorni, esaltarne il movimento, e animare l'inerte superficie del ghiaccio.

2. LA PERCEZIONE E LA FRUIZIONE

Si analizzerà qui di seguito, come avviene la percezione della pista da parte del pubblico e degli atleti, sia per le piste votate ad uso professionistico, come i palazzi del ghiaccio, sia per quelle a scopo puramente ricreativo.

Si procederà valutando le dimensioni e le caratteristiche di una pista professionistica regolamentare, considerando la posizione sia degli atleti sia degli spettatori.

2.1. Pista di ghiaccio ad uso professionale

Cominciando con un palazzo del ghiaccio, bisogna premettere una considerazione: qualunque stadio, o palazzo dello sport può trasformarsi in un palazzo del ghiaccio; basti pensare all'esempio dell'Energy Solutions Arena di Salt Lake City, sede della squadra di basket NBA Utah Jazz.

Questo palazzo, pensato per un altro genere di sport e che non prevede neppure la pista di ghiaccio, fu utilizzato durante le Olimpiadi invernali del 2002, come luogo per disputare le gare di short track e di pattinaggio artistico.

La scelta fu fatta per ragioni di capienza e di modernità dell'impianto, capace di ospitare, in quell'occasione, 14.000 spettatori, contro gli oltre 19.000 di un evento di basket.

Per fare questo furono, rimosse le gradinate più basse, al fine di raggiungere le dimensioni idonee per un pista di ghiaccio, ben più grandi di quelle di un campo da basket e venne poi realizzata un pista mobile.

Nell'esito finale, il pubblico, per via della rimozione del primo ordine di gradinate, risultava posizionato ad oltre due metri sopra la pista, oltre una parete temporanea blu.



Figura 10: l'Energy solutions arena di Salt Lake City, riconvertito da stadio di basket a pista di ghiaccio nel 2002

Si comprese poi che questa soluzione poteva risultare poco gradita ai pattinatori.

Questo esempio serve a suggerire che in realtà, sebbene sembri il contrario, una pista di ghiaccio capace di ospitare eventi di risonanza mondiale, può essere realizzata con grande facilità e che, quindi, le richieste tecniche e tecnologiche non sono affatto insormontabili.

Esistono tipologie differenti di palazzi del ghiaccio, e ciascuna tipologia dipende dal luogo in cui esso si trova; spesso accade che nei paesi nordici la pista sia coperta, ma l'intero ambiente sia aperto, privo di chiusure verticali.

In questo modo la pista può ampiamente usufruire dell'illuminazione naturale e anche del clima favorevole, con un notevole risparmio energetico.

In Italia vi sono palazzi del ghiaccio di questo tipo, o anche ibridi, in cui le chiusure verticali possono facilmente essere rimosse.

Una seconda tipologia è quella del palazzo del ghiaccio tradizionale, ovvero uno stadio con gradinate poste su uno, due o quattro lati, più o meno capace di sfruttare la luce naturale, con superfici vetrate disposte ai lati o in copertura. Questo tipo di struttura deve produrre autonomamente il potere refrigerante capace di ghiacciare la pista, quindi il fabbisogno energetico è nettamente superiore rispetto all'esempio precedente così pure per l'illuminazione.

La struttura di una pista per sport professionistici, di taglia regolamentare è facilmente sintetizzabile: come si è già detto, la pista ha le dimensioni generalmente di 30 m per 60, con gli angoli arrotondati.

In una pista di queste dimensioni, si possono svolgere competizioni di hockey, pattinaggio di figura e di velocità. Intorno alla pista si trova una fascia piana, dove sostano gli atleti e gli allenatori, dove si trovano i giudici e gli arbitri, a volte insieme ai commentatori sportivi e i fotografi; dietro questa cintura interdotta al pubblico si trovano le vere e proprie gradinate, strutturate come quelle tradizionali, con gradoni profondi 60 cm minimo e di un'altezza generalmente compresa tra i 40 e i 60 cm.

Attualmente il palazzo del ghiaccio di dimensio-

ni maggiori al mondo è il Bell Centre di Montreal, sede della squadra di hockey, sport nazionale del Canada, dei Montreal Canadiens, capace di ospitare fino a 22.000 spettatori, disposti su tre anelli di gradinate.



Figura 11: il Bell Centre di Montreal: la pista appena rigenerata riflette l'interno del palazzo

La struttura è dotata di grande flessibilità, permettendo di ospitare eventi sportivi su ghiaccio, ma anche eventi musicali e teatrali, accogliendo pubblico o palchi là dove si trova la pista, variando così la propria capacità da un minimo di 2.000 fino ad un massimo di 15.000 posti a sedere. Questo dimostra come in realtà, la tendenza attuale sia quella di sfruttare al massimo una struttura originariamente pensata per uno sport ed un uso molto specifico.

Sostanzialmente si possono immaginare le gradinate, con buona approssimazione, come una scalinata a gradoni con un angolo di inclinazione di 30°; dall'inclinazione della gradinata e dalla distanza dalla pista, dipende la visione da parte dello spettatore del rettangolo di gara.

E' raro che gli spettatori risentano di fenomeni

di abbagliamento da parte dei corpi illuminanti, per via della grande altezza a cui sono installati, andrà tuttavia considerata la luminanza da alcune posizioni estreme, al fine di valutare se vi siano eventuali posti in cui la visione sia sfavorevole, anche per via di abbagliamenti indiretti.

2.2. Cenni sulle piste di ghiaccio mobili

Una pista di ghiaccio mobile è costituita, invece, dalla sola lastra di ghiaccio, in estrema sintesi.

In effetti, si tratta di una pista costruita con i medesimi principi tecnologici di una pista indoor fissa.



Figura 12: una pista di ghiaccio mobile, Somerset House, Londra

Viene realizzata una sorta di vasca, circondata e chiusa da un balaustra; all'interno della vasca sono posate le serpentine mobili, in cui scorre il liquido refrigerante; al di sopra viene creato a strati la lastra di ghiaccio.

Appena oltre la balaustra si ergono i pali sui quali sarà montato l'impianto d'illuminazione. Oltre, di solito, sono disposti alcuni elementi temporanei utili al funzionamento della struttura, ad esempio una protezione per il motore refrigerante, dei vani per il deposito e noleggio dei pattini e altro.

Nel caso in cui la struttura sia pensata per ospitare una competizione, le dimensioni della pista saranno quelle regolamentari, ovvero 30 m per 60, e affiancate da spalti temporanei per il pubblico; in questo caso la visione dello spettatore risulta essere identica a quella di uno spettatore ospite in una pista indoor, eccezion fatta per la luce naturale.



Figura 13: una macchina rasaghiaccio

Comunemente, le piste mobili sono realizzate per lo svago e l'intrattenimento; vi si tengono

corsi più o meno avanzati di pattinaggio, o di hockey, a scopo assolutamente non agonistico, ma del tutto ricreativo. Spesso la pista può ospitare spettacoli o esibizioni, ma la parte quantitativamente più rilevante dell'uso che ne è fatto, è l'apertura al pubblico, quindi il pattinaggio semplice e libero per gli appassionati o i neofiti.

In casi come questo, è trasmessa musica in diffusione e la pista viene utilizzata per pattinare liberamente.

Solitamente dunque, in assenza di gradinate, la visione della pista del pattinatore e dello spettatore che si trova accanto alla balaustra, sono pressoché identiche.

La vera differenza tra una pista indoor e una all'aperto risiede nel ghiaccio; una pista in palazzetto ha certamente una macchina del ghiaccio per ravvivare la superficie, una pista mobile, invece, in relazione alle sue dimensioni e alla sua collocazione, potrebbe non averla.

In questo caso la superficie viene ravvivata manualmente, prima con l'uso di scope gommate per spostare e compattare la polvere di ghiaccio alzata dalle lame dei pattini, poi con dell'acqua versata direttamente sulla pista.

Questo determina un'inferiore capacità di riflessione speculare da parte di una pista all'aperto, un aspetto meno vetroso e più grezzo e delle capacità diffondenti leggermente superiori.

2.3. L'atleta e lo spettatore, percezione della pista

In queste righe si faranno alcune considerazioni di carattere qualitativo, più che quantitativo, utili, però, a comprendere quali siano i possibili problemi che andranno a incidere sulla visione da parte degli utenti di una pista di ghiaccio.

Per completezza immagineremo la pista di dimensioni regolamentari per l'hockey, e circondata da gradinate come in un palazzo del ghiaccio.

Considerando, per cominciare, la posizione dell'atleta si può affermare, senza dubbio, che la sua sia la posizione più critica, per via della complessità dell'attività che egli svolge in pista. È utile specificare che la pista per il pattinatore rappresenta lo spazio in cui muoversi, perciò egli non concentrerà la sua attenzione su di essa, bensì tenderà a guardare intorno a sé solo per avere riferimenti sulla propria posizione rispetto al campo e per l'equilibrio; per un giocatore di hockey la situazione è analoga, anche se le righe del campo sono per lui segnali fondamentali sulla propria posizione e quella degli altri giocatori e del disco. Per un giocatore di hockey, dunque, l'osservazione della pista è più rilevante che per un pattinatore di figura o uno di velocità.

Poiché la pista appare come una superficie bianca, traslucida, con un'elevata chiarezza e sovente molto più illuminata rispetto alle gradinate o le superfici attorno ad essa, è utile verificare in che porzione essa occupi il campo visivo

di ciascuno degli attori: nel caso dell'atleta sul ghiaccio, la pista può occupare da una piccola porzione, fino a metà del campo visivo.

Per via della natura riflettente e del colore chiaro della pista, rispetto alle zone circostanti, essa può avere luminanze da due, a tre e fino a dieci volte superiori secondo le condizioni d'illuminazione. Questo non determina una percezione imperfetta o inefficace da parte dell'atleta, ma piuttosto una possibile sensazione d'isolamento, in cui solo la pista e i suoi contorni sono visibili e luminosi, e le gradinate sono al buio; come si vedrà in seguito, esistono condizioni in cui questa situazione è estrema, nel caso di esibizioni o spettacoli professionali.

Dunque per l'atleta il contrasto delle luminanze tra la pista e lo sfondo non genera disturbo o scarsa qualità della visione, ma può far apparire, in condizioni limite, la pista come un rettangolo luminescente immerso nell'oscurità.

Il secondo rischio, dovuto alla sua posizione sul ghiaccio, per l'atleta è l'abbagliamento indiretto: generalmente in un palazzo del ghiaccio professionistico l'impianto d'illuminazione della pista, si trova sospeso sotto la copertura, oltre l'ultimo anello di gradinate, perciò a un'altezza tale da essere completamente escluso dal cono visivo dell'atleta, tuttavia i fasci luminosi proiettati dai riflettori sul ghiaccio possono urtare, una volta riflessi, l'occhio dell'atleta, abbagliandolo. Il rischio esiste, ma si limita soprattutto al caso in cui sia la luce solare a illuminare la pista, generando una riflessione diffusa molto forte, in grado di annebbiare la vista; nel caso dell'il-

luminazione artificiale il rischio è contenuto, per via dell'altezza di montaggio degli apparecchi, ad almeno una decina di metri dal ghiaccio ma spesso ben oltre, e per la scelta di ottiche a fascio largo utili a rendere uniforme l'illuminamento in pista.

Dunque anche il rischio di abbagliamento sembra non sussistere per l'atleta.

Passando allo spettatore, è evidente quanto invece sia molto più ampia e completa la sua visione della pista via via che ci si allontana da essa: uno spettatore seduto a bordo pista avrà una visione paragonabile a quella degli atleti in campo, uno seduto in ventesima fila al centro, vedrà il ghiaccio occupare grande parte del suo campo visivo, così come per uno seduto in curva. Dunque lo spettatore è meno soggetto allo schiacciamento prospettico, in molti casi vede dall'alto, da una certa distanza, grande parte della pista e la pista occupa oltre la metà, se non tutto il suo campo visivo; inoltre la pista è l'oggetto stesso della sua attenzione, per cui ha di rado ragioni per guardare altrove.

La pista, o campo di gioco è, di fatto, il suo compito visivo, la ragione per cui si trova lì; perciò il suo sguardo si sposterà di rado sulle gradinate, se non per percorrerle in ingresso e uscita, ma rimarrà sempre sul ghiaccio, seguendo gli atleti, l'arbitro, il disco per godere dello spettacolo.

Lo spettatore non risente, quale che siano le condizioni di luminanza della pista e degli spazi circostanti, di possibili forti contrasti e non percepisce la sensazione d'isolamento, anche perché dal suo punto di vista la pista proietta

un bagliore sugli spalti, ed egli può anche comodamente usufruire delle luci di segnalazione e di sicurezza del palazzetto, che non migliorano la percezione, ma aiutano a collocare la propria posizione nello spazio.

Per quel che concerne l'abbagliamento, le considerazioni fatte per gli atleti possono ritenersi valide anche per gli spettatori.

Quest'analisi, basata su considerazioni fatte sulla geometria di una pista di ghiaccio e su un'illuminazione artificiale di tipo comune, trova riscontro nelle informazioni suggerite, nel paragrafo successivo da un professionista degli sport su ghiaccio. Sarà interessante notare come, chi pratica sport su pista di ghiaccio, sia poco avvezzo e concentrato sugli aspetti tecnici di un impianto d'illuminazione, tuttavia sia molto consapevole delle condizioni di luce ideali per gli atleti in pista e di quelle di disagio.

Si potrà notare come l'atleta sia in realtà sensibile alle condizioni di luce, come sia suscettibile ai suoi cambiamenti durante la giornata e come tutto questo ricada sulla sua sensazione di comfort e di sicurezza in pista.

3. CONVERSAZIONE CON UN PATTINATORE PROFESSIONISTA

In questa breve fase, saranno riportate le conclusioni di una conversazione tenuta con Angelo

Dolfini, ex pattinatore di figura, campione italiano dal 1998 al 2002 e rappresentante azzurro alle Olimpiadi invernali di Salt Lake City del 2002.



Figura 14: Angelo Dolfini durante i Campionati Europei di Losanna 2002

Lo scopo di questa conversazione è stato comprendere il punto di vista professionale di un pattinatore, in relazione all'illuminazione di una pista e i problemi che essa comporta.

La conversazione non sarà riportata sotto forma d'intervista, bensì i contenuti saranno sintetizzati, per dare un quadro completo di tutte le considerazioni fatte a voce, ma senza indugiare sulla formula di domanda e risposta.

Analizzando la struttura di un impianto d'illuminazione di una pista di ghiaccio stabile, quindi

all'interno di un palazzetto del ghiaccio, è stato possibile fare alcune considerazioni generali, valide per la maggior parte degli impianti.

Solitamente una pista di ghiaccio, all'interno di un palazzetto, ma anche di un'arena in grado di ospitare più sport diversi, è pensata per essere illuminata con la luce naturale.

Questo avviene soprattutto per ragioni di ordine economico, essendo la pista un impianto con costi energetici elevati per via delle macchine refrigeranti.

Per questo, il palazzetto è dotato spesso di ampie pareti vetrate o coperture trasparenti in grado di consentire, in ogni stagione, alcune ore d'illuminazione naturale; i vantaggi che ne derivano, oltre che economici, sono di ordine pratico, per via del fatto che questo tipo d'illuminazione garantisce una buona percezione e una condizione generale di comfort per l'atleta. Ogni atleta, ha esigenze e caratteristiche diverse, com'è ovvio, perciò avrà preferenze sulla natura dell'illuminazione della pista, generalmente però, una buona illuminazione naturale è sempre preferita, almeno in fase di allenamento, questo dipende dal fatto che condizioni d'illuminazione uniforme e diffusa sono requisiti fondamentali per raggiungere le condizioni ottimali di allenamento e performance.

Definire una buona illuminazione naturale non è semplice, poiché le condizioni di luce cambiano durante l'intera giornata, da un giorno con l'altro e con l'avvicinarsi delle stagioni; in generale sono due le problematiche più frequenti che possono determinare condizioni di disturbo

per l'atleta: riflessi sulla superficie o forti contrasti tra zone della pista illuminate con diversa intensità. Nel primo caso, se la superficie del ghiaccio è nuova, oppure è appena stata rigenerata dall'apposita macchina e se il sole è basso, si possono generare fenomeni di riflessione che possono urtare l'occhio e abbagliare.

Nel secondo caso, quando l'illuminazione natu-

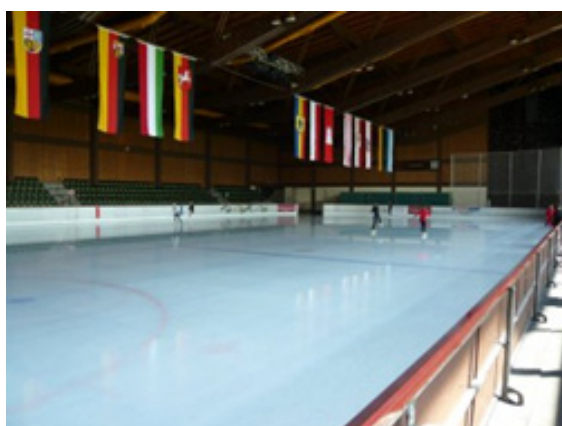


Figura 15: la pista di allenamento di Oberstdorf illuminata con la sola luce naturale

rale non è correttamente studiata, si possono manifestare dei fenomeni in cui una parte della pista è fortemente illuminata dalla luce diretta del sole e la parte rimanente è in ombra; per via della natura del ghiaccio la parte colpita dalla luce diretta, avrà una superficie a terra bianca e abbagliante e una seconda metà in penombra. Normalmente questo contrasto di luminanze è fastidioso per una qualunque utenza, ma in condizioni come quelle qui descritte, il contrasto risulta molto forte e un pattinatore, passando a forte velocità da una zona intensamente luminosa ad una in penombra, e viceversa, rischia

di non percepire correttamente i contorni della pista o di rimanere abbagliato.

Questi sono casi in cui si possono anche correre rischi per la sicurezza dell'atleta, poiché questo inconveniente può far perdere l'orientamento, può far mal percepire le proporzioni del rettangolo di ghiaccio e la posizione, rendendo più difficile il solo procedere, senza contare il disagio di eseguire passi, salti o difficoltà tecniche.

Va ricordato che è l'occhio lo strumento principale con cui il pattinatore mantiene e controlla l'equilibrio, perciò ogni condizione luminosa che sfavorisca la visione, che abbagli, o che temporaneamente offuschi la vista, rischia di compromettere l'equilibrio e di conseguenza la bontà di un gesto o persino la sicurezza dell'atleta.

L'illuminazione artificiale è solitamente costituita da una serie di apparecchi disposti sul perimetro della pista, oppure da una griglia di apparecchi dell'ampiezza del rettangolo di gara, posta sopra di esso; in entrambi i casi, i corpi illuminanti sono disposti a una considerevole altezza, superiore a dieci metri.

Questa è, ovviamente, l'illuminazione che riguarda esclusivamente la pista, perché i criteri con cui sono illuminati spalti o gradinate sono di altro genere.

Anche nel caso di una pista mobile gli apparecchi sono disposti a considerevole altezza, solitamente su pali a circa cinque o sei metri.

La ragione di questa disposizione dipende dall'esigenza di generare un'illuminazione la più diffusa e uniforme possibile; solitamente, infatti, gli apparecchi, molto spesso accoppiati, sono

collocati con un angolo leggermente sfalsato l'uno rispetto all'altro, al fine di allargare il fascio luminoso.



Figura 16: l'illuminazione artificiale di un palazzo del ghiaccio

Nel corso degli anni, le lampade sono cambiate, raggiungendo valori di resa cromatica sempre più alti.

Gli inconvenienti più frequenti legati all'illuminazione artificiale sono legati più all'uso che se ne fa, piuttosto che alla sua natura o alla sua progettazione. Come in molte attività, sono l'equilibrio e la costanza dell'illuminazione a generare la sensazione di comfort; squilibri, alternanze, cali e picchi della luminosità generano invece fastidio e disturbano l'individuo nel compiere i propri compiti.

Generalmente le esigenze di risparmio energetico, fanno sì che allenamenti e gare siano svolti in condizioni di luce diverse; nel primo caso con un'illuminazione più bassa che nel secondo.

Eseguire una performance, specialmente se agonistica, provata in determinate condizioni di luce, in condizioni di luminosità più forte, determina ovviamente una sensazione sgradevo-

le. E' evidente che le condizioni psicologiche di tensione e concentrazione, tipiche di una gara sportiva, sono ben diverse da quelle di un allenamento atletico o tecnico e da quelle di chi pattina per semplice ricreazione; un atleta professionista, come spesso avviene, per migliorare, favorire la concentrazione è solito creare per sé condizioni stabili, quasi rituali, perciò un cambio d'illuminazione, anche trascurabile, è per l'atleta elemento di disturbo, mentre per un semplice appassionato potrebbe non creare alcun disagio.

Le condizioni che distinguono l'illuminazione di una pista in relazione all'attività svolta, variano sensibilmente; come si è già detto è possibile distinguere due categorie principali: l'attività agonistica, e la ricreazione.

Ciascuna di queste categorie può essere distinta in due tipologie secondarie: allenamento e gara, nel primo caso ed esibizione e ricreazione pura nel secondo.

Per ciò che riguarda l'attività agonistica, l'allenamento e la gara vera e propria hanno condizioni d'illuminazione analoghe: entrambi sono svolti in condizioni di piena luce e non vi è sostanziale differenza nell'illuminamento della pista e degli spalti.

L'atleta deve avere una percezione chiara e distinta del rettangolo di gara, deve poter svolgere il percorso stabilito nella più completa sicurezza, avendone una visione completa ed equilibrata, deve poter lasciar spaziare lo sguardo senza interruzioni in tutto l'ambiente senza trovare ostacoli. Allo stesso modo il pubblico, i

giudici e gli allenatori devono poter vedere distintamente la pista e l'atleta, senza disturbo e con chiarezza. Non va altresì sottovalutato che il contatto tra l'atleta e il pubblico è parte integrante della performance agonistica.

L'atleta, infatti, deve poter coinvolgere lo spettatore con la sua espressività e l'intensità della sua coreografia, di là dalle difficoltà tecniche previste dal programma di gara; nel caso di Salt Lake City e della pista temporanea dell'Energy Solutions Arena, questo tipo di contatto, era per via delle modifiche alla struttura, limitato dalla distanza e dall'altezza del pubblico; questo fu non gradito a tutti gli atleti del pattinaggio di figura.

Non è raro quindi che gli atleti guardino direttamente gli spettatori delle prime file, cercando un contatto che è parte integrante della bellezza dello sport e dei criteri di valutazione della performance. E' tuttavia evidente che vi siano atleti dotati d'indole diversa, più o meno espressivi, più o meno tecnici e quindi diversamente portati a cercare una relazione con lo spettatore.

L'allenamento, che sia finalizzato alla preparazione atletica e tecnica, o finalizzato alla preparazione di una coreografia di gara, e quindi osservabile come una sintesi degli aspetti atletici, tecnici, ed espressivi, deve perciò avere caratteristiche d'illuminazione del tutto simili a quelle in cui si svolgerà la gara, fatte salve le esigenze di risparmio energetico a cui si accennava prima.

In sintesi si può affermare che l'illuminazione di una pista legata all'attività agonistica si caratterizza come un'illuminazione diffusa, intensa,

con luce di colore bianco, la più possibile uniforme e capace di restituire fedelmente i colori. Nel caso delle finalità ricreative la situazione è ben diversa. Partendo dal presupposto che alcune delle considerazioni appena fatte possano essere valide anche in circostanze come questa, bisogna analizzare separatamente le due possibilità principali.



Figura 17: un esempio d'illuminazione a scopo ricreativo di una pista di ghiaccio

Un'esibizione, quindi una performance eseguita da un atleta professionista, altro non è che una coreografia caratterizzata da passi e salti di difficoltà variabile, caratterizzata da condizioni di luce finalizzate ad enfatizzare, accompagnare e raccontare le movenze del pattinatore.

Lo scopo non è eseguire difficoltà tecnicamente impegnative, potrebbero infatti essere previsti solo elementi tecnicamente semplici, bensì narrare, trasmettere sensazioni attraverso la musica ed il movimento, coinvolgere gli spettatori.

Partendo da questi presupposti, si comprende quanta libertà ci sia nell'accompagnare l'atleta con luci ed effetti coreograficamente coinvol-

genti; viene a mancare la necessità di un'illuminazione ampia e diffusa e diventa possibile usare altri apparecchi e altre tecnologie.

Generalmente gli spalti sono al buio, o in forte penombra, la pista è l'unico punto in cui la luce è proiettata. Spesso l'esibizione inizia al buio, con un occhio di bue che illumina l'atleta isolandolo dall'oscurità che lo circonda, o che ne lambisce figura creando un effetto di controllo luce, che mostra allo spettatore solo una sagoma scura, ma senza illuminarlo direttamente.

L'occhio di bue usato, a seconda delle finalità estetiche ed espressive, può essere più o meno ampio, o variare di ampiezza durante la performance, può essere singolo, doppio o triplo, ritagliando attorno al pattinatore uno spazio di dimensioni variabili e può essere associato a altri apparecchi che diffondono sulla pista luci colorate.

Le difficoltà per l'atleta durante questo tipo di esibizione sono evidenti: egli si trova sostanzialmente al buio, non vede il pubblico, non vede i contorni della pista e, se illuminato direttamente da un occhio di bue, non vede nulla oltre il cono di luce proiettato su di lui.

Non si tratta quindi di condizioni di visione ottimali, che in un individuo inesperto potrebbero anche indurre la sensazione di disorientamento; spesso, infatti, per ragioni di sicurezza, si circonda la pista con un nastro di lampade, o di led o una fibra ottica, poggiati sullo zoccolo della balaustra, in modo da fornire all'atleta una visione, almeno parziale dei contorni del rettangolo di gara, in modo da favorire l'orientamento, senza

disturbare il pubblico distogliendone l'attenzione dal pattinatore.

Sono proiettate luci colorate, che tingono letteralmente la superficie bianca del ghiaccio, creando sfumature e contrasti cromatici; si utilizzano luci intermittenti o stroboscopiche; si utilizzano l'occhio di bue o fasci colorati per seguire e tracciare il percorso del pattinatore, letteralmente disegnando i suoi movimenti sul ghiaccio.

La natura di questo tipo di esibizioni, per concludere, è molto varia: è prassi che gli atleti, al termine di un evento sportivo, come un campionato, fino all'olimpiade, eseguano delle performance dopo le competizioni, per celebrare con uno spettacolo la fine delle ostilità; esistono spettacoli itineranti, caratterizzati da scene, momenti, coreografie stabilite, in cui l'uso delle luci è strettamente legato alle esigenze estetiche della coreografia e del tema generale dell'esibizione.

Il progetto e l'esecuzione di questo tipo di coreografia delle luci sono affidati a un tecnico specializzato, che segue lo spettacolo nelle sue tappe, o che affianca un progetto dettagliato ad uso dei tecnici degli altri palazzi del ghiaccio, che lo dovranno riprodurre.

Per concludere, si è discusso delle caratteristiche dell'illuminazione di una pista ad uso del pubblico appassionato. In questo caso le condizioni sono per certi versi simili a quelle di una gara, per altri a quelle di un'esibizione. E' evidente che vi sia la necessità di garantire sicurezza e visibilità agli utenti, perciò è usata un'illuminazione soffusa e diffusa, che consenta

di distinguere i contorni della pista e le altre persone presenti sul ghiaccio.

Non bisogna dimenticare che i rischi d'infornio, dovuti alla velocità, sono numerosi: distorsioni, contusioni, danni muscolari e ossei sono gli esiti più comuni, ma va ricordato che il pattino stesso può causare ferite rilevanti; è evidente quindi che la sicurezza, per utenti che non hanno l'esperienza e la preparazione atletica di un professionista, sia un requisito fondamentale.

Contemporaneamente si richiede che la pista sia anche in grado di intrattenere e divertire con luci colorate e stroboscopiche, che accompagnino la musica in diffusione o il semplice pattinaggio.

Estendendo il discorso alle piste all'aperto, mobili o fisse che siano, le difficoltà legate all'illuminazione riguardano soprattutto la luce naturale. Dove e quando il sole si trova in condizione da creare riflessi fastidiosi sulla superficie, l'atleta rischia di essere abbagliato, anche in relazione alle condizioni del ghiaccio stesso: in un palazzetto si trova sempre una macchina del ghiaccio che periodicamente rigenera la superficie, rendendola lucida come il vetro; invece nel caso di una pista all'aperto, in assenza dell'apposita macchina, il ghiaccio si copre di uno strato di nevischio, costituito in realtà dai residui sollevati dalle lame del pattino, capace di generare riflessi diffusi molto fastidiosi.

Non va inoltre dimenticato che le condizioni del ghiaccio variano sensibilmente in relazione alle condizioni climatiche; pioggia, neve e nebbia, generano effetti sulla superficie che ne cambia-

no sensibilmente il comportamento in relazione alla luce.

Un palazzo del ghiaccio è un luogo generalmente dedicato allo sport agonistico, perciò ospita allenamenti, gare e meeting, a partire dal livello locale, regionale, nazionale e internazionale, fino agli impianti più prestigiosi, in cui si svolgono eventi di risonanza mondiale o eventi olimpici. E' dunque un luogo in cui tutto è pensato per consentire agli atleti di allenarsi e gareggiare nelle migliori condizioni, ma la tendenza contemporanea vede la necessità della struttura di funzionare come una vera e propria azienda, capace di fornire intrattenimento, al pubblico e di ottenerne ricavi, per finanziare le attività di punta, assai più costose.

Dunque un palazzo del ghiaccio deve essere capace di declinare la propria offerta di eventi, partendo dallo sport agonistico, e il relativo allenamento, fino alla possibilità di ospitare spettacoli e tour, o di accogliere il pubblico degli appassionati sulla pista.

La naturale evoluzione di un impianto d'illuminazione di una pista, deve seguire quella del ventaglio di offerte proposte dal palazzetto che lo ospita; la tendenza è quindi che gli impianti diventino sempre più integrati, capaci cioè, di adattarsi sia alla gara sia all'uso da parte del pubblico, con grande facilità.

Anche gli aspetti energetici diventano sempre più importanti; un impianto sportivo come un palazzo del ghiaccio è costretto a un consumo elevato di energia per la durata di tutto l'anno, al solo scopo di mantenere le temperature ne-

cessarie per la sopravvivenza del ghiaccio e allo stesso modo deve fornire luce artificiale.

Com'è giusto, si cerca quindi di limitare il consumo energetico, sviluppando progetti che usino apparecchi dotati di grande efficienza, che non richiedano manutenzione e riparazione frequente e costosa.

Concludendo, la conversazione svolta con Angelo Dolfini ha evidenziato alcuni aspetti importanti ai fini di questo studio.

Si è potuto comprendere come l'illuminazione diffusa sia la più adatta nella maggior parte dei casi; essa permette che vi siano meno rischi di abbagliamento, evita fastidiosi passaggi tra zone colpite da luci di diversa intensità, consente di percepire meglio le proporzioni della pista e la propria posizione al suo interno e, in generale, garantisce una maggiore sicurezza.

Questa considerazione vale sia per l'attività agonistica sia per l'intrattenimento sportivo, e quindi l'illuminazione diffusa diventerà uno dei criteri per la progettazione che sarà seguita in queste pagine.

Si è potuto tuttavia anche verificare come un buon impianto, che si possa adattare alle richieste più varie, dovrà avere consumi energetici contenuti e la possibilità di adattarsi alle richieste d'uso più svariate, dalla gara all'intrattenimento.

I. LA LUCE: GENERALITÀ

Nel corso del tempo, sono state formulate numerose teorie per spiegare il fenomeno luminoso e il comportamento della luce.

La prima di queste teorie fu quella corpuscolare: formulata da Isaac Newton nel XVII secolo.

La luce era interpretata come un flusso di piccole particelle di materia (corpuscoli) emesse in tutte le direzioni. Oltre che essere matematicamente molto più semplice della teoria ondulatoria, questa teoria spiegava molto facilmente alcune caratteristiche della propagazione della luce che erano ben note all'epoca di Newton.

Innanzitutto la meccanica galileiana prevede, che le particelle, inclusi i corpuscoli di luce, si propagano in linea retta e che questi fossero immaginati come molto leggeri, era coerente con una velocità della luce alta ma non infinita. Anche il fenomeno della riflessione poteva essere spiegato in maniera semplice tramite l'urto elastico della particella di luce sulla superficie riflettente.

La spiegazione della rifrazione fu più complessa ma tutt'altro che impossibile: bastava, infatti, pensare che le particelle incidenti sul materiale rifrangente subissero, ad opera di questo, delle forze perpendicolari alla superficie che ne cambiassero la traiettoria.

I colori dell'arcobaleno erano spiegati tramite l'introduzione di un gran numero di corpuscoli di luce diversi, uno per ogni colore, e il bianco

era pensato come formato numerose particelle multicolori. La separazione dei colori ad opera, ad esempio, di un prisma poneva qualche problema teorico in più perché le particelle di luce dovrebbero avere alcune proprietà nel vuoto ma altre all'interno della materia.

La teoria ondulatoria fu formulata da Christiaan Huygens nel 1678 ma pubblicata solo nel 1690 nel *Traité de la Lumière*.

La luce era interpretata come un'onda che si propaga, in maniera del tutto simile alle onde del mare o a quelle acustiche, in un mezzo, chiamato etere, che si supponeva pervadesse tutto l'universo e fosse formato da microscopiche particelle elastiche.

La teoria ondulatoria della luce permetteva di spiegare, anche se in maniera matematicamente complessa, un gran numero di fenomeni: oltre alla riflessione e alla rifrazione, Huygens riuscì, infatti, a spiegare anche il fenomeno della birifrangenza nei cristalli di calcite.

Nel 1801 Thomas Young dimostrò come i fenomeni della diffrazione, osservati per la prima volta da Francesco Maria Grimaldi nel 1665, e dell'interferenza fossero interamente spiegabili dalla teoria ondulatoria e non dalla teoria corpuscolare.

Agli stessi risultati arrivò Augustin-Jean Fresnel nel 1815. Nel 1814 Joseph von Fraunhofer fu il primo ad investigare seriamente sulle righe di

assorbimento nello spettro del Sole, che vennero esaurientemente spiegate da Kirchhoff e da Bunsen nel 1859, con l'invenzione dello spettroscopio.

Un problema della teoria ondulatoria era tuttavia la propagazione rettilinea della luce.

Infatti, era ben noto che le onde sono capaci di aggirare gli ostacoli mentre è esperienza comune che la luce si propaghi in linea retta (questa proprietà era già stata notata da Euclide nel suo *Optica*). Quest'apparente incongruenza può però essere spiegata assumendo che la luce abbia una lunghezza d'onda microscopica.

Al contrario della teoria corpuscolare, quella ondulatoria prevede che la luce si propaghi più lentamente all'interno di un mezzo che nel vuoto; restano tuttavia alcune ambiguità.

Per la grandissima maggioranza delle applicazioni questa teoria è ancora utilizzata al giorno d'oggi. Proposta da James Clerk Maxwell alla fine del XIX secolo, la teoria sostiene che le onde luminose sono elettromagnetiche e non hanno bisogno di un mezzo per la trasmissione e mostra che la luce visibile è una parte dello spettro elettromagnetico.

Con la formulazione delle equazioni di Maxwell furono completamente unificati i fenomeni elettrici, magnetici e ottici.

Il mondo scientifico tentò lungamente di dirimere la questione che vedeva contrapposte la teoria corpuscolare e quella ondulatoria, tanto che il dualismo tra le due visioni divenne celebre. Nel 1801 l'inglese Thomas Young eseguì un esperimento, ormai molto noto, che avvalorava

la teoria sulla natura ondulatoria della luce.

Due raggi di luce (originati dalla divisione di un unico raggio di partenza) colpivano due fenditure, intersecandosi e interferendo tra loro successivamente.

L'area d'intersezione non era più luminosa, come ci si sarebbe aspettato da un modello particellare, ma presentava delle bande più luminose e altre meno luminose alternate, come prevedeva il modello ondulatorio: a seconda del punto di incontro i due fasci di luce si sommano o si annullano, creando un'immagine d'interferenza.

Per risolvere alcuni problemi sulla trattazione del corpo nero nel 1900 Max Planck ideò un artificio matematico: pensò che l'energia associata a un'onda elettromagnetica non fosse proporzionale al quadrato della sua ampiezza, come nel caso delle onde elastiche in meccanica classica, ma direttamente proporzionale alla frequenza e che la sua costante di proporzionalità fosse discreta e non continua.

L'interpretazione successiva che Albert Einstein diede dell'effetto fotoelettrico incanalò il pensiero dei suoi contemporanei verso una nuova strada.

Si cominciò a pensare che quanto fatto da Planck non fosse un mero artificio matematico, ma piuttosto l'interpretazione di una nuova struttura fisica, cioè che la natura della luce potesse avere un qualche rapporto con una forma discreta di alcune sue proprietà.

Si cominciò a parlare di pacchetti discreti di energia, battezzati fotoni.

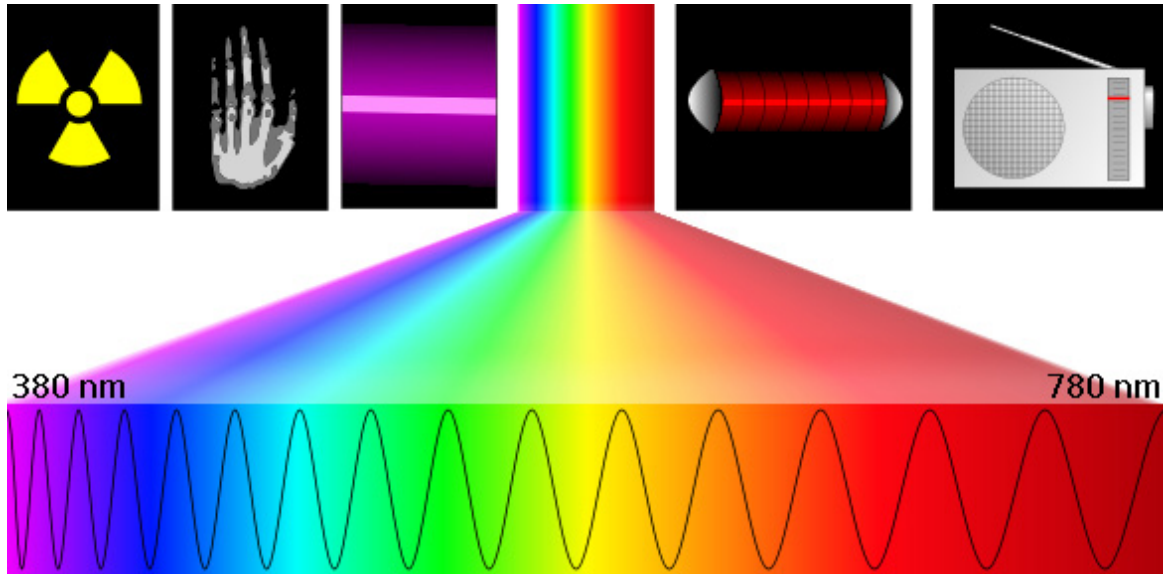


Figura 18: lo spettro elettromagnetico e la porzione di luce visibile

Con l'avvento delle teorie quantistiche dei campi, e in particolare dell'elettrodinamica quantistica, il concetto di fotone fu formalizzato e oggi sta alla base dell'ottica quantistica.

La luce, dunque, è un'onda elettromagnetica, così come le onde radio e i raggi ultravioletti, dal punto di vista fisico non ha nulla di diverso da qualunque altro tipo di onda elettromagnetica, se non la peculiarità di riuscire a sollecitare l'occhio umano, generando la sensazione di visione. Attraverso l'ausilio di occhiali a infrarossi è persino possibile vedere il calore come se fosse luce, ciò significa che l'uomo considera luce solo le lunghezze d'onda visibili dal suo occhio, sebbene tramite il senso del tatto sia possibile comunque percepire il calore, senza alcun ausilio esterno.

All'interno dello spettro elettromagnetico, misurando la lunghezza d'onda in nanometri, può essere definito luce solo quel campo di lunghez-

ze d'onda comprese tra 380 e 780nm.

Le caratteristiche che consentono di analizzare un'onda elettromagnetica sono l'ampiezza, il periodo, frequenza, la lunghezza, la velocità.

Tutte le onde sono caratterizzate da un'equazione in cui lo spazio e il tempo sono legati fra loro in secondo la seguente relazione:

$$E = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

(equazione di un'onda viaggiante)

dove E rappresenta l'ampiezza del campo (elettrico o magnetico, in genere ci si riferisce al campo elettrico).

È una funzione sinusoidale nel cui argomento x =spazio e t =tempo sono le variabili "esterne" all'onda, cioè proprie dell'ambiente in cui si muove (rappresentano cioè un punto e un istante ben definiti).

E_0 è l'ampiezza dell'onda, cioè il valore massimo

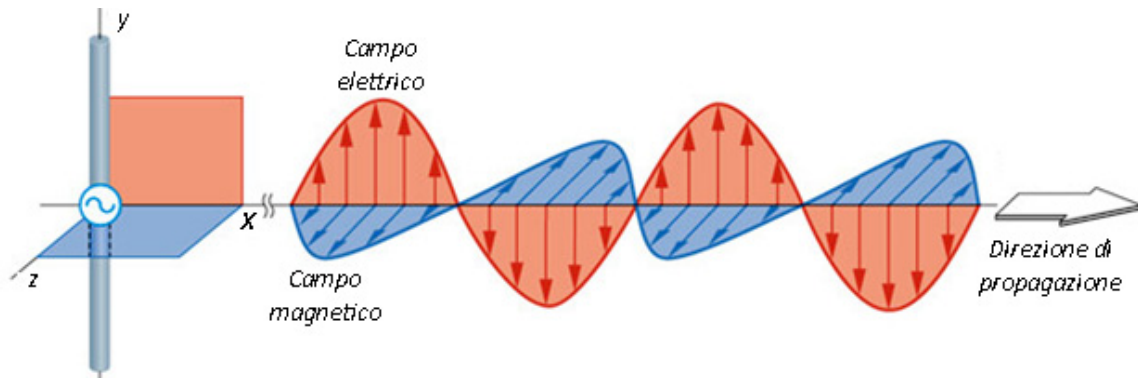


Figura 19: rappresentazione schematica di un'onda elettromagnetica

che l'onda raggiunge nel momento in cui la funzione seno vale +1 ($-1 \leq \sin \leq +1$).

$(\mathbf{kx} - \omega t)$ è l'argomento della funzione seno, e rappresenta un angolo, ovvero è adimensionale, un numero puro, quindi anche ogni singolo addendo è adimensionale.

Ne consegue che:

$$k = [L]^{-1} \quad \omega = [T]^{-1}$$

Più in particolare:

$$k = 2\pi/\lambda$$

dove λ = lunghezza d'onda e $1/\lambda$ = numero d'onda e:

$$\omega = 2\pi/T$$

Dove T = periodo, $1/T$ = frequenza f .

Da ciò si deduce che:

$$E = E_0 \sin[2\pi(x/\lambda - t/T)]$$

In sintesi si può descrivere un'onda con una funzione caratterizzata da un grafico sinusoidale; perciò è possibile definire le seguenti grandezze:

- **L'ampiezza (E_0)** è il valore massimo che la funzione raggiunge;
- **Il periodo (T)** è il tempo impiegato dall'onda a assumere di nuovo uno stesso valore con lo stesso andamento;
- **La frequenza (f)** è l'inverso del periodo, ovvero il numero di volte che l'onda si ripete nell'unità di tempo (1 secondo);
- **La lunghezza d'onda (λ)** è la distanza minima in cui l'onda riassume uno stesso valore con il medesimo andamento.

Dopo queste definizioni è possibile immaginare quale sia logicamente la relazione che lega alcune di queste grandezze: ad esempio un'onda caratterizzata da un periodo breve si ripete nel

tempo molte volte, ovvero con alta frequenza e avrà una lunghezza d'onda ridotta, mentre un'onda caratterizzata da un lungo periodo si ripeterà con una frequenza molto bassa e una grande lunghezza d'onda; il tutto indipendentemente dall'ampiezza.

Per completezza si possono ancora definire:

- $K=2\pi/\lambda$, dove K è il **vettore d'onda**.
- $\omega=2\pi/T$, dove ω è la pulsazione o frequenza angolare, ovvero la parte di angolo descritta dall'onda nell'unità di tempo.

L'ultima caratteristica da analizzare, relativamente ad un'onda elettromagnetica, è la sua velocità:

$$V=\Delta x/\Delta t$$

Molto semplicemente lo spazio percorso nell'unità di tempo.

Questo tipo di formulazione si adatta poco al moto ondulatorio, perciò è più pratico considerare un punto della curva, dotato di particolari caratteristiche, come $\sin=0$ o il culmine di una senoide, e valutare quanto esso si sposta nel tempo. Si noterà che è più pratico considerare la velocità come velocità di fase, ovvero come velocità con cui un'onda si sposta di una distanza pari alla lunghezza d'onda λ in un tempo pari ad un periodo T :

$$V=\lambda/T=\lambda f$$

E sostituendo:

$$V=\omega/K$$

Da tutto questo si deduce che una qualsiasi onda elettromagnetica può essere descritta conoscendo tre grandezze: E_0 , K e ω .

Pur essendo possibile descrivere l'onda anche solo grazie alla sua velocità, questa sarebbe una semplificazione, perché sarebbe trascurato che la velocità di propagazione dell'onda dipende non dall'emissione o dall'oscillazione, bensì dal mezzo attraverso cui essa avviene.

Nella pratica si fa riferimento a due sole grandezze per definire un'onda elettromagnetica, scegliendo tra esse quella più pratica e che consente di riferirsi a valori più agili da scrivere memorizzare e riportare.

Ad esempio le onde radio e televisive, che si propagano nell'aria, che si comporta praticamente come il vuoto, vengono descritte tramite la frequenza espressa in multipli di Hz.

Come si è già espresso poco fa, si preferisce descrivere le onde luminose attraverso la loro lunghezza d'onda espressa in nanometri (nm).

La luce, espressa in nanometri, occupa le lunghezze d'onda tra 380 e 780, passando dalla sensazione visibile del blu a quella del rosso; ai margini dello spettro visibile si trovano le radiazioni ultraviolette (inferiori a 380 nm) e i raggi infrarossi (superiori a 780 nm).

La sensibilità dell'occhio umano varia in relazione alla lunghezza d'onda; in altri termini l'uomo percepisce con maggiore facilità la lunghezza

d'onda di 555 nm, pari alla sensazione cromatica del verde.

In sintesi si può affermare che la luce è un fenomeno sì fisico, ma anche sensoriale: la sensibilità dell'occhio è nulla, ad esempio agli infrarossi, ma aumenta progressivamente per divenire massima a lunghezza d'onda corrispondente alla sensazione del verde, per poi ridiscendere progressivamente fino a d annullarsi verso i raggi ultravioletti.

Questa variazione si esprime attraverso la curva di "sensibilità spettrale" dell'occhio umano, in altre parole un grafico a campana che indica quanta parte, ad esempio di un Watt di energia, è percepita come luce, attraverso il valore $V(\lambda)$. Il fattore di visibilità spettrale varia da 0 a 1, e raggiunge il suo valore massimo in corrispondenza di 555nm, per i quali l'intera energia dell'onda elettromagnetica è visibile come luce dall'occhio; per altre lunghezze d'onda il valore di $V(\lambda)$ scende verso il valore nullo, suggerendo che solo una parte dell'energia dell'onda è in effetti visibile.

2. INTERAZIONE DELLA LUCE CON LA MATERIA

Ciò che è visibile della luce è il fenomeno macroscopico, ma per comprendere come essa interagisca con la materia, e quindi come avvenga la visione di tutto ciò che ci circonda, è necessario accennare ai fenomeni microscopici.

S'immagini di isolare nell'aria un atomo, avente un nucleo con una carica positiva ed elettroni, sia interni che di valenza, con carica negativa; il campo magnetico agisce solo sulle cariche in movimento (con una forza di Lorentz che è proporzionale anche alla velocità della carica); un atomo presente nell'aria che sia normalmente in movimento avrà in genere una velocità piccola, mentre i suoi elettroni possono subire o meno gli effetti a seconda della loro velocità o delle varie combinazioni tra i moti degli elettroni. Nella maggior parte dei materiali trasparenti, d'interesse per l'ottica, si può ritenere che la componente di campo magnetico dell'onda non produca sostanzialmente nessun effetto.

Ampliando il discorso, anche su una molecola (ad esempio di ossigeno) che si trova nell'aria, la forza di Lorentz non ha nessun effetto.

È diverso invece il discorso concernente il campo elettrico, che agisce sulle cariche, sia ferme che quelle in moto, mettendole in movimento con un moto oscillante, in cui l'accelerazione varia continuamente.

Una qualsiasi carica che fa questo tipo di moto emette a sua volta un'onda elettromagnetica; il tipo di emissione dipende dalle caratteristiche delle cariche coinvolte.

Per chiarire questo punto si ricordi dalla meccanica che quando si applica a una massa m una forza F abbiamo un'accelerazione a , legate da $F=ma$.

Questa relazione implica che a parità di forza se la massa è grande, l'accelerazione sarà piccola e viceversa; è il prodotto ma che deve rimanere

uguale alla forza.

Nel caso degli atomi sono di entità confrontabile sia le forze applicate al nucleo che quelle applicate agli elettroni, ma poiché la massa del nucleo è molto maggiore di quella degli elettroni, ne consegue che l'accelerazione del nucleo è molto piccola (il nucleo oscilla di poco), mentre gli elettroni subiscono un'accelerazione maggiore e oscillano con un'ampiezza molto grande.

Si ricordi, per inciso, che in un moto oscillatorio (ad esempio massa attaccata a una molla) la massa varia continuamente la sua velocità (anche invertendo il verso del moto) e perciò è soggetta ad un moto variamente accelerato.

Ovviamente questo avviene anche per tutte le molecole (ad es. di ossigeno, di azoto nell'aria, o di acqua). La molecola dell'acqua si può vedere come una grossa distribuzione di carica negativa formata dagli elettroni dell'ossigeno e da quelli degli elettroni d'idrogeno, il nucleo dell'O, e 2 protoni (H+) legati all'ossigeno: con questa distribuzione di carica tutti gli elettroni che stanno attorno al nucleo di O oscillano ampiamente seguendo il ritmo imposto dalle oscillazioni del campo elettrico, mentre il nucleo è sostanzialmente fermo (anche nell'acqua il campo magnetico non sortisce effetti). I protoni compiono piccole oscillazioni.

Ogni singola carica accelerata in moto oscillatorio emette un'onda elettromagnetica avente la stessa frequenza dell'onda, ma forma vettoriale diversa: un'onda sferica invece di un'onda piana. L'onda elettromagnetica generata dall'oscillazione di una carica è, infatti, diretta uniformemen-

te in tutte le direzioni dello spazio circostante la carica, per cui il fronte d'onda (luogo dei punti aventi la stessa fase) è una superficie sferica che si allontana man mano dal punto in cui viene generata l'onda.

Poiché, però, le sorgenti in una piccola regione di spazio sono tantissime (dell'ordine del numero di Avogadro) si producono altrettante onde sferiche generate tutte insieme e con la stessa frequenza.

In un qualsiasi punto dello spazio il risultato complessivo (dato dalla somma vettoriale dei campi appartenenti a ogni singola onda) è un'onda che non dà effetti nella direzione perpendicolare a quella dell'onda incidente, mentre ne forma una nella stessa direzione dell'onda incidente.

Nello studio delle onde elettromagnetiche è necessario premettere che tale tipo di onda resta invariata nel tempo e nello spazio, indipendentemente dalla distanza dalla sua sorgente; basti pensare alla luce proveniente da stelle di galassie remote: l'onda continua a viaggiare, ed è analizzabile strumentalmente, sebbene la stella che l'ha originata si sia spenta milioni di anni fa. Questo è possibile per la particolare natura dell'onda elettromagnetica, composta di due campi, uno elettrico e uno magnetico, ortogonali tra di loro; tali campi sono variabili nel tempo e questo garantisce la generazione di campi indotti, anche in assenza di una sorgente prossima.

Sia il campo magnetico che quello elettrico, che costituiscono un'onda elettromagnetica, hanno

una natura oscillatoria nel tempo e nello spazio; questa loro variazione continua è abbinata, in modo tale che i valori minimi, massimi e i valori nulli sia dell'uno che dell'altro siano coincidenti, anche se i loro rispettivi piani sono ortogonali. Questa configurazione specifica permette ai campi di auto generarsi come campi indotti, ovvero come campi secondari generati da variazioni del campo principale.

Dallo studio delle equazioni di Maxwell si evince un dato fondamentale: l'ampiezza massima del campo elettrico diviso l'ampiezza massima del campo magnetico è uguale alla velocità di fase (in sostanza le velocità di propagazione dell'onda).

Questa velocità tuttavia non è costante in ogni condizione possibile, ma varia in relazione alla sostanza attraversata; viene usata come pietra di paragone la velocità della luce nel vuoto, pari a 299'792'458 m/s solitamente semplificata in 300'000 km/s, questo valore è invece una costante universale definita c =velocità della luce nel vuoto.

La velocità della luce in una sostanza, e nel vuoto, dipende da due caratteristiche proprie del mezzo, la permeabilità magnetica relativa κ_m (grandezza che esprime l'attitudine di una sostanza a lasciarsi magnetizzare, calcolata in Henry al metro: H/m) e dalla permittività dielettrica relativa κ_e (grandezza fisica che descrive come un campo elettrico influenza ed è influenzato da un mezzo dielettrico, ed è determinata dalla capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza del campo e quindi ridurre il campo elettrico to-

tale nel materiale.

In breve la permittività è la predisposizione di un materiale a trasmettere, o meglio permettere, un campo elettrico).

Volendo esprimere questo concetto in funzione della velocità della luce si può scrivere:

$$n=c/v=\sqrt{\kappa_m \kappa_e}$$

dove n è l'indice di rifrazione, ovvero il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità di fase di un'onda.

Tale valore è sempre maggiore di 1, poiché non esiste alcuna sostanza in cui l'onda possa propagarsi più rapidamente che nel vuoto.

In una sostanza attraversata dalla luce, avvengono due fenomeni: la trasmissione della luce (cioè la propagazione nel mezzo) e i fenomeni connessi con l'assorbimento (ovvero la possibilità che la luce sia assorbita e poi trasformata oppure assorbita ed emessa nuovamente).

L'indice di rifrazione è costituito da una parte reale n e una parte immaginaria k , ed è chiamato indice di rifrazione complesso:

$$\tilde{n}=n+ik$$

n e k sono positivi, prendono il nome rispettivamente di "indice di rifrazione" vero e proprio, e di coefficiente di estinzione e ovviamente, variano con la frequenza.

L'indice di rifrazione complesso in funzione della frequenza è un parametro molto utile perché rappresenta tutte le caratteristiche otti-

che del materiale.

Per il suo studio occorre misurare il comportamento di un'onda luminosa nel materiale, ma ovviamente non è possibile eseguire misurazioni dentro il materiale, cioè misurare direttamente gli effetti dei campi elettrico e magnetico sulle cariche presenti all'interno del materiale. Non resta che fare considerazioni su ciò che avviene all'esterno: infatti, quando la radiazione arriva su una sostanza, può essere: riflessa, trasmessa o assorbita.

2.1. Fenomeni semplici: riflessione speculare e diffusa; rifrazione; trasmissione; assorbimento e dispersione ottica

La riflessione è il normale processo per cui la luce incidente ritorna nello stesso mezzo da cui è arrivata. L'interazione con i primi strati atomici del materiale fa sì che le onde sferiche riemesse da tutti gli elettroni possono formare un fascio di luce rivolto in direzione opposta rispetto alla superficie (angolo d'incidenza = angolo di riflessione).

Il processo di riflessione può dare effetti diversi secondo la qualità (rugosità) della superficie di separazione tra i due mezzi.

Normalmente se essa è sufficientemente liscia (rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione), la riflessione segue la normale legge della riflessione (riflessione speculare).

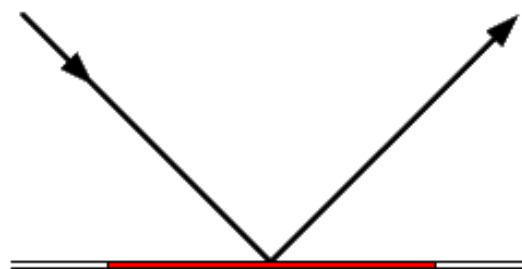


Figura 20: rappresentazione schematica della riflessione speculare

Quando la superficie di riflessione è irregolare si ottiene la riflessione diffusa: una superficie rugosa può essere vista come un insieme di piccole superfici con orientamento casuale, a ciascuna delle quali può essere applicata la legge della riflessione. Conseguentemente la luce è diretta in molteplici direzioni.

Per non avere riflessione diffusa, le irregolarità della superficie devono essere di dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda λ .

Solo in tal caso l'onda non ne è disturbata, cioè, non fa differenza se c'è una superficie inclinata in un modo o nell'altro, perché la distanza λ in cui variano i campi elettrico e magnetico è più grande della distanza in cui varia macroscopica-

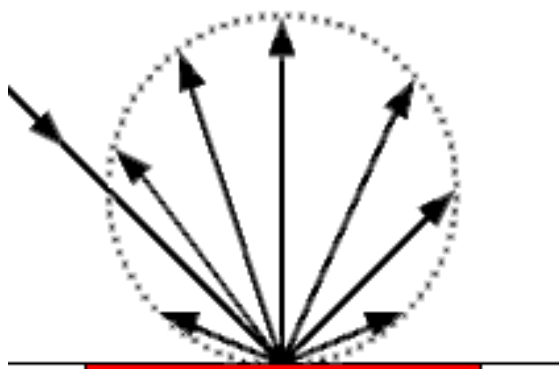


Figura 21: rappresentazione schematica della riflessione diffusa

mente la disposizione delle irregolarità.

Se invece le irregolarità sono maggiori o molto maggiori della lunghezza d'onda i campi elettrico e magnetico interagiranno in direzioni diverse con le varie aree.

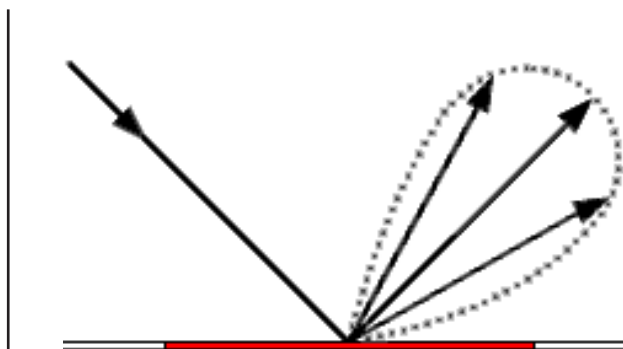


Figura 22: rappresentazione schematica della riflessione mista

La lunghezza d'onda della luce è compresa, nel visibile, tra i 380 e i 780 nm, cioè poco meno di un millesimo di mm, quindi per ottenere uno specchio efficace occorre levigare le asperità della superficie fino al di sotto del millesimo di mm.

Un esempio macroscopico è dato dalla differente immagine riflessa da uno specchio d'acqua calmo o increspato. È evidente che, poiché è più facile ottenere una superficie rugosa (carta, legno, muro, pavimento, ecc.) che una liscia (lastra di vetro, specchio) la riflessione diffusa è il processo più comune in natura, ma è anche il più difficile da misurare.

Nella riflessione speculare è facile misurare l'intensità del raggio riflesso, posizionando il rivelatore nella direzione stabilita dalla legge della riflessione. Nella misura della radiazione diffu-

sa, diretta in tutte le direzioni comprese in un angolo solido di 180° nel piano e 90° nello spazio, si utilizzano degli strumenti chiamati sfere integratrici, degli accessori comuni degli spettrofotometri.

La rifrazione, come già accennato, è la deviazione subita da un'onda che ha luogo quando questa passa da un mezzo ad un altro nel quale la sua velocità di propagazione cambia.

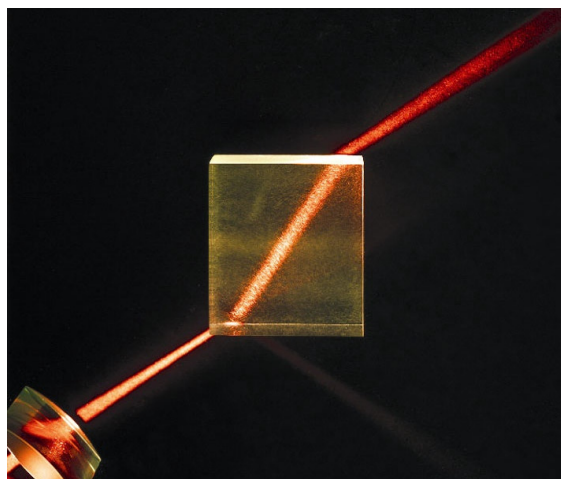


Figura 23: il fenomeno della rifrazione della luce

In ottica, la rifrazione avviene quando un'onda luminosa passa da un mezzo con un indice di rifrazione a un mezzo con un diverso indice di rifrazione. Sul bordo dei due mezzi, la velocità di fase dell'onda è modificata, cambia direzione e la sua lunghezza d'onda è aumentata o diminuita mentre la sua frequenza rimane costante. Il fenomeno, è facilmente osservabile e comprensibile, osservando un cucchiaio in un bicchiere d'acqua: per via della differenza degli indici di rifrazione di aria e acqua, il cucchiaio

sembrerà essere piegato nella sua parte immersa.

La trasmissione della luce è il fenomeno per cui l'onda elettromagnetica attraversa un materiale. La parte di radiazione che all'interfaccia non è riflessa, si propaga all'interno del materiale, cambiando la velocità e la direzione, per via della differenza di coefficiente di rifrazione tra i due materiali contigui.

Questa parte di radiazione è trasmessa, vale a dire che passa dall'altra parte del materiale e può essere anch'essa misurata da un rivelatore.

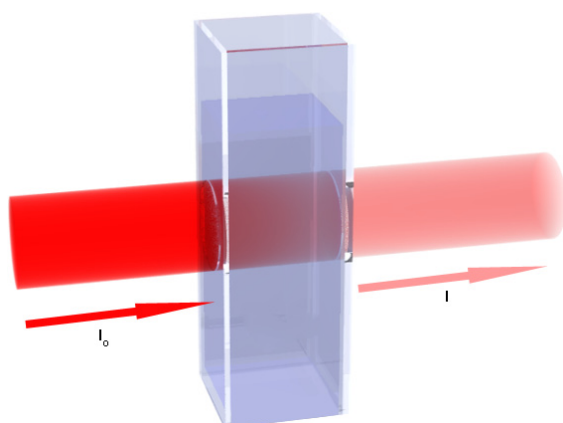


Figura 24: rappresentazione schematica della trasmissione e dell'assorbimento di un'onda

L'assorbimento avviene, come la trasmissione, all'interno della sostanza in cui la luce viaggia, è il fenomeno per cui l'onda elettromagnetica interagisce con la materia trasformandosi ad esempio in calore. Sintetizzando per semplicità questi tre fenomeni principali possono essere spiegati con tre esempi molto comuni: la riflessione è il fenomeno generato da uno specchio,

la trasmissione avviene attraverso una lastra di vetro o l'acqua, l'assorbimento avviene per tutte le altre sostanze che non si comportano in questo modo, ad esempio un muro di mattoni.

La dispersione ottica è un fenomeno che causa la separazione di un'onda in componenti spettrali con diverse lunghezze d'onda, a causa della dipendenza della velocità dell'onda dalla lunghezza d'onda. È spesso descritta in onde luminose, ma può avvenire in ogni tipo di onda che interagisce con un mezzo. La dispersione è anche chiamata dispersione cromatica per enfatizzare la sua dipendenza dalla lunghezza d'onda, in generale è dovuta al fatto che la risposta di un materiale alle onde dipende dalla loro frequenza.

Tale fenomeno si può osservare con il celebre esperimento del prisma ottico.

Questi problemi sono analizzati, dal punto di vista matematico, così come segue.

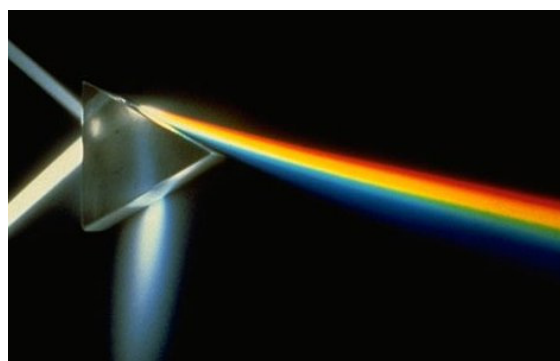


Figura 25: l'esperimento del prisma ottico

Il problema è semplificato definendo delle quantità relative (non assolute) che esprimono quanta intensità della radiazione incidente I_0

viene riflessa I_r e quanta viene trasmessa I_t da una superficie di separazione tra due mezzi 1 e 2 di diverso indice n_1 e n_2 .

Si definisce perciò il rapporto:

$I_r/I_0=R$, Coefficiente di riflessione (o Riflettività, o Riflettanza),

e similmente il rapporto:

$I_t/I_0=T$, Coefficiente di trasmissione (o Trasmettività, o Trasmittanza).

Ovviamente i coefficienti sono sempre minori di 1, perché i raggi riflesso o trasmesso non possono essere più intensi di quello incidente.

Sulla superficie non c'è assorbimento (è un meccanismo che avviene nel volume), per cui la radiazione può essere solo o trasmessa o riflessa: quindi necessariamente $R+T=1$.

I coefficienti dipendono dall'angolo d'incidenza (con una relazione che discende dalle equazioni di Maxwell) e dal tipo di polarizzazione rispetto al piano d'incidenza (il piano d'incidenza è quello contenente il raggio incidente e la normale alla superficie di separazione).

Per incidenza normale non solo si semplificano molto, ma sono gli stessi per entrambe le polarizzazioni (Leggi di Fresnel):

$$R=(n_1-n_2)^2/(n_1+n_2)^2$$

e

$$T=1-R=4n_1n_2/(n_1+n_2)^2$$

Da notare che R e T non cambiano se si scambiano i mezzi fra loro, cioè se la luce attraversa la superficie di separazione in direzione opposta.

In particolare le formule delle intensità si ricordano più facilmente se per il materiale si usa l'indice di rifrazione n relativo al mezzo in cui è immerso ($n=n_2/n_1$), sempre a incidenza normale. In genere il mezzo 1 è l'aria ($n_1=1$). In tal caso:

$$R=(n-1)^2/(n+1)^2$$

e

$$T=1-R=1-[(n-1)^2/(n+1)^2]=4n/(n+1)^2$$

Ipotizzando di essere in grado di misurare correttamente sia la radiazione riflessa sia quella trasmessa dal campione, è necessario comunque tenere conto dettagliatamente del percorso della luce per definire precisamente le varie grandezze.

Non va, infatti, dimenticato che la riflessione e la trasmissione avvengono a ogni superficie di separazione tra due mezzi otticamente diversi (cioè con differente indice di rifrazione complesso).

Il materiale d'indice n_1 ha un certo spessore L , ed è racchiuso tra le due superfici di separazione 1 e 2, rispettivamente con il mezzo di indice n_1 e quello di indice n_3 (per maggiore generalità: normalmente negli esperimenti il primo e l'ulti-

mo mezzo sono uguali).

La radiazione incidente ha un'intensità I_0 .

Il primo fenomeno che avviene è la riflessione (che supponiamo per semplicità sia speculare) dalla superficie 1 (per la quale valgono i due coefficienti R_1 e T_1): chiamata I_r .

A causa della perdita per riflessione, la radiazione I_t che entra nel materiale è comunque minore di I_0 :

$$I_t = I_0 T_1 = I_0 (1 - R_1)$$

Essa poi si propaga nel materiale lungo la direzione z da $z=0$ a $z=L$, ma contemporaneamente subisce un'attenuazione, secondo i meccanismi d'interazione visti in precedenza e descritti dal coefficiente di estinzione k .

Infatti l'equazione d'onda nella materia, dove il vettore d'onda \mathbf{K} va moltiplicato per \tilde{n} , diventa il prodotto di un termine che rappresenta un'onda che si propaga con un vettore d'onda $n\mathbf{K} = n2\pi/\lambda$ (cioè con lunghezza d'onda più corta, come è noto) e un termine che si può scrivere come:

$$\exp(-2\pi k/\lambda z)$$

che essendo un esponenziale con segno negativo è un fattore che diminuisce all'aumentare di z . Esso vale 1 per $z=0$ (sulla superficie della sostanza), poi diminuisce sempre di più man mano che la radiazione penetra dentro il materiale, senza mai arrivare a zero.

Poiché i due fattori sono moltiplicati fra loro, ne consegue che l'ampiezza dell'onda che si propa-

ga nel materiale diminuisce esponenzialmente, e si può scrivere come:

$$I(z) = I_0 (1 - R_1) e^{-\alpha z}$$

introducendo il "coefficiente di assorbimento" $\alpha = 2\pi k/\lambda$.

Più è grande k , più il materiale è assorbente per la lunghezza d'onda in esame; solo se $k=0$ il mezzo è perfettamente trasparente per quella lunghezza dell'onda.

Dimensionalmente α è l'inverso di una lunghezza e si misura in cm^{-1} .

L'andamento è esponenziale perché l'assorbimento avviene strato dopo strato, quindi attraversato un piccolo strato, l'intensità sarà diminuita di una certa percentuale, poi nello strato successivo subirà gli stessi processi e diminuirà della stessa percentuale e così via:

questo andamento è descritto da un esponenziale decrescente.

La propagazione e l'assorbimento continuano finché la luce non raggiunge la superficie 2 del materiale in $z=L$, dove l'intensità vale:

$$I(L) = I_0 (1 - R_1) e^{-\alpha L}$$

La luce che arriva alla superficie 2 (per la quale valgono i due coefficienti R_2 e T_2) subisce una parziale riflessione interna indicata con I_{r2} e, nel tornare indietro, incontrerà la superficie 1, subendo ancora riflessioni e trasmissioni multiple, e così via.

La parte non riflessa è invece trasmessa attra-

verso la superficie 2 con l'intensità I_{t1}

$$I_{t1} = I(L)(1-R_2) = I_0(1-R_1)(1-R_2)e^{-\alpha L}$$

In sostanza I_0 è l'intensità iniziale, $(1-R_1)$ è la percentuale persa nella prima riflessione, $(1-R_2)$ quella persa nella seconda riflessione e $e^{-\alpha L}$ è quella residua dopo l'assorbimento.

Per ricavare i parametri ottici del materiale occorre conoscere l'intensità incidente e misurare l'intensità di tutti i raggi riflessi e di tutti i raggi trasmessi.

Immaginando che il fenomeno avvenga con un angolo d'incidenza normale, tutti i raggi riflessi sono sovrapposti fra loro e lo stesso i trasmessi, per cui si può misurare solo il valore totale I_r e I_t . Tuttavia se I_r è bassa (ad es. il 5%) i raggi riflessi sono molto deboli, e solo i raggi trasmessi sono relativamente intensi (95%), anche in un materiale trasparente. In questi casi è sufficiente approssimare I_r e I_t rispettivamente con il primo raggio riflesso e il primo raggio trasmesso.

Ad esempio, se $R=1\%$,

$$I_{t1} = 98.01\% \text{ e } I_{t2} = 0.0098\%;$$

$$I_{r1} = 1.00\% \text{ e } I_{r2} = 0.9801\%$$

È interessante il caso in cui il primo e l'ultimo mezzo sono uguali, per cui $R_1=R_2=R$ e $T_1=T_2=T$: analizzando i percorsi dei raggi riflessi più volte si vede che:

- il primo raggio riflesso R_1 vale R .
- il secondo raggio riflesso R_2 fa due

passaggi attraverso le superfici di separazione ($TxT=T^2$) e una riflessione R dalla seconda superficie, per cui vale RT^2 .

- il terzo raggio riflesso R_3 fa sempre due passaggi attraverso le superfici di separazione ($TxT=T^2$) ma tre riflessioni interne, per cui vale R^3T^2 .
- il primo raggio trasmesso T_1 fa due passaggi attraverso le superfici di separazione e vale
- $TxT=T^2$
- il secondo raggio trasmesso T_2 , oltre a fare due passaggi attraverso le superfici di separazione, subisce due riflessioni interne e quindi vale R^2T^2 .

E così via.

Il fenomeno delle riflessioni multiple è alla base di particolari strutture (strati superficiali di diverso indice di rifrazione) usate in ottica sia per ottenere un trattamento antiriflesso, sia per ottenere specchi perfettamente riflettenti (e anche i filtri interferenziali).

Infatti, per un dato angolo d'incidenza e per una particolare frequenza della luce incidente, il differente cammino percorso nel materiale da due raggi riflessi consecutivi può dare luogo a un ritardo di fase corrispondente a una lunghezza d'onda (interferenza costruttiva=massima riflet-

tività) o a mezza lunghezza d'onda (interferenza distruttiva=minima riflettività).

Affinché questo accada, è però necessario che tra i vari raggi riflessi vi sia in origine una relazione di fase costante, cioè che siano coerenti, altrimenti il ritardo di fase finale sarà casuale e non vi saranno gli effetti desiderati.

Con la radiazione naturale (non coerente) questa condizione vale solo per spessori dei vari strati che siano confrontabili con la lunghezza d'onda, per cui la realizzazione di tali strutture richiede un controllo molto buono della qualità degli strati (indice di rifrazione e spessore).

Quando la riflettività è ancora minore (<1%), la luce in buona sostanza può solo essere assorbita o trasmessa: in questo caso l'equazione diventa più semplice perché con R_1 e R_2 nulli l'intensità trasmessa è $I_t = I_0 e^{-\alpha L}$ con attenuazione dovuta al solo assorbimento.

In questo va misurato solo I_t ed I_0 con due soli rivelatori.

Il rapporto $I_t/I_0 = e^{-\alpha L}$ è un numero legato all'assorbimento del materiale in funzione della lunghezza d'onda.

Se riportiamo in diagramma direttamente I_t , si ha una curva del tipo di quelle nella figura a destra (la trasmittività va da 0 a 1).

Calcolando il logaritmo in base 10 di $I_t/I_0 = e^{-\alpha L}$ a destra e a sinistra, si ottiene:

$$\log(I_t/I_0) = \log(e^{-\alpha L}) = -\alpha L \times \log e = -\alpha L / \ln 10 = -\alpha L / 2,30$$

Il segno negativo indica solo che c'è un'attenuazione, una quantità assorbita.

Il valore assoluto di $(-\alpha L / 2,30)$, pari all'opposto del logaritmo decimale del rapporto tra le intensità trasmessa e incidente, esprime le unità di assorbanza.

Ad esempio, se $I_t/I_0 = 0,1$, $\alpha L / 2,3 = 3$; se $I_t/I_0 = 0,001$, $\alpha L / 2,3 = 3$; ecc.

Il grafico dell'assorbanza in funzione della lunghezza d'onda costituisce lo spettro di assorbimento del materiale, in cui quindi le ordinate hanno una scala logaritmica.

Il vantaggio di usare una scala logaritmica è che i bassi assorbimenti vengono un po' attenuati, mentre sono evidenziati gli alti: sono perciò particolarmente utili per sapere a quali λ si presentano i picchi di assorbimento.

Esistono altri fenomeni che avvengono durante l'interazione della luce con la materia; si tratta della diffusione e dell'estinzione.

2.2 Fenomeni complessi: diffusione; estinzione

La diffusione, o **scattering**, è il fenomeno per cui durante la trasmissione un raggio luminoso attraversa una sostanza fortemente anisotropa, dotata di particolari caratteristiche.

È noto che sostanze come l'opale hanno la facol-

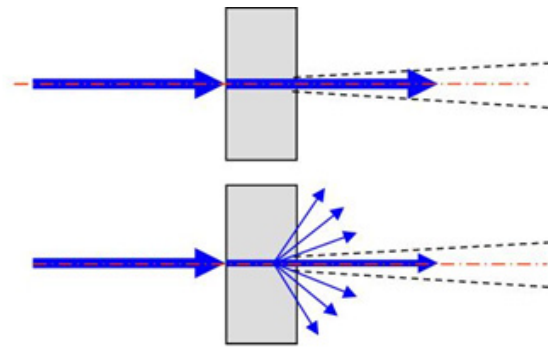


Figura 26: rappresentazione schematica della diffusione luminosa

tà di apparire uniformemente e pallidamente luminosi nel momento in cui sono colpiti dalla luce; questo avviene poiché il materiale al suo interno ospita particelle in grado di rifrangere la luce: in sintesi i fenomeni di rifrazione, spiegati sopra, avvengono, ripetuti migliaia di volte in scala microscopica, generando un effetto di dispersione del raggio luminoso.

Un materiale può essere costituito come aggregazione, miscela o soluzione di altre sostanze, ciascuna di queste è dotata di caratteristiche ottiche proprie, che ovviamente determinano effetti concatenati: l'esempio più semplice sono le bollicine sparse nell'acqua; qui un'onda nello spettro visibile penetra nel liquido, urta una bolla d'aria determinando una parziale riflessione e una rifrazione, la attraversa e nuovamente penetra nell'acqua e il fenomeno si ripete innumerevoli volte.

In questo modo i raggi luminosi sono ripetutamente riflessi, rifratti determinando un effetto di scomposizione del fronte d'onda, facendo così apparire il materiale luminescente.

La diffusione è in realtà un fenomeno molto fre-

quente, ad esempio la nebbia e le nuvole determinano effetti diffusivi molto forti; l'aria stessa, la nostra pelle, il latte sono esempi di materiali diffondenti.

Dal punto di vista matematico la diffusione è un fenomeno di difficile analisi, per via della sua complessità: in effetti, è impossibile prevedere come, quante volte, con che percorso un'onda luminosa sarà riflessa e rifratta dalle infinitesime particelle diffondenti ospitate da un materiale.

A questo fenomeno si farà riferimento più avanti, analizzandolo nello specifico del caso del ghiaccio.

Vi è infine **l'estinzione**, che non rappresenta un fenomeno a sé stante, ma è piuttosto una valutazione d'insieme di tutti i fenomeni sopra citati; dopo una parziale riflessione, un'onda elettromagnetica viene in parte assorbita, in parte trasmessa e in parte diffusa da una sostanza, ma se si immagina la massa d'acqua oceanica, ci si rende facilmente conto che la luce, sebbene penetri agevolmente questo mezzo, non riesce a raggiungere i fondali più profondi.

L'estinzione è dunque l'effetto finale della combinazione di tutti i fenomeni di assorbimento e diffusione, che fa affievolire fino all'esaurimento, un'onda luminosa.

Come si è già accennato, l'onda non svanisce, ma tramite l'assorbimento è semplicemente convertita in lunghezza d'onda non più visibili dall'occhio umano, come il calore.

2.3. Altri fenomeni d'interazione

- **Effetto fotoelettrico:** avviene quando l'energia luminosa assorbita è tale che gli elettroni aumentano la loro energia cinetica fino al punto di poter uscire dalla sostanza, superando l'elevato valore della barriera di potenziale (potenziale di estrazione) che normalmente impedisce loro di uscire, è perciò un effetto meccanico, perché gli elettroni estratti hanno caratteristiche cinetiche particolari che permettono di riconoscere la sostanza in esame.
- **Effetto Compton:** in cui si ha assorbimento parziale dell'energia della radiazione da parte di un elettrone e l'onda si propaga nel materiale ma cambiando frequenza e direzione.
- **Diffrazione dei raggi X:** è un'interazione elastica (senza cambiamento di frequenza) che cambia la direzione della luce (pur non essendo una normale riflessione dalla superficie); se si proiettano onde elettromagnetiche nel campo dei raggi X

(quindi a corta lunghezza d'onda) su materiali strutturalmente ordinati, i raggi riflessi che hanno interagito con il materiale vanno a formare delle figure d'interferenza la cui distribuzione nello spazio è caratteristica natura interna del materiale, cioè della varietà e distribuzione degli atomi costituenti.

- **Diffusione anelastica:** l'onda parzialmente assorbita interagisce con le oscillazioni del solido, è diffusa a vari angoli (non è una riflessione speculare) e inoltre avviene un cambiamento di frequenza, in relazione all'angolo di diffusione.
- **Luminescenza, fotoconduttività ed emissione stimolata** sono processi in cui si creano stati eccitati, cioè l'elettrone che riceve l'energia luminosa cambia la sua energia potenziale passando a livelli più alti.

In particolare la luminescenza è il fenomeno più comune.

Può avvenire sia in solidi sia in fluidi e richiede la presenza di livelli roto-vibrazionali; è caratterizzata dal fatto che la radiazione incidente sulla sostanza ha una frequenza maggiore di quella

emessa.

In un sistema complesso in cui ci sono tanti livelli energetici, anche vibrazionali e rotazionali, se un fotone assorbito ha energia sufficiente per imporre a un elettrone una transizione da un livello a un altro, il processo si completa spontaneamente con il ritorno dell'elettrone nello stato fondamentale, dopo il passaggio intermedio in un livello più basso dello stato eccitato o altro livello.

La fotoconducibilità riguarda i solidi semiconduttori e isolanti, in cui il salto di energia, che l'elettrone compie, lo porta in uno stato di conduzione, così un elettrone, che normalmente non lo sarebbe, diventa disponibile per la conduzione di corrente elettrica.

L'emissione stimolata è simile alla luminescenza, ma non è un processo spontaneo poiché la transizione di emissione avviene alla presenza di altra radiazione dello stesso tipo; è ciò che avviene nel laser.

3. IL GHIACCIO: GENERALITÀ

“Ghiaccio” dal Latino GLACIES, mediante una forma di barbara latinità GLACIA-US, da un tema greco GALAK contratto in GLAK, germogliante da una radice GAL, GHAR essere chiaro, splendere, rilucere.

PIANIGIANI O., Vocabolario etimologico della lingua italiana, Genova, Edizioni Polaris 1991.

“Ghiaccio” è genericamente la fase solida, solitamente cristallina, di una sostanza non metallica che normalmente, a temperatura ambiente (temperatura 298 K e pressione 1 bar, se non diversamente specificato) si manifesta allo stato liquido o gassoso.

“Ghiaccio” è anche il nome comune usato per designare l'acqua allo stato solido.

Esso si manifesta sotto numerose forme e con svariate caratteristiche, è normalmente presente in natura in enormi quantità e rappresenta un elemento essenziale dei fenomeni climatici globali, perché protagonista del ciclo dell'acqua. Per la fisica, a pressione atmosferica standard (101,325 Pa) la transizione di fase avviene quando l'acqua liquida è raffreddata sotto gli 0 °C (273,15K, 32 F).

Pressione e temperatura combinate sono le due condizioni decisive per il passaggio di fase liquido-solido e possono dare luogo a fenomeni di scioglimento e solidificazione inaspettati.

A causa del fenomeno di sopraffusione, infatti, l'acqua può rimanere allo stato liquido anche sotto gli 0°C ; inoltre il ghiaccio può formarsi anche a temperature superiori a 0°C con pressioni inferiori a quella normale e, viceversa, rimanere allo stato liquido o gassoso fino a -30°C , con pressioni più alte.

Esistono quattordici differenti fasi solide dell'acqua, ma la più comune è il I_h , che è l'unica presente nella biosfera, a parte una piccola percentuale di I_c rintracciabile nell'alta atmosfera.

Le varie fasi del ghiaccio formate a pressioni differenti da quella normale hanno una struttura cristallina diversa da quella del ghiaccio comune.

Ghiaccio, acqua e vapore acqueo possono coesistere al punto triplo, che per il sistema terrestre si trova alla temperatura di $273,16\text{ K}$ ($0,01^{\circ}\text{C}$) e alla pressione di $611,73\text{ Pa}$.

Una caratteristica insolita del ghiaccio congelato alla pressione di un'atmosfera è che il solido ha una densità che è circa dell'8% inferiore a quella dell'acqua liquida.

Il ghiaccio ha una densità di $0,917\text{ g/cm}^3$ a 0°C , mentre l'acqua ha una densità di $0,9998\text{ g/cm}^3$ alla stessa temperatura. L'acqua liquida è più densa, in pratica $1,00\text{ g/cm}^3$, a 4°C e diventa meno densa quando le sue molecole iniziano a formare i cristalli esagonali di ghiaccio, mentre la temperatura scende verso gli 0°C (la stessa parola "cristallo" deriva dal termine greco "kristallos" che significa "gelo").

Ciò è dovuto ai legami che si formano tra le molecole d'acqua per mezzo degli atomi d'idroge-

no, che allineano le molecole in maniera meno efficiente, in termini di volume, quando l'acqua congela. Il risultato di ciò è che il ghiaccio galleggia sull'acqua liquida, un fattore importante per il clima della Terra.

In quanto solido cristallino, il ghiaccio è considerato un minerale.



Figura 27: Inclusioni d'aria e detriti nel ghiaccio

Una prima distinzione tra le varie tipologie di ghiaccio si basa sulle caratteristiche cristallografiche: il ghiaccio e la neve con cui abbiamo a che fare normalmente hanno una struttura cristallina esagonale (ghiaccio I_h).

Solo leggermente meno stabile (metastabile)

della forma esagonale è quella cubica (ghiaccio I_c). Tuttavia raffreddare il ghiaccio I_h , provoca la formazione di una diversa configurazione nella quale si muovono i protoni, il ghiaccio **XI**.

Sfruttando combinazioni di raffreddamento riscaldamento a varie pressioni si manifestano nuovi tipi di ghiaccio, ognuno collocato in aree diverse del diagramma di fase del ghiaccio.

Questi sono **II, III, V, VI, VII, VIII, IX, e X**.

Con cautele particolari tutti questi tipi possono essere riportati a temperatura ambiente.

I vari tipi differiscono per la loro struttura cristallina, ordinamento e densità.

Ci sono due fasi metastabili del ghiaccio: la **IV** e la **XII**.

Il ghiaccio **XII** fu scoperto nel 1996.

Nel 2006 sono state scoperte le fasi **XIII** e **XIV**.

Così come in forme cristalline l'acqua può esistere in stati amorfi: acqua solida amorfa, ghiaccio amorfo a bassa densità, ghiaccio amorfo ad alta densità, ghiaccio amorfo ad altissima densità e acqua vetrosa sottoraffreddata.

Tutte queste tipologie sono distinte l'una dall'altra in base alle loro caratteristiche di densità, o in base alla temperatura e pressione di congelamento, tuttavia è facile immaginare che sia possibile distinguere in natura, altre tipologie di ghiaccio distinte in relazione al luogo, alle circostanze meteorologiche e al metodo di congelamento con cui esse si manifestano.

Saranno trattate in seguito più diffusamente sia la distinzione cristallografica sia quella morfologica, è tuttavia importante, in questa prima analisi, notare come il ghiaccio sia al tempo stesso

oggetto di catalogazioni differenti, poiché fenomeno naturale con cui il genere umano e le sue varie culture si è trovato a coesistere, lottare o collaborare e sia fenomeno scientifico complesso.

Per anticipare ciò che sarà meglio spiegato in seguito: la brina è un tipo di ghiaccio che si forma per brinamento (che è appunto il termine tecnico per il passaggio diretto dallo stato aeriforme a quello solido) del vapore presente nell'aria a contatto con oggetti freddi.

Essa contiene un'alta porzione di aria intrappolata, che la fa apparire bianca invece che trasparente e le conferisce una densità che è circa un quarto di quella del ghiaccio puro.

La galaverna si forma invece per il congelamento delle gocce d'acqua contenute nella nebbia sulle superfici, quando la temperatura è inferiore a 0°C.

Il ghiaccio può anche formare ghiaccioli, simili come aspetto alle stalattiti, quando l'acqua gocciola e si rcongela.

I clatrati idrati sono forme di ghiaccio che contengono molecole di gas intrappolate nella sua struttura cristallina.

Il Pancake ice è una formazione di ghiaccio creata generalmente in zone con condizioni meno calme.

Alcune altre sostanze (in particolare forme solide di sostanze che si trovano solitamente come fluidi) vengono anch'esse chiamate "ghiaccio": il ghiaccio secco, ad esempio, è il termine con cui si riferisce comunemente al biossido di carbonio allo stato solido.

4. STRUTTURA MICROSCOPICA: CRISTALLOGRAFIA E ACCENNI ALLA CLASSIFICAZIONE

Una breve introduzione relativa alle caratteristiche dei cristalli, renderà più semplice la comprensione delle differenze esistenti tra le varie fasi cristalline del ghiaccio.

Un cristallo (dal greco κρύσταλλος, *krýstallos*, ghiaccio) è un oggetto solido costituito da atomi, molecole e/o ioni aventi una disposizione geometricamente regolare, che si ripete indefinitamente nelle tre dimensioni spaziali, detta reticolo cristallino.

In altre parole è una formazione minerale solida che ha una disposizione periodica e ordinata di atomi ai vertici di una struttura reticolare; la presenza di tale organizzazione atomica conferisce al cristallo una forma geometrica definita. I cristalli si formano per solidificazione graduale di un liquido o per brinamento di un gas.

Possono formarsi spontaneamente in natura o essere prodotti per cristallizzazione.

Una caratteristica distintiva dei cristalli, dovuta proprio alla loro struttura, è l'anisotropia, in altre parole la capacità di presentare proprietà fisiche e chimiche dipendenti dal loro orientamento nello spazio.

La formazione e le caratteristiche di un cristallo dipendono dalla velocità e dalle condizioni della solidificazione. Gli stessi liquidi che formano il granito talvolta sono eruttati in superficie come lava vulcanica e si raffreddano in fretta.

Se il raffreddamento è più lento, si forma una roccia afanitica, con cristalli troppo piccoli perché siano visti; invece se il raffreddamento avviene in maniera ancora più lenta, si forma una roccia porfirica. La struttura cristallina di un minerale gli conferisce una forma geometrica poliedrica. Se invece il minerale non è dotato di una struttura cristallina, sarà identificato come "amorfo" ossia privo di una forma definita.

E' noto che alla pressione atmosferica e a temperature pari o inferiori a 0°C si forma il ghiaccio comune, ma è altresì vero che con condizioni differenti di temperatura e pressione l'acqua possa comunque passare alla fase solida: si tratta in ogni caso di ghiaccio, ma con caratteristiche cristallografiche diverse dal ghiaccio comune. Qui di seguito sono illustrate tutte le tipologie di ghiaccio conosciute, considerando le condizioni cui esse si manifestano e le caratteristiche cristallografiche possedute:

Ghiaccio amorfo: è il privo di struttura cristallina. Esiste in tre forme distinte: a bassa densità (LDA), che si forma alla pressione atmosferica o inferiore; ad alta densità (HDA); ad altissima (VDHA), che si forma ad alte pressioni.

Ghiaccio I_h : è il ghiaccio dotato di struttura cristallina esagonale, il ghiaccio ordinario di acqua comune. Nella biosfera è quasi l'unica tipologia di ghiaccio presente, tranne una piccola percentuale di ghiaccio I_c , che occasionalmente compare nelle parti alte dell'atmosfera.

Il ghiaccio I_h è dotato di caratteristiche tali da

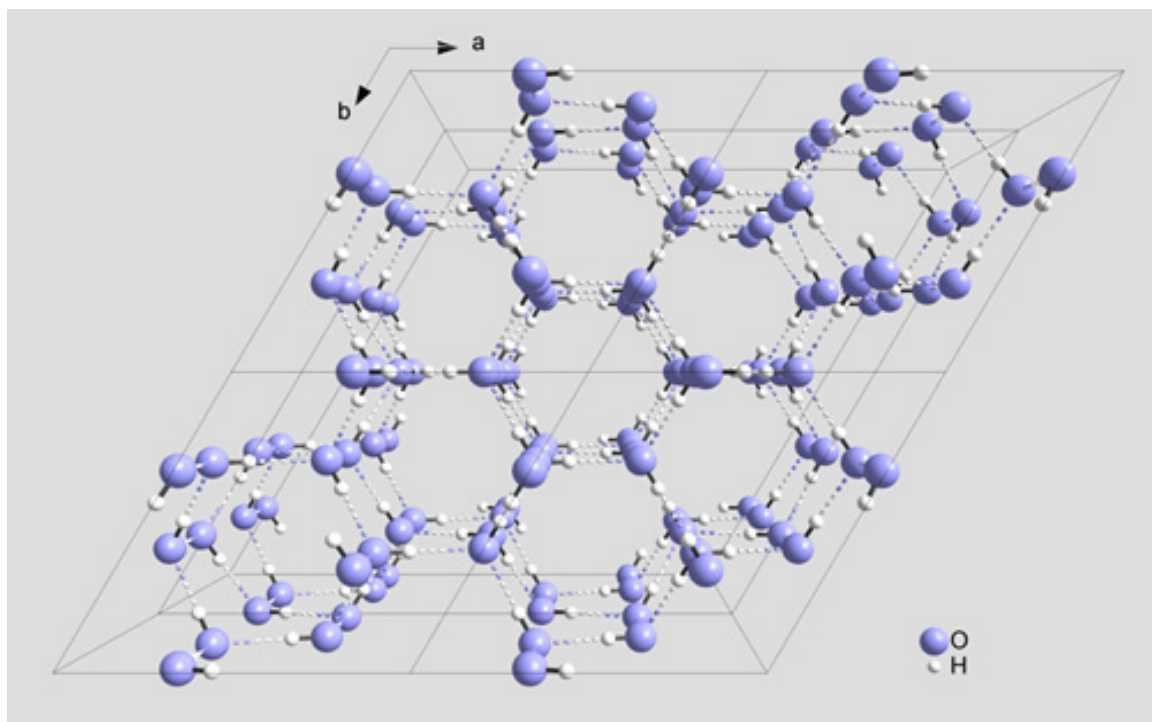


Figura 28: schema della struttura cristallina del ghiaccio

determinare il ciclo dell'acqua, fondamentale per garantire la regolarità del clima globale e, di conseguenza, la vita sulla terra.

Esso è stabile a partire da $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($73,1\text{ K}$, $328\text{ }^{\circ}\text{F}$) e può esistere a pressioni di $0,2\text{ Gpa}$.

Ha, com'è noto, una densità inferiore rispetto a quello dell'acqua liquida, pari a $0,917\text{ g/cm}^3$, per via del suo reticolo cristallino assai rado.

La densità del ghiaccio I_h non è però costante, ma varia in relazione alla temperatura, più precisamente essa aumenta al calare della temperatura: scendendo a $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ la densità è $0,9340\text{ g/cm}^3$.

Il calore latente di fusione è pari a 5.987 J/mol ; il calore latente di sublimazione è 50.911 J/mol . Tali valori sono spiegati dalla forza di coesione dovuta al legame idrogeno.

Infine l'indice di rifrazione del ghiaccio I_h è $1,31$. Nel 1935, il chimico statunitense, due volte premio Nobel, Linus Pauling propose il modello cristallografico del ghiaccio I_h : approssimativamente può essere spiegato come una serie di piani increspatisi sovrapposti, costituiti da esagoni regolari a nido d'ape; a ogni vertice si trova un atomo di ossigeno, gli spigoli sono invece rappresentati dai legami idrogeno.

I piani si susseguono l'uno sopra l'altro, il secondo speculare rispetto al primo lungo l'asse stesso dei piani: in questo modo si crea un'alternanza di piani secondo uno schema ABAB, in cui i piani A sono speculari ai piani B.

Questa struttura è molto regolare, infatti, la lunghezza dei lati degli esagoni e la distanza tra due piani successivi sono pressoché identiche,

ovvero 275 pm. Gli angoli dei legami, nel reticolo cristallino sono pressoché pari a quelli di una struttura tetraedrica regolare, ovvero 109,5°. Tali dimensioni e tali angoli danno origine a un reticolo di prismi esagonali di dimensioni sufficientemente grandi da ospitare al loro interno un'intera molecola d'acqua, questo spiega la differenza di densità tra l'acqua e il ghiaccio.

Ghiaccio **I_c**: è una variante metastabile a reticolo cubico del ghiaccio; gli atomi di ossigeno sono disposti in un reticolo a diamante.

Ghiaccio **II**: è una forma cristallina romboedrica di ghiaccio, con una struttura molto ordinata.

Ghiaccio **III**: è cristallino e di struttura tetragonale.

Ghiaccio **IV**: è una fase romboedrica metastabile di ghiaccio.

Ghiaccio **V**: è una forma cristallina monoclina di ghiaccio.

Ghiaccio **VI**: è una forma cristallina tetragonale di ghiaccio.

Ghiaccio **VII**: è una forma cristallina cubica di ghiaccio.

Ghiaccio **VIII**: è una forma tetragonale di ghiaccio.

Ghiaccio **IX**: è una forma cristallina tetragonale metastabile di ghiaccio.

Ghiaccio **X**: è una forma cristallina cubica.

Ghiaccio **XI**: è una forma ortorombica.

Ghiaccio **XII**: è una fase cristallina metastabile.

Ghiaccio **XIII**: è una forma cristallina monoclina di ghiaccio.

Ghiaccio **XIV**: è una fase cristallina ortorombica

di ghiaccio.

Ghiaccio **XV**: è una fase non ancora riscontrata, ma che si presuppone che si manifesti raffreddando l'acqua a temperature di 108-80 K e pressioni di 1,1 GPa.

Queste qui riportate sono tutte le tipologie di ghiaccio conosciute; come si evince da questa elencazione, molte di queste fasi cristalline sono simili tra loro, differendo solo per la stabilità o instabilità degli atomi nel reticolo e non per la forma del reticolo stesso.

Molte di queste fasi sono inoltre state ottenute tramite processi di laboratorio, in altre parole pressioni artificialmente alte e temperature bassissime, condizioni che in natura, almeno nella biosfera, non si possono manifestare, o si manifestano assai raramente.

In effetti, si possono raggiungere temperature molto basse e pressioni elevatissime, in natura, ma in ambienti come gli strati più profondi dei ghiacci polari eterni; è chiaro che queste sono condizioni estreme, per l'uomo e per lo studio stesso delle fasi cristallografiche del ghiaccio.

Questi studi sono tuttavia sufficienti per individuare la tipologia di ghiaccio che interessa in questa trattazione: il ghiaccio **I_h**.

Esso è il ghiaccio che comunemente si forma nella biosfera, e quello che si incontra per effetto dei fenomeni meteorologici, quindi il tipo di ghiaccio che si utilizza nelle piste di pattinaggio, oggetto di questo studio.

5. STRUTTURA MACROSCOPICA: PASSAGGI DI STATO E FENOMENI NATURALI

Fin qui è stata fatta un'analisi cristallografica del ghiaccio, ma questo solo punto di vista non è sufficiente: anche nello studio delle varie fasi del ghiaccio visto fin qui, vi sono state occasioni per comprendere che l'acqua, congelando dalla fase liquida o gassosa, genera forme di ghiaccio cristallograficamente identiche, ma molto diverse alla vista.

Per cominciare a comprendere questo tipo di differenze si può introdurre una breve trattazione riguardante i vari fenomeni meteorologici spontanei, che interessano la generazione di ghiaccio; così è possibile avere una prima idea generica delle varie forme naturali di ghiaccio. Al fine di ottenere una prima panoramica su quali sono le possibili forme in cui il ghiaccio si può presentare in natura, si procederà con un'analisi delle condizioni generali che conducono al fenomeno.

Analizzando gli aspetti cristallografici, si è potuto verificare come pressione e temperatura siano due elementi che condizionano fortemente la formazione del ghiaccio; il congelamento a pressioni bassissime o altissime, genera ghiacci con caratteristiche cristalline assai diverse e determina anche innalzamenti o abbassamenti della temperatura di congelamento.

In natura, o più precisamente sul nostro pianeta, all'interno della biosfera si può ragionevol-

mente considerare stabile la pressione atmosferica, mentre la temperatura varia ampiamente. Sono quindi altri gli aspetti da prendere in considerazione per comprendere le innumerevoli forme con cui il ghiaccio si manifesta, in altre parole: la temperatura dell'aria, da cui dipende la velocità di congelamento; l'umidità dell'aria; il momento, il luogo e altri ancora.

Per semplificare la comprensione di questo fenomeno, è consigliabile prendere in considerazione le modalità e i casi concreti di alcune tra le più note e diffuse forme di ghiaccio, cercando di fare attenzione ai fenomeni che per effetto di umidità e temperatura possono formarsi su una pista di ghiaccio all'aperto.

Uno dei modi con cui si genera il ghiaccio è il brinamento, in altre parole il passaggio diretto dell'acqua dallo stato gassoso a quello solido, dall'aria a contatto con superfici fredde.

La brina, ad esempio, è un deposito di ghiaccio granuloso dall'aspetto cristallino a forma di scaglie o aghi.

La brina da irraggiamento è la più comune, e si forma soprattutto su superfici che tendono a perdere calore: è frequente soprattutto durante le notti invernali con cielo sereno e calma di vento, condizioni che favoriscono la dispersione del calore.

Si forma per il brinamento del vapore acqueo su una superficie fredda (suolo, oggetti, tetti): quindi occorre che il punto di rugiada sia maggiore della temperatura superficiale ma inferiore a 0 °C. Tale fenomeno può manifestarsi sulla superficie di una pista specialmente se la sua

superficie è liscia e intatta e la sua temperatura è più bassa di quella dell'aria, in altre parole se il refrigeratore è in funzione.

La neve è una tipologia di precipitazione nella forma di acqua ghiacciata cristallina, che consiste in una moltitudine di minuscoli cristalli di ghiaccio tutti aventi di base la forma esagonale, per via della matrice cristallina.

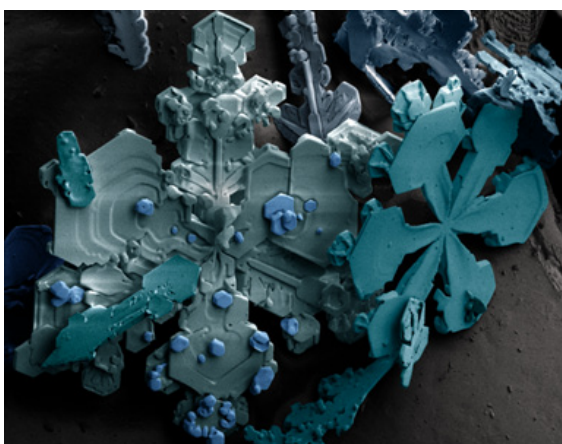


Figura 29: alcuni cristalli di ghiaccio; è evidente la matrice esagonale dei cristalli

Poiché è composta di piccole parti grezze, è un materiale granulare. Ha una struttura aperta ed è quindi soffice, purché non sia schiacciata dalla pressione esterna.

La neve si forma nell'alta atmosfera, quando il vapore acqueo, a temperatura inferiore a 0°C sublima e passa dallo stato gassoso a quello solido e riesce a raggiungere il terreno senza sciogliersi. Tuttavia, alla presenza di uno o più dei seguenti fattori: violente precipitazioni, forti moti verticali, bassa umidità, aria molto gelida in quota, la neve può cadere, anche se per brevi periodi, con temperature positive superiori ai

2°C.

Secondo le condizioni atmosferiche e della temperatura, la neve a terra può avere una consistenza molto diversa.

Appena caduta, se sotto zero, la neve ha consistenza leggera e polverosa, mentre se si è sopra zero i fiocchi si uniscono in agglomerati più grandi, e a terra diventa molto pesante, e facilmente compattabile.

Se nel secondo caso la temperatura scende in seguito sotto zero, cosa molto frequente in pianura, la neve ghiaccia, e prende la consistenza di polvere mista a ghiaccio.

Se invece nevicava sotto zero, e poi la temperatura va sopra zero, cosa molto frequente in montagna, la neve diventa più pesante.

Successivi passaggi sopra e sotto zero generano la neve trasformata, che è molto compatta ed è il tipo di neve che si trova a volte in primavera.

Il vento, invece, forma una crosta, molto rigida e spessa sopra la neve polverosa, meno spessa sulla neve più molle.

Questo fenomeno è interessante, per via del fatto che il ghiaccio, ridotto in polvere, per effetto dell'azione delle lame dei pattini, acquista un aspetto molto simile alla neve, ed è soggetto agli stessi fenomeni di indurimento a cui essa è soggetta.

Quanto più la pista è usurata e quanto più intensa è l'attività svolta, maggiore sarà il deposito di detriti generati dalle lame.

Una pista di piccole dimensioni, che non ha la possibilità di essere rigenerata da una macchina rasaghiaccio avrà caratteristiche molto prossi-

me a quelle della neve compattata e ghiacciata. L'oggetto di questo studio è tuttavia uno strato omogeneo e uniforme di ghiaccio, perciò per prima cosa saranno riepilogate in sintesi tutte le caratteristiche fisiche, chimiche, cristallografiche del ghiaccio comune, per poi analizzare, e questa è la seconda fase oggetto di questo studio, quali siano le caratteristiche da prendere in considerazione per analizzare il comportamento del ghiaccio in relazione alla luce.



Figura 30: i detriti di ghiaccio che generano per effetto dei pattini

6. PROPRIETÀ CHIMICHE E FISICHE

Il ghiaccio, essendo la fase solida dell'acqua, condivide con essa la formula chimica: H_2O , in natura tuttavia esso si manifesta sotto diversi gradi di purezza, miscelato o mescolato con altre sostanze durante la fase liquida, facendo sì che tali sostanze estranee rimangano intrappolate durante la cristallizzazione.

È un minerale reperibile in ogni parte del mon-



Figura 31: la superficie usurata di una pista di ghiaccio outdoor

do e sotto molteplici aspetti, dai cristalli di neve agli iceberg, fino ai ghiacciai perenni.

L'acqua assume più forme in natura.

Allo stato solido è nota come ghiaccio, allo stato aeriforme è nota come vapore acqueo.

Sono note anche altre due forme solide, quella del ghiaccio vetroso e quella del solido amorfo, non cristallino, simile al vetro.

L'acqua è una delle poche sostanze esistenti (insieme a gallio, bismuto e antimonio) in cui il processo di solidificazione avviene con un aumento di volume specifico pari a circa 0,09 l/kg (alla temperatura di 0 °C e alla pressione di 1 atm). Ciò comporta che alla diminuzione della temperatura, la pressione di passaggio di stato solido-liquido aumenti sensibilmente: si ha una pendenza negativa della linea di passaggio solido-liquido nel diagramma pressione-temperatura. In particolare, per ogni centesimo di grado Celsius (0,01 °C) di diminuzione della temperatura si ha un aumento della pressione di fusione pari a circa un'atmosfera.

Questa relazione è verificata fino alla pressione di 2.070 atm e alla temperatura di $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, oltre la quale si hanno altri stati allotropici.

In condizioni normali (a pressione di 1atm) l'acqua vaporizza alla temperatura di $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Come per tutte le altre sostanze, nella trasformazione è necessario fornire una certa quantità di calore detto calore latente, che nel caso dell'acqua è più elevato di ogni altra sostanza nota: a condizioni di 0°C e di un'atmosfera questo calore di vaporizzazione è, infatti, pari a 2.501 kJ/kg .

L'acqua allo stato liquido presenta diverse anomalie:

- Punto di ebollizione molto alto;
- Volume molare piuttosto basso;
- Calore specifico elevato con un minimo a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Viscosità che presenta un minimo alle alte pressioni;
- Notevole aumento di volume nel congelamento;
- Un massimo della massa volumica che indica la presenza, sotto la corrispondente temperatura, di uno stato liquido che in modo anomalo all'aumentare della temperatura si contrae.

Per spiegare queste anomalie si tende ad ammettere che l'organizzazione cristallina, dovuta

nel ghiaccio ai legami idrogeno, sussista ancora nell'acqua liquida, costituendo un edificio macromolecolare lacunare con legami interni mobili che diminuiscono di numero all'aumentare delle temperature e che formano un insieme di agglomerati polimerici a grappolo in equilibrio dinamico, e di molecole libere o legate in catene o in anelli.

Come si è visto, a differenza della maggior parte delle altre sostanze, per le quali la forma solida è più densa di quella liquida, il ghiaccio è meno denso dell'acqua liquida. La densità dell'acqua è, infatti, massima a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ciò è dovuto al fatto che il volume molare dell'acqua aumenta all'abbassarsi della temperatura, con conseguente diminuzione della densità, e galleggiamento per spinta di Archimede.

Questa insolita espansione dell'acqua a basse temperature costituisce un vantaggio importante per tutte le creature che vivono in ambienti di acqua dolce d'inverno.

L'acqua, raffreddandosi in superficie, aumenta di densità e scende verso il fondo innescando correnti convettive che raffreddano uniformemente l'intero bacino.

Quando la temperatura in superficie scende sotto i $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ questo processo si arresta, e per la spinta di Archimede l'acqua più fredda rimane in superficie, dove, con un ulteriore calo della temperatura, forma uno strato di ghiaccio.

Se l'acqua non avesse questa particolarità, i laghi ghiaccerebbero interamente, e di conseguenza tutte le forme di vita presenti morirebbero.

La situazione nelle acque marine è in qualche

modo differente. Il sale contenuto nell'acqua abbassa sia il punto di congelamento dell'acqua di circa 2 °C, (per il fenomeno dell'abbassamento crioscopico) sia la temperatura cui l'acqua raggiunge la sua massima densità fino a circa 0 °C. Nelle acque oceaniche i moti convettivi che portano verso il fondo l'acqua più fredda non sono bloccati dal gradiente di densità, come avviene nelle acque dolci.

Le creature che vivono sul fondo degli oceani artici sono adattate a vivere a temperature prossime a 0 °C.

Alla normale salinità marina, l'acqua congela a circa -1,9 °C. Il ghiaccio che si forma è sostanzialmente privo di sale ed ha densità paragonabile a quella del ghiaccio di acqua dolce.

Questo ghiaccio galleggia sulla superficie, mentre il sale che ne è stato "espulso" va ad aumentare salinità e densità dell'acqua vicina, la quale scende per convezione verso il fondo.

Le condizioni di temperatura e pressione in cui le fasi, solida, liquida e gassosa di una sostanza esistono contemporaneamente in equilibrio tra loro sono definite: punto triplo.

Per l'acqua il punto triplo è usato come riferimento di temperatura, avendo fissato per convenzione che questi è a 273,16 K (ossia 0,01 °C); la pressione al punto triplo dell'acqua è di 611,2 Pa, valore molto basso, se si considera che al livello del mare la pressione atmosferica è mediamente 101,300 Pa.

L'acqua possiede un'elevata tensione superficiale, osservabile tramite la formazione di gocce, proprietà anch'essa importante per la vita.

Un esempio è il trasporto dell'acqua negli xilemi degli steli vegetali; la tensione superficiale mantiene la colonna d'acqua unita e forze adesive mantengono l'acqua aderente allo xilema. Colonne altrettanto alte e sottili di liquidi meno coesi e meno aderenti andrebbero a spezzarsi formando sacche d'aria o di vapore, rendendo inefficiente fino all'impossibilità il trasporto del liquido attraverso lo xilema.

L'acqua pura è un buon isolante elettrico (cioè un cattivo conduttore).

Essendo anche un buon solvente, spesso reca in sé tracce di sali disciolti in essa, che, con i loro ioni la rendono un buon conduttore di elettricità.

In teoria il pH dell'acqua pura a 25 °C è 7.

In pratica, date le sue buone capacità solventi, l'acqua pura è difficile da trovare in natura.

Per semplice esposizione all'aria, l'acqua ne dissolve l'anidride carbonica, formando una soluzione molto diluita di acido carbonico che può arrivare fino a un valore di pH 5,7.

Similmente si comportano le gocce di pioggia, che presentano sempre una seppur minima acidità. La presenza di ossidi di zolfo o di azoto nell'atmosfera, tramite la loro dissoluzione nelle gocce di pioggia, porta a precipitazioni acide aventi valori di pH ben inferiori (3,5÷2,5), i cui effetti sull'ambiente sono ben più seri.

Il pH dell'acqua di mare è tra 7,7 e 8,3.

Un'importante caratteristica dell'acqua è data dalla polarità della sua molecola, con momento di dipolo molecolare pari a 1,84 D.

La molecola dell'acqua forma un angolo di

104,45° con l'atomo di ossigeno al vertice e i due atomi d'idrogeno alle due estremità.

Dato che l'ossigeno ha un'elettronegatività maggiore, il vertice della molecola ospita una parziale carica elettrica negativa (δ^-), mentre le estremità recano una parziale carica elettrica positiva (δ^+). Una molecola che presenta questo squilibrio di cariche elettriche è detta: dipolo elettrico. Le cariche fanno sì che le molecole siano attratte reciprocamente l'una dall'altra. Quest'attrazione nell'acqua è particolarmente intensa, prende il nome di legame idrogeno e spiega molte delle proprietà fisiche tipiche dell'acqua, benché il legame idrogeno sia molto più debole dei legami covalenti interni alla molecola stessa.

La presenza del legame idrogeno spiega, ad esempio, l'alto punto di fusione e di ebollizione: è, infatti, richiesta una maggiore energia (rispetto a sostanze meno polari) per rompere i legami idrogeno che tengono unite le molecole le une alle altre. L'acido solfidrico, H_2S , simile per geometria ma incapace di formare legami idrogeno, è un gas a temperatura ambiente, pur avendo un peso molecolare quasi doppio rispetto all'acqua.

Sempre al legame idrogeno è da attribuire l'elevata capacità termica specifica.

Il legame idrogeno spiega anche l'insolito comportamento dell'acqua quando questa congela: a causa di questo legame, quando la temperatura si abbassa fino al punto di congelamento, le molecole di acqua si organizzano in una struttura cristallina dalla simmetria esagonale tipica

del ghiaccio, che è meno densa dell'acqua liquida.

Il fatto che il ghiaccio sia meno denso dell'acqua liquida porta con sé una curiosa conseguenza: il ghiaccio può essere fuso anche tramite l'applicazione di un'adeguata pressione.

Tale pressione è piuttosto elevata, si pensi, per confronto, che la pressione esercitata dalla lama di un pattino abbassa il punto di fusione del ghiaccio su cui si trova di circa 0,09 °C.

Allo stato solido ogni molecola di acqua si lega con altre quattro mediante legami idrogeno in una configurazione tetraedrica, dando luogo a una conformazione tridimensionale a strati costituiti di anelli esagonali.

Allo stato liquido la continua formazione e rottura di legami idrogeno dà luogo ad aggregati fluttuanti (chiamati "domini") molto estesi (dell'ordine di decine di molecole), dovuti al fatto che la formazione di un legame-idrogeno fra due molecole induce la formazione di un altro legame-idrogeno in una sorta di reazione a catena. Ogni dominio ha una struttura simile a quella del ghiaccio; mediamente ogni molecola di acqua è circondata da altre 4,7 molecole e la distanza fra due atomi di ossigeno di molecole attigue è circa 3 Å, rendendo così molto influenti le interazioni a corto raggio.

L'esistenza di questi domini impartisce all'acqua un elevato grado di strutturazione, che ne determina molte caratteristiche peculiari.

Chimicamente l'acqua è un buon solvente.

Le proprietà solventi dell'acqua sono essenziali per gli esseri viventi, poiché consentono lo svol-

02 ACQUA - CLASSIFICAZIONE

Acqua

Nome IUPAC (Unione Internazionale di Chimica Pura ed Applicata)

monossido di diidrogeno

idrossido di idrogeno

ossano

acido ossidrillico

Caratteristiche generali

Formula bruta o molecolare

H₂O

Massa molecolare

18,0153 g/mol

Aspetto

liquido incolore

Proprietà chimico-fisiche

Densità (g/l, in c.s.)

999,972 a 277,15 K (4 °C)

Temperatura di fusione (K)

273,15 (0,00 °C)

Temperatura di ebollizione (K)

373,15 (100,00 °C)

Punto triplo

273,16 K (0,01 °C), 611,73 Pa

Punto critico

647 K (374 °C), 2,2064 × 10⁷ Pa

Tensione di vapore (Pa) a 293,15K

2.338,54

Viscosità dinamica (mPa.s a 20°C)

1

gersi delle complesse reazioni chimiche che costituiscono le basi della vita stessa (ad esempio, quelle che avvengono nel sangue o nel citoplasma della cellula).

Il comportamento di solvente dell'acqua è determinato dalla polarità della sua molecola: quando un composto ionico o polare è disciolto in acqua, viene circondato dalle molecole di acqua, le quali, si inseriscono tra uno ione e l'altro o tra una molecola e l'altra di soluto (grazie alle loro piccole dimensioni), orientandosi in modo da presentare ad ogni ione (o estremità polare) del soluto la parte di sé che reca la carica opposta; questo indebolisce l'attrazione tra gli ioni (o tra le molecole polari) e rompe la struttura cristallina; ogni ione (o ogni molecola polare) si

ritrova quindi solvatato, cioè circondato completamente da molecole d'acqua che interagiscono con esso.

In generale, le sostanze ioniche polari (quali acidi, alcoli e sali) sono abbastanza solubili in acqua, mentre non lo sono le sostanze non polari (quali grassi e oli).

Le molecole non polari non si miscelano all'acqua, perché per quest'ultima è favorita dal punto di vista energetico la formazione di legami a idrogeno al suo interno, piuttosto che la formazione di legami di Van der Waals con molecole non polari.

L'acqua è un anfotero, cioè un composto capace di comportarsi sia da acido sia da base.

Formula chimica: H_2O .

Composizione: massa molecolare 18,0152 u (corrispondente alla somma $2 \times 1,0079$ u + 15,9994 u delle masse molecolari di 2 atomi di idrogeno e di 1 di ossigeno). H=11,19% O=88,81%

Il ghiaccio è la sostanza con più fasi cristalline che sia conosciuta in natura; sarà qui discussa unicamente la cristallografia del ghiaccio classificato come ghiaccio I_h .

Sistema: esagonale.

Classe: diesagonale dipiramidale.

Forma: cristalli prismatici esagonali.

Colore: il ghiaccio è sostanzialmente incolore, tuttavia esso si mostra bianco o blu pallido o verde pallido; ciò non dipende dalla sostanza in sé, ma dalla dinamica della solidificazione e dalla presenza di sostanze disciolte o sparse nell'acqua prima del congelamento e che intervengono nel dare una sfumatura di colore.

Se si congela propriamente dell'acqua distillata, il ghiaccio così ottenuto è incolore.

Densità: $0,917 \text{ g/cm}^3$

Durezza: la durezza si misura valutando la resistenza che un minerale offre all'abrasione; nella scala di Mohs, che elenca 10 materiali dal più

tenero al più duro, il ghiaccio si colloca tra i materiali "teneri" (che si scalfiscono con l'unghia) o "semiduri" (scalfiti da una punta d'acciaio), con un punteggio intermedio di 2,5, tra il gesso e la calcite.

Frattura: in un minerale si presenta quando i legami fra gli strati di atomi sono pressoché uguali nelle varie direzioni. In questo caso, il minerale si rompe secondo superfici irregolari oppure secondo superfici lisce ma incurvate (come in un pezzo di vetro), altrimenti si può parlare di sfaldatura. Il ghiaccio è caratterizzato da frattura concoide, cioè che segue superfici lisce ma curve.

Lucentezza: nei minerali è una caratteristica che dipende da più fattori contemporanei quali l'indice di rifrazione, la dispersione, la densità ottica e la tessitura della superficie (che può essere la faccia di un cristallo o una superficie di frattura).

Non è quindi possibile misurare la lucentezza. Essa si può comunque distinguere in metallica (tipica delle sostanze che assorbono completamente la luce) e non metallica (tipica dei corpi quasi trasparenti).

Empiricamente, si può classificare a grandi linee la lucentezza del ghiaccio definendolo poco riflettente, con lucentezza grassa-oleosa o molto riflettente, con lucentezza vitrea; ciò dipende, come per altre caratteristiche di questa sostanza, dal modo con cui avviene la solidificazione: dell'acqua pura e calma congelando produce un

ghiaccio simile al vetro, una massa di cristalli di neve è invece più opaca.

Luminescenza: è un fenomeno fisico che consiste nell'emissione di fotoni di luce visibile o invisibile da parte di materiali eccitati da cause diverse dall'aumento di temperatura.

La luminescenza nasce dalla proprietà di alcuni materiali di assorbire quantità discrete di energia, poi restituita sotto forma di fotoni di energia inferiore. Secondo questa distinzione il ghiaccio si presenta non-fluorescente, cioè non in grado di emettere autonomamente luce visibile.

Trasparenza: è la proprietà di un materiale di lasciarsi attraversare dalla luce; una sostanza "trasparente", o più correttamente in mineralogia "diafana", è chiaro ed è possibile vedere attraverso di esso; una sostanza "traslucente" permette alla luce di attraversarlo, ma in maniera diffusa, cioè non è possibile vedere attraverso il suo spessore, ma la luce può comunque attraversarlo. Quest'argomento, di centrale importanza per questa trattazione, sarà approfondito più avanti.

Il ghiaccio, per via della sua caratteristica di assumere conformazioni differenti in conseguenza dal modo con cui si forma, può essere definito sia "trasparente" sia "traslucente".

Vena: Il colore della vena di un minerale è il colore che esso mostra se finemente polverizzato; il ghiaccio, se sottoposto a questo tipo di prova, si mostra bianco.

7. CARATTERISTICHE OTTICHE

Il fulcro di questo studio, che darà poi origine alle scelte progettuali, è la relazione esistente tra ghiaccio e luce e il comportamento del primo quando è investito e attraversato dalla seconda. Le proprietà ottiche sono perciò, in questa sede, di fondamentale importanza.

Indice di rifrazione: è un parametro macroscopico, solitamente indicato col simbolo n , che rappresenta il fattore numerico per cui la velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica viene rallentata, rispetto alla sua velocità nel vuoto, quando questa attraversa un materiale.

Essendo funzione della lunghezza d'onda, della radiazione elettromagnetica e della natura del materiale attraversato, la sua misura in condizioni controllate può essere usata per identificare il materiale stesso. Ad esempio in chimica sono comunemente effettuate misure dell'indice di rifrazione allo scopo di trarre indicazioni analitiche. In funzione dei parametri solvente, lunghezza d'onda incidente e temperatura, si esegue la misura del parametro utilizzando un rifrattometro.

L'indice di rifrazione è un'ottima approssimazione in moltissimi casi di uso pratico ma rimane un'approssimazione del reale comportamento delle onde elettromagnetiche.

Esistono casi in cui non è possibile definire un

indice di rifrazione.

Nel caso del ghiaccio l'indice di rifrazione 1,31 (n a $\lambda=589,3\text{nm}$), pressoché identico a quello dell'acqua.

Coefficiente di riflessione: o riflettività spettrale è il rapporto tra le intensità della radiazione riflessa e l'intensità di quella incidente, per questo motivo il suo valore è inferiore a 1 e spesso viene espresso in forma percentuale.

Nel caso di una radiazione che incida ortogonalmente su una superficie, il coefficiente di riflessione è trascurabile.

Il ghiaccio è tuttavia un materiale dalle caratteristiche complesse, anche a livello superficiale, cosa che rende assai difficile valutarne il coefficiente di riflessione.

La superficie del ghiaccio può, infatti, apparire lucida o opaca, liscia o granulosa, secca o umida e per ciascuna di queste possibilità la porzione di intensità riflessa varia sensibilmente; è possibile suggerire alcuni dei valori plausibili, scegliendo poi, caso per caso, quello più prossimo alle condizioni del ghiaccio considerate:

- Neve con film ghiacciato: 0,75.
- Neve fresca: 0,8-0,9.
- Ghiaccio oceanico: 0,5-0,7.
- Ghiaccio nero: 0,1.
- Ghiacciaio: 0,15-0,35.
- Oceano: 0,06.

- Vetro comune 0,04.

Sono stati inseriti anche i valori relativi al vetro comune e all'oceano, al fine di comprendere meglio quanto, il coefficiente di riflessione dipenda in larga misura dalla trasparenza del materiale. Sono note le facoltà riflettenti del vetro, ma è altrettanto evidente che, sebbene la sua superficie sia in grado di riflettere la luce, e quindi le immagini, la gran parte della radiazione luminosa lo attraversa e che, di conseguenza, i valori del coefficiente di riflessione siano molto bassi.

Coefficiente di assorbimento: la parte di radiazione luminosa incidente su una superficie che penetra in un materiale è parzialmente assorbita dalla sostanza e convertita in calore.

Il ghiaccio ha, allo stato puro, la stessa capacità di assorbire dell'acqua, e varia sensibilmente in relazione alla lunghezza d'onda considerata: dai 400 ai 500 nm il coefficiente è più o meno costante, cresce gradualmente tra i 500 e i 600 nm, per poi avere un rapido incremento oltre i 600 nm. Per meglio comprendere il problema, si può considerare il caso degli oceani: il limite cui la luce penetra è circa a 200 m, che, in funzione della limpidezza dell'acqua, può variare da 50 m fino a 400 m. Ad esempio, in assenza di inquinamento antropico, il mediterraneo è uno dei mari più limpidi, la cui zona "afotica", cioè priva di luce comincia intorno ai 400 m.

Da tutte le considerazioni fatte fin qui, si evince

che il ghiaccio è un materiale molto complesso, dotato di caratteristiche ottiche tali da rendere assai difficile valutare e quantificare le modalità con cui la luce si propaga attraverso esso.

Di per sé, il ghiaccio, privo d'impurità, d'inclusioni saline, bolle d'aria e altro, è identico all'acqua allo stato liquido, dal punto di vista ottico: cioè quasi del tutto trasparente; tuttavia va precisato che la vera differenza dipende proprio dalle altre sostanze disciolte e che vi rimangono intrappolate durante il congelamento.

In effetti, anche in questo caso, in prima analisi, non sembrerebbe dover sussistere alcuna differenza tra acqua allo stato liquido e solido, dal punto di vista ottico, tuttavia il congelamento determina lo sprigionarsi e la migrazione di bollicine di gas, normalmente disciolte nel liquido, oppure la cristallizzazione delle inclusioni di sali, anch'essi disciolti nell'acqua liquida.

Quindi, a completa identità chimica e di miscelazione con impurità di vario genere, corrispon-

dono differenze fisiche visibili tra acqua e ghiaccio, come la presenza di microbolle concentrate nel mezzo della massa di ghiaccio, assenti invece nell'acqua.

Bisogna perciò comprendere i principali fenomeni che determinano l'attenuazione della luce attraverso uno strato di ghiaccio: la riflessione, la rifrazione, l'assorbimento e la dispersione; nei primi tre fenomeni sopra elencati, la presenza di bolle o cristalli di sale nella massa ghiacciata, per via della loro quantità di molto inferiore rispetto a quella di acqua che li ospita, possono tranquillamente essere trascurati.

Nel caso della diffusione, invece, il fenomeno dipende proprio dalla presenza d'impurità, senza le quali il fenomeno non si verificherebbe affatto: congelando dell'acqua distillata purissima in condizioni controllate si otterrebbe del ghiaccio privo di ogni impurità e persino di bolle, esente perciò dal fenomeno di diffusione.

Data un'onda elettromagnetica incidente su una

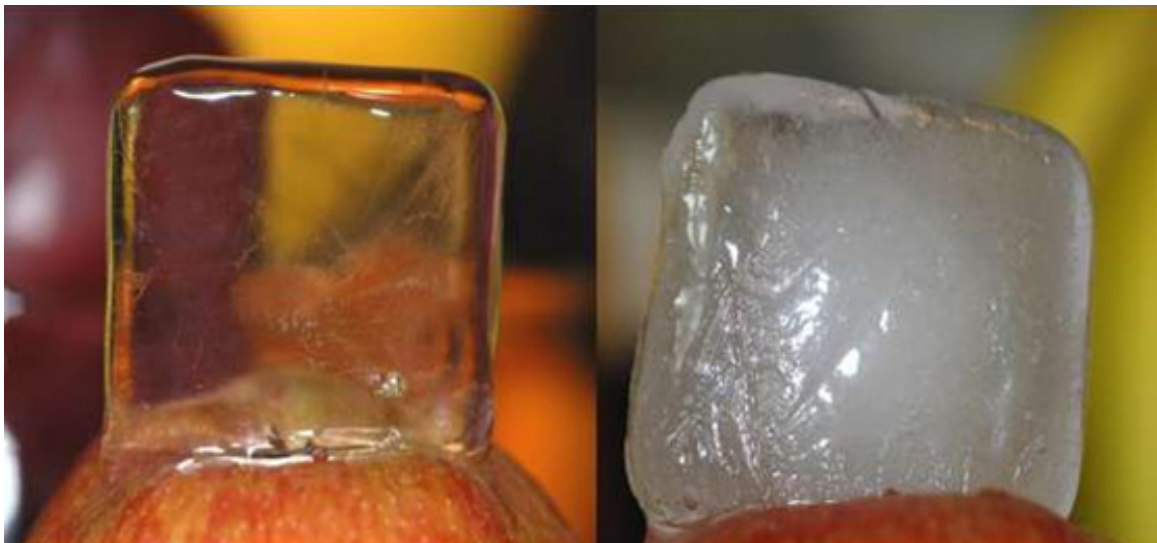


Figura 32: ghiaccio perfettamente puro e ghiaccio con inclusioni d'aria a confronto

superficie, è facile immaginare che parte di essa penetri oltre la superficie e che la rimanente parte sia riflessa.

Tale fenomeno avviene con modalità differenti, dipendenti dalle caratteristiche del materiale; nel caso di una superficie di ghiaccio la riflessione che si manifesta è di tipo misto, ovvero unisce aspetti tipici della riflessione speculare e di quella diffusa. La riflessione è valutata in base alle teorie di Fresnell, grazie alle quali, noti gli indici di rifrazione, è possibile calcolare la quantità di luce riflessa da una superficie.

La quota parte di onda elettromagnetica che non è riflessa, penetra oltre la superficie del mezzo considerato, ma la diversità dei due mezzi, in termini chimici, determina un rallentamento dell'onda. Poiché l'onda elettromagnetica tende a percorrere la strada energeticamente meno dispendiosa, si assisterà a una deviazione rispetto alla sua direzione originaria, dovuta, conformemente alla legge di Snell, ai differenti indici di rifrazione.

Questo fenomeno ottico occorre a ogni interfaccia tra due sostanze; in base alla legge di Snell è possibile prevedere la cosiddetta "riflessione interna totale", fenomeno secondo il quale se l'angolo d'incidenza del flusso supera l'angolo critico, esso è completamente riflesso all'interno del mezzo senza superarne l'interfaccia.

Qualunque sostanza ha la capacità di assorbire parte della radiazione elettromagnetica che la attraversa, e quindi anche parte della radiazione visibile, convertendola in calore.

Alcuni materiali sono maggiormente assorben-

ti di altri, così come alcuni sono selettivamente assorbenti, cioè catturano più facilmente le onde a una data lunghezza piuttosto che altre. Il ghiaccio è una di queste sostanze e, nella fattispecie, assorbe con minore facilità le onde che danno la sensazione visiva del blu, e per questo che esso appare sovente azzurro-blu.

Perciò, per valutare la quota parte di onda elettromagnetica che attraverso il ghiaccio è assorbita, è necessario considerare ogni lunghezza d'onda e il relativo coefficiente di assorbimento, altrimenti indicato come "indice di rifrazione immaginario", a lungo e tuttora oggetto di studio, poiché assai più dipendente rispetto all'indice di rifrazione semplice dalla lunghezza d'onda. In effetti, sono stati necessari numerosi studi ed esperimenti per stilare un elenco degli indici di rifrazione immaginari del ghiaccio, per ogni lunghezza d'onda, esperimenti per altro effettuati su campioni di ghiaccio naturali o realizzati in laboratorio, perciò assai diversi in termini di purezza del materiale e quindi delle sue doti di assorbenza spettrale.

Infine la diffusione (o scattering) è il fenomeno per cui un'onda elettromagnetica che attraversa una sostanza, se incontra un ostacolo, una bolla d'aria o una particella di sale, con diversi indici di rifrazione, viene, proprio per effetto della rifrazione, deviata, se sul suo percorso dovesse incontrare numerose impurità, questo si ripeterebbe ancora, e se tale fenomeno avvenisse per un intero fronte d'onda, sarebbe facile immaginare che la luce sarebbe diffusa attraverso il materiale. Lo scattering è appunto la diffusio-

ne per effetto delle bolle d'aria e delle impurità. Esso è un fenomeno molto complesso, dovuto a migliaia di rifrazioni consecutive, per migliaia di direzioni differenti, perciò difficile da valutare, non solo per via della complessità delle particelle presenti nel ghiaccio, ma anche a causa della difficoltà di verificare la loro distribuzione, la loro densità e la loro interazione.

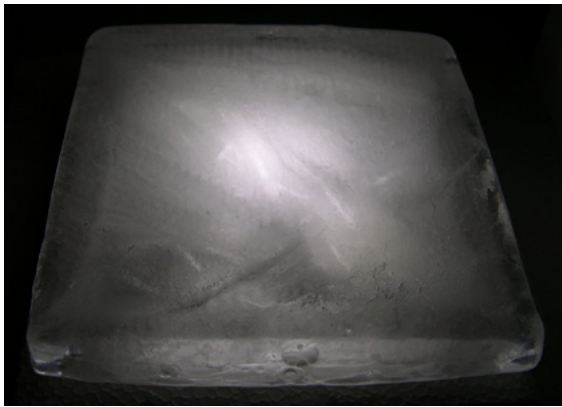


Figura 33: un semplice esperimento realizzato per documentare il fenomeno della diffusione della luce nel ghiaccio nella completa oscurità

In effetti, il calcolo matematico dello scattering è per lo più teorico, ovvero è un modello che simula l'effetto finale con buona approssimazione, ma procedendo per semplificazioni.

Per il suo calcolo interviene il **coefficiente di scattering**, dimensionalmente analogo a quella di assorbimento, anche se, a differenza di quest'ultimo risulta essere pressoché indipendente dalla lunghezza d'onda, poiché le dimensioni delle impurità, bolle d'aria o sali disciolti ecc., hanno dimensioni tra il decimo di millimetro e il millimetro, evidentemente molto più grandi dei 380, o 780 nanometri delle lunghezze

d'onda del visibile, sicché diffrazioni e interferenze possono essere ignorate.

Inoltre, maggiore è la differenza tra i coefficienti di rifrazione, maggiore sarà la deviazione subita da un singolo raggio.

Esiste un parametro che sintetizza gli ultimi due fenomeni, l'assorbimento e lo scattering, detto "coefficiente di estinzione" che suggerisce l'attenuazione dell'intensità del raggio luminoso in relazione alla distanza libera percorsa da esso, e la distanza necessaria al suo totale esaurimento. Il "coefficiente di estinzione" è, però, un parametro specifico per ogni sostanza esaminata e dipende da molti fattori, come la composizione chimica e la presenza di impurità; inoltre esso non indica in alcun modo quale sia il comportamento della luce dovuto alle ripetute rifrazioni che compongono lo scattering, perciò è da considerarsi un parametro solo quantitativo e non qualitativo, in quanto rappresentato dalla semplice somma dei coefficienti di assorbimento e scattering. E' tuttavia molto utile valutarne l'ordine di grandezza, al fine di comprendere a quale profondità è in grado di penetrare in un volume di ghiaccio un raggio luminoso.

A questo riguardo, esattamente come nel caso dello scattering, non è possibile fornire dei dati che siano universalmente validi, per effetto della natura multiforme e dell'aspetto variabile del ghiaccio; si può, però, individuare quali siano i valori estremi, partendo dagli studi di ottica fin qui eseguiti sul ghiaccio marino, salino, di acqua pura e privo o meno di bolle.

Sintetizzando si può affermare che i valori scien-

tificamente più diffusi riguardano i valori di coefficiente di estinzione del ghiaccio artico, formato sia di acqua marina gelata sia di neve compatta, insomma ghiaccio sì, ma molto complesso e stratificato, tali valori si assestano tra 1,5 e 2,2 m^{-1} , il che indichi che, in questi casi la luce possa procedere per 0,66 m o 0,45 m prima di esaurirsi. Valori come questi suggeriscono che un raggio luminoso si estingua al massimo penetrando poco oltre due metri dopo la superficie di un blocco di ghiaccio.

La ricerca scientifica ha però valutato anche il caso, che ha la valenza di un valore di riferimento, del ghiaccio puro, ovvero quello privo di sali, e altre sostanze disciolte, e privo di bolle di gas al suo interno; in questo caso il valore sale notevolmente, attestandosi su valori pressoché identici a quelli dell'acqua pura.

E' chiaro che questo coefficiente di estinzione altro non è che il semplice coefficiente di assorbimento, poiché in questo caso il ghiaccio non presenta alcuna delle sostanze perturbanti e la luce lo attraversa senza intralcio secondo le sue caratteristiche ottiche pure, ma questo è un modello quasi puramente teorico.

Va inoltre chiarito che il coefficiente di scattering suggerisce sì l'incidenza di urti elastici e riflessioni che il raggio luminoso incontra in un materiale diffondente analizzato, ma non è in grado di indicare quanta parte di questo raggio, e in che direzione venga riflesso al termine delle successive iterazioni a livello macroscopico.

Al fine di comprendere quest'aspetto si è proceduto ad una sperimentazione, cercando di tro-

vare un modello matematico che fornisse con semplicità di calcolo questo tipo di informazioni; il processo sperimentale e i suoi esiti finali saranno descritti esaurientemente più avanti.

I. CARATTERISTICHE GENERALI

In queste pagine si concentrerà l'attenzione sulle tipologie di piste di ghiaccio mobili oggetto di studio di questa tesi.

Posto che la tecnologia, le modalità di realizzazione e la struttura di base di questo tipo di impianti non varia da una tipologia ad un'altra, bensì può variare solo qualche accorgimento tecnico tra le varie aziende installatrici, si offrirà una descrizione delle caratteristiche generali e delle specifiche tecniche, considerandole universalmente accettabili.

Al fine di verificare la versatilità di applicazione delle nuove tecnologie a Led, in questo campo di applicazione, sarà presa in esame una pista olimpionica ad uso professionistico, dotata di gradinate coperte, anch'esse temporanee.

Le considerazioni fatte per essa saranno ragionevolmente valide anche per piste più piccole, di 15x30 m ad esempio, prive di qualunque altro elemento se non le semplici strutture accessorie, quali biglietteria e deposito pattini.



Figura 34: una pista temporanea di medie dimensioni

Tale scelta è stata fatta in ragione delle esigenze di verifica considerate: si cercherà infatti di comprendere quanto la tecnologia a Led sia in grado di rispondere alle esigenze normative, in ambito illuminotecnico, per grandi superfici su cui si svolgono attività sportive professionistiche, esibizioni di livello ancora professionistico, in concomitanza con attività di ripresa televisiva, con la stessa facilità con cui può soddisfare le esigenze di una pista cittadina, su cui gli appassionati e gli amatori possono praticare il pattinaggio a scopo esclusivamente ricreativo.

I requisiti normativi richiesti, come già evidenziato in precedenza, sono ovviamente molto diversi, a seconda del livello di attività svolta e dell'area funzionale considerata.

Attualmente in commercio, reperibili sia per il noleggio sia per la vendita, sono disponibili numerose tipologie di piste, di dimensioni e forme variabili, pensate per soddisfare tutte le possibili esigenze di collocazione, dalla piazza urbana fino alla spiaggia. Le dimensioni possono variare da un minimo di 10x20 m fino a un massimo di 30x60 olimpionica.

Si è preferita una pista olimpionica, per valutare le prestazioni della tecnologia Led, una volta sottoposta a un campo di applicazione con esigenze complesse, come le riprese televisive, le attività agonistiche di alto livello e le possibilità ricreative.

L'impianto olimpico è quello che soddisfa tutte le esigenze sportive e custodisce il fascino del ghiaccio delle piste professionistiche.

È idoneo all'utilizzo per spettacolo e attività sportiva a tutti i livelli e per tutte le discipline, attività ludiche o complementari al pattinaggio. La superficie estesa prevede un impiego in piazze e siti di grande dimensione e con ampiezza sufficiente a contenere anche il necessario allestimento di tribune, oltre alle vie di esodo e agli spazi tecnici che per questi impianti sono rilevanti. È uno degli impianti più richiesti per le installazioni temporanee su piazza nelle grandi città, in considerazione delle sue dimensioni e nonostante l'elevato costo gestionale, ma offre la possibilità di installazione anche indoor.

È la soluzione ideale alla pratica ludica con orientamento sportivo. Su questi impianti si possono organizzare corsi di avviamento al pattinaggio che possono prevedere anche primi livelli di esame.

1.1. Composizione dell'impianto

La composizione generale di una pista di ghiaccio temporanea, valida per tutte le tipologie, è sostanzialmente costituita da poche parti essenziali, sintetizzabili in impianto refrigerante, pista vera e propria e impianto d'illuminazione, con, in aggiunta, una serie di elementi accessori fissi:

- L'impianto refrigerante è costituito dal motore refrigerante, dal sistema di condotte principali e di serpentine di raffreddamento.
- La pista è costituita dal manto di fondo della pista e dal tavolato di fondo, elemento non indispensabile, e dalla balaustra, solitamente autoportante.
- L'impianto d'illuminazione è composto di pali o supporti e apparecchi illuminanti.
- Gli elementi accessori sono, primo fra tutti, l'impianto di diffusione audio, le biglietterie, i depositi, gradinate e coperture mobili.

I primi tre sono gli elementi essenziali per realizzare una pista di ghiaccio mobile fruibile.

Esiste poi la necessità di manutenzione dell'impianto stesso, che si avvale di componenti aggiuntivi, spesso forniti dai produttori stessi, soprattutto per la pista, quali pale o macchine rasaghiaccio, di cui si parlerà in seguito.

L'insieme degli elementi tecnici dell'intero sistema è semplice, tuttavia, una volta posto in opera l'impianto sportivo è dotato anche una propria struttura funzionale, legata alla fruizione delle diverse parti che lo costituiscono e delle diverse tipologie di utenti che lo frequentano.

La struttura funzionale è in realtà molto semplice, ma è importante chiarirla, poiché più avanti, in fase di progettazione, questi concetti saranno ripresi e approfonditi.

L'impianto è costituito da:

- Un'area di ingresso costituita dalle cassette mobili per la biglietteria, il deposito pattini e guardaroba, l'area di cambio scarpe/pattini, allestita con delle semplici panche e pavimentata con un robusto tessuto antiscivolo e resistente al taglio.
- L'anello bordo pista, anch'esso rivestito di tessuto antiscivolo, nel quale, durante le attività ricreative, sostano gli utenti in coda e gli spettatori e durante le attività agonistiche o gli spettacoli professionali diventa il luogo di attività diverse: l'attesa di atleti e allenatori, la collocazione del tavolo di giuria, l'area destinata a medici e soccorritori e infine lo spazio destinato a cameraman e fotografi. Ciascuna di queste figure occupa stabilmente il proprio spazio, senza intralciare gli altri.
- Le balaustre e i relativi disimpegni, sono il luogo destinato al pubblico a sedere e devono essere dotate di aree di deflusso

per gli spettatori uscenti.

- L'area impianti, ovvero lo spazio in cui sono collocati i refrigeratori e il gruppo elettrogeno, più gli eventuali elementi aggiuntivi come la macchina rasaghiaccio. Quest'area è normalmente interdetta al pubblico, per ragioni di sicurezza e solitamente è collocata dall'altra parte rispetto all'ingresso.
- La pista, il nucleo funzionale dell'intero sistema, il luogo in cui confluiscono le persone attivamente e l'attenzione di spettatori, fotografi, giudici ecc.

Una volta chiarite le dinamiche funzionali di una pista olimpica generica, è necessario ritornare agli aspetti tecnologici: lo scopo, di ciascuno dei componenti tecnici precedentemente descritti, sarà esplicitato qui di seguito, durante la descrizione della posa in opera e dell'installazione dell'intero impianto, per meglio comprendere il funzionamento dell'intero sistema.

1.2. Realizzazione

La fase realizzativa dell'intero impianto è piuttosto semplice e si basa principalmente sulla posa in opera di tutti le componenti fisse, e infine la realizzazione del manto ghiacciato.

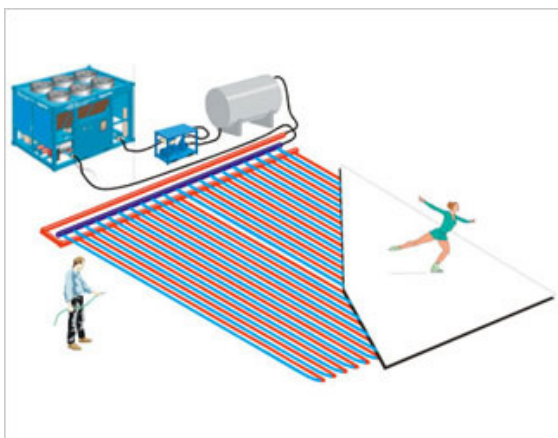


Figura 35: rappresentazione schematica della stratificazione di una pista

Per prima cosa si verificano le condizioni del piano di appoggio: se esso si presenta pressoché perfettamente piano e solido, è possibile stendere direttamente il manto di fondo sul piano di calpestio, nel caso esso sia irregolare o in pendenza, si procede a livellarlo con un tavolato in legno componibile, alto all'incirca come un comune gradino. Il tavolato ha lo scopo di rendere piano e orizzontale il fondo della pista, per evitare che essa abbia sensibili variazioni di spessore e quindi che il sistema refrigerante lavori in maniera differente nei vari punti della superficie; questo dipende dal fatto che, ovviamente, l'acqua tenderà a livellarsi e congelare con una

superficie superiore perfettamente orizzontale, anche se il fondo fosse molto inclinato; lo scopo è dunque quello di ottenere uno strato di ghiaccio di spessore ragionevolmente uniforme.

Il manto di fondo, ovvero uno tappeto in tessuto sintetico grande come l'intera pista, ha più funzioni, sia tecniche che estetiche: prima di tutto è idrorepellente, costituisce quindi il fondo della vasca in cui si verserà l'acqua, essendo in tessuto sintetico viene parzialmente pervaso dall'acqua e, con il formarsi del ghiaccio, diventa un ottimo irrigidimento per la pista, evitando che irregolarità del fondo o parziali movimenti del tavolato, spezzino il ghiaccio, o danneggino le serpentine, infine esso uniforma il colore del piano di appoggio e rende la superficie del ghiaccio bianca e gradevole.

In questa fase si colloca l'intero impianto refrigerante, a lato della pista, solitamente in testa, ma dipende dal luogo dell'installazione, si dispone il blocco motore da cui fuoriescono due condotte principali, una di andata e una di ritorno, del liquido refrigerante, collocate lungo un lato della pista.

Esistono diverse tipologie d'impianti, con lo stesso funzionamento, ma con geometrie idrauliche differenti, per sintetizzare si descriverà il moto dei fluidi, senza insistere sulle possibili configurazioni. Il liquido refrigerante imbocca la condotta principale di andata, da questa fluisce alle serpentine posate sul manto di fondo e che ricoprono fittamente l'intera superficie della pista, dopodiché, dalle serpentine fluisce alla condotta di ritorno per poi ricominciare il suo ciclo

nel motore. Ciò che conta è comprendere come e dove le varie parti siano disposte: le condotte principali sono collocate sui lati corti, a volte anche, sotto il tavolato, e le serpentine sono stese ordinatamente sull'intera pista, senza lasciare spazi vuoti.

Dopo questa fase si collocano le balaustre, in genere autoportanti, con il duplice scopo di chiudere la pista e di costituire i fianchi della vasca in cui si versa l'acqua, oltre che di proteggere i lati del ghiaccio, una volta che si sarà formato. In genere le balaustre sono totalmente chiuse o lo sono per una ventina di centimetri nella parte bassa, per offrire uno zoccolo contro gli urti dei pattini e rendere possibili aggiunte successive di acqua.

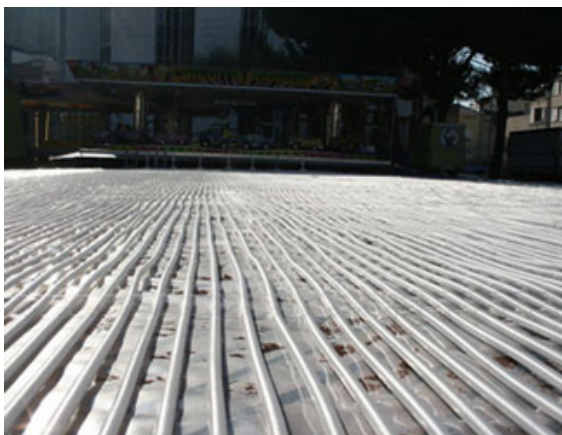


Figura 36: Il manto di fondo e il tappeto di serpentine

Poi s'installa l'impianto d'illuminazione e si collocano le attrezzature accessorie, biglietteria, deposito, l'impianto di diffusione audio, gradinate e coperture eventuali, solitamente si sten-

de attorno alla pista un robusto tessuto con lo scopo di individuare passatoie antisdrucchiolo.

In seguito, avviato il ciclo refrigerante si stendono strati successivi di acqua, il primo dei quali annega le serpentine, che vengono lasciati congelare uno dopo l'altro, fino ad ottenere uno strato complessivo intorno ai quattro centimetri, ma fino al doppio nel caso in cui si tema che l'instabilità del fondo lo possa spezzare, irreparabilmente; in questo caso si dovrebbe procedere a spaccare e asportare l'intera massa ghiacciata, per poi ricominciare.

2. LA PISTA

Si procederà ora a una descrizione dettagliata delle varie parti che compongono l'intero sistema, iniziando con la pista e le parti che la compongono.

Per quel che concerne la pista, non c'è molto da precisare; la struttura del tavolato, se presente, è molto semplice da immaginare, serve solo specificare alcune delle caratteristiche del manto di fondo. Il tappeto di fondo è realizzato solitamente in TNT termine utilizzato per indicare un tessuto non tessuto, ovvero un foglio sintetiche con caratteristiche strutturali simili alla tradizionale trama e ordito, ma ottenute con un procedimento diverso dalla tessitura; analogamente si può fare riferimento all'anglicismo "nonwoven".

Sovente sono realizzati con fibre incrociate sovrapposte unite con aghi, con processi termici o chimici.

Esistono numerosi polimeri alla base di questo tipo di materiali, poliestere, polipropilene e polietilene sono i più diffusi, anche in ragione della loro facilità di realizzazione, poiché ottenuti da un'unica fibra sovrapposta.

Solitamente si utilizzano manti in polietilene del peso di 600 g/m², e dello spessore di 4 mm.

Sovente, sopra le serpentine del manto, è posato un logo stampato su materiali polimerici, che sarà poi immerso nel ghiaccio.

Le strutture autoportanti e i corrimano delle balaustre vengono realizzate con diversi materiali come legno e alluminio; i pannelli di tamponamento sono in legno, alluminio o policarbonato trasparente; i battipattino sono in alluminio o polietilene.

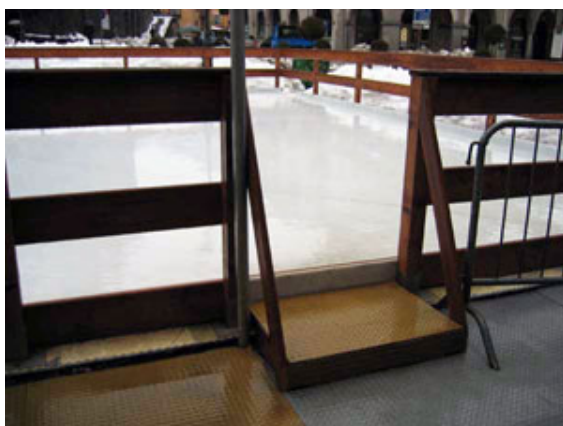


Figura 37: le balaustre fanno da bordo di contenimento laterale per l'acqua

La balaustre è costituita da una serie di moduli affiancati, della lunghezza complessiva variabi-

le, ma raramente superiore a 1,8 o 2 m, per meglio adattarsi al raggio di curvatura degli angoli smussati presenti in una pista professionistica. Normalmente una balaustre, in commercio, è alta 1,2 m, in questo caso è adatta al solo pattinaggio, nel caso si volesse consentire la pratica dell'hockey si dovrebbero utilizzare balaustre apposite, di altezza minima pari a 2m, e arrotondate negli angoli.

In queste pagine si farà riferimento, per semplicità, a una pista pensata per ospitare competizioni di solo pattinaggio artistico, sapendo che le stesse soluzioni illuminotecniche possono essere adottate anche nel caso di competizioni di hockey.

3. L'IMPIANTO REFRIGERANTE

È una delle parti più complesse presenti nel sistema, costituito da parti separate quali motore refrigerante, condotte e serpentine.

Il motore refrigerante è senz'altro la componente più costosa e complessa, anche se di facile installazione, poiché viene trasportata sul posto in un unico blocco, messa in opera semplicemente e poi collegata alle varie tubazioni.

Ovviamente esistono in commercio motori di dimensioni differenti, in relazione alla stagione di utilizzo e alla dimensione della pista a cui sono associati.

Normalmente si utilizzano gruppi frigoriferi con



Figura 38: un chiller per piste di grandi dimensioni

le seguenti caratteristiche:

- Telaio e struttura di acciaio zincato.
- Temperature in uscita del liquido refrigerante: minima -12/-15°; massima 20/30°.
- Gas refrigerante R-507.
- Potenza elettrica: pista 15x30 m, 120 kW ad uso estivo, 110 kW ad uso invernale. Pista 30x60 m, 270 kW ad uso estivo, 230 kW ad uso invernale.
- Le dimensioni sono largamente variabili, ma sono riassumibili, nel caso di una pista da 15x30 m in 3x2,4x2,3 m (lunghezza, larghezza e altezza), e nel caso di una pista 30x60 m in 6x2,4x2,6 m.
- Il peso è anch'esso variabile, compreso

tra i 3.300 e i 3.600 kg.

- Potenza sonora circa 50 Db a 10 m.

Tutte queste caratteristiche si riferiscono a un gruppo frigorifero comune, facilmente reperibile in commercio.

Dal gruppo frigorifero si dipartono due tubazioni principali, ovvero le condotte che distribuiscono il liquido refrigerante all'intero sistema, una distribuisce il liquido, la seconda lo riporta al refrigeratore o chiller.

Normalmente i tubi collettori sono realizzati in acciaio inox del diametro di circa 10 cm, uno di andata e uno di ritorno sovrapposti, dotati di raccordi metallici da cui si dipartono le serpentine posate sul manto.

Le serpentine sono tra le tecnologie dotate di maggiore varietà realizzativa: comunemente sono costituite da tappeti avvolgibili di etil vinil acetato, composti di una serie di tubi del diametro di 8 o 10mm affiancati ad una distanza analoga. Il materiale è bianco e trattato in modo da riverberare i raggi UV, disperdendo il calore del sole ed evitando di ingiallire o deteriorare per effetto della luce.

I Vantaggi di questa tecnologia sono numerosi:

- Uno spessore di 6 cm di ghiaccio si può ottenere in 24 o 36 ore, sia per allagamento che con spruzzatura manuale o automatica.
- Perdite di fluido quasi nulle.

- Facilità di montaggio e adattabilità a piste di tutte le dimensioni.
- Qualità del ghiaccio: compatto, consistente e con crosta robusta.

Una seconda tipologia, meno utilizzata, è costituita da canaline realizzate in pannelli pieghevoli di alluminio. Questo sistema ha una facilità di montaggio superiore, una maggiore stabilità dovuta al peso stesso delle canaline e tempi di congelamento inferiori, dovuti alle caratteristiche di conduttività termica dell'alluminio, le più elevate dopo quelle del rame, non utilizzato per via dei suoi residui di ossidazione che sporcano il ghiaccio.

In entrambi i casi le serpentine sono realizzate in modo da veicolare il fluido refrigerante sia in andata che al ritorno.

4. L'IMPIANTO D'ILLUMINAZIONE: TIPOLOGIA RICORRENTE E CARATTERISTICHE GENERALI

Ora sarà analizzata, la tipologia tradizionale d'impianto d'illuminazione per piste di ghiaccio mobili outdoor, valutandone sia gli aspetti estetici sia illuminotecnici, al fine di trarne un parametro di confronto utile, con il quale saranno paragonate le prestazioni di un impianto realizzato con tecnologia a Led.

Per prima cosa saranno considerate brevemente le esigenze che, in base alla tipologia di pista considerata, sono normalmente soddisfatte da un impianto tradizionale e che dovranno essere altrettanto soddisfatte da un impianto a Led.

Dovranno essere soddisfatti i requisiti d'illuminamento medio orizzontale, i requisiti di rapporto tra illuminamento medio e minimo orizzontali e illuminamento medio orizzontale e verticale. Si è già verificato in sede d'introduzione quali siano le richieste normative in termini di Lux per entrambe le dimensioni di pista considerate.



Figura 39: il reticolo di apparecchi sospesi sopra la pista di ghiaccio, in un impianto indoor

Al fine di garantire una buona ripresa televisiva, si offre un livello d'illuminamento verticale adeguato lungo la direzione delle telecamere.

In secondo luogo vi sono le esigenze coreografiche, per le quali non esistono riferimenti normativi utili cui rifarsi, ma che possono essere facilmente riassunte in poche semplici voci: è necessario installare delle luci in grado di cambiare colore, spot o occhi di bue per seguire l'atleta ed effetti stroboscopici, funzionali sia per le esibizioni a livello professionali, che per l'intrat-

tenimento serale.

La disposizione delle lampade in una pista all'aperto, solitamente, è molto diversa da quella utilizzata in una pista indoor di un palazzo del ghiaccio: mentre in un impianto stabile gli apparecchi possono essere disposti a grande altezza (10, 15, 20 m e oltre), in un reticolo regolare sopra la pista, in modo da uniformare gli illuminamenti sulla superficie; negli impianti all'aperto una soluzione di questo genere non è possibile, a meno che non sia realizzata una struttura di copertura o che non si posi in opera un supporto appositamente pensato per questo scopo.

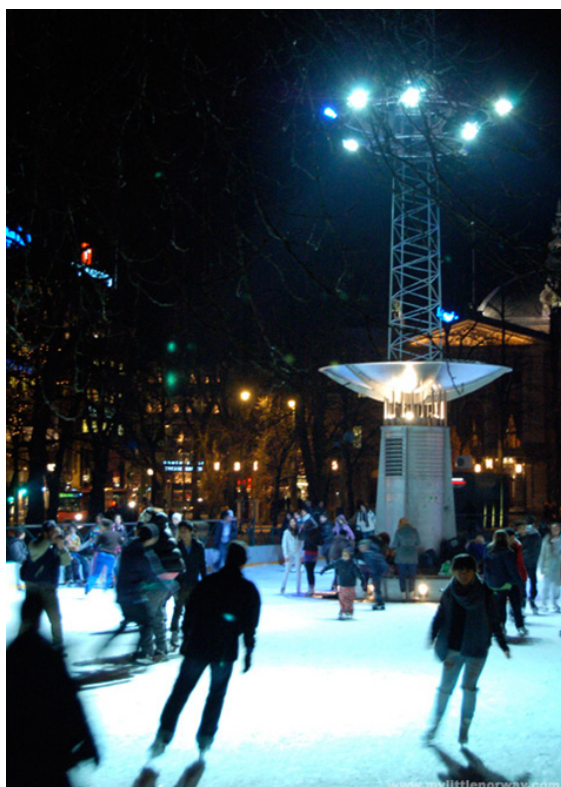


Figura 40: una torre faro illumina una pista di ghiaccio outdoor

apparecchi su pali, disposti oltre il perimetro della pista lungo i lati lunghi; in entrambi i casi, l'unica cautela utile un'altezza d'installazione di almeno cinque metri, per essere al sicuro, se non dai colpi, dal rischio di rottura dovuto al disco di hockey.

Pr quel che concerne il tipo di lampade e apparecchi, è evidente che le lampade più utilizzate sono quelle ad alogenuri metallici o al sodio ad alta pressione, per via della loro capacità di ottenere potenti flussi luminosi, utili mediamente a partire dai 35.000 lm e oltre; questo tipo di apparecchi richiede ciascuno una potenza elettrica di circa 400 W.

Per gli apparecchi solitamente si scelgono, nel caso di montaggio alla copertura, ottiche a largo fascio per meglio diffondere su tutta la pista; per il montaggio su palo si utilizzano riflettori con emissione asimmetrica, facendo attenzione ai possibili fenomeni di abbagliamento diretto e indiretto, per atleti e spettatori.

Gli effetti luminosi sono ottenuti con l'ausilio di apparecchi cambiacolori a quattro lampade con filtri RGB, o RGBY, con lampade alogene lineari o ad alogenuri metallici; oppure con apparecchi a lampada singola, solitamente alogena con riflettore dicroico, dotata di cambiacolori meccanico e di filtri con effetto acqua o altri; gli effetti stroboscopici o intermittenti con lampade lineari ad alta potenza.

Perciò si procede spesso con l'installazione di

I. IL LED “LIGHT EMITTING DIODE”

I.1. Generalità

Il diodo è un componente elettronico non lineare, la cui funzione principale è permettere il passaggio di corrente in una direzione e di impedirlo nella direzione opposta.

Dalla sua invenzione nel 1904, ne sono state sviluppate numerose varianti, con funzioni e caratteristiche differenti, tra cui il diodo a emissione luminosa, inventato nel 1962, con acronimo è Led, nella dicitura estesa: light emitting diode.

I Led emettono luce visibile se polarizzati direttamente: originariamente furono usati per segnalazione su pannelli di controllo e come spie luminose, oppure come trasmettitori per telecomandi e fibre ottiche. In seguito sono stati sviluppati modelli ad alta potenza adatti per l'illuminazione; oggi esistono in commercio numerosi apparecchi d'illuminazione che utilizzano i Led come sorgenti in alternativa alle tradizionali lampade a incandescenza e alle lampade fluorescenti, offrendo vantaggi in termini di risparmio energetico, durata e resa cromatica.

Dal punto di vista energetico i Led sono componenti elettronici particolari, dotati di caratteristiche interessanti: ad esempio, la loro tensione di polarizzazione diretta, ovvero la tensione necessaria per l'accensione, varia secondo la lunghezza d'onda della luce che emettono, ed

emettono tanta più luce quanta più corrente li attraversa; in genere è necessaria un'intensità di corrente minima di 4 mA (corrente di soglia) perché possano emettere luce in quantità percepibile. La corrente varia in funzione del tipo di diodo Led impiegato.

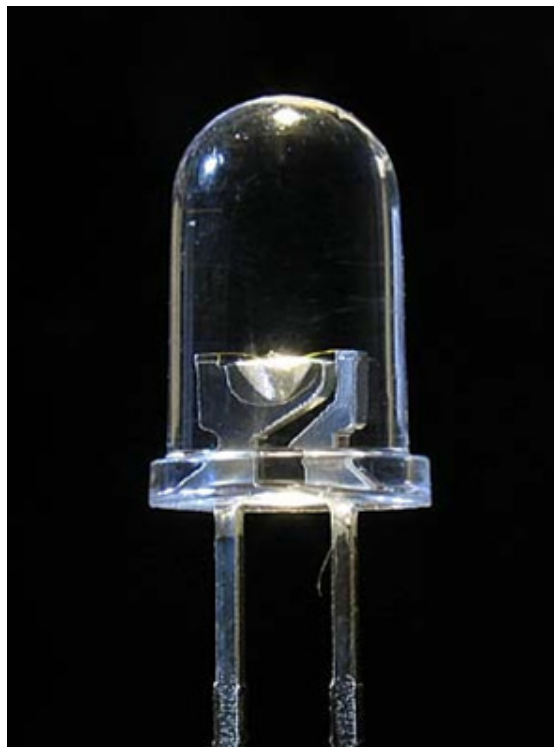


Figura 41: un Led a spina; sono visibili anodo e catodo

I diodi Led “normali” richiedono di media 150 mA per emettere un'apprezzabile luminosità. Nel caso di HPLeds (High Power Leds) la corrente sale fino a valori di circa 200-250 mA. Led di nuova concezione, ad altissima luminosità

tà possono assorbire fino a 1 ampere di corrente, per questi, è previsto l'accoppiamento meccanico di un dissipatore di calore.

Il dispositivo sfrutta le proprietà elettriche di alcuni materiali semiconduttori per produrre fotoni dalla ricombinazione di coppie elettrone-lacuna, ovvero di portatori di carica negativa e positiva.

I Led sono costituiti da una giunzione P-N (Positivo-Negativo) realizzata, ad esempio, con arseniuro di gallio o con fosfuro di gallio, materiali in grado di emettere radiazioni luminose quando sono attraversati da una corrente elettrica; il valore di tale corrente è compreso fra 100 e 1.500 mA.

Il funzionamento del Led si basa sul fenomeno detto "elettroluminescenza", ovvero l'emissione di fotoni (nella banda del visibile o dell'infrarosso) prodotti dalla ricombinazione degli elettroni e delle lacune quando la giunzione P-N è polarizzata in senso diretto.

Quando sono sottoposti a una tensione diretta per ridurre la barriera di potenziale della giunzione, gli elettroni della banda di conduzione del semiconduttore si ricombinano con le lacune della banda di valenza rilasciando energia sufficiente da produrre fotoni.

A causa dello spessore ridotto del chip un ragionevole numero di questi fotoni può abbandonarlo ed essere emesso come luce.

I Led, quindi, hanno un terminale positivo e uno negativo, e per funzionare devono essere inseriti in un circuito rispettando tale proprietà.

Quando si utilizza un Led, è necessario dispor-

re sempre una resistenza in serie con esso, allo scopo di limitare la corrente passante ed evitare che possa rompersi; la caduta di tensione ai capi di un Led può variare da 1,1 a 1,6 V, in funzione della lunghezza d'onda della radiazione emessa (a lunghezze d'onda minori corrisponde una caduta di tensione più alta).

Diversamente dalle comuni lampade a incandescenza, il cui filamento funziona a temperature elevatissime ed è caratterizzato da notevole inerzia termica, i Led emettono luce fredda, e possono lampeggiare a frequenze molto alte, superiori al Mhz; se si considera che la luce emessa sia direttamente proporzionale alla corrente che li attraversa, i Led sono particolarmente adatti alla trasmissione di segnali tramite modulazione dell'intensità luminosa.

L'esatta scelta dei semiconduttori determina la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni, l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita.

Secondo il drogante utilizzato, i Led producono i seguenti colori:

- AlGaAs, rosso ed infrarosso
- GaAlP, verde
- GaAsP, rosso, rosso-arancione, arancione, e giallo
- GaN, GaAlN verde e blu
- GaP, rosso, giallo e verde
- ZnSe, blu

- InGaN, blu-verde, blu
- InGaAlP, rosso-arancione, arancione, giallo e verde
- SiC come substrato, blu
- Diamante (C), ultravioletto
- Silicio (Si) come substrato, blu (in sviluppo)
- Zaffiro (Al₂O₃) come substrato, blu

La scelta del semiconduttore e del drogaggio a esso associato, determinando la lunghezza d'onda della luce emessa, determina anche la sensazione cromatica percepita dall'occhio.

I semiconduttori più utilizzati sono: Arseniuro di Alluminio (AlAs), Arseniuro di Alluminio-Gallio (AlGaAs), Arseniuro di Gallio (GaAs), Fosfuro-arseniuro di Gallio (GaAsP), Fosfuro-Arseniuro di Indio-Gallio (InGaAsP), Fosfuro di Gallio (GaP) e Fosfuro di Indio (InP).

Per quel che concerne i Led ad alto potenziale molto spesso si utilizzano Nitruro di Gallio e Indio (GaInN), Nitruro di Gallio (GaN) usati per i colori verde e blu e come base per il bianco, e per il rosso, il giallo e l'arancio si utilizza una miscela di Fosfuro di Gallio (GaP) e Fosfuro di Indio, Gallio e Alluminio (InGaAlP).

Anche se è cosa poco nota, i Led sono "macchine reversibili": infatti, se la loro giunzione è esposta direttamente a una forte fonte luminosa o ai raggi solari, ai terminali appare una tensione, dipendente dall'intensità della radiazione

e dal colore del Led in esame (massima per il blu). Questa caratteristica è abitualmente sfruttata nella realizzazione di sensori, per sistemi di puntamento (inseguitori solari) di piccoli impianti fotovoltaici o a concentratore e per molti altri scopi.

I primi Led erano disponibili solo nel colore rosso. Venivano utilizzati come indicatori nei circuiti elettronici, nei display a sette segmenti e negli optoisolatori. In seguito furono sviluppati Led che emettevano luce gialla e verde e furono realizzati dispositivi che integravano due Led, generalmente uno rosso e uno verde, nello stesso contenitore permettendo di visualizzare quattro stati (spento, verde, rosso, verde+rosso=giallo) con lo stesso dispositivo.

Negli anni novanta furono realizzati Led con efficienza sempre più alta e in una gamma di colori sempre maggiore fino a quando, con la realizzazione di Led a luce blu, fu possibile realizzare dispositivi che, integrando tre Led (uno rosso, uno verde e uno blu), potevano generare qualsiasi colore sfruttando la miscelazione additiva della luce (RGB).

I Led sono sempre più utilizzati in ambito illuminotecnico in sostituzione di alcune sorgenti di luce tradizionali. Il loro utilizzo nell'illuminazione domestica, quindi in sostituzione di lampade a incandescenza, alogene o fluorescenti compatte, è oggi possibile con notevoli risultati raggiunti grazie alle tecniche innovative sviluppate nel campo. Fondamentalmente, il limite dei Led per questo tipo di applicazione è il flusso luminoso, che nei modelli di ultima generazione

per uso professionale si attesta intorno ai 120 lm, ma che nei modelli più economici raggiunge solo i 20 lm. Una lampada a incandescenza da 60 W emette un flusso luminoso di circa 550 lm, in merito a questa tipologia di lampada, una normativa della Comunità Europea ne prevede nell'arco di sette anni, a partire dall'1-9-2009 il divieto di vendita in tutti i paesi della comunità, graduandone annualmente il divieto in base alla potenza in Watt.

Il loro utilizzo diventa invece molto più interessante in ambito professionale, dove l'efficienza luminosa media pari a 90-100 lm/W li rende una sorgente appetibile.

Come termine di paragone basti pensare che una lampada a incandescenza ha un'efficienza luminosa di circa 20 lm/W, mentre una lampada ad alogeni di 25 lm/W e una fluorescente lineare fino a 104 lm/W.

Un altro limite del Led nell'illuminazione funzionale è che le loro caratteristiche di emissione e durata sono fortemente condizionate dalle caratteristiche di alimentazione e dissipazione. Diventa dunque difficile individuare rapporti diretti tra le varie grandezze, tra le quali entra in gioco anche un ulteriore parametro, ovvero l'angolo di emissione del fascio di luce, che può variare in un intervallo compreso tra circa 4 gradi e oltre 120.

L'emissione luminosa, inoltre, si riduce con l'aumentare della temperatura. La dipendenza dalla temperatura è più significativa nei Led a luce gialla che in quelli a luce verde.

Questa riduzione di potenza luminosa è reversi-

bile e non ha influenza sul decadimento del flusso nel corso della vita. La massima temperatura di funzionamento per i Led è normalmente di 100 °C e non deve essere superata.

Come avviene nelle sorgenti luminose convenzionali, nei Led si verifica nel tempo un graduale decadimento del flusso luminoso.

Quando un Led emette il 50% del flusso luminoso iniziale, si considera alla fine della sua vita utile. Nelle normali condizioni operative un Led può durare oltre 50.000 ore secondo il colore.

Concludendo, i vantaggi dei Led dal punto di vista illuminotecnico sono:

- Durata di funzionamento (i Led ad alta emissione superano le 50.000 ore).
- Costi di manutenzione del diodo ridotti.
- Elevata efficienza luminosa.
- Assenza di componenti IR e UV.
- Facilità di realizzazione di ottiche polimeriche efficienti.
- Flessibilità d'installazione del punto luce.
- Colori saturi.
- Sorgente quasi puntiforme.
- Funzionamento a bassa tensione (normalmente tra i 3 e i 24 Vdc).
- Accensione e funzionamento a freddo (fino a -40 °C).
- Resistenza a umidità e vibrazioni.

- Assenza di mercurio.
- Durata non influenzata dal numero di accensioni e spegnimenti.

Un aspetto da sottolineare, interessante dal punto di vista dei vantaggi industriali che ecologici, è la ridotta dimensione del Led, che è realizzato con quantità ridottissime di materia, quindi facile da stoccare e da trasportare e privo di sostanze tossiche o inquinanti, quindi facile ed economico da smaltire.

D'altra parte esistono anche degli svantaggi, facilmente elencabili:

- Costi iniziali elevati.
- Sensibilità termica.
- Sensibilità alla tensione elettrica.

I vantaggi di questi dispositivi si basano sulla loro potenzialità di ottenere elevata luminosità (quattro volte maggiore di quella delle lampade fluorescenti e a filamento di tungsteno), basso prezzo, elevata efficienza e affidabilità (la durata di un Led varia dalle 25.000 alle 50.000 ore, anche in condizioni di stress meccanici, e può essere ulteriormente accresciuta in condizioni di tensione e di dissipazione termica appropriate); inoltre essi non richiedono circuiti di alimentazione complessi, possiedono alta velocità di commutazione e la loro tecnologia di costruzione è compatibile con quella dei circuiti integrati al silicio.

I Led sono particolarmente interessanti per le loro caratteristiche di elevata efficienza luminosa e di affidabilità. I primi Led ad alta efficienza sono stati investigati nel 1995, rilevando ottime caratteristiche per dispositivi in AlGaInP/GaAs con contatto trasparente di Indio e Stagno (ITO). L'evoluzione dei materiali è stata quindi la chiave per ottenere delle sorgenti luminose che si prestano ad avere uno sviluppo intenso.

Nei telefoni cellulari sono presenti nel formato più piccolo in commercio, per l'illuminazione dei tasti, su alcuni modelli di autovetture e ciclomotori di nuova produzione, sono presenti in sostituzione delle lampade a filamento, per le luci di "posizione" e "stop", sul mercato sono già presenti dispositivi sostitutivi diretti del faretto alogeni, aventi identico standard dimensionale, per l'illuminazione stradale sono disponibili apparecchi analoghi a quelli tradizionali; la quantità di luce appropriata al fabbisogno di ogni applicazione, viene realizzata con il posizionamento nel dispositivo, di matrici di diodi di varie dimensioni.

Allo stato attuale, le aziende produttrici di Led ad alta luminosità ed elevata efficienza luminosa si sfidano nel tentativo di ottenere il Led singolo dotato della più alta efficienza luminosa in lm/W.

Attualmente il primato appartiene ad un singolo Led su piastrina capace di erogare 161 lm/W, a 350 mA, con una temperatura colore di 4.689 K, per un totale di 173 lm, implementato poi nel febbraio 2010 a un'efficienza di 208 lm/W a 4.579 K.

Seguono chip capaci di 140 lm/W e 138 lm, fino a 138 lm/W e 155 lm, considerando l'attuale sviluppo tecnologico a disposizione.

Si tratta di valori di efficienza luminosa molto alti, per prototipi non ancora disponibili sul mercato; attualmente le aziende valutano di poter raggiungere valori di 180 lm/W entro i prossimi 5 anni, per apparecchi di fascia commerciale.

I problemi di questi Led, dotati di capacità emissive altissime, sono, in realtà, la durata e l'affidabilità: pare, infatti, che siano stati raggiunti valori di efficienza luminosa persino superiori, tali però da fondere il contatto metallico dopo pochissimi istanti, rendendo inutilizzabile il diodo. La dissipazione del calore è il problema principale, cui si sta cercando di trovare soluzioni ragionevoli.

Attualmente sono disponibili, mediamente, Led di colore bianco con prestazioni certe, comprese tra i 60 e i 90 lm/W, nel caso di bianco "freddo" e tra i 27 e 55 lm/W, nel caso del bianco "caldo"; tra quelli più efficienti vi sono modelli capaci di 100-110 lm/w e persino oltre.

Sinteticamente si può affermare che, allo stato attuale della ricerca, dello sviluppo e soprattutto della diffusione, siano disponibili Led di diverse fasce di potenza, da 1, 3, 5, 10, 20, 50 fino a 100 W, capaci rispettivamente emettere 140, 300, 700, 1.400, 3.000 e 5.000 lm; da questo elenco di massima si evince che l'efficienza luminosa tende a decrescere con l'aumentare della potenza assorbita.

I.2. Funzionamento

Un diodo è sostanzialmente costituito da un semiconduttore, ovvero un materiale dotato di una capacità variabile di condurre elettricità. Generalmente i semiconduttori sono costituiti da materiali debolmente conduttivi drogati con impurità, che ne variano le caratteristiche elettriche.

Per la precisione un semiconduttore è un materiale dotato di una resistività, o di una conduttività, elettrica intermedia tra i conduttori e gli isolanti; intendendo per resistività, l'attitudine di una sostanza a opporre resistenza al passaggio di cariche elettriche e per conduttività, il suo contrario. A temperature molto basse un semiconduttore si comporta come un isolante, mentre a temperatura ambiente ha una conduttività apprezzabile.

Le sue caratteristiche elettriche intermedie sono interessanti, poiché suscettibili di variazioni in seguito al drogaggio, ovvero l'aggiunta di atomi estranei, che ne variano le proprietà.

Il drogaggio è un'aggiunta di quantità d'impurità infinitesime, tanto che si calcola in atomi/cm³; per avere un'idea delle grandezze in gioco, basti pensare che un centimetro cubo di silicio conta circa 10²² atomi, il drogante è iniettato in quantità pari a 10¹³ atomi, intorno al miliardesimo.

Nel caso dei Led il conduttore più usato è l'alluminio-gallio-arsenide (ALGaAs): in condizioni di totale purezza, tutti i suoi atomi sono legati perfettamente gli uni agli altri, senza lasciare alcun

elettrone libero.

Quando esso viene drogato, vengono aggiunti altri atomi che spezzano l'equilibrio elettronico, aggiungendo elettroni liberi o creando lacune che possono essere occupate da altri elettroni: in entrambi i casi il materiale diviene più conduttivo.

Un semiconduttore si definisce di tipo N (negativo), se possiede elettroni aggiuntivi, che si muovono da zone con carica negativa verso aree caricate positivamente.

Nel caso in cui il semiconduttore presenti lacune tra gli elettroni, è definito di tipo P (positivo), poiché appare come se fosse dotato di cariche positive aggiuntive. In questo caso gli elettroni possono spostarsi da una lacuna all'altra, muovendosi da zone con carica negativa verso zone con carica positiva; da ciò si desume che le lacune danno l'illusione di muoversi da aree con carica positiva verso altre con carica negativa.

Per chiarezza saranno brevemente definiti i concetti di lacuna ed elettrone.

La lacuna elettronica, chiamata anche semplicemente lacuna, è, insieme all'elettrone, uno dei due portatori di carica che contribuiscono al passaggio di corrente elettrica nei semiconduttori.

La lacuna ha in valore assoluto la stessa carica dell'elettrone, ma contrariamente a quanto accade a questa particella, la sua carica è positiva. Analogamente a come è definita la massa dell'elettrone all'interno di un semiconduttore, la massa di una lacuna varia secondo il materiale e del livello energetico cui appartiene, ma

è sempre maggiore di quella degli elettroni nel medesimo materiale. Altra caratteristica peculiare delle lacune è che la loro mobilità è minore di quella degli elettroni.

Per quanto sia conveniente considerare le lacune come dei reali portatori di carica positiva, è importante ricordare che la lacuna è una "quasiparticella", schematizzabile come la mancanza di un elettrone all'interno di un semiconduttore. Un osservatore esterno, concentrandosi sul movimento di carica, vedrebbe una carica positiva che si sposta, anche se ciò non è altro che il risultato dello spostamento degli elettroni nel senso inverso.

La descrizione della lacuna come una particella con carica positiva è comunque molto utile e permette di descrivere facilmente e accuratamente il comportamento dei semiconduttori.

L'elettrone è una particella subatomica, ritenuta una particella elementare, dotato di carica elettrica negativa; nei conduttori, un flusso di elettroni, determina una corrente elettrica.

La descrizione dei drogaggi di tipo N e P, fatta finora, è in realtà una semplificazione, atta a comprendere lo svolgersi del fenomeno; in realtà il drogaggio N consiste nell'iniettare sostanze dotate di un numero maggiore di elettroni di valenza rispetto al semiconduttore originario, rendendo quindi disponibile, nel reticolo atomico, un elettrone non legato in modo covalente, perciò debolmente legato all'atomo e suscettibile di spostamento nella banda di conduzione, ovvero al livello energetico responsabile della

conduzione di elettricità.

Non si può propriamente parlare d'introduzione di un eccesso di elettroni, piuttosto della creazione di legami che ne facilitano la mobilità.

Allo stesso modo, il drogaggio di tipo P non ha come scopo produrre un eccesso di lacune, bensì liberare legami covalenti, disposti ad accettare elettroni.

Una giunzione P-N può essere creata drogando regioni vicine di un semiconduttore con droganti di tipo P e di tipo N ed è la base del componente elettronico chiamato diodo, che consente il flusso di corrente in una sola direzione del dispositivo.

Un diodo comprende due sezioni di semiconduttori, una di tipo N e una di tipo P, a contatto, con un elettrodo collegato a ciascuno dei due segmenti. Questa configurazione consente passaggio di corrente in una sola direzione: quando non viene applicata alcuna differenza di potenziale, gli elettroni naturalmente si spostano dal semiconduttore di tipo N a quello di tipo P, attraverso l'interfaccia tra i due materiali.

A partire dall'interfaccia si genera, espandendosi in entrambe le direzioni, una zona definita "di svuotamento", ovvero un volume in estensione, in cui entrambi i materiali drogati ritornano al loro stato originale d'isolanti, poiché ogni lacuna è stata colmata da ciascuno degli elettroni liberi. Per eliminare la zona di svuotamento è necessario forzare gli elettroni dal semiconduttore di tipo N a quello di tipo P, per ottenere questo fenomeno si collegano i poli di un circuito elettrico, associando il polo negativo al semicondut-

tore di tipo N e quello positivo al semiconduttore di tipo P.

In questo modo gli elettroni sono respinti dalla carica negativa applicata, e le lacune vengono a loro volta respinte dalla carica positiva.

Quando la differenza di potenziale è sufficientemente alta gli elettroni e le lacune tornano a occupare la zona di svuotamento, facendola così ridurre fino a sparire e le cariche tornano a muoversi attraverso il diodo.

Se s'inverte la polarità della corrente applicata, non ci sarà flusso attraverso il diodo, poiché elettroni e lacune si muovono in direzione opposta gli uni rispetto alle altre, incrementando nuovamente la zona di svuotamento.

Questa configurazione genera luce.

La luce è una forma di energia generata da un atomo, è costituita da particelle dotate di energia, di momento, ma non di massa.

Il rilascio di fotoni avviene come risultato dello spostamento di elettroni da orbitali ad alta energia verso orbitali a un livello energetico più basso.

Maggiore è la perdita di energia da parte di un elettrone, maggiore sarà l'energia di cui saranno dotati i fotoni rilasciati e più alta sarà la loro frequenza.

Quando un elettrone che viaggia attraverso un diodo, e colma una lacuna, si manifesta una sua caduta verso orbitali a basso livello energetico, e il conseguente rilascio di fotoni.

Ciò avviene in ogni diodo, ma l'emissione di luce visibile avviene solo per i diodi costituiti dai materiali sopra elencati. Tale fenomeno altro non è

che l'elettroluminescenza, ovvero la capacità di alcuni materiali di emettere luce se sottoposti a un campo elettrico, ovvero quando sono attraversati da una corrente elettrica.

Un Led, solitamente, non si limita a emettere luce visibile, ma trasforma una parte dei watt assorbiti in calore. Solitamente un'azienda produttrice fornisce il dato della "dissipazione di potenza", espressa in Watt ma questo dato non suggerisce che temperatura può raggiungere il diodo una volta acceso. In effetti, la "temperatura di giunzione" dipende da svariati fattori, tra cui il materiale, la forma e la dimensione del diodo, essa inoltre influisce pesantemente sulla vita media dello stesso Led: maggiore sarà la temperatura raggiunta, minori saranno il flusso emesso e la vita media del diodo.

1.3. Colore

Tutti i diodi emettono radiazione elettromagnetica, alcuni emettono luce visibile con diverse sensazioni cromatiche per l'occhio umano.

I Led sono considerati sorgenti luminose fortemente monocromatiche, ma ovviamente emettono uno spettro ampio di lunghezze d'onda, quindi una miscela cromatica; tuttavia il colore della luce emessa può essere identificato con il picco di lunghezza d'onda (I_{pk}) o emissione primaria, ovvero la lunghezza d'onda cui il diodo associa la più alta intensità di emissione.

La luce bianca è più complessa da ottenere, in ragione del fatto che nello spettro del visibile non esiste una banda di lunghezze d'onda cui sia associata la sensazione cromatica del bianco; Tale sensazione si ottiene con la miscela cromatica additiva (ovvero la miscelazione tipica della luce, ben diversa da quella sottrattiva, a noi più nota, essendo quella della pittura, ad esempio), sommando tutte le sensazioni cromatiche. In realtà per l'occhio umano non è necessaria un'emissione spettrale completa per avere la sensazione del bianco, ma sono sufficienti tre bande cromatiche principali, provenienti ciascuna da una fascia dello spettro alta, media e bassa, ovvero blu, verde e rosso.

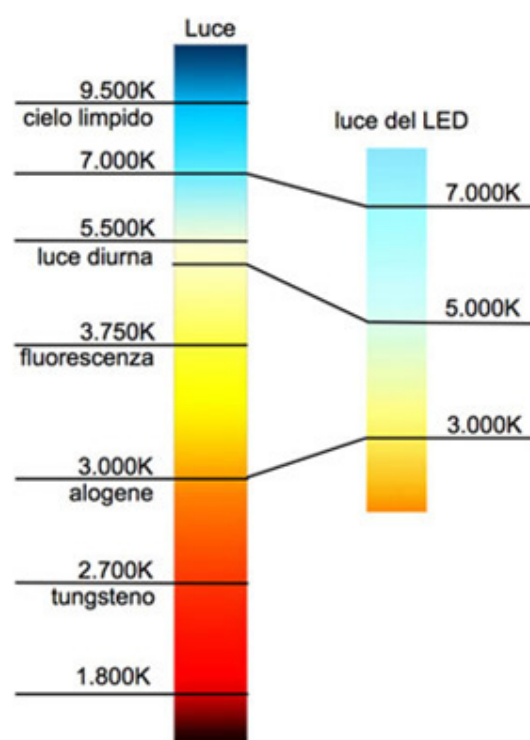


Figura 42: lo spettro di emissione cromatica del Led

Utilizzando questo sistema, quindi miscelando le emissioni di tre diversi Led, uno rosso, uno verde e uno blu, si può ottenere luce bianca; questa tecnologia prevede l'utilizzo di apparecchiature di controllo dell'emissione e della diffusione, ma consente anche di ottenere tutti gli altri colori, tuttavia è relativamente poco usata per il bianco puro, se non quando sia richiesta grande flessibilità di miscelazione del colore.

Un secondo sistema per ottenere luce bianca consiste nell'utilizzare polveri o miscele di fosforo per convertire l'emissione monocromatica di Led blu o ultravioletti in luce bianca: un Led con tecnologia InGaN, che emette nel campo del blu, stimola una polvere fluorescente (ad esempio Ittrio, Alluminio, Granato), depositata su una superficie all'interno del bulbo, che, eccitata, emette luce nel campo del giallo; questo metodo è definito "conversione della luminescenza".

La miscelazione dell'emissione primaria blu e di quella secondaria gialla, dà all'occhio la sensazione del bianco; variando la concentrazione delle polveri fluorescenti è possibile ottenere tonalità variabili dal bianco "freddo" (simile a quello emesso dalle lampade a fluorescenza, oltre i 5000 K), al "caldo" (vicino a quello che caratterizza l'emissione di lampade a incandescenza, tra i 2000 e i 4000 K).

Ottenere tonalità di bianco più naturali e gradevoli, quindi sotto i 6000 K, impone di utilizzare maggiori quantità di fosfori, di conseguenza si avranno perdite di flusso emesso fino al 40%.

Attualmente si sta diffondendo una tecnologia

capace di ottenere Led bianchi più efficienti: si tratta della cosiddetta tecnologia a "fosforo remoto".

Normalmente lo strato di polveri fosforo si ricopre il diodo; questo determina l'assorbimento della luce da parte del fosforo e la sua riemissione ad una differente lunghezza d'onda, ottenendo così la miscelazione cromatica desiderata; tuttavia buona parte della luce viene riemessa dai fosfori verso il diodo, determinando un calo dell'efficienza e una minore nitidezza del colore bianco.

La tecnologia a fosforo remoto allontana le polveri dal diodo e, con un'appropriata configurazione della lente, permette ai fotoni, prima assorbiti, di essere emessi di nuovo sotto forma di luce visibile. Le stime suggeriscono che questo tipo di Led permetta di avere un'efficienza luminosa dal 30 al 60% più alta rispetto alla tecnologia tradizionale.

Considerare le doti di resa cromatica del Led bianchi allo stesso modo con cui si valutano quelle delle altre sorgenti è un metodo piuttosto impreciso, infatti attualmente la norma CIE 177:2007, suggerisce di non applicare il parametro di resa cromatica ad apparecchi che montino diodi Led a luce bianca.

Questo dipende dal fatto che i Led bianchi hanno uno spettro emissivo discontinuo, con lacune corrispondenti ad alcune sensazioni cromatiche precise, il che abbassa la valenza cromatica del Led, rispetto ad altre sorgenti che hanno uno spettro emissivo più continuo.

Tuttavia i produttori offrono valori di riferimen-

to della resa cromatica dei diodi, utili a stimarne le caratteristiche in fase progettuale.

Attualmente la resa cromatica di un singolo led bianco va dal 65 al 90, ma anche in questo campo la tecnologia è in continua evoluzione, tanto che la grande maggioranza dei diodi disponibili offre una resa pari ad 80.

La tecnologia della conversione permette di ottenere efficienze e intensità luminose molto superiori a quelle dei tradizionali led monocromatici.

Esistono poi Led dicromatici, tricromatici e quadricromatici, dotati ciascuno di stabilità e resa cromatica e più o meno alta efficienza; il grande vantaggio di questo tipo di sorgenti è l'elevatissima flessibilità nella miscelazione del colore, che permette di ottenere pressoché qualunque sfumatura percepibile dall'occhio umano.

1.4. Parametri caratteristici

I parametri che caratterizzano il Led sono:

L'efficienza: è la relazione tra intensità luminosa emessa misurata in millicandele (mcd), e la corrente elettrica in mA; si rappresenta con I_v , i valori possono essere fra 0,5/2 mcd a 20 mA, ed arrivano, ad alta efficienza, fino a 20 mcd a 10 mA.

La direttività: è l'angolo massimo di osservazio-

ne della luce che il Led consente rispetto all'asse dello stesso; dipende dalla sua forma e dalla presenza o meno di una lente amplificatrice al suo interno. Generalmente quest'angolo è piccolo, comunque ogni Led ha una curva di direttività, dove si trova la luminosità in funzione dell'angolo di osservazione.

In un Led l'angolo di emissione $2\theta_{1/2}$ si riferisce a come è diffusa l'emissione luminosa.

Questo angolo viene determinato misurando l'angolo diretto in asse e l'angolo in cui la luminosità si dimezza e raddoppiando il valore della differenza tra i due angoli.

La scelta dell'angolo di emissione luminosa influisce sul risultato dell'intensità luminosa finale.

A parità d'intensità effettiva del Led maggiore è l'angolo di emissione meglio si distribuisce la luce emessa, ma per contro peggiora l'intensità luminosa.

Nei Led ad alta potenza di frequente si utilizzano delle lenti appositamente progettate con il fine di concentrare il fascio luminoso così da aumentarne considerevolmente l'intensità luminosa. I Led più diffusi hanno angoli di emissione compresi tra i 90 e i 130°.

L'intensità di corrente inversa, I_r : è il valore massimo di mA che sopporta il Led se inversamente polarizzato; valore tipico 10 μ A, oltre il quale si crea l'effetto valanga, e la giunzione si rompe.

L'intensità di corrente diretta, di lavoro, o di pilotaggio I_f : è il valore di corrente necessaria al

Led per ottenere l'intensità luminosa voluta, in mA.

La tensione elettrica di giunzione, tensione diretta o corrente di lavoro, V_f : nella maggior parte dei Led è compresa tra 1,5 e 2,5V ed è la tensione presente fra i due terminali quando il Led è percorso dalla sua corrente di eccitazione.

La tensione elettrica di alimentazione, V_s : è la tensione che si può applicare e assume valori massimi dell'ordine di 3-5 V.

La tensione diretta V_f è il valore di tensione necessario affinché il diodo Led assorba la corrente per cui è stato progettato.

Nei diodi Led basta circa un 10% di tensione V_f in meno perché non si illuminino, mentre superando la tensione V_f è molto facile bruciarli (innalzamento distruttivo della corrente diretta e quindi della temperatura della giunzione).

I Led devono essere fatti funzionare solo con tensione diretta e non devono essere sottoposti a tensioni inverse, soltanto pochi volt potrebbero danneggiarli irreversibilmente.

E' buona norma fare funzionare i Led ad alta potenza tramite degli alimentatori a corrente costante appropriati, in questo caso la corrente rimarrà stabile nel tempo e la tensione V_f sarà automaticamente allineata alle caratteristiche del Led.

Per i Led o gruppi di Led di piccola potenza è anche possibile ricorrere all'uso di una o più resistenze limitatrici di corrente (è necessario conoscere la tensione di alimentazione disponibile,

la V_f e la corrente nominale del Led).

La dispersione di potenza: è la parte di potenza che il Led assorbe non trasformandola in radiazione luminosa e disperde sotto forma di calore.

Flusso luminoso: aumentare la corrente di pilotaggio significa aumentare il flusso luminoso emesso da un diodo Led: per questo motivo i produttori indicano il flusso luminoso emesso relativo ad una corrente di riferimento (generalmente pari a 350 mA); inoltre questo flusso è relativo ad una temperatura di giunzione di laboratorio pari a 25°C.

La variazione di temperatura di giunzione e di corrente di pilotaggio comporta una notevole differenza nel flusso emesso.

Con il termine giunzione ci si riferisce alla zona in cui i due tipi di semiconduttore, tipo N e tipo P, sono a contatto tra loro.

Il termine **temperatura di giunzione T_j** si attribuisce alla temperatura misurata sulla giunzione stessa che costituisce anche il cuore del Led. Con questo termine è indicata la temperatura della giunzione che costituisce il nucleo del Led; la temperatura massima è determinata dal produttore del dispositivo in modo da porre un limite invalicabile per una vita operativa ragionevole del componente.

Questa temperatura è strettamente collegata al flusso luminoso emesso e alla durata: maggiore è la temperatura, maggiore la riduzione del flusso luminoso e minore la durata della sorgente Led. Un diodo LED deve pertanto poter resistere

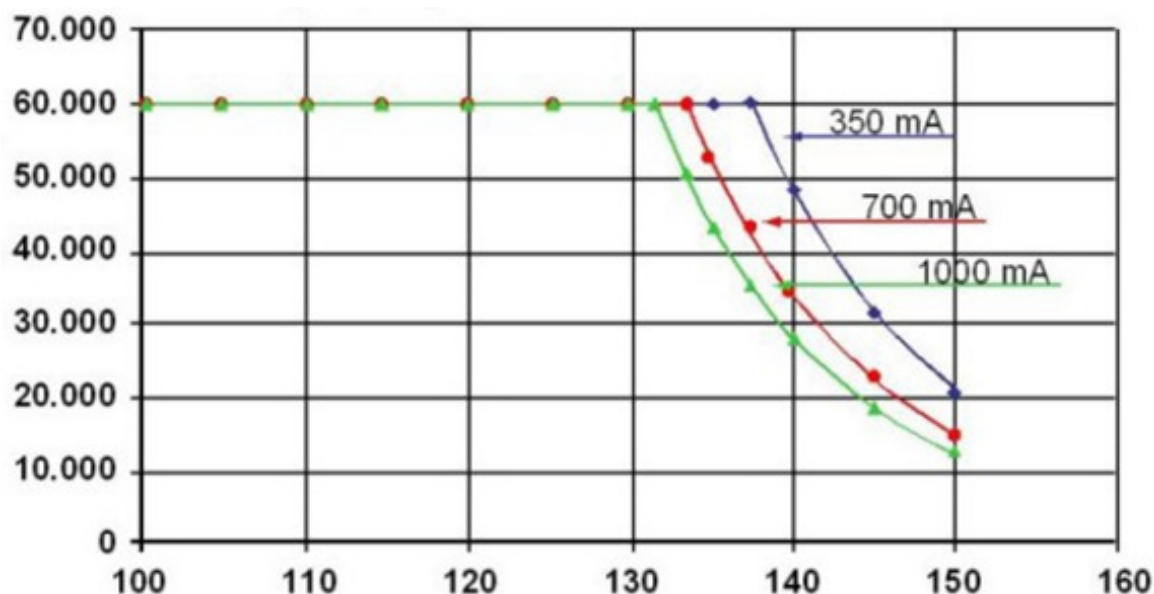


Grafico 1: esempio di relazione generica tra la temperatura di giunzione (C°) e la durata di un diodo (h)

alle alte temperature e i dispositivi di dissipazione a corredo devono essere dimensionati con cura.

Ad oggi non è possibile misurarla direttamente e le indicazioni dei vari produttori si riferiscono quindi a formule sperimentali che cercano per quanto possibile di riprodurre il comportamento della giunzione; senza entrare troppo nello specifico è facile capire che una misura non diretta può portare facilmente ad errori sperimentali, che si accumulano fino a rendere molto incerto il risultato finale. I dati inoltre si riferiscono a misure fatte in laboratorio, in condizioni al contorno stabili, che non tengono conto delle reali oscillazioni nei valori di temperatura e corrente presenti in un impianto reale.

Un dato di massima per definire la temperatura di giunzione può essere fornito dalla temperatura della piastra su cui il Led è saldato, poiché

appare ovvio che la temperatura di giunzione sarà comunque superiore a essa.

Nelle installazioni su strada, in base a queste evidenze sperimentali, si registrano temperature di giunzione costantemente sopra i valori indicati dai produttori.

In definitiva è fondamentale l'apparato dissipativo posto a corredo dell'apparecchio d'illuminazione: l'indicazione generale è quella di non considerare i dati forniti dal produttore come definitivi e di verificare con attenzione il metodo utilizzato nelle saldature dei diodi e la superficie e il materiale dei dispositivi di dissipazione.

La giunzione PN non è l'unione meccanica di due singoli semiconduttori, ma a livello costruttivo è determinata dal drogaggio di un singolo semiconduttore, atomi trivalenti (P) su un lato e atomi pentavalenti (N) sull'altro.

La T_j (max) è determinata dal produttore del di-

spositivo in modo da porre il limite invalicabile per una vita operativa ragionevole del componente.

L'utente può quindi intervenire mantenendola sotto il valore indicato con il fine di ottenere una realizzazione ad alta affidabilità.

Aumentare tale temperatura, ovvero surriscaldare il Led, corrisponde ad una durata ridotta nel tempo o addirittura alla rottura istantanea.

Normalmente, per Led capaci di assorbire potenze comprese tra 1 e 5 W, ma anche oltre, la temperatura di giunzione massima è compresa tra i 110 e i 150 °C.

La vita utile è il lasso di tempo che intercorre tra l'accensione e il momento in cui un certo numero di sorgenti smettono di funzionare.

Le sorgenti luminose a Led invece non tendono a spegnersi improvvisamente esaurita la loro vita utile: i diodi Led nel tempo diminuiscono gradualmente il loro flusso luminoso iniziale fino a esaurirsi completamente in un periodo molto lungo, a meno di rotture improvvise.

Per questo motivo occorre provvedere con termini di confronto che sono del tutto diversi da quelli utilizzati oggi.

Il parametro più utilizzato nella definizione di vita utile è stato definito da un gruppo industriale produttore di Power Led, che ha determinato che il mantenimento del 70% del flusso iniziale corrisponde al limite inferiore al di sotto del quale l'occhio umano percepisce una riduzione della luce emessa (e quindi si può supporre che una riduzione del flusso iniziale del 30% sia ac-

ceffabile per la maggioranza delle applicazioni): per questo motivo viene definita come vita utile di un Led il tempo trascorso prima che venga raggiunto questo limite (indicato generalmente come L70 che sta per "lumen maintenance 70%").

I.5. Alimentazione

I Led devono essere alimentati a corrente costante e polarizzata e questo può essere fatto utilizzando un generatore di corrente o, più semplicemente, ponendovi in serie una resistenza per limitare la corrente per una data tensione di alimentazione. La corrente può variare da 5-6 mA fino a 20 mA quando è richiesta molta luce. Il valore dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce emessa dal Led.

Il valore della resistenza in serie R_s è calcolato mediante la legge di Ohm e la legge di Kirchhoff conoscendo la corrente di lavoro richiesta I_f , la tensione di alimentazione V_s e la tensione di giunzione del Led alla corrente di lavoro data, V_f .

Nel dettaglio, la formula per calcolare la resistenza in serie necessaria è:

$$R_s = (V_s - V_f) / I_f$$

Misurata in ohm (volt/ampere), questo si dimostra considerando il Led come una seconda resi-

stenza calcolata come:

$$V_f \Omega / I_f$$

Ponendo V_s uguale alla somma delle tensioni ai capi della resistenza del Led:

$$V_s = V_r + V_f = R_s I_f + V_f I_f / I_f$$

Da cui:

$$R_s I_f = V_s - V_f$$

In linea generale, quando non si possiede il dato tecnico specifico, si può considerare per i Led consueti di diametro 5 mm una tensione V_f pari a circa 2V e una corrente di lavoro I_f prudenziale di 10-15mA, fino a 20 mA.

Valori superiori di corrente sono in genere sopportati, ma non assicurano un funzionamento duraturo.

Per i Led di tipo flash, per i quali la corrente può variare tra 20 e 40 mA, i valori minimo e massimo della resistenza saranno 250 e 500 (valori standard 270 Ohm e 470 Ohm).

Poiché i Led sopportano una bassa tensione inversa (solo pochi volt), se sono alimentati a corrente alternata, occorre proteggerli ponendovi in parallelo un diodo con polarità invertita rispetto al Led ("antiparallelo").

Non è consigliabile inserire un diodo in serie per due motivi: in primo luogo la tensione di alimentazione dovrebbe essere superiore alla somma delle due tensioni di giunzione. In se-

condo luogo, la tensione si può ripartire sui due diodi in modo da superare comunque la tensione inversa sopportata dal Led.

In qualche caso si può usare un ponte di quattro diodi per assicurare che una corrente diretta scorra sempre attraverso il Led.

In questo caso saranno sempre interessati due diodi e quindi la tensione d'alimentazione dovrà sempre essere superiore al doppio della tensione di giunzione.

Se si vuole alimentare un Led con la tensione di rete, senza che il nostro circuito dissipi troppa energia nella resistenza in serie, si può usare un circuito costituito da un condensatore collegato in serie a una sezione, che consiste nel Led in parallelo a un diodo di protezione, (con polarità invertita per limitare la tensione inversa) e al tutto seguirà ancora in serie, una resistenza di protezione, che serve a limitare la scarica all'accensione (di valore un decimo della reattanza del condensatore alla frequenza di rete).

Il valore della capacità del condensatore dipenderà dalla reattanza (Impedenza) che lo stesso dovrà presentare alla frequenza di rete per far scorrere la voluta corrente I_f nel Led.

La massima quantità di luce che può essere emessa da un Led è limitata essenzialmente dalla massima corrente media sopportabile, che è determinata dalla massima potenza dissipabile dal chip, i recenti dispositivi progettati per impieghi professionali hanno una forma adatta ad accogliere un dissipatore termico, assolutamente necessario per smaltire il calore prodotto: sono ormai in commercio Led a luce bianca con

potenza di 10 W e corrente assorbita di 1 ampere. Quando sono richiesti valori d'uscita più alti normalmente, si tende a non usare correnti continue, ma a usare delle correnti pulsanti con duty cycle scelto in maniera opportuna.

Ciò permette alla corrente e, di conseguenza, alla luce di essere notevolmente incrementate, mentre la corrente media e la potenza dissipata rimangono nei limiti consentiti.

1.6. Struttura e tipologie

La struttura di un Led è pressoché identica per ciascuna tipologia disponibile oggi; ciò dipende dalla sua natura piuttosto semplice e di facile realizzazione. Le parti che lo compongono, sebbene differenti per forma, dimensione e a volte per composizione chimica sono sempre le stesse e le differenze più rilevanti interessano la forma, la disposizione geometrica, più che la sostanza.

Per comprendere la struttura e conseguentemente le differenze tra le varie tipologie, conviene studiare inizialmente il Led a bulbo da 5 mm, ovvero il primo sviluppato con successo commerciale, allo scopo di emettere luce per pannelli elettronici e applicazioni simili e in seguito anche per l'illuminazione.

Partendo dalle parti esterne, si trovano due bacchette metalliche di lunghezza diversa: l'anodo

è il più lungo e il catodo il più breve.

Essi costituiscono anche la struttura su cui è assicurato l'intero Led. Anodo e catodo sono parzialmente immersi in una piccola capsula (dotata di un dentello per facilitarne il posizionamento e il montaggio) di plastica trasparente ad alta resistenza, qui si trova il vero cuore del diodo: il catodo termina con una piastrina detta "incudine" sulla quale è posato il semiconduttore con giunzione PN, che risulta quindi connesso al polo negativo e collegato poi, con un filamento metallico, all'estremità sagomata dell'anodo. In cima al blocco di plastica è poi collocata una piccola lente dello stesso materiale, allo scopo di direzionare, secondo le esigenze, il fascio luminoso.

E' evidente quanto siano, di fatto, ridotte le dimensioni del diodo luminoso vero e proprio, costituito, infatti, da una sottilissima piastrina di meno di un millimetro di lato, posata sull'incudine del catodo e poi collegata, da un filamento all'anodo.

Il filamento è la parte "sensibile" del Led, infatti, le alte temperature che il diodo può raggiungere, rischiano di fondere il sottilissimo filamento, interrompendo così il passaggio di corrente e ponendo irrimediabilmente fine alla vita del Led.

La capsula, che ha funzioni sia di protezione sia ottiche, è molto resistente e garantisce al diodo protezione da aggressioni di tipo chimico e meccanico, rendendo il Led virtualmente indistruttibile. Solitamente capsula e lente, considerate funzionalmente due parti separate, ma spesso

costituite dallo stesso materiale, sono costituite da resina epossidica, ovvero un polimero termoindurente, utilizzato nell'industria per le applicazioni più svariate: dai circuiti elettronici fino agli scafi d'imbarcazioni.

Capsula e lente sono realizzate sia diffondenti sia trasparenti, secondo gli scopi, così come, solitamente, sono del colore della luce emessa, anche se questo varia da Led a Led.

Questo tipo di tecnologia, senza la minima variazione, è realizzata in dimensioni 8, 5 e 3 mm.

La seconda tecnologia fondamentale è quella deputata principalmente all'illuminazione: si tratta dei Led ad alto potenziale (High Power Leds) che si configurano con tecnologia SMT (Surface Mounted Technology) ovvero sono montati su una piastrina.

Questo tipo di diodi lavora con intensità di cor-

rente a partire da centinaia di milliampere, fino a oltre l'ampere, consentendo l'emissione di flussi luminosi superiori al migliaio di lumen.

In questo caso il surriscaldamento è un pericolo grave, tale da determinare la fusione del filamento anche in meno di un secondo.

Per questo motivo la capsula è applicata su un dissipatore di calore a piastrina.

Il Led è costituito da un vero e proprio pacchetto, realizzato a partire dal diodo vero e proprio ottenuto sovrapponendo su strati successivi il semiconduttore, attraverso un processo definito epitassia, ovvero la posa di spessori infinitesimi (dell'ordine del nanometro o di centinaia di micron). Il diodo è poi applicato su un supporto in materiale plastico, connesso tramite filamenti metallici alla rete elettrica, poi coperto da una lente in resina epossidica dotata di una camera a sua volta riempita di silicone, allo scopo di

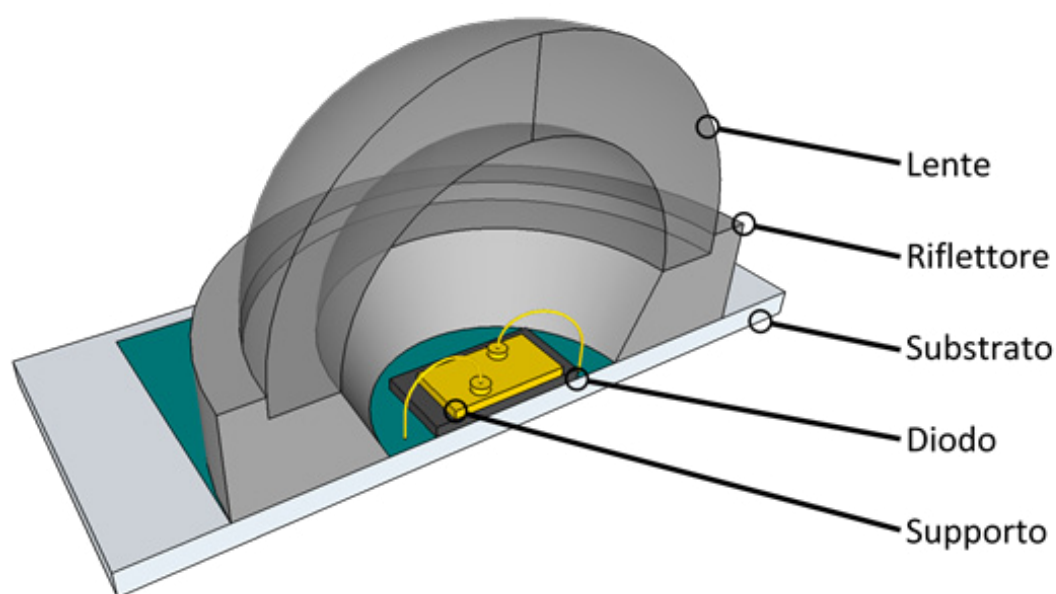


Figura 43: schema strutturale di un Led SMT

proteggere da aggressioni chimiche e meccaniche la delicata struttura e le fragili connessioni del Led.

Il pacchetto è poi montato su un singolo dissipatore, o su una scheda elettronica, dotata a sua volta di sistemi di dispersione del calore, insieme con altri Led.

2. CONFRONTO CON LE TIPOLOGIE DI LAMPADE TRADIZIONALI

Sono state fin qui evidenziate le caratteristiche proprie della tecnologia Led, tuttavia non è stato ancora possibile verificare quale sia il reale stato di evoluzione rispetto alle tecnologie tradizionali, quanto sia superiore e sotto quali aspetti.

Gli aspetti da considerare in questo confronto sono molteplici e non è possibile svincolare il confronto stesso dal campo di applicazione cui le sorgenti sono destinate: i valori di flusso emesso suggeriscono quale lampada, tra due, è la più potente, ma conoscere l'applicazione cui sono destinate, può indicare quale sia il flusso più ragionevole da installare; senza che sia, necessariamente, quello più elevato.

In questo caso inoltre, limitare il confronto alla finalità d'uso, evita di insistere in confronti privi di senso pratico, come verificare le prestazioni di un Led rispetto a quelle di una lampada a incandescenza, applicati all'illuminazione di una

pista di dimensioni olimpioniche, poiché è ovvio che una lampada a filamento non è affatto idonea a questo tipo di applicazione.

E' chiaro che la sfida tra tecnologie vecchie e nuove è, per certi versi, impari; è ormai chiaro che un singolo diodo Led non può avere flussi imponenti, ma è altrettanto evidente che è possibile associare in un singolo apparecchio decine, o centinaia, di Led rendendo quindi questa soluzione paragonabile a un apparecchio con una lampada tradizionale.

Questo sembrerebbe apparentemente svantaggiare il Led rispetto a tecnologie più adulte, tuttavia aumenta la possibilità di scelte e di combinazioni possibili, a netto vantaggio della versatilità.

E' evidente, dunque, che non ha senso un confronto tra una lampada al sodio ad alta pressione e un singolo Led, ma lo ha confrontare due apparecchi per applicazioni esterne, per illuminazione di grandi superfici, il primo equipaggiato con una lampada tradizionale, il secondo dotato di un numero di Led tali da ottenere un flusso paragonabile: ora sarà possibile valutare la potenza assorbita, la durata, la resa cromatica e tutti gli aspetti utili al confronto in uno specifico campo di applicazione, fino a dedurre se vi sia, o no, una tecnologia migliore di un'altra. Secondo questo semplice principio, saranno valutati due grandi campi applicativi: le esigenze tecniche, funzionali e televisive da una parte e quelle coreografiche dall'altra.

Per prima cosa, è necessario considerare l'efficienza luminosa di un singolo diodo luminoso;

tale calcolo va effettuato considerando tre delle sue caratteristiche principali, fornite dal produttore: flusso emesso Φ (lm), tensione elettrica di alimentazione V_f (V) e intensità di corrente diretta I_f (mA). Una volta noti questi valori, l'efficienza luminosa, espressa in lm/W, si calcola:

$$\Phi / I_f \times V_f$$

Ovvero flusso emesso, diviso per la potenza assorbita in Watt.

E' necessario considerare anche le eventuali perdite dovute alla dispersione termica, dipendente da possibili surriscaldamenti, che spesso i produttori suggeriscono essere intorno al 10% del flusso luminoso. Una volta che il Led sia inserito in un apparecchio completo, andranno poi considerate le dispersioni dovute all'alimentatore, comunemente valutate intorno al 10-15%. L'ultima delle eventualità da prendere in considerazione è la dispersione di flusso dovuta all'ottica dell'apparecchio: spesso i Led hanno

un angolo di emissione ristretto, caratteristica che talvolta complica lo sfruttamento ottimale del flusso emesso; questo problema è però di difficile valutazione, per via della varietà di diodi, ottiche e apparecchi disponibili.

Le esigenze tecniche, funzionali e televisive consistono, sostanzialmente, nel rispetto dei valori d'illuminamento a terra richiesti dalla normativa vigente: nel caso di una pista di ghiaccio, secondo l'uso e delle dimensioni, devono essere soddisfatti alcuni requisiti d'illuminamento, tali da consentire lo svolgersi di competizioni agonistiche, riprese televisive e allenamenti.

Le tecnologie attualmente utilizzate per soddisfare questo tipo di richieste includono principalmente le lampade al sodio ad alta pressione e quelle ad alogenuri metallici.

E' necessario prendere in considerazione la tipologia di apparecchio più idonea per questo tipo di applicazione e verificare in quanti e quali aspetti un apparecchio a Led analogo sia migliore o peggiore. Considerando tre apparecchi

03 CONFRONTO TRA APPARECCHI (equipaggiati con sorgenti a Sodio, Ioduri e Led)

	Sodio ad alta pressione Bruciatore ceramico	Ioduri metallici con bruciatore ceramico (attacco singolo)	Led ad alta luminosità
Potenza nominale (W)	150	150	150
Flusso emesso (Lm)	15.000	14.000	12.290
Numero di lampade	1	1	130 Led
Potenza assorbita	169	165	162
Efficienza luminosa lampada (Lm/W)	100	93,3	81,9
Tempo di accensione/ riaccensione (min/sec)	15'	4'/30"	0'/0"
Vita media al 50% (h)	28.000	12.000	Oltre 50.000
Temperatura colore (K)	2.000	3.000/4.200	Da 3.400 a 6.000
Resa cromatica Ra	25	80/90	70/80

04 CONFRONTO TRA APPARECCHI (equipaggiati con sorgenti a Sodio, Ioduri e Led)

	Sodio ad alta pressione Bruciatore ceramico	Ioduri metallici con bruciatore ceramico (attacco singolo)	Led ad alta luminosità
Potenza nominale (W)	1.000	1.000	136
Flusso emesso (Lm)	130.000	85.000	11.183
Numero di lampade	1	1	120 Led
Potenza assorbita	1.065	1.041	147
Efficienza luminosa lampada (Lm/W)	130	85	81,9
Tempo di accensione/ riaccensione (min/sec)	15'	4'/30"	0'/0"
Vita media al 50% (h)	28.000	12.000	Oltre 50.000
Temperatura colore (K)	2.000	3.000/4.200	Da 3.400 a 6.000
Resa cromatica Ra	25	80/90	70/80

equipaggiati con sorgenti di pari potenze nominali, il confronto suggerisce gli seguenti esiti illustrati in tabella 03.

Questo paragone ha, tuttavia, un valore puramente teorico, poiché gli apparecchi più idonei per l'illuminazione di una vasta area come una pista di ghiaccio hanno le seguenti caratteristiche riportate in tabella 04.

Analizzando i dati brevemente riassunti qui sopra, si deduce che la tecnologia Led dispone al minimo di apparecchi capaci di un flusso luminoso di poco superiore ai 10.000 lm, quando le altre sorgenti offrono flussi di molto superiori: 130.000 lm per le lampade al sodio ad alta pressione e fino a 320.000 per quelle ad alogenuri metallici. Il dato è solo parzialmente corretto, poiché in effetti sono disponibili proiettori a Led con flussi anche molto superiori, ma di certo non paragonabili a quelli di riferimento o addirittura non affidabili, poiché ancora troppo sensibili agli aumenti di temperatura, perciò il dato di durata, che per i diodi è estremamente van-

taggioso, viene ad essere negato.

La durata dei Led è innegabilmente superiore, tuttavia il ciclo di montaggio di una pista esterna, nel nostro paese, occupa per lo più tre o quattro mesi invernali e in alcuni casi alcune applicazioni estive di breve durata; per questo la lunghezza della vita della sorgente non è un parametro fondamentale. Allo stesso modo il decadimento luminoso non risulta un aspetto di importanza radicale.

Un discorso analogo può essere fatto per i tempi di accensione, che non necessitano di essere istantanei.

Resa cromatica e temperatura colore sono invece aspetti in cui il Led è capace di offrire vantaggi sicuri, soprattutto rispetto alle lampade al sodio.

Tornando infine al flusso emesso, è chiaro che il Led non è ancora in grado di competere con un singolo apparecchio a tecnologia tradizionale, tuttavia è possibile montare a gruppi più apparecchi simili, raggiungendo flussi vicini a quelli

citati.

Quale sia l'esito finale di questo confronto, non è ancora possibile stabilirlo, fino a quando non saranno verificati gli esiti illuminotecnici di un impianto a Led per le tipologie di piste considerate.

Il secondo campo di applicazione è quello dell'illuminazione a scopo scenografico; in questo caso il confronto va fatto con lampade ad alogeni e fluorescenti, in altre parole quelle adottate da apparecchi, cambia colore o per effetti proiettati.

Le tecnologie utilizzate per apparecchi scenici sono molto varie e gli scopi cui queste tecnologie sono finalizzate sono altrettanto vari e numerosi; per questo sarebbe inutile concentrare il confronto su ogni singola variante possibile, quando invece è più ragionevole considerare solo gli aspetti generali utili per un effetto coreografico.

Considerando ad esempio un apparecchio cambia-colore, è necessario valutare i seguenti aspetti riportati in tabella 05.

Le valutazioni in questo campo specifico suggeriscono che il Led offra vantaggi concreti in termini di flessibilità cromatica, di variazione di flusso e di tempi di accensione e riaccensione, prima ancora che di flusso emesso totale e di potenza.

Queste considerazioni schematiche sono da considerarsi introduttive all'analisi del problema, poichè la questione sarà più diffusamente e precisamente valutata in fase di progetto, dove saranno fornite quindi soluzioni più specifiche e conclusioni più esaustive.

05 CONFRONTO TRA APPARECCHI (cambiacolore)

	Alogeni riflettore dicroico	Fluorescente	Ioduri metallici	Led ad alta luminosità (tutti, R, G, B)
Potenza nominale (W)	150	120	150	150
Flusso emesso (Lm)	500	9.000	10.500	1.230, 2.040, 3.795, 825
Numero di lampade	1	1	1	15
Potenza assorbita	variabile	variabile	variabile	variabile
Efficienza luminosa lampada (Lm/W)	33,3	75	70	8,2 - 13,6 - 25,3 - 5,5
Tempo di accensione/riaccensione (min/sec)	0'/0" circa	0'/0" circa	Non riaccendibile a caldo	0'/0"
Vita media al 50% (h)	500	20.000	3.000	50.000
Colori disponibili	12 (CMY+Bianco)	12 (CMY+Bianco)	8/12 (CMY+Bianco)	16.700.000 (RGB)
Temperatura colore (K)	3.000	3.000	8.500	-
Resa cromatica Ra	100	80	70	-
Regolabile (dimmer)	sì	sì	sì	sì

I. PREMESSA

I.1. Le ragioni di una nuova proposta: analisi e valutazione della tecnologia a Led

In seguito all'analisi degli aspetti tecnologici del Led, è evidente che i suoi veri vantaggi, rispetto alle sorgenti tradizionali, risiedono nella durevolezza, nelle ridotte dimensioni, nella versatilità, nella varietà cromatica, nella resa cromatica, nella gestione del flusso, nell'efficienza luminosa e molti altri.

Non è ancora chiaro se e quanto questa tecnologia possa essere superiore, e in quali aspetti, a quelle tradizionali in un campo di applicazione specifico; in altre parole se il Led sia davvero pronto a sostituire le lampade ad alogenuri metallici nell'illuminazione di grandi superfici dedicate allo sport e se sia il loro naturale successore, nell'illuminazione sia a scopo funzionale, sia a scopo coreografico.

La diffusione che il Led ha avuto in questi anni sembra incoraggiare chi sostiene che esso sia la sorgente luminosa del futuro; questa prospettiva è plausibile, poiché la ricerca di cui gode questa tecnologia può contare su grandi risorse e su un'evoluzione continua; ma oggi, mentre nell'illuminazione architettonica d'esterni, in quella d'interni e in molte altre applicazioni, il Led sembra essersi conquistato un posto privilegiato, in altri campi le tecnologie tradizionali

mantengono ancora saldo il loro primato.

Tutte le più grandi aziende produttrici di Led, almeno le maggiori, investono grandi risorse nella ricerca e sviluppano diodi singoli capaci di efficienze luminose sempre migliori ma questi prototipi, sovente, tardano ad uscire dai laboratori e a confluire sul mercato.

E' evidente che le potenzialità sono enormi e che in ambito sperimentale sono stati ottenuti chip capaci di prestazioni elevatissime, tuttavia ad efficienze così alte, non sempre corrisponde altrettanta affidabilità o una durata accettabile, specialmente nel caso dei diodi con potenze nominali molto superiori ad 1 W.

Per questo motivo, oggi, la tecnologia rende disponibili diodi con efficienze interessanti ma non ancora superiori a quelle di alcune sorgenti tradizionali e i vantaggi più apprezzati del led rimangono la sua durata media e la sua robustezza.

In queste pagine sarà proposto il progetto di un impianto d'illuminazione per una pista di ghiaccio temporanea, di dimensioni olimpioniche, basato prima sulla tecnologia a ioduri e poi su quella a Led; in questo modo le caratteristiche illuminotecniche, energetiche e qualitative di questi due impianti saranno confrontate, in tutti i loro aspetti. L'esito del confronto tra le due tipologie d'impianto, a Led da una parte e a lampade a scarica dall'altro, potrà suggerire se, in

questo tipo di applicazione, il Led sia in grado di sostituire o meno le sorgenti tradizionali; quali siano i suoi pregi e i suoi limiti e, in conclusione, quali siano le prospettive del suo sviluppo.

Scegliendo una pista olimpionica regolamentare sarà possibile eseguire una verifica prestazionale di un impianto, applicato a una pista capace, per struttura e dimensioni, di ospitare eventi del più alto livello agonistico e di risonanza almeno nazionale.

L'impianto olimpico è idoneo all'utilizzo per spettacolo e attività sportive a tutti i livelli e per tutte le discipline e attività ludiche, complementari e propedeutiche alla pratica del pattinaggio. L'ampiezza della superficie a ghiaccio prevede un impiego in piazze e siti di grande dimensione e con ampiezza sufficiente a contenere anche il necessario allestimento di tribune, oltre alle vie di esodo e agli spazi tecnici, che per questi impianti sono numerosi e dimensionalmente rilevanti.

Come è stato fatto fino ad ora, è necessario distinguere le esigenze da soddisfare negli ambiti principali, questa volta prestando la dovuta attenzione ai singoli aspetti funzionali del problema.

Dovranno essere considerate le utenze di una pista e le loro attività, anche in base al livello di difficoltà dell'attività stessa; dovrà essere considerata la necessità di eseguire riprese televisive, anche in alta definizione e infine dovranno essere garantite le esigenze di illuminazione coreografica.

Questa tipologia di pista, in ragione della sua

flessibilità di utilizzo, deve essere indagata in tutte le possibili attività, ciascuna delle quali ha requisiti illuminotecnici normativi specifici; assicurarli è vincolante per poter consentire il loro svolgimento.

In fase progettuale si tenterà di rispettare i requisiti illuminotecnici utili per gli eventi agonistici di maggiore importanza, fino ad oggi ottenuti con apparecchi a ioduri metallici, cercando di ottenere un impianto a Led equilibrato, agile, flessibile, energeticamente competitivo, durevole, facile da installare, mantenere in efficienza e coreograficamente espressivo, oltre che superiore o equivalente a quello di confronto, in termini di flusso emesso, uniformità degli illuminamenti e controllo dell'abbagliamento.

Prima di procedere con il progetto vero e proprio è necessario riprendere l'analisi delle caratteristiche ottiche del ghiaccio; nel capitolo dedicato all'interazione tra luce e materia sono stati proposti valori di coefficiente di riflessione e di diffusione noti, per alcune forme particolari di ghiaccio, tuttavia non è ancora chiaro se e quali di queste caratteristiche siano applicabili ad una pista di pattinaggio.

Al fine di realizzare un modello teorico del ghiaccio su cui fare le successive valutazioni progettuali, è stata eseguita una campagna sperimentale che sarà qui di seguito descritta.

2. INDAGINI SPERIMENTALI SULL'INTERAZIONE TRA LUCE E GHIACCIO

Per meglio comprendere le caratteristiche ottiche del ghiaccio, già ampiamente analizzate, si è proceduto ad una serie di ricerche sperimentali: sia semplici osservazioni dei fenomeni, sia misurazioni quantitative.

Lo scopo di queste indagini è comprendere nel dettaglio le caratteristiche ottiche del ghiaccio comune, per poi riprodurle, con la maggiore fedeltà possibile, nel software di calcolo illuminotecnico, ottenendo così un modello capace di risultati verosimili.

L'indagine si è concentrata su due aspetti principali: la diffusione luminosa attraverso il ghiaccio e la riflessione superficiale.

2.1. La diffusione luminosa

Per prima cosa si è cercato di valutare quantitativamente quale parte di un flusso luminoso, che percorre longitudinalmente una lastra di ghiaccio, viene emessa sulle sue facce esterne e fino a che distanza dalla sorgente.

Applicando sorgenti luminose, dalle caratteristiche illuminotecniche note, a contatto con la piastra, sulla spalla laterale di un lato corto, si è proceduto a misurare l'illuminamento sulla faccia superiore della superficie di ghiaccio.

Le misurazioni, effettuate con un luxmetro, sono state eseguite lungo un reticolo regolare, di 5 cm di lato, partendo dal punto più vicino alla sorgente, e allontanandole progressivamente. La dimensione delle singole celle del reticolo, pari a 5 cm, corrisponde al diametro del senso-



Figura 44: il fenomeno della diffusione della luce attraverso la lastra di ghiaccio campione

re del luxmetro; si è cercato quindi di ottenere una piastra capace di offrire il maggior numero di celle, compatibilmente con lo spazio disponibile nel refrigeratore utilizzato.

Il reticolo di celle è costituito da sette punti in larghezza e sedici in lunghezza, ciò significa che sette rilevamenti sono equidistanti dalla sorgente luminosa; il valore medio dei sette rilevamenti, eseguiti fianco a fianco, viene poi utilizzato per compiere le successive considerazioni e tracciare un grafico dell'andamento degli illuminamenti misurati sulla superficie, dal punto più prossimo a quello più lontano dalla sorgente.

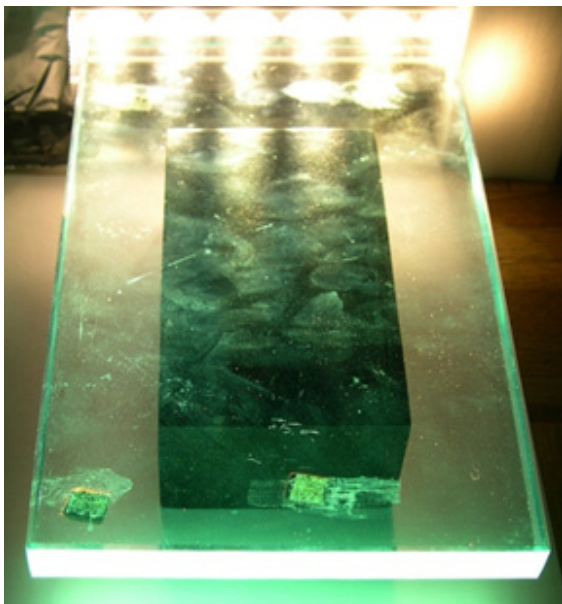


Figura 45: il vetro, privo di particelle diffondenti, si lascia attraversare dalla luce da un capo all'altro

2.2. La piastra di ghiaccio ampione

Allo scopo di ottenere un campione di ghiaccio il più possibile simile a quello di una comune pista si è proceduto alla realizzazione di uno stampo rettangolare capace di ospitare un volume di 35 per 80 cm e di altezza variabile, compresa tra 3 e 6 cm.

Spesso, nella pratica, una pista di ghiaccio è ottenuta allagando la vasca a strati successivi, di spessore pari a circa 1 cm; quest'operazione è utile ad accelerare il processo di congelamento poiché si incarica la serpentina di congelare masse d'acqua consecutive di spessore contenuto.

Nella pratica vengono stesi strati successivi fino a ottenere uno spessore totale variabile tra i 2 e 4,5 cm per le piste fisse e fino a 7-8 cm per quelle mobili.

In fase di sperimentazione si è potuto verificare che l'atto di produrre il ghiaccio per strati successivi non determina il formarsi di superfici d'interfaccia rilevanti tra gli strati contigui; questo non avviene perché nel momento in cui si sparge acqua su uno strato di ghiaccio, questa scioglie la parte superficiale che poi ricongela insieme con quella nuova.

Sebbene sia possibile distinguere le stratificazioni in alcuni punti, per via della presenza di superfici di interfaccia, il fenomeno non è generalizzato e non comporta, com'è ovvio, problemi di rifrazione, in ragione del fatto che le due sostanze a contatto sono dotate di caratteristi-

che ottiche identiche, principalmente l'indice di rifrazione.

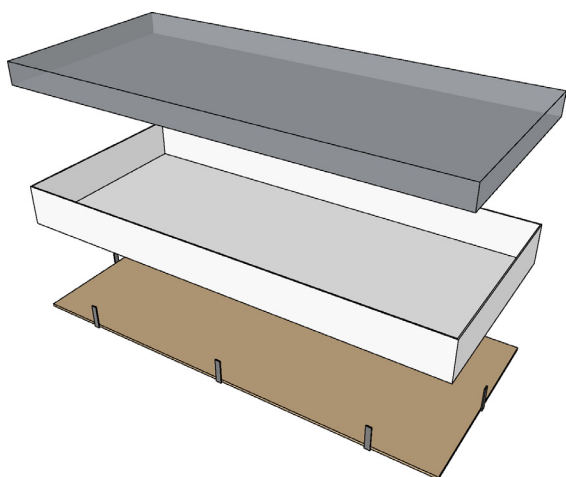


Figura 46: schema di realizzazione della piastra di ghiaccio campione. Dall'alto si trovano la piastra, lo stampo e il pannello di irrigidimento

Di conseguenza, per ragioni di tempo e di semplicità si è proceduto realizzando le piastre sperimentali in un'unica colata d'acqua.

Per quel che concerne lo spessore, si è proceduto utilizzando un valore medio di 3 cm per evitare che la piastra si spezzasse inavvertitamente e per eseguire misurazioni che si potessero ritenere ragionevolmente valide per spessori superiori o inferiori di circa un centimetro.

La maggiore difficoltà è stata ottenere piastre di spessore uniforme, per via del fatto che il fondo del congelatore a pozzo utilizzato è pensato in modo da convogliare l'acqua in un'unica canalina di scarico posta in uno degli angoli della base; quindi ottenere la perfetta posizione orizzontale non è sempre stato possibile; inoltre il volume della camera coibentata del congelatore, piuttosto piccola, tendeva a favorire alte

concentrazioni di umidità nell'aria, determinando fenomeni di brinamento sulla superficie della piastra, facendo sì che essa, naturalmente piana, risultasse, a volte, rugosa ed irregolare. Nonostante alcune variazioni, dovute all'errata inclinazione della vasca, lo spessore è sempre rimasto intorno ai 3 cm, ideale per convogliare l'intero flusso uscente dalle sorgenti nel ghiaccio.

Inoltre il naturale aumento di volume dell'acqua, dovuto al congelamento, imponeva alla faccia libera superiore una forma non più perfettamente piana, ma leggermente convessa; per questo le misurazioni sono state per lo più effettuate sulla faccia inferiore della lastra, certamente piana, poiché a contatto diretto con il fondo dello stampo.

Avendo, in fase di studio del ghiaccio, verificato che le sue caratteristiche ottiche superficiali variano in relazione alla sua temperatura e quindi alla presenza o assenza di un sottile film di acqua liquida o brina, si è proceduto ad effettuare misurazioni in diverse condizioni; si è così verificato che la diffusione, avvenendo all'interno del volume di ghiaccio, non determinava variazioni di rilievo nelle letture effettuate a contatto diretto con la superficie.

Un altro aspetto considerato, sempre a proposito delle caratteristiche ottiche superficiali, è stata la possibilità che una pista subisca graffi e solchi per effetto delle lame dei pattini: a tale proposito sono state praticate manualmente delle fessurazioni con l'ausilio di una lama metallica, anche con passaggi sovrapposti.

Anche in questo caso si è verificato che le misurazioni non hanno subito sensibili variazioni, per una ragione molto semplice: il ghiaccio è di natura caratterizzato da una superficie irregolare, che determina una riflessione ibrida, sia speculare sia diffusa, in circostanze come quelle sperimentate, perciò, la presenza di altre irregolarità superficiali non ha determinato sostanziali variazioni nei valori registrati a contatto.

In sintesi, il fenomeno diffusivo, qualunque siano le condizioni superficiali della lastra, non varia, poiché avviene all'interno del volume; il fenomeno della riflessione, avvenendo al di fuori del volume, è invece fortemente influenzato dalle condizioni superficiali.

Un ultimo aspetto da considerare è la quantità, la dimensione e la distribuzione delle bolle d'aria e la quantità di sali disciolti nella massa di ghiaccio.

In prima istanza si può escludere che l'acqua utilizzata per la piastra sperimentale e quella utilizzata per una qualunque pista, sia fissa che temporanea, siano differenti dal punto di vista della concentrazione e della varietà di minerali soluti; è ovvio che a seconda della località le caratteristiche minerali dell'acqua possano variare, ma in ogni caso l'acqua utilizzata proviene dalla rete idrica nazionale, perciò soggetta alle norme igieniche statali, il che consente di trascurare il problema, supponendo che le misurazioni non varino sensibilmente con un'acqua piuttosto che un'altra.

La presenza di bolle è una questione più delicata e perciò di più difficile soluzione.

Lo studio del ghiaccio suggerisce che il diametro delle bolle, che concorrono al fenomeno della diffusione, sia per lo più molto inferiore al millimetro, ma dimostra anche che si possono formare bolle di dimensioni anche molto maggiori; l'osservazione della piastra sperimentale ha poi dimostrato che le bolle si concentrano per lo più nella parte più interna della massa: in altre parole il gas disciolto più esterno è riuscito a risalire e fuggire dall'acqua prima del congelamento, quello più interno si è accumulato in bollicine che invece non hanno avuto il tempo di migrare verso la superficie, prima della solidificazione. Questo fenomeno avviene diversamente quando il ghiaccio è ottenuto per strati successivi, poiché la distribuzione delle bolle intrappolate lascia intravedere la stratificazione, tuttavia, anche in questo caso, le misurazioni non hanno dimostrato differenze apprezzabili.

L'unico sistema per liberare l'acqua dalla presenza di gas disciolti è la bollitura; in questo modo si otterrebbe un ghiaccio dalle caratteristiche ottiche identiche a quelle dell'acqua.

2.3. Misurazioni con luxmetro e valutazioni

In un ambiente privo di luce diretta, ma non completamente oscurato da quella naturale, si è posato a terra un telo bianco, e sopra di esso alcuni spessori di gomma morbida, utili allo scopo, per via della loro flessibilità, di facilitare

l'allineamento del ghiaccio con la sorgente, di bloccarlo facilmente nella posizione corretta e, al tempo stesso, fornire un isolamento termico adeguato.

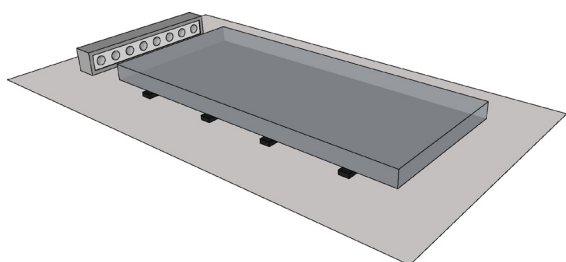


Figura 47: schema delle misurazioni con luxmetro. Dal basso si trovano il telo di fondo, i supporti in gomma, la lastra e la sorgente

Sopra gli spessori si è posata la lastra di ghiaccio, e a contatto con uno dei lati corti, la sorgente luminosa, procedendo poi alle serie di misurazioni con un luxmetro, eseguite con un reticolo di 7 per 16 caselle, partendo dal lato adiacente alla sorgente, allontanando progressivamente lo strumento, figura 48.

La prima serie di misurazioni è stata eseguita con una piastra a led bianchi, allo scopo di valutare qualitativamente il comportamento della luce attraverso la lastra di ghiaccio; si è così ve-

rificato come, in penombra, la piastra apparisse diffusamente luminosa, in modo intenso nella parte più prossima ai Led, debolmente in quella più lontana.

La seconda misurazione, eseguita con una piastra Led RGB, aveva lo scopo di verificare qualitativamente il comportamento dei raggi cromatici nel ghiaccio, sebbene l'ottica suggerisca che esso sia selettivamente assorbente alle varie lunghezze d'onda, nell'osservazione preliminare non è stato possibile riscontrare sostanziali differenze tra la penetrazione dei vari colori, di certo per via delle dimensioni contenute della lastra campione.

La terza e ultima serie di misurazioni è stata eseguita con le modalità precedentemente illustrate, ma con una piastra Led, le cui caratteristiche ottiche ed illuminotecniche sono offerte dal produttore.

A questo punto, con i dati a disposizione si è cercato di rispondere alle domande poste all'inizio del capitolo. Ovviamente le misurazioni sono state ripetute numerose volte, cercando di rendere invariate le condizioni al contorno.

06 ILLUMINAMENTI SU LASTRA DI GHIACCIO

		Luce ambientale														
Sorgente	4.410	2.470	1.500	860	540	360	350	250	200	180	160	130	110	110	80	90
	4.480	3.520	1.590	980	490	340	330	250	210	170	140	120	100	110	90	90
	4.080	3.880	1.790	910	550	350	330	250	200	160	130	120	100	100	90	80
	4.060	3.960	1.710	850	510	350	320	240	180	160	140	120	100	100	100	80
	4.720	3.230	1.390	690	430	320	310	230	180	160	130	120	120	110	100	80
	4.810	2.810	1.290	650	390	310	310	240	210	190	130	120	110	110	110	90
	4.040	2.110	1.090	600	390	330	360	280	230	210	160	130	100	100	90	90
Media	4.371	3.140	1.480	791	471	337	330	248	201	176	141	123	106	106	94	86

07 ILLUMINAMENTI SU PIANO LIBERO

		Luce ambientale														
Sorgente	146	578	522	380	284	209	157	120	100	77	64	51	43	35	29	25
	385	955	814	564	388	276	198	148	121	93	72	57	46	37	30	25
	383	1.018	940	682	472	331	237	174	136	104	81	63	49	41	34	28
	238	1.022	952	707	498	349	248	179	142	107	82	64	51	41	34	29
	383	1.015	941	682	474	331	236	170	137	106	80	64	50	40	33	27
	384	952	815	563	387	275	199	148	120	91	71	57	47	339	30	26
	145	578	520	386	283	205	156	122	100	79	62	50	41	34	30	24
		Luce ambientale														
Media	294	874	786	566	398	282	204	151	122	93	73	58	46	38	31	26

Il fenomeno di maggiore disturbo riscontrato era la difficoltà di allineare correttamente la direttrice del flusso con la lastra di ghiaccio, dovuta alle irregolarità della superficie e alla sua natura sdruciolevole.

Solo la serie di misurazioni effettuate con sorgente nota concorre a suggerire le considerazioni che seguono.

Innanzitutto sono state eseguite le misurazioni senza la lastra di ghiaccio, questo per vagliare il comportamento della piastra led in assenza di un mezzo diffondente; le misurazioni sono state eseguite sul piano ortogonale alla direzione del fascio luminoso, quindi sul telo a terra, in modo tale da ottenere risultati paragonabili a quelli ottenuti poi sulla superficie del ghiaccio.

Confrontando i due valori medi si possono fare le prime considerazioni:

- Sul piano libero dalla piastra sperimentale, i valori d'illuminamento orizzontale vanno progressivamente da quasi 294 fino a 26 lux, partendo dal punto più vi-

cino alla sorgente e allontanandosi progressivamente.

- Alla presenza della piastra di ghiaccio, misurando con il medesimo criterio, i valori d'illuminamento orizzontale vanno da quasi 4.000 fino a 90 lux circa.

Da questo si evince quanto la luce sia fortemente influenzata dalla massa del ghiaccio: una larga parte del flusso entrante è deviata e diffusa sulla faccia superiore della piastra.

Una seconda considerazione riguarda l'omogeneità del ghiaccio: in effetti, è ragionevole supporre che all'interno dello spessore della lastra le bolle e tutte le particelle diffondenti siano uniformemente distribuite, perciò se si eseguissero le misurazioni sulla piastra nella faccia orizzontale opposta, i valori in lux dovrebbero essere mediamente uguali.

Per questo motivo si può immaginare che la quantità di flusso che è diffusa per effetto del ghiaccio sia equamente distribuita in ogni direzione. A dimostrazione di questa tesi si può

affermare che le misurazioni, effettuate proprio capovolgendo la piastra, non fanno registrare variazioni di rilievo, bensì variazioni locali dovute ad eventuali condizioni di disturbo.

Per meglio comprendere l'andamento del fenomeno sono stati riportati in forma di grafico i valori medi misurati.

Nel caso specifico, si è operato su un piano cartesiano in cui, sull'asse delle ascisse si trova la distanza dalla sorgente espressa in metri e sull'asse delle ordinate, si leggono i valori d'illuminamento in lux.

Nel grafico di figura 49, sono state riportate le curve sia delle misurazioni effettuate con la lastra, sia quelle effettuate sul piano libero. Lo scopo di questa schematizzazione grafica è comprendere il comportamento della diffusione luminosa.

In blu è rappresentata la curva dei valori medi sperimentali, mentre in verde è stata rappresentata la curva di andamento dei valori d'illuminamento misurati sul piano libero dalla piastra di ghiaccio campione.

Osservando qualitativamente, prima che quantitativamente, la curva dei valori d'illuminamento registrati, si nota che essa ha un andamento curvilineo, apparentemente iperbolico o esponenziale, che nel primo tratto mostra come i valori d'illuminamento tendano a calare rapidamente, per poi progressivamente stabilizzarsi su un andamento quasi rettilineo verso il valore zero. Tale curva, però, non si comporta asintoticamente con l'asse delle ascisse, quindi senza mai incontrarla; questo perché una porzione di flusso sarà certamente sempre diffusa dal ghiaccio verso le facce, finché il flusso stesso

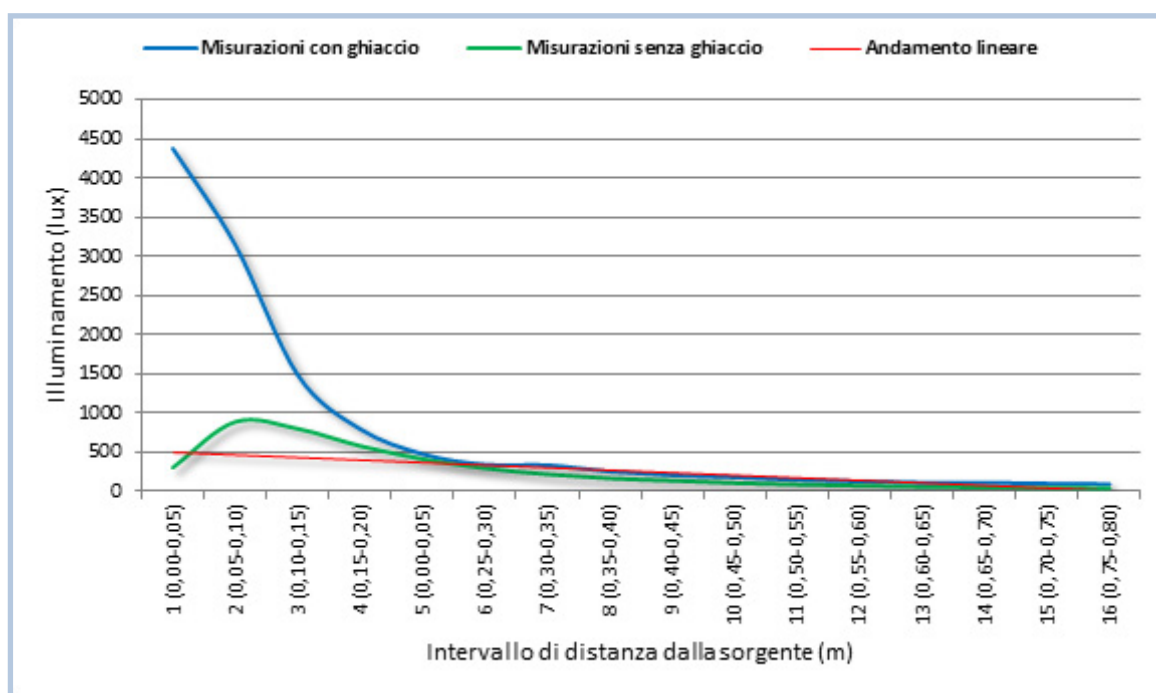


Grafico 2: rappresentazione cartesiana delle curve di illuminamento

non sarà completamente estinto, portando così la curva al valore 0.

Per questo motivo, al fine di calcolare il punto in cui l'illuminamento scende a zero, è stata considerata la porzione finale della curva, dal punto in cui essa tende a stabilizzarsi su un andamento lineare; da questo punto in avanti, quindi escludendo la porzione iniziale dei dati, è possibile rappresentare la curva come fosse una retta (la linea in rosso) e verificare quale sia il punto in cui essa incontra l'asse delle ascisse.

Il valore così ottenuto è il cammino libero percorso dal flusso luminoso, pari a 0,85 m, il che significa che il flusso luminoso non si diffonde più sulla superficie a circa 85 cm dalla sorgente luminosa. Ovviamente, se, per effetto della diffusione, fino a 85 cm la luce si riverbera attraverso il ghiaccio sulle facce superiore e inferiore della piastra, si può ritenere che in quel punto il raggio si sia completamente estinto.

Il cammino libero percorso dalla luce prima di estinguersi è il reciproco del coefficiente di estinzione k ; il calcolo è semplice e fornisce un risultato pari a $1,17 \text{ m}^{-1}$, circa in linea con i valori riportati in precedenza.

Si nota come il primo tratto della curva verde sia crescente, per poi impostarsi su valori decrescenti; questo dipende dalle lenti della piastra Led utilizzata, che hanno un cono di apertura sufficientemente stretto da impedire che il flusso incida abbondantemente sulla superficie entro 5 cm di distanza dalla sorgente.

Il flusso della sorgente è noto, 1.680 lm, generato da 48 diodi da 35 lm ciascuno per effetto

del rendimento ottico delle lenti, durante le misurazioni solo 12 agivano sulla piastra, mentre gli altri erano oscurati completamente, perciò il flusso entrante nel ghiaccio era di 420 lm; considerando che l'illuminamento medio sulla superficie superiore della piastra è circa 650 lm e che la superficie totale della faccia superiore è di $0,28 \text{ m}^2$, allora il flusso agente su di essa è di circa 182 lm. Ciò significa che sulla faccia superiore incide in media il 42% del flusso totale entrante. Questo calcolo ha uno scopo assolutamente indicativo, perché, com'è stato detto, il flusso diffuso tende presto a calare fino ad avvicinarsi a 0, ma è utile per stimare la percentuale globale di un flusso luminoso diffuso trasversalmente rispetto alla sua direzione.

Cercando di schematizzare il fenomeno è necessario, per prima cosa, premettere che la curva di diffusione luminosa della sorgente utilizzata rende difficile fornire risultati certi; questo perché il fascio luminoso tende ad attraversare il ghiaccio conservando il suo profilo conico.

Per maggiore precisione sarebbe stato utile utilizzare un fascio luminoso perfettamente lineare, come un laser, tuttavia la debolezza del flusso emesso avrebbe reso difficile effettuare le misurazioni con il luxmetro.

Si immagini la lastra come una sequenza di celle identiche, nelle quali si ripete, una dopo l'altra, lo stesso fenomeno: entra un flusso noto, una parte viene diffusa sulle facce superiore, inferiore e laterali, generando su di esse un illuminamento misurabile, la parte rimanente del flusso entra nella cella successiva dove viene parzial-

mente diffuso e così via, figura 50.

Considerando una singola cella di 5 per 5 cm, quindi di 0,0025 m², sapendo che l'illuminamento medio su di essa è 4.000 lx a contatto con la sorgente e 90 lx all'estremo opposto, si deduce che il flusso agente su di esse è rispettivamente di 10 lm e di 0,225 lm.

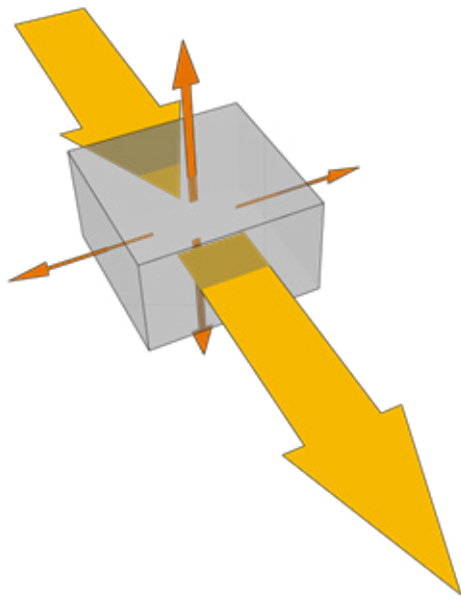


Figura 48: rappresentazione schematica del fenomeno della diffusione luminosa

E' ragionevole affermare che il flusso entrante si diffonda in egual misura in tutte le direzioni, per cui, se la lastra ha uno spessore di 3 cm, su ciascuna delle facce laterali di 3 per 5 cm, quindi 0,0015 m², insisterà un flusso pari a tre quinti di quello agente su una cella quadrata.

Se il flusso agente su una cella quadrata è pari ad **a**, il totale è:

$$2a + 6a/5 = 16a/5$$

Nella prima cella il flusso diffuso totale sarà 32 lm; nella cella estrema sarà 0,72 lm.

Per cercare di comprendere in che percentuale il flusso entrante venga diffuso e in che percentuale prosegua in linea retta, una cella dopo l'altra, si può impostare un'equazione di questo tipo:

$$32x^{15} = 0,72$$

Dove 32 lm è il flusso diffuso nella prima cella; 0,72 lm è il flusso diffuso nell'ultima cella, e 15 è il numero degli scatti tra la prima e l'ultima delle 16 celle; **x** è invece il fattore di moltiplicazione con cui il valore di flusso cala uno scatto dopo l'altro, per 15 volte.

Il risultato è che **x** è pari a 0,78; ciò significa che il flusso diffuso in una cella, nella cella successiva si riduce del 22%.

Il presupposto che il calo percentuale sia costante, via via che la luce penetra nel ghiaccio, è basato sull'assunto che il ghiaccio sia, per semplificazione, del tutto isotropo e le particelle diffondenti siano perfettamente omogenee.

Secondo questo stesso presupposto, si può anche affermare che il flusso non diffuso abbia una riduzione analoga via via che procede attraverso la lastra.

Nel grafico di figura 51, vengono rappresentati i valori di flusso per ogni singola cella, in rosso quello che attraversa longitudinalmente la lastra, in blu la parte diffusa sulle facce laterali.

Si noti che la parte diffusa del flusso entrante

è circa la metà, di questa metà circa un terzo viene diffuso sulla faccia superiore: nella prima cella entrano 60 lm, 32 lm vengono diffusi, di questi, 10 lm insistono sulla faccia superiore.

Questa schematizzazione non rispetta fedelmente le pendenze seguite dalle curve di illuminamento misurate, in parte in ragione della curva fotometrica della sorgente, tuttavia rappresenta una semplificazione più che accettabile e che riproduce con chiarezza il fenomeno a livello quantitativo.

L'equazione esponenziale indicata a lato del grafico:

$$\phi = 60e^{-5,43t}$$

descrive la curva del flusso; dove ϕ è il flusso che giunge ad una data distanza t dalla sorgente

e 60 è il flusso entrante nella prima cella campione.

Questa formulazione è analoga alla seguente, utile a stimare il comportamento di un raggio luminoso d'intensità I_0 nota, all'interno del ghiaccio alla distanza t , il cui coefficiente di estinzione sia k :

$$I = I_0 e^{-kt}$$

Questa equazione è nota come "legge di Lambert-Beer-Bouguer".

Questa formulazione, sebbene faccia riferimento al valore del coefficiente di estinzione k , non fu pensata, in origine, per tenere conto dei fenomeni diffusivi, tuttavia è in grado di descrivere l'attenuazione di un'onda di intensità nota I_0 , attraverso una sostanza dotata di un'assorbanza

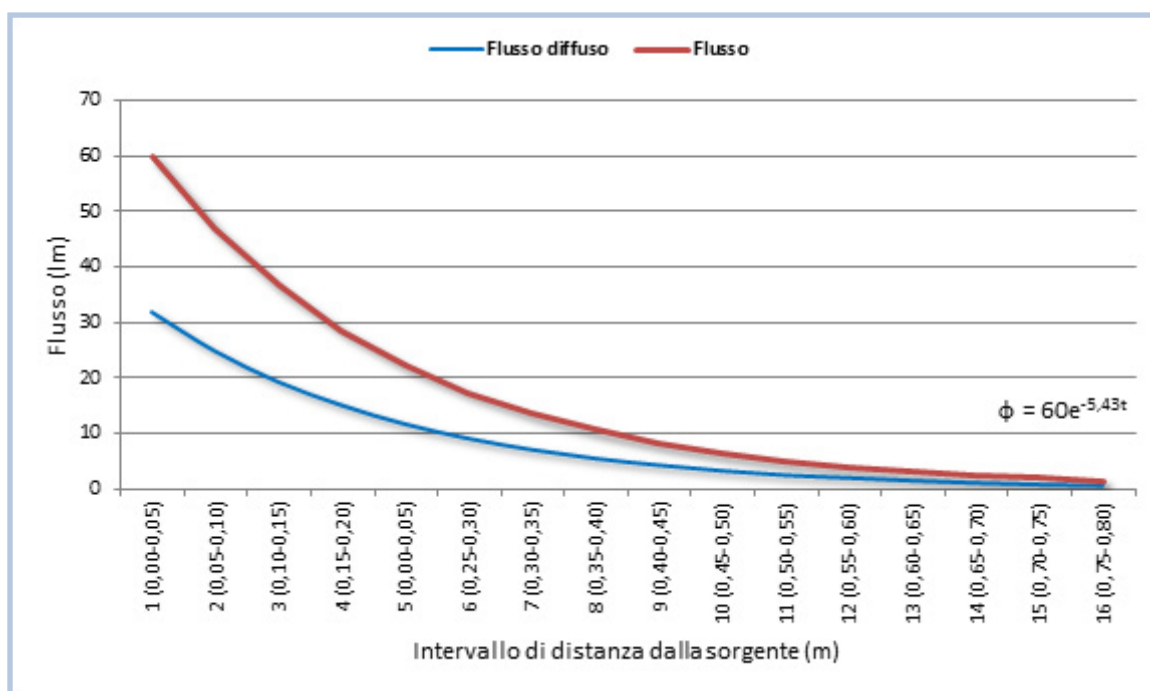


Grafico 3: rappresentazione cartesiana delle curve di flusso entrante diffuso

conosciuta.

Resta da comprendere se un modello matematico sia davvero realizzabile, al fine di interpretare il comportamento della luce nel ghiaccio: le teorie che la fisica propone sono numerose, ma nessuna sembra, a meno di analisi sperimentali molto più approfondite, essere assimilabile al caso in esame.

Lo scattering di Rayleigh è un modello che valuta la diffusione di un'onda elettromagnetica contro ostacoli sferici il cui diametro sia minore della lunghezza d'onda, quindi inadatto al caso in esame.

Lo scattering di Lorentz-Mie è adatto a particelle diffondenti sferiche molto più piccole della lunghezza d'onda ed è un'equazione vettoriale molto complessa, che comprende le componenti elettrica e magnetica dell'onda considerata.

Questi due modelli sono quindi adatti per descrivere le interazioni tra la luce e le molecole dell'atmosfera o i fenomeni diffusivi di liquidi come il latte, di tessuti biologici o sostanze polimeriche.

Lo scattering di Compton descrive l'urto elastico tra un fotone ed un elettrone, perciò è un modello ben lontano dal caso in esame.

Allo stesso modo i modelli di Thomson, Coulomb e Brillouin non rispecchiano i presupposti presenti nel caso del ghiaccio comune.

E' dunque molto difficile riproporre matematicamente il fenomeno diffusivo, se non affidandosi alla teoria di Mie o di Rayleigh, perciò si è deciso di affidarsi ad una stima più qualitativa che quantitativa ricorrendo ad un calcolo sem-

plificato, come quello appena proposto.

Inoltre, come già accennato, le teorie a cui si è brevemente fatto riferimento subiscono solo in che percentuale un'onda venga diffusa, senza però indicarne le direzioni e la distribuzione.

Tutto questo è sufficiente per comprendere che sfruttare le proprietà diffondenti del ghiaccio per illuminare è una cosa molto difficile; eventualmente è possibile creare gradevoli effetti scenici e illuminazioni integrative.

Ad esempio è possibile ottenere risultati piacevoli immergendo fibre ottiche ad emissione laterale nell'acqua, sopra le serpentine; con la solidificazione esse resteranno immerse nel ghiaccio, figura 52.

Tale scelta è ragionevole, per via del fatto che la fibra ottica a emissione laterale non emette calore, che l'accenditore può essere collocato lontano dal ghiaccio, senza il rischio di scioglierlo, facilitando così la sostituzione della sorgente; inoltre l'accenditore può essere provvisto di cambiacoore per aumentare l'effetto coreografico.

Il nastro di fibra ottica può agevolmente essere lasciato nella massa di ghiaccio, senza rischio di rotture o danneggiamenti di sorta.

Questo tipo di soluzione, sebbene esteticamente molto gradevole, non è in realtà sufficiente ad illuminare la pista, ottenendo valori di illuminamento ragionevoli.

Sarebbe infatti necessario un tappeto di fibre, con numerosi accenditori, quindi un costo iniziale e un dispendio energetico considerevoli, a fronte di valori di illuminamento largamente al

di sotto della normativa.

Collocare nel ghiaccio una cintura perimetrale di fibra ottica ai margini della pista, può però fungere da sistema di orientamento per gli atleti, in caso di esibizioni che prevedano momenti di bassa illuminazione.

2.4. La riflessione della luce

Nel capitolo relativo alle interazioni tra luce e ghiaccio sono stati elencati i coefficienti di riflessione di alcune forme di ghiaccio già studiate in svariati ambiti scientifici: neve, ghiaccio nero,

ghiacciaio ecc.

Va ricordato che nella pratica dello sport su piste artificiali, la superficie del ghiaccio, per via dei graffi e dei solchi determinati dai pattini viene trattata ripetutamente: in ambito agonistico l'apposita macchina rasaghiaccio rigenera la superficie sciogliendone un sottile strato, che poi ricingela per scambio termico con la parte sottostante ancora solida; in questo modo vengono ripristinate le caratteristiche originali e il ghiaccio ritorna perfettamente piano e levigato. Le piste mobili, specialmente quelle più piccole, non sempre hanno a disposizione macchinari di questo tipo, perciò l'unico trattamento superficiale possibile viene effettuato manualmente, con l'ausilio di acqua o di apposite spatole gom-



Figura 49: fibra ottica immersa nel ghiaccio, Fung Collaborative, Sestriere 2006

mate che spostano e ricompattano i frammenti di ghiaccio staccatisi per effetto delle lame e rendono, con questo tipo di operazione, la superficie molto più opaca, più diffondente e meno speculare, con il ripetersi dei trattamenti successivi.

Non è ancora chiaro quale tra i coefficienti di riflessione elencati, o quali tra essi, siano idonei a descrivere la riflessione del ghiaccio di una pista. Per risolvere il problema, sono state prolungate le osservazioni su campioni di ghiaccio e sorgenti luminose.

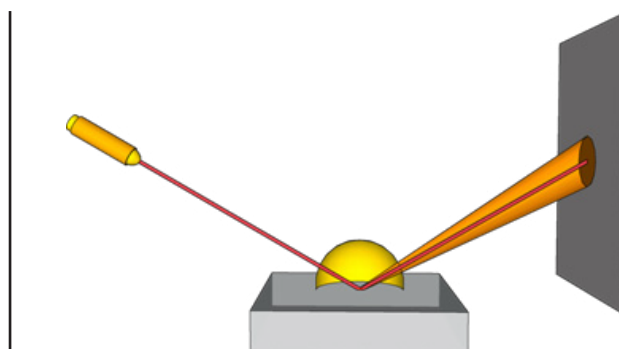


Figura 50: schema delle osservazioni sulla riflessione

Per prima cosa sono state realizzate una serie di indagini fotografiche utili a comprendere come possa effettivamente essere definita la riflessione di una lastra di ghiaccio.

Questo esperimento è stato ottenuto utilizzando un piccolo campione quadrato di ghiaccio di spessore noto, 3 cm, e di 15 cm di lato, e un semplice puntatore laser il cui fascio è di ampiezza nota, 3 mm e praticamente costante anche se misurato a grande distanza dalla sorgente.

Il puntatore, inclinato a 30°, è a una distanza di

20 cm dalla superficie del ghiaccio, questo, con angolo identico, riflette il raggio su un foglio verticale applicato alla stessa distanza dal punto di riflessione.

In questa serie di esperimenti, si sono verificati sostanzialmente due fenomeni principali: il primo in cui il ghiaccio, appena uscito dal congelatore, si riveste di un fine strato di brina, generata dal vapore acqueo dell'aria che ghiaccia a contatto della superficie fredda; il secondo caso in cui la superficie del ghiaccio comincia lievemente a sciogliersi.

Con il surriscaldamento la brina tende a sciogliersi, e in parte a sublimare, rendendo più lucida la superficie, ma il passaggio avviene in maniera fluida, senza poterne apprezzare fasi distinte.

Lo scopo di questo esperimento è documentare i vari fenomeni di riflessione e comprendere quale sia il caso maggiormente ricorrente in una pista di ghiaccio.

Nel caso in cui la superficie del ghiaccio sia rivestita di brina asciutta, non si apprezza sul foglio di riferimento alcuna proiezione del riflesso, ma solo un uniforme alone diffuso in tutte le direzioni, non apprezzabile in fotografia, per via della scarsa sensibilità dell'apparecchio, alla completa oscurità. Nello schema, in figura 53, questo fenomeno è stato rappresentato attraverso la semicupola gialla.

Nel secondo caso invece, è possibile apprezzare come, allo sciogliersi della brina, alla riflessione diffusa tendano ad associarsi fenomeni sempre più marcatamente speculari.

Qui sono riportate alcune delle molte immagini

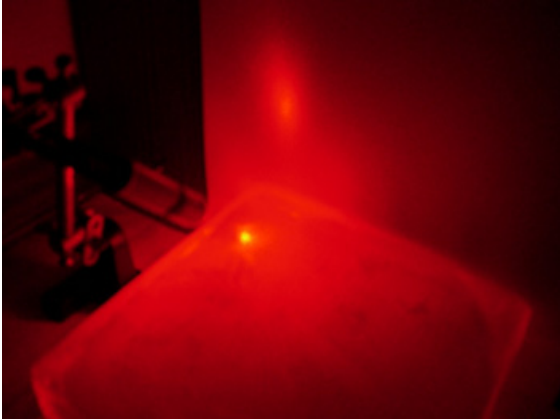


Figura 51: alla riflessione diffusa si associa una parziale riflessione speculare

scattate, al fine di fare comprendere la dinamicità del fenomeno.

Nell'ultima immagine della serie, figura 56, si può notare come la riflessione sia nettamente speculare, ma come in realtà continui a persistere un diffuso bagliore rosso, che non scompare neppure quando il riflesso del laser si proietta sul foglio di riferimento totalmente invariato, se non per le distorsioni dovute all'irregolarità della superficie del ghiaccio.

Dalle immagini appare evidente come la mas-

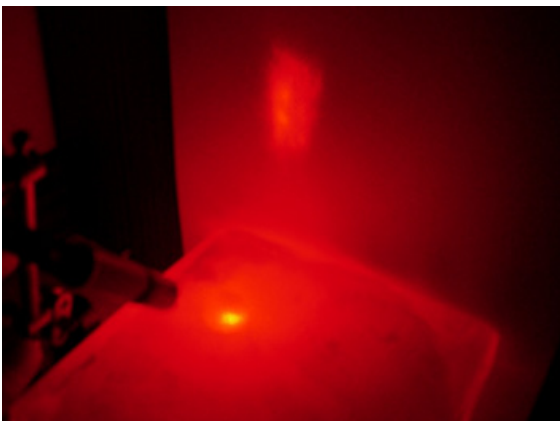


Figura 52: il riflesso speculare misto, appare sempre più nitidamente

sa del ghiaccio campiona diffonda luce anche dall'interno, per effetto dello scattering.

In ultima analisi, si può affermare che nel corso della sperimentazione i fenomeni si sono susseguiti naturalmente, senza intervento esterno nel corso di poche decine di minuti.

L'osservazione è stata eseguita nella stagione estiva, perciò lo scioglimento superficiale si è manifestato rapidamente.

Inoltre è necessario rilevare come, in fotografia, non sia stato possibile apprezzare la presenza di graffi e solchi lasciati allo scopo di simulare l'azione dei pattini; l'effetto, non visibile in fotografia, è apprezzabile solo quando il laser colpisce direttamente il solco, generando riflessioni distorte.

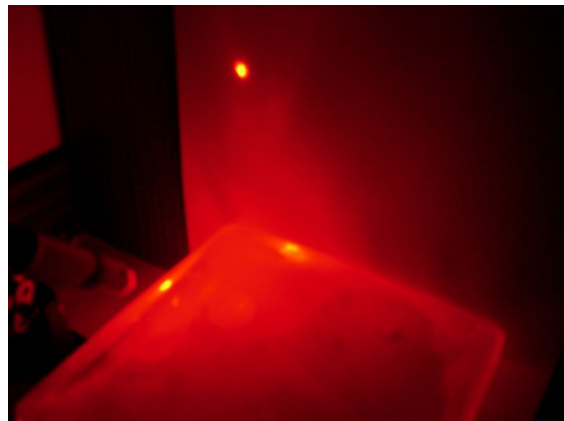


Figura 53: il riflesso speculare è nitido, ma ancora associato a un alone diffuso

Per concludere l'analisi qualitativa della riflessione del ghiaccio è riportata un'immagine che mostra come il riflesso del laser proiettato sul foglio di riferimento, sia distorto dalla superficie del ghiaccio. Tale riflesso varia continuamente

via via che il ghiaccio cambia le condizioni superficiali.

Il riflesso qui riprodotto è molto più ampio del raggio originale, che viene quindi disperso a cono dalle irregolarità della superficie del ghiaccio.

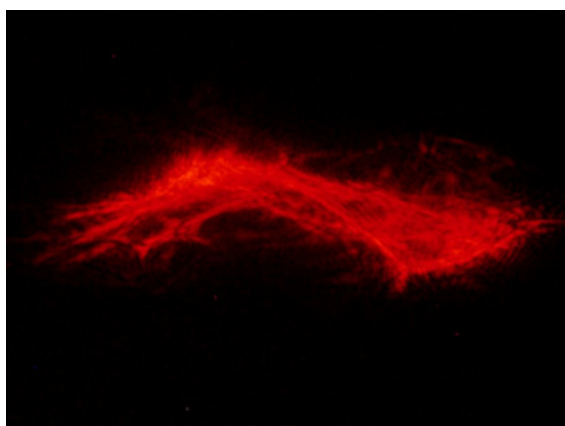


Figura 54: ecco come il raggio laser è riflesso sul foglio di riferimento, quando la superficie del ghiaccio comincia a sciogliersi

L'analisi quantitativa della riflessione è stata invece ottenuta con l'utilizzo di un luxmetro, come nel caso dello studio dello scattering.

Lo scopo è stato quello di verificare quale flusso agisse sulla superficie del luxmetro, di area nota, in seguito alla riflessione sul ghiaccio, variandone le condizioni superficiali.

La validità di questo sistema non è garantita, ma ha avuto lo scopo di fare alcune verifiche per scegliere poi tra i coefficienti di riflessione già noti, quale si avvicinasse maggiormente, e quindi individuare di conseguenza la soluzione migliore.

La sorgente utilizzata è la stessa dell'esperimento precedente, con un flusso di 420 lm.

Sorgente e luxmetro sono sovrapposti per evitare che ombre o ostacoli potessero disturbare la lettura, e si trovano a una distanza di 30 cm dalla piastra di ghiaccio, figura 58.

Come riferimento è stato utilizzato uno specchio al posto del ghiaccio ed è stata eseguita la misurazione: sulla superficie di 0,002 m² dell'area sensibile del luxmetro, insiste un illuminamento di 220 lx, perciò vi incide un flusso di 0,44 lm.

Sono state effettuate misurazioni con il ghiaccio con varie caratteristiche superficiali: con brina, senza brina e asciutto e infine parzialmente disciolto, in più occasioni.

Sono stati ottenuti flussi incidenti compresi tra 0,29 e 0,19 lm, il che significa che il coefficiente di riflessione, considerando 100% il valore ottenuto tramite lo specchio, assume valori compresi tra il 66%, nel caso del ghiaccio bagnato superficialmente e il 45%, nel caso del ghiaccio brinato.

Sono da considerare anche altri aspetti, che ren-

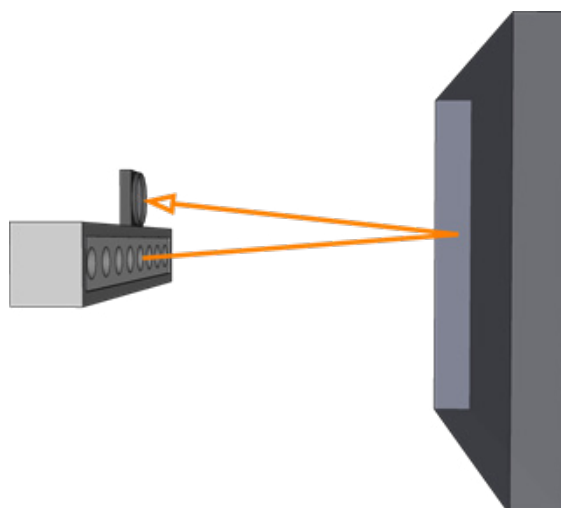


Figura 55: rappresentazione schematica della valutazione del coefficiente di riflessione

dono il calcolo eseguito, valido per lo più come riferimento per gli ordini di grandezza del coefficiente di riflessione: per prima cosa non è stato possibile effettuare rilevamenti in presenza di ghiaccio in condizioni simili al vetro, ovvero in zone prive di inclusioni d'aria e superficialmente lucide, e in secondo luogo che tutte le misurazioni sono state effettuate appoggiando il ghiaccio ad una parete, elemento che ha sicuramente influito ad aumentare il valore di illuminamento calcolato.

Tuttavia i valori di coefficiente calcolati sono compatibili con quelli elencati durante l'analisi delle caratteristiche d'interazione tra luce e ghiaccio.

In sintesi, gli esiti delle osservazioni eseguite con piastra di ghiaccio campione, sorgenti e luxmetro possono essere brevemente sintetizzate così:

- Non è possibile illuminare la pista di ghiaccio collocando sorgenti sulla spalla laterale della lastra, poiché il flusso si esaurisce a breve profondità (circa 85 cm), tuttavia sarebbe possibile collocare delle sorgenti sotto la superficie, ottenendo gradevoli effetti.
- Le condizioni superficiali del ghiaccio determinano il suo comportamento alla riflessione, più o meno diffusa e specu-

lare, oltre che influenzare il coefficiente di riflessione stesso, valutato sperimentalmente con valori compresi tra 66% e 45%.

Qui di seguito tutte le considerazioni fatte saranno vagliate per ottenere una simulazione ragionevole dal software di calcolo illuminotecnico.

3. SIMULAZIONE DELLE CARATTERISTICHE OTTICHE DELLE SUPERFICI NEL SOFTWARE DI CALCOLO

Al fine di ottenere risultati plausibili dal software di calcolo illuminotecnico, è stato necessario tentare di riprodurre le caratteristiche ottiche dei materiali che costituiscono l'impianto.

Attualmente i pacchetti software deputati al calcolo illuminotecnico forniscono intere librerie di materiali simulati, a cui è facile accedere e che offrono risultati fedeli alla realtà, tuttavia il ghiaccio, non essendo un materiale ad uso edilizio, non rientra nelle suddette librerie e deve quindi essere interamente definito nelle sue caratteristiche ottiche.

E' evidente, in ragione dei fenomeni di passaggio di stato dell'acqua, che le caratteristiche superficiali della pista possono variare: supponendo per un attimo di poter fissare le sue con-

dizioni superficiali nel tempo, si possono, con buona approssimazione distinguere tre stati fondamentali:

- La pista è intatta, priva di polvere di ghiaccio o di solchi, per effetto del brinamento si ricopre di uno strato diffondente, questo la rende una superficie dotata di riflessione quasi del tutto diffusa. Si viene a generare un tenue effetto albedo: ovvero la riflessione lambertiana. Per effetto del brinamento, inoltre, la superficie perde di trasparenza e ovviamente aumenta il suo coefficiente di riflessione, ma poiché essa non avviene in modo unicamente speculare, gli effetti sono difficilmente valutabili in termini quantitativi.
- La pista è intatta, priva di polvere di ghiaccio o di solchi, soggetta a scioglimento superficiale, per effetto della temperatura o del trattamento della macchina rasaghiaccio: la superficie manifesta una riflessione mista e variabile. Un raggio incidente tende a essere riflesso in modo disperso, con effetti variabili da punto a punto della pista, ma con un marcato

aumento dei fenomeni speculari. Certamente un raggio perfettamente lineare e con incidenza puntiforme, sarà riflesso in forma conica, molto probabilmente in modo misto. Questo è il caso di più difficile valutazione. Inoltre la massa del ghiaccio, per via delle condizioni superficiali, appare all'osservatore più "trasparente": il comportamento dell'intero sistema composto di massa e interfaccia, si approssima a quello dell'acqua liquida.

- La pista è usurata per via dell'azione dei pattini, su di essa si è depositato e compattato uno strato di detriti di ghiaccio distaccatosi dalla pista stessa; in questo caso la riflessione potrebbe avvenire con caratteristiche ibride tra le due descritte in precedenza. L'effetto, tuttavia si avvicina all'albedo della neve.

Si potrebbe considerare anche un altro caso, in altre parole quello puramente teorico del ghiaccio perfetto: la superficie è intatta, priva di brinamento, appannamento e strato disciolto.

Si tratta ovviamente di un'astrazione, dagli esiti, per altro, scontati: l'acqua e il ghiaccio hanno caratteristiche ottiche virtualmente identiche.

Non bisogna dimenticare poi che, nel tempo, il

ghiaccio per effetto dello smog, della polvere, e altro, tende a sporcarsi, perdendo in parte la sua “bianchezza”.

E' evidente che una superficie con caratteristiche ottiche di questo tipo rappresenti un problema complesso in fase progettuale, per la sua mutevolezza, per la sua tendenza a generare possibili effetti di riflessione e quindi di abbagliamento indiretto; da ciò dipende anche che un impianto come una pista di ghiaccio all'aperto, è per natura portata a riflettere parte del flusso incidente su di essa verso l'alto.

Il calcolo illuminotecnico, eseguito con l'ausilio di un software specifico, deve poter rispecchiare le caratteristiche valutate durante la fase di analisi delle caratteristiche ottiche del ghiaccio. E' evidente l'impossibilità di realizzare un modello informatico che rispecchi fedelmente le grandezze fisiche valutate, per prima cosa perché i software disponibili cercano di riprodurre in maniera semplificata il fenomeno fisico; in secondo luogo perché, dove la simulazione del fenomeno non arriva, normalmente il software “imita” le caratteristiche di una superficie, fornendo risultati scientificamente verosimili.

I software di rendering, invece, cercano di ottenere risultati che siano visivamente fedeli, imitando l'aspetto delle superfici, quando non riescono ad imitarne il comportamento.

Di conseguenza l'unica possibilità è stata l'approssimazione: si è quindi cercato di scegliere caratteristiche fisiche, quali la riflessione, la trasparenza, la scabrosità e la specularità, che si avvicinasero il più possibile a quelle reali, per

ottenere esiti illuminotecnici plausibili.

Inoltre, come già evidenziato, il ghiaccio ha caratteristiche mutevoli, che determinano sensibili variazioni sia superficiali sia interne, nella pista di progetto; ne deriva la necessità di selezionare una tipologia di ghiaccio che fosse ragionevolmente comprensiva di tutti le sue possibili declinazioni e, al tempo stesso, fedele alla sua natura. Inoltre, la scelta di sintetizzare una singola “forma”, determina la possibilità di eseguire un singolo calcolo illuminotecnico ragionevolmente valido, per poi eventualmente produrne altri con caratteristiche superficiali più specifiche.

Concludendo, la pista, ai fini del calcolo illuminotecnico, è stata considerata come dotata di caratteristiche intermedie tra quelle considerate, al fine di valutare, con buona approssimazione, un caso che fosse ragionevolmente applicabile in ogni circostanza.

- Il coefficiente di riflessione è stato leggermente limitato, per via di tre fattori principali: il possibile manifestarsi di un effetto brinamento superficiale, la presenza di detriti di ghiaccio compattati e l'eventuale accumulo di polveri e sporcizia che ne limitino la “bianchezza”.

Il valore è stato per questo impostato al 60%, identico a quello della neve fresca.

- La trasparenza dipende dalla riflessione; in altre parole la componente del flusso incidente che non viene riflessa, attraversa il ghiaccio. Poiché la somma dei due valori deve essere 100%, il valore è stato approssimato al 40%.
- La scabrosità, è stata impostata sul 10%, per suggerire la possibile presenza di solchi e graffi su un materiale altrimenti liscio.
- La riflessione speculare, indica in quale proporzione il raggio incidente su una superficie, è riflesso in modo speculare e quanto in modo diffuso. Poiché il caso maggiormente disturbante per uno spettatore è quello in cui una superficie ha caratteristiche speculari, e poiché questo fenomeno è piuttosto raro, il valore è stato fissato al 50%.
- Il colore, per via della maggiore permeabilità del ghiaccio alle lunghezze d'onda responsabili della sensazione visiva del blu, è stato impostato su una tonalità di blu puro (nella scala RGB) molto chiara, prossima al bianco.

Il tipo di riflessione, inoltre, non è simulabile precisamente in tutti i suoi aspetti; il parametro di scabrosità suggerisce che il fenomeno avvenga con caratteristiche diffuse, tuttavia in combinazione con le diverse possibili caratteristiche superficiali del ghiaccio, possono manifestarsi riflessioni molto complesse.

Un'ultima caratteristica ottica del ghiaccio è la diffusione, o subsurface scattering; questo fenomeno, già ampiamente spiegato nella fase di analisi del materiale, non è tuttavia computato tra le potenzialità di calcolo dei software illuminotecnici più diffusi.

Semplificando esso potrebbe rientrare nella "trasparenza", tuttavia non sarebbe una semplificazione ragionevole, poiché lo scattering, da un lato dipende dalla opacità della sostanza, ovvero dalla presenza di occlusioni che ne limitano la trasparenza, ma dall'altro lato determina la diffusione in ogni direzione della luce entrante, rendendo quasi "luminescente" la sostanza. Altro aspetto da considerare nel calcolo illuminotecnico informatico, è l'insieme delle caratteristiche ottiche dello strato a fondo pista: come è già stato ampiamente spiegato in precedenza, il fondo della pista è costituito da uno strato di tessuto in PVC bianco e opaco, a cui sono sovrapposte le serpentine refrigeranti, anch'esse bianche e semitrasparenti, a loro volta attraversate dal liquido refrigerante.

Questo sistema triplice, considerato piano e orizzontale per semplicità, avrebbe caratteristiche molto complesse, per via della sua irregolarità e della diversità dei materiali che lo

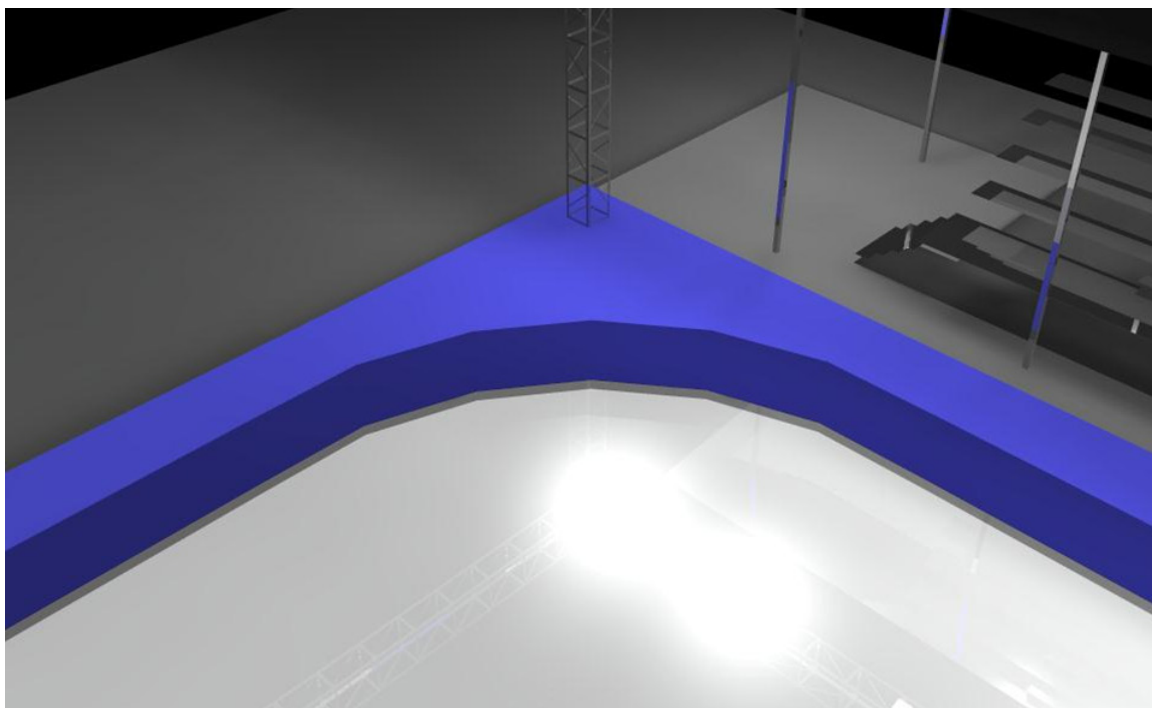


Figura 56: : visualizzazione Ray-Trace della pista di ghiaccio con le caratteristiche ottiche approssimate

compongono. Si è dunque deciso di impostare le caratteristiche di riflessione su valori elevati, comprensivi anche della componente di scattering appartenente al ghiaccio, cioè il 78%, ottenuto utilizzando come riferimento il valore del coefficiente di riflessione del colore bianco, ovvero 70%, aumentato dell'8% per effetto della diffusione e impostato come materiale plastico. Sostanzialmente l'attributo della diffusività, non applicabile al ghiaccio, è stato simulato parzialmente ricorrendo a un lieve aumento del coefficiente di riflessione dello strato sottostante. Si è stimato l'8% perché circa la metà di un flusso che penetra nel ghiaccio, come si è visto precedentemente, viene diffuso, di questo, circa un terzo riverbera sulla faccia superiore; quindi dal 70% si passa al 35%, un terzo del quale è 11,6%, a sua volta ridotto del 25% in considerazione

della possibilità che parte del flusso resti intrappolato tra le serpentine e il tessuto di fondo; si giunge così all'8% aggiuntivo).

La trasparenza è stata impostata su 0, la scabrosità è stata annullata, come la specularità; infine il colore è stato impostato su un tono molto chiaro di grigio, prossimo al bianco.

La semplificazione è robusta ma cerca di prendere in considerazione sia la lucidità delle canaline, sia l'opacità del tessuto di fondo.

Tutti gli altri materiali, come il metallo, il legno e il tessuto, sono stati impostati sui valori delle caratteristiche ottiche già presenti all'interno del software di calcolo.

Osservando una visualizzazione di render nativa del software di calcolo, è possibile intuire quale sia l'esito finale di tutte le approssimazioni eseguite: la superficie del ghiaccio appare come

uno strato perlaceo, leggermente speculare e sufficientemente opaco da non distinguere il fondo della pista. L'approssimazione dunque, sebbene visivamente non sia del tutto realistica, simula in modo piuttosto corretto i fenomeni analizzati sperimentalmente e imposta il calcolo su un caso d'interesse per la progettazione.

Per concludere la pagina dedicata alle semplificazioni fatte in ambito di calcolo illuminotecnico, va sottolineato che, per favorire l'operazione di calcolo da parte del computer, l'intero impianto è stato semplificato. La pista e le gradinate sono state ridotte ai loro elementi costitutivi, ovvero delle superfici, evitando così di sovraccaricare il calcolatore dagli oneri di riflessioni diffuse successive e ripetute.

4. LA PISTA DI GHIACCIO DI PROGETTO

E' necessario, per prima cosa, chiarire che le piste temporanee outdoor sono impianti che per natura non hanno una configurazione fissa: le condizioni del luogo che le ospita impongono agli installatori di trovare la collocazione delle varie componenti più idonea al caso.

Alcune parti, tuttavia, hanno disposizione e struttura fisse, in particolare la pista e il suo anello di pertinenza; le gradinate, gli impianti refrigeranti e i prefabbricati di servizio, invece, possono variare la loro disposizione in funzione del luogo di installazione.

Per gli stessi installatori esistono delle configurazioni ideali, per ampiezza delle superfici, per praticità collocazione e posa in opera; in queste pagine si farà riferimento a una soluzione di questo genere, da non considerarsi quindi come

la disposizione corretta, bensì quella, per certi versi, ideale, sulla quale è più ragionevole fare delle considerazioni di ordine illuminotecnico.

Da questo consegue che le stesse soluzioni d'impianto non debbano essere considerate universalmente valide, bensì una base di partenza per scelte che, in linea di principio, possano essere applicate a tutte le possibili configurazioni.

Il caso di una pista di ghiaccio temporanea outdoor, come è stato precedentemente accennato, offre delle difficoltà oggettive nella progettazione dell'impianto di illuminazione:

- La collocazione degli apparecchi non può avvenire su un reticolo regolare al di sotto della copertura; questo impone che essi

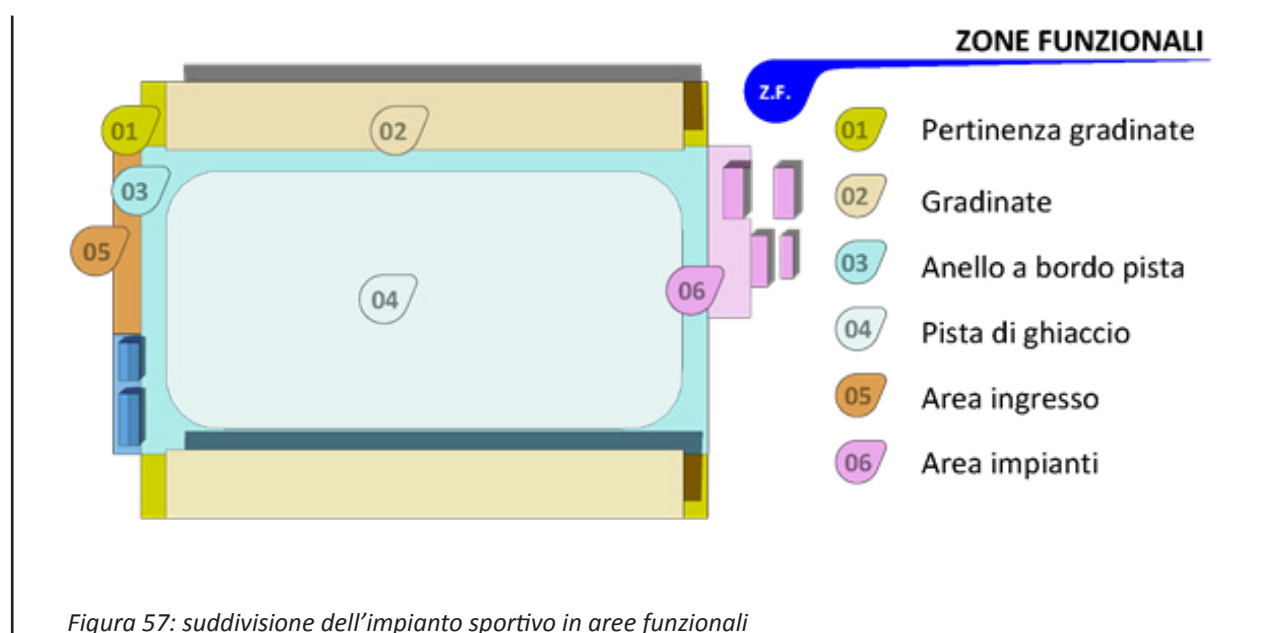


Figura 57: suddivisione dell'impianto sportivo in aree funzionali

siano disposti ai lati della pista, curando distanza e altezza di montaggio.

- La posizione degli apparecchi genera angoli acuti tra i fasci luminosi e il piano della pista, determinando il rischio di riflessi potenzialmente disturbanti.
- Il numero degli apparecchi installabili è forzatamente limitato dalla natura temporanea della pista; le scelte di progetto devono perciò essere indirizzate ad massimizzare le prestazioni dell'impianto di illuminazione.
- La possibilità che la pista sia allestita in configurazioni differenti da quella qui riportata, obbliga a cercare soluzioni illuminotecniche che siano il più possibile versatili.

Di conseguenza, tutte le soluzioni, valide nel caso in esame, potranno essere applicate a svariate configurazioni, sia in esterno che in interno.

Per l'illuminazione funzionale in pista, inoltre, saranno valutati gli allestimenti necessari ad ospitare ciascuno dei possibili livelli di attività, valutandone, laddove siano realizzabili con le tecnologie in esame, le qualità illuminotecniche ed energetiche.

Mettere alla prova il Led in un terreno così complesso, quindi, non potrà che chiarire quali siano le sue vere doti prestazionali, come utilizzarlo al meglio per illuminare grandi superfici che richiedano alti illuminamenti e, in conclusione, se sia in grado di sostituire le tecnologie tradizionali in questo campo di applicazione specifico. Nella figura 60, sono schematizzate tutte le zone funzionali dell'intero allestimento; nelle pagine che seguono ciascuna di queste aree sarà indagata attentamente in tutti i suoi aspetti e sarà quindi proposto per ciascuna il progetto ad essa dedicato, prima, con la tecnologia tradizionale e poi con quella a Led. In questo modo, zona dopo zona, le esigenze di illuminazione saranno soddisfatte da entrambe le tecnologie, permettendo così di confrontare le due soluzioni con facilità.

5. PISTA DI GHIACCIO E ANELLO A BORDO PISTA: COMPITI VISIVI, ILLUMINAZIONE A IODURI METALLICI E A LED

La pista di ghiaccio è il centro sia strutturale, sia funzionale dell'impianto, ha dimensioni olimpioniche (60x30 m, con angoli arrotondati con raggio di 7 m), quindi idonee al pattinaggio di figura, di velocità e all'hockey.

In queste pagine è stata considerata una pista generica realizzata su un tavolato ligneo alto 20 cm; il suo spessore è variabile e si colloca tra i 4 e i 6 cm.

La balaustra che la cinge permette di collocare aperture d'ingresso e uscita in qualsiasi punto del perimetro, che conducono all'anello di bordo che la circonda interamente, per questo motivo, in fase di calcolo illuminotecnico, è irrilevante conoscerne l'esatta posizione; di conseguenza il parapetto è stato rappresentato come continuo.

In pista si svolgono le attività principali di tutto l'impianto: le competizioni, gli allenamenti sia per lo sport professionale sia dilettantistico, le attività didattiche introduttive allo sport, gli spettacoli, le esibizioni e la ricreazione pura.

Inoltre è l'oggetto cui guardano il pubblico e tutte le figure professionali o meno, collocate a bordo pista. Essa è quindi parte integrante di molteplici compiti visivi differenti, legati strettamente al tipo di utente.

Nel caso di un'attività sportiva è necessario considerare il concetto di compito visivo nel suo senso più ampio, in altre parole come azione o sequenza di azioni che per essere svolte ne-

cessitano del senso della vista e non solo come oggetto dell'atto della visione; in questo caso, infatti, il compito visivo consiste nell'orientamento in uno spazio piano, che può avere condizioni di illuminazione variabili e può essere occupato da una o molte persone.

Parte del compito è anche mantenere l'equilibrio sia durante esercizi complessi eseguiti in velocità da parte di atleti professionisti, sia durante il semplice spostamento per utenti principianti.

Ne consegue che il compito visivo dell'atleta e del dilettante, pur con ovvie differenze, consiste nel vedere distintamente la pista e i suoi confini, nel riconoscere con chiarezza le balaustre e la loro forma, oltre che individuare rapidamente altre persone ed eventuali ostacoli, per potersi muovere in sicurezza all'interno dello spazio di gioco.

Il tutto deve avvenire in condizioni dinamiche e in velocità.

Gli aspetti critici di questo genere di compito visivo sono la velocità cui l'attività si svolge, superiore a quella di una persona al passo, le condizioni d'illuminazione variabili e il controllo dell'equilibrio; in altre parole l'aspetto più critico è la sicurezza da cadute e infortuni.

In tutto questo rientra anche la necessità di evitare abbagliamenti o velature della vista che possano rendere difficoltoso il movimento sui pattini.

08 REQUISITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO

Livelli di illuminamento E (lux) per piste di ghiaccio outdoor (per classe di attività agonistica)	
Orizzontale medio: E_{hm}	500; 300; 100 (livello I; II; III)
Orizzontale specifico: E_{hs}	500; 300; 100 (livello I; II; III)
Uniformità di illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,6; 0,5; 0,4 (livello I; II; III)
Rapporto orizzontale, verticale: E_{hm}/E_{vm}	$0,5 \leq E_{hm}/E_{vm} \leq 2$
Orizzontale medio per riprese televisive: E_{hmt}	(min 800) 1.000
Verticale medio per riprese televisive: E_{hmt}	(min 800) 1.000
Intensità (cd) nell'emisfero superiore (per impianti sportivi generici)	
Ocd per 1.000 lm a 90°	
Temperatura colore (K)	
3.000-5.300 (consigliato ≥ 4000) (consigliato ≥ 5.500 per le riprese TV)	
Indice di resa cromatica Ra	
Min >65 , consigliato >80; min >80 con riprese TV, consigliato 90	
Abbagliamento Gr	
Gr ≤ 50	

Le normative vigenti in ambito d'illuminazione d'impianti sportivi suggeriscono i parametri da rispettare, durante la progettazione.

Per semplicità saranno indicati in forma di tabella. Vengono inoltre riportati i livelli di attività, in base alla categoria, precisandone alcuni aspetti principali:

- **Livello I**, attività agonistica o gare non professionistiche con grande affluenza di pubblico: è il livello più alto, che contempla lo svolgimento di gare a livello nazionale o internazionale, anche in presenza di riprese televisive.
- **Livello II**, allenamento o gare dilettantistiche con modesta affluenza di pubblico: è il livello di attività intermedio, che contempla l'allenamento svolto da atleti professionisti, oppure gare dilettantistiche e agonistiche di interesse locale, per le quali è prevista una modesta affluenza di spettatori.
- **Livello III**, attività ricreativa: si tratta del livello più basso, che contempla attività svolte a scopo di divertimento, per lo più da dilettanti e amatori. Nel caso di alcune discipline specifiche è previsto lo svolgimento di gare o competizioni a livello puramente ricreativo. L'affluenza di pubblico non è contemplata, ma non è possi-

09 REQUISITI ILLUMINOTECNICI SULL'ANELLO A BORDO PISTA

Livelli di illuminamento E (lux) per impianti all'aperto (corridoi, servizi, spogliatoi, tribune)	
Orizzontale medio: E_{hm}	150 (preferibile 250 tra 500 e 1.000 spettatori)
Orizzontale specifico: E_{hs}	150
Uniformità di illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4
Temperatura colore (K)	
3.000-5.300	
Indice di resa cromatica Ra	
80-90 (Grado 1B, molto buono)	

bile escludere la presenza di un pubblico improvvisato.

In tabella 09 sono riportati sinteticamente i requisiti illuminotecnici utili per i tre principali livelli di attività sportiva, insieme con i requisiti necessari per effettuare riprese televisive.

Questi valori provengono sia dalle già citate norme F.I.S.G., sia dalla norma UNI 9316 del 1989. Per maggiore completezza e uniformità dei dati, si è fatto anche riferimento alle raccomandazioni UEFA e FIFA in ambito di illuminazione finalizzata alle riprese televisive; di conseguenza i valori riportati, contemplano sia il minimo accettabile dalla norma UNI, sia quello consigliato dalle federazioni calcistiche.

L'anello a bordo pista è il luogo dove avvengono le attività più disparate: è una sorta di fascia di rispetto attorno alla balaustra profonda 2,5 m, oltre i montanti della balaustra stessa.

Qui si trovano le panchine degli atleti e degli allenatori, il tavolo dei giudici di gara, i fotografi e le telecamere, gli addetti alla sicurezza, come

croce rossa o vigili del fuoco, e molto spesso è uno spazio di sosta, attesa, conversazione per gli spettatori e gli atleti dilettanti, oltre che una zona di passaggio. Normalmente quest'area è rivestita a terra da un robusto panno, di solito colorato, con lo scopo molteplice di proteggere le lame dei pattini dal contatto diretto con la pavimentazione o il tavolato ligneo sottostante, evitare che gli utenti possano scivolare e, se necessario, assorbire eventuali fuoriuscite d'acqua dal perimetro della pista.

In questo caso i compiti visivi degli utilizzatori sono molteplici, secondo le attività svolte.

Il pubblico in attesa e le persone in transito, devono poter riconoscere distintamente i contorni del passaggio, devono, se dotate di pattini, poter riconoscere la forma e gli eventuali ostacoli sul piano di calpestio per potersi muovere, o restare in sicurezza.

Atleti, allenatori, giudici e tutto il personale di sicurezza e dell'impianto devono poter osservare indisturbati le attività svolte in pista, riconoscere i soggetti e valutarne le prestazioni e i movimenti. E' ragionevole considerare costoro, come soggetti immobili.

Gli operatori di fotografia e di ripresa devono poter visionare senza ostacoli l'intera superficie della pista e contare su valori di illuminamento verticale, in direzione della linea di mira dei loro strumenti, adeguati a ottenere immagini di qualità.

Possibilmente, anche se le apparecchiature di ripresa moderne non risentono di disturbi dovuti all'inquadratura diretta di sorgenti di forte luminanza, non si devono determinare fenomeni di "abbagliamento" nell'obiettivo.

5.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici

La tecnologia tradizionale più utilizzata al giorno d'oggi, come già evidenziato in precedenza, è quella che utilizza lampade a ioduri metallici con bruciatore ceramico o al quarzo.

Il vantaggio di questo tipo di tecnologia risiede soprattutto nell'elevata potenza delle sorgenti e quindi nell'alto flusso emesso; questo consente di installare un numero limitato di apparecchi, ad altezze di montaggio elevate ottenendo così benefici molteplici: illuminamenti consistenti e uniformi, uniti alla facilità di escludere i centri luminosi dal cono ottico degli osservatori in pista, limitando così il rischio di abbagliamenti diretti. Con questo tipo di lampade è certamente possibile illuminare tutti i livelli di attività.

Lampade

Per cominciare sarà descritto in modo esteso l'impianto dedicato all'attività agonistica, in seguito saranno sinteticamente rappresentati quelli per gli altri livelli di attività.

Per ciascuno di questi impianti la logica realizzativa, le altezze di montaggio, l'orientamento degli apparecchi e la tipologia di ottica non varieranno; cambieranno, invece, le lampade, gli apparecchi e il loro numero.

Si tratterà dunque di impianti tecnologicamente simili, progettati, per flusso emesso e potenza assorbita, per rispettare i requisiti illuminotecnici relativi ad ogni livello di attività.

La scelta delle lampade per l'illuminazione della pista ad ogni livello è stata guidata da alcuni parametri principali:

- Cercare di ottenere il massimo flusso emesso possibile.
- Ridurre il numero delle sorgenti.
- Limitare la potenza assorbita.
- Ottenere una buona resa cromatica.

Le sorgenti ad alogenuri metallici utilizzate nell'impianto di riferimento per l'illuminazione della pista e dell'anello circostante usano come alogeno lo iodio, perciò rientrano nella sottocategoria di lampade a ioduri metallici.

Sono state scelte lampade con bruciatore al

quarzo, a doppio attacco, non compatte, da 2.000 W e funzionanti a 400 V, capaci di 220.000 lm.

Sono lampade tubolari della lunghezza di circa 30 cm, della durata media di 12.000 ore; come è evidente dai dati di flusso sono fortemente emissive e dotate di un'efficienza pari a 110 lm/W.

Sono altresì caratterizzate da un'elevata resa cromatica ($R_a > 80$) e una temperatura di colore pari a 4.200 K; tutte queste caratteristiche le rendono sorgenti assolutamente ideali per l'illuminazione di grandi superfici e di impianti sportivi professionistici.

Il principale svantaggio è dato dalla lentezza in fase di accensione: impiegano infatti circa 5 minuti per arrivare a pieno regime. E in caso di spegnimento e di riaccensione a caldo, i tempi necessari per recuperare interamente il flusso luminoso aumentano ulteriormente.

Questi aspetti sono, come è noto, dovuti ai com-

plexi dispositivi che ne regolano l'accensione e l'innesco.

Nella tabella 10 sono sintetizzati i parametri caratteristici di questo tipo di lampade.


Apparecchi e ottiche

Per l'illuminazione funzionale della pista, l'apparecchio deve essere, ovviamente, progettato per operare all'esterno, con temperature invernali, in ambienti privi di protezioni di ogni sorta. Sono stati scelti corpi in alluminio, per la leggerezza, per la resistenza all'ossidazione e alla corrosione, dotati di braccio orientabile per l'installazione.

La struttura dell'ottica è in alluminio anodizzato, ad alto coefficiente di riflessione.

Il vetro è indurito con processi termici.

10 LAMPADA A IODURI METALLICI CON BRUCIATORE AL QUARZO

Potenza nominale (W)	2.000	
Tensione (V)	400	
Tensione lampada (V)	235	
Flusso emesso (lm)	220.000	
Efficienza luminosa (lm/W)	110	
Temperatura colore (K)	4.200	
Resa cromatica R_a	>80	
Durata al 50% del flusso (h)	12.000	
Dimensioni (l-d) (mm)	294-40	
Peso (Kg)	0,172	
Codice di colore	NW	

Apparecchi come questi, pensati per lampade a ioduri metallici, contengono anche dispositivi ausiliari, come alimentatore, accenditore e condensatore, per un peso complessivo di 16 Kg.

In installazioni sportive di questo tipo, la tecnologia attualmente consente di utilizzare due tipi di ottiche principali per i proiettori: simmetrica o asimmetrica a evolvente di cerchio.

La forma dell'apparecchio dipende dall'ottica che porta.

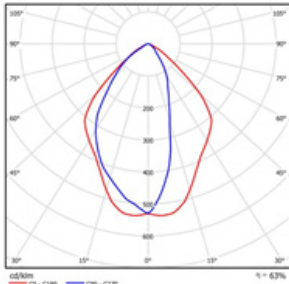

La scelta dipende dalle necessità d'installazione imposte dalla struttura della pista o dell'impianto sportivo: le ottiche simmetriche, a fascio medio, largo o stretto, consentono di disporre l'apparecchio sopra la pista, ottenendo risultati ottimali; negli impianti indoor, ad esempio, gli apparecchi sono disposti in reticolo regolare sopra il campo di gioco; le ottiche ad evolvente di

cerchio sono adatte invece ad essere collocate ai margini della pista.

Nelle applicazioni all'aperto, prive di copertura, dove non è possibile realizzare una disposizione a reticolo sopra la pista, gli apparecchi sono collocati su torri faro o su pali; in questi casi l'apparecchio, se dotato di ottica simmetrica, deve essere correttamente orientato per distribuire uniformemente il flusso sulla superficie, o, eventualmente, provvisto di apposite lamelle di schermo, superiori o laterali, atte a dirigere il flusso luminoso verso il campo di gioco, evitando un'inutile dispersione.

Nel caso di apparecchi con ottica ad evolvente di cerchio, la corretta collocazione si ottiene assecondandone la caratteristica asimmetria, quindi installando gli apparecchi alla giusta altezza e distanza dalla pista.

11 APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello I- illuminazione della pista

Lampada alloggiata	Ioduri metallici con bruciatore al quarzo (2.000 W)
Potenza nominale (W)	2.213
Tensione di alimentazione (V)	400
Flusso emesso (lm)	220.000
Peso netto (Kg)	15,5
Dimensioni (mm)	600x547x259
Rendimento ottico	63%
Classe di isolamento	1
	(Configurazione priva di lamella) 

La curva fotometrica dei riflettori a fascio simmetrico può essere rappresentata nello spazio tridimensionale come un volume forma di goccia; la presenza di lamelle deforma questa rappresentazione schiacciandola sul fianco.

In questo caso sono state selezionate curve fotometriche simmetriche ad ampio fascio e provviste di lamella superiore; l'emissione risulta a goccia simmetrica sull'asse 0-180°, mentre sull'asse 0-90° appare a goccia asimmetrica, più marcatamente emissiva verso il basso.

Nella tabella 11 sono sintetizzate tutte le caratteristiche dell'apparecchio dotato della lampada scelta e dell'ottica simmetrica.

In questo proiettore il flusso è diffuso in un cono ampio, simmetrico ai lati e limitato superiormente, favorendo la concentrazione sul piano della pista.

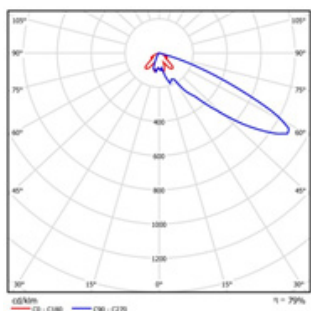
L'ottica asimmetrica invece è più elaborata, ed è pensata per disporre l'apparecchio orizzontalmente; in questo modo il flusso si distribuirà verso il basso e in avanti, consentendo quindi di installare gli apparecchi a una certa distanza dalla superficie interessata.

In particolare, sono state considerate curve fotometriche che emettono con profilo ovoidale sull'asse 0-180°, mentre sull'asse 90-270° concentrano fortemente la loro intensità in avanti, sull'asse dei 45°, come schematizzato nella tabella 12.

Per le piste di ghiaccio, questo tipo di scelta permette di allontanare i pali di montaggio dalla balaustra di alcuni metri, senza inclinare l'apparecchio, mantenendo una buona illuminazione diffusa. Anche per ottiche di questo tipo esistono apparecchi a fascio largo, medio e stretto ma

12 APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello IA- illuminazione della pista

Lampada alloggiata	Ioduri metallici con bruciatore al quarzo (2.000 W)
Potenza nominale (W)	2.213
Tensione di alimentazione (V)	400
Flusso emesso (lm)	173.800
Peso netto (Kg)	15,5
Dimensioni (mm)	600x547x259
Rendimento ottico	79%
Classe di isolamento	1



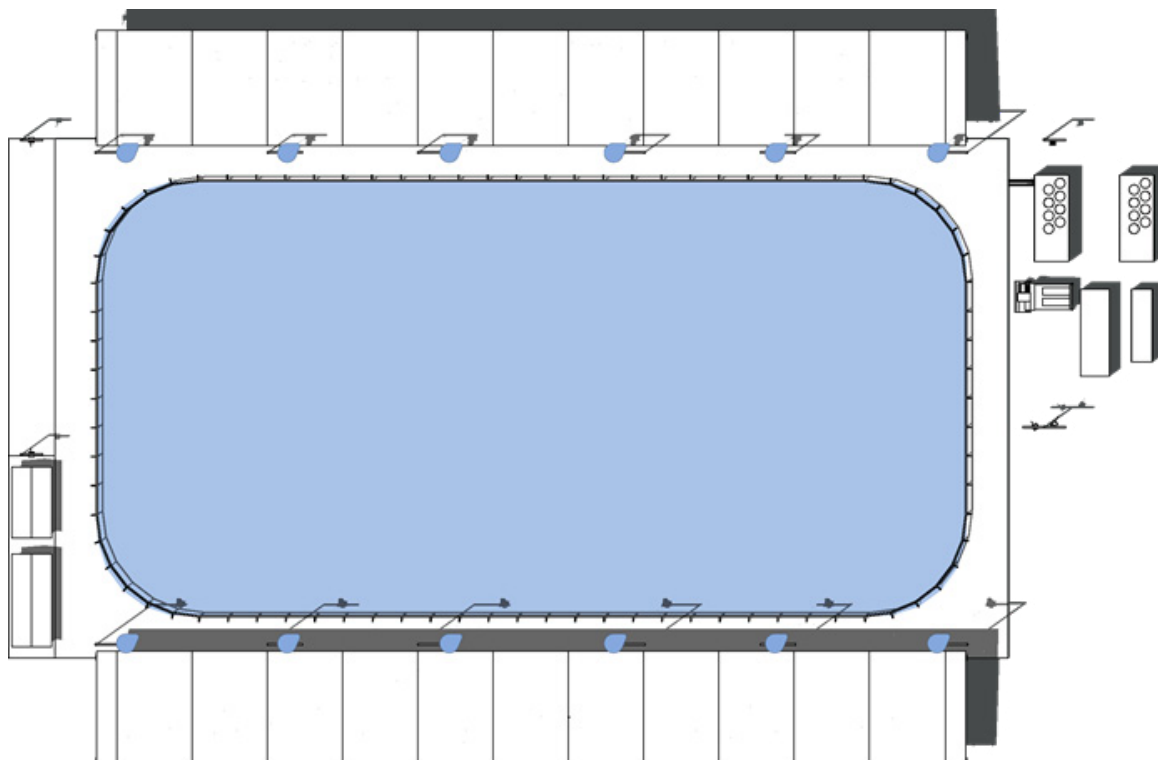


Figura 58: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione della pista e dell'anello circostante

per favorire l'uniformità degli illuminamenti è stato scelto un fascio largo.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

Attraverso il metodo del flusso globale, quindi prima ancora di effettuare il calcolo illuminotecnico via software, si è proceduto a calcolare un dimensionamento di massima dell'impianto; senza insistere nei dettagli di questa fase preliminare, si può sottolineare che l'obiettivo era raggiungere un illuminamento medio sulla pista

di 500 lx su 1768,24 m², tenendo conto che lo stesso allestimento di apparecchi dedicato alla pista sarebbe stato responsabile anche dell'illuminazione a bordo pista.

In questa fase, per ottenere un illuminamento di 500 lx sulla pista e di circa 200 sull'anello a bordo pista, è risultato sufficiente installare una decina di apparecchi del modello 1 e analogamente del modello 1A, poiché caratterizzati da flussi molto simili, nonostante i rendimenti ottici diversi, pari al 63% per il primo e al 79% per il secondo.

Una volta valutato il numero di massima degli apparecchi, il secondo aspetto da analizzare è la loro collocazione ideale: la distanza minima dal confine del campo da gioco del centro luminoso

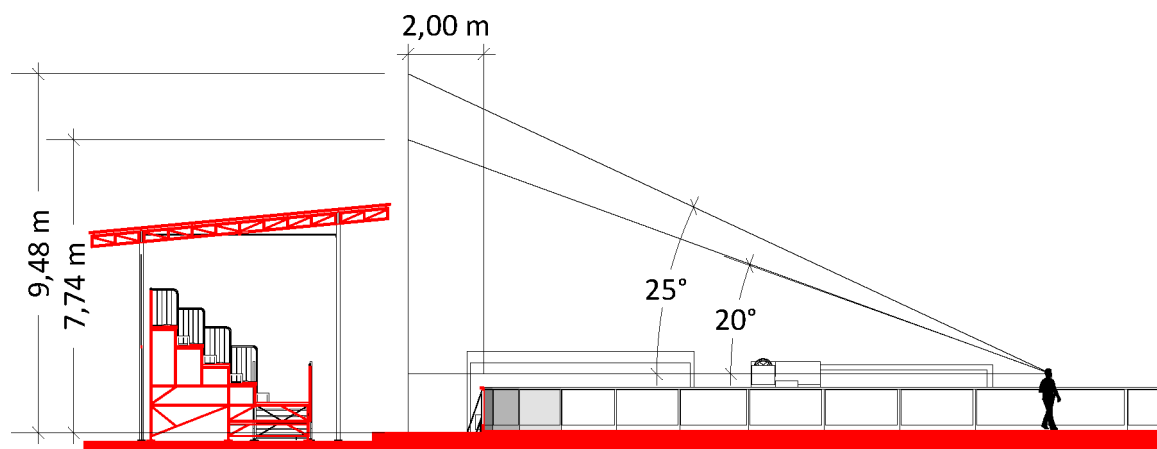


Figura 59: schema delle altezze e delle distanze minime dei centri luminosi dal centro della pista

dell'apparecchio deve essere, secondo le prescrizioni normative, di almeno 2 m, e l'altezza minima di 7,6 m.

Per ragioni di spazio, dovute alla presenza di gradinate, le distanze dapprima sono state rispettate precisamente, e poi sono state variate, nel rispetto delle prescrizioni per ottenere i valori ideali di illuminamento in pista.

Si è proceduto quindi con il calcolo tramite software, ripetendolo più volte con entrambe le tipologie considerate, al fine di ottenere la configurazione ideale, nel numero, nella posizione e nell'inclinazione degli apparecchi.

Già dalle prime prove è stato evidente che l'apparecchio con ottica a evolvente di cerchio, pur offrendo valori d'illuminamento idonei, non era in grado di garantire una buona uniformità d'illuminamento in pista, per via della limitata ampiezza del fascio principale sull'asse 90-270°.

L'apparecchio con ottica simmetrica, per via dell'ampiezza del fascio, soffre meno di problemi di uniformità d'illuminamento, anzi, riesce a rispettare il valore richiesto; per questo motivo

la scelta si è orientata verso questa tipologia.

Ottenere un illuminamento di oltre 500 lx è stato possibile installando dodici apparecchi del modello 1; si è scelto di rispettare la distanza limite ma di elevare l'altezza di montaggio fino a 10 m, aumentando così l'angolo tra la linea orizzontale di vista di un osservatore a centrocampo e la linea diretta al centro luminoso considerato, la cui ampiezza minima è 20°.

In questo caso l'angolo è di 25°, ovvero l'ampiezza consigliata, come rappresentato in figura 64. In questo modo è stato possibile ottenere un'illuminazione molto diffusa, grazie all'ampiezza del fascio e l'altezza di montaggio.

Gli apparecchi sono installati tramite il loro braccio rotante, sotto i bracci montati su pali metallici, collocati sul bordo pista, alla distanza indicata, ciascuno di essi è inclinato rispetto alla verticale di 55°, in modo da dirigere il fascio verso il centro del rettangolo di gioco.

Il montaggio avviene con l'ausilio del braccio rotante di cui è provvisto il proiettore, permettendo anche di orientare il fascio all'angolazione

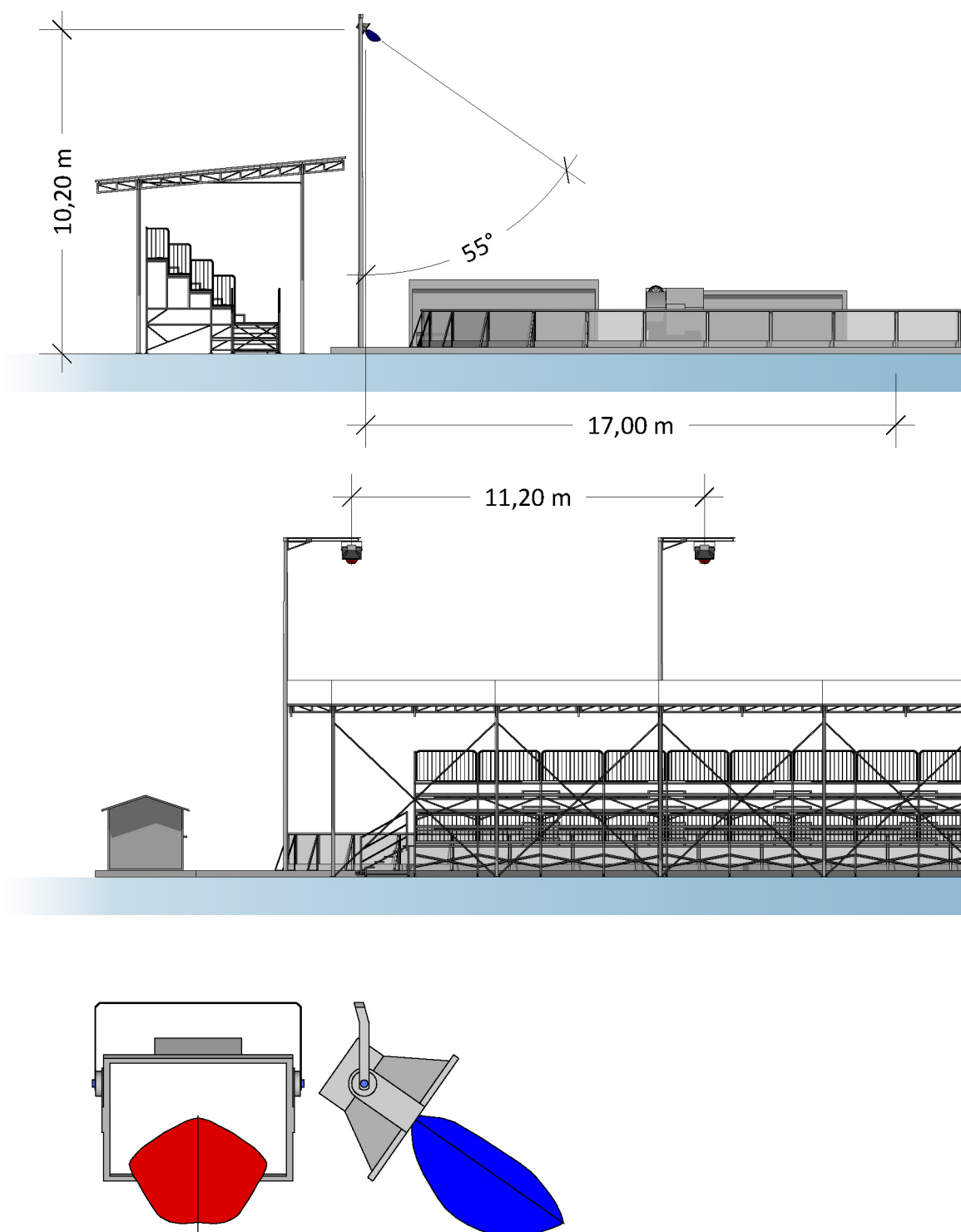


Figura 60: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione della pista. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

richiesta. Al fine di limitare il disturbo provocato agli spettatori in gradinata, i pali sono stati allineati ai montanti delle coperture.

Si tenga conto che l'intero calcolo illuminotecnico computerizzato è stato impostato con un fattore di manutenzione pari a 0,8.

La prassi delle piste di ghiaccio mobili, solitamente, prevede che sia installato un unico impianto, adatto al solo livello di attività previsto. Nel caso in cui fossero previste attività quali l'allenamento o la sola ricreazione, sarebbero quindi necessari impianti alternativi, comunque basati sulla medesima logica di installazione. Qui di seguito, in tabella 13, sono brevemente riassunti gli impianti dedicati a questo tipo di attività insieme con quello già descritto.

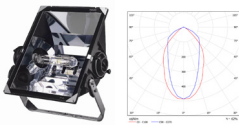
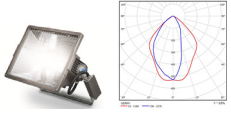
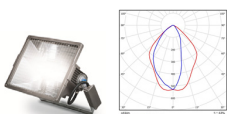
Emerge fin da subito che la tecnologia a ioduri metallici gode di maggiore efficienza luminosa

quanto più sia potente la lampada, ma anche che rappresenta una soluzione capace, ovviamente con allestimenti diversi, di soddisfare i requisiti normativi a tutti i livelli di attività.

Il numero degli apparecchi usati, in tutti i casi valutati, è ragionevole; le ottiche usate sono analoghe e i risultati sono del tutto ammissibili, alla luce delle normative di riferimento.

I costi di installazione e manutenzione dell'impianto saranno valutati successivamente, in un diretto confronto con quelli della tecnologia a Led, da cui emergeranno le proprietà di ordine economico ed energetico di ciascuna tecnologia.

13 LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista outdoor

	E_m 100 lx; uniformità di E_m 0,4	
RICREAZIONE		16 apparecchi, 856 W, 70.000 lm (efficienza sorgente 87,5 lm/W) Rendimento ottico 62% 13.696 W installati
		E_m 191 lx, uniformità di E_m 0,6
	E_m 300 lx; uniformità di E_m 0,5	
ALLENAMENTO		16 apparecchi, 1.100 W, 93.000 lm (efficienza sorgente 93 lm/W) Rendimento ottico 63% 17.600 W installati
		E_m 332 lx, uniformità di E_m 0,5
	E_m 500 lx; uniformità di E_m 0,6	
AGONISTICA		12 apparecchi, 2.213 W, 220.000 lm (efficienza sorgente 110 lm/W) Rendimento ottico 63% 26.556 W installati
		E_m 533 lx, uniformità di E_m 0,5

Anello a bordo pista

Com'è già stato rilevato in precedenza, anche in questo caso l'anello a bordo pista non è oggetto di scelte illuminotecniche specifiche, in altre parole non può contare su una sezione dell'impianto interamente dedicata a esso, ma si appoggia sugli apparecchi utilizzati per l'illuminazione della pista vera e propria, il cui flusso si diffonde in modo ampio anche nella sua area di pertinenza. Tale soluzione, che potrebbe apparire come una facile scelta di comodo, ha in realtà delle motivazioni logiche consolidate: il livello d'illuminamento e di luminanza dell'area che circonda la pista, specialmente in ambito di competizioni professionistiche, è simile o uguale a quello della pista stessa. Questo dipende dalla necessità degli atleti di distinguere chiaramente i contorni della pista, di non provare disturbo causato da forti contrasti di luminanza e poter avere un contatto visivo con il pubblico, parte integrante della del pattinaggio di figura. Questo vale ad ogni livello di attività.

Esiti illuminotecnici

Nel caso dell'attività agonistica, la pista di ghiaccio, gode di un illuminamento orizzontale, sul piano di scivolamento, molto alto e piuttosto

diffuso; in questo caso si è scelto di installare flussi in grado di garantire lo svolgimento di attività agonistiche professionistiche di rilevanza internazionale, ma non idonei per consentire riprese televisive.

La scelta è motivata dal fatto che non si svolgono sovente, manifestazioni internazionali di questo tipo in impianti temporanei, tuttavia, non è difficile immaginare il tipo d'impianto su pista necessario a rispondere a questo tipo di esigenze: aumentando il numero degli apparecchi installati a 18 si otterrebbe un illuminamento medio superiore ad 800 lx, con 22 apparecchi l'illuminamento riuscirebbe a superare i 1.000 lx.

E' da subito evidente che questa soluzione, sia come scelta degli apparecchi sia come disposizione, appare idonea dal punto di vista dell'illuminamento orizzontale medio, ma meno da quello dell'uniformità; questo dipende dall'ottica scelta.

E' del tutto conforme alle normative il valore del rapporto tra illuminamento medio orizzontale e verticale.

Anche le caratteristiche di temperatura colore e resa cromatica della lampada sono ottimali, in base alle richieste normative.

E' rilevante anche il valore della classe di abbagliamento, conforme alle richieste normative, calcolato in relazione ad un osservatore posto al centro della pista, secondo la norma CIE 112 del 1994.

L'anello bordo pista, come già indicato, sfrutta gli apparecchi dedicati alla pista per essere a sua

14 ESITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO tecnologia a ioduri metallici

Orizzontale medio: E_{hm}	500; 300; 100	533
Orizzontale specifico: E_{hs}	500; 300; 100	-
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,6; 0,5; 0,4	0,521
Rapporto orizzontale, verticale: E_{hm}/E_{vm}	$0,5 \leq E_{hm}/E_{vm} \leq 2$	1,41
Orizzontale medio per riprese televisive: E_{hmt}	800	-
Intensità (cd) nell'emisfero superiore (per impianti sportivi generici)		
Ocd per 1.000 lm a 90°	-	
Temperatura colore (K)		
3.000-5.300 (consigliato ≥ 4000) (consigliato ≥ 5.500 per le riprese TV)	4.200	
Indice di resa cromatica Ra		
60-60-20 (livello I; II; III); ≥ 80 (con riprese TV)	80	
Abbagliamento Gr (atleta in pista)		
$Gr \leq 50$	$Gr \leq 31$	

volta illuminato.

Questo tipo di soluzione, per via della tecnologia scelta, degli apparecchi e delle ottiche selezionate, offre all'area circostante al campo da gioco un illuminamento elevato e uniforme.

Il valore d'illuminamento medio ottenuto, se si considerano le richieste normative, appare più che raddoppiato, in realtà è utile considerare che l'anello a bordo pista non è una semplice area di transito, a cui il valore di illuminamento medio si riferisce, bensì un'area dalle funzioni molteplici, tra cui l'attività dei giudici di gara.

Se si considera questo tipo di attività con esigenze visive medie, e si calcola l'illuminamento su di un tavolo posto a lato della pista, si ottiene un illuminamento medio di 351 lx con una uniformità pari a 0,956, perfettamente in linea con i requisiti illuminotecnici di ambienti come sale conferenza, in cui vi è una illuminazione suffi-

ciente a prendere appunti.

Si consideri inoltre che, a oggi, l'attività del giudice di gara è molto diversa rispetto al passato, poiché si svolge con l'ausilio di monitor di computer sui quali viene visionata la performance e le singole difficoltà; per questo i valori di illuminamento riscontrati appaiono di nuovo adatti al compito visivo.

Considerando il rischio di abbagliamento per gli occupanti di quest'area, si nota, dai dati in tabella, che il valore minimo è costante, mentre i massimi variano a seconda della posizione.

Sono stati considerati due osservatori posti nei punti più critici rispetto alle sorgenti luminose: un primo osservatore, un giudice ad esempio, posto al centro esatto di uno dei lati lunghi della pista, e un secondo posto all'angolo esatto della pista.

I risultati, com'era prevedibile, dimostrano che

15 ESITI ILLUMINOTECNICI SULL'ANELLO A BORDO PISTA tecnologia a ioduri metallici

Orizzontale medio: E_{hm}	150	349
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	-
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,14
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (cameraman/fotografo)		
$Gr \leq 50$	$Gr \leq 44$	

il luogo d'installazione prescelto, rende il rischio di abbagliamento un fenomeno localizzato: osservare la pista, sia dall'interno sia dall'esterno, in direzione longitudinale, determina un rischio di abbagliamento più basso che osservarla in direzione trasversale, poiché in questo caso si rivolge lo sguardo in direzione dei centri luminosi.

Per completezza sono riportati i valori di illuminamento medio e uniformità di illuminamento per l'attività ricreativa e l'allenamento:

- E_m 185, E_{min}/E_m 0,2 per la ricreazione.
- E_m 223, E_{min}/E_m 0,2 per l'allenamento.

Sarà ora analizzata la tecnologia a Led.

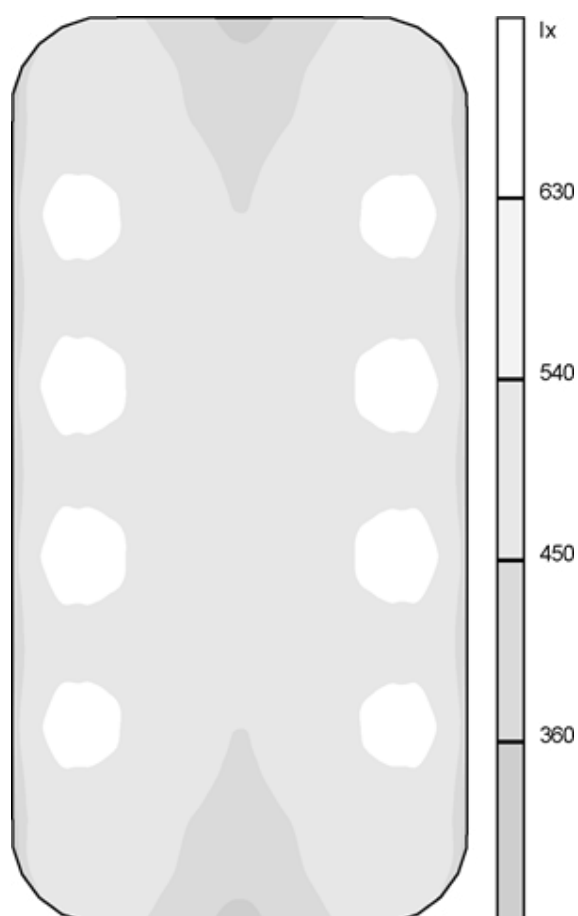


Figura 61: distribuzione degli illuminamenti sulla pista di ghiaccio

5.2. Tecnologia di progetto a Led

Sorgenti

Il confronto tra le sorgenti a ioduri metallici e il Led è un esercizio complesso, per prima cosa perché il principio di funzionamento è differente: da una parte vi è la radiazione dei gas, cioè la facoltà degli atomi di un gas di emettere fotoni, se urtati da elettroni e dall'altra l'elettroluminescenza, ovvero la proprietà dei semiconduttori di emettere luce se sottoposti ad un campo elettrico.

Le differenze non si limitano, però, al principio di funzionamento, ma, proprio in regione del principio stesso, si estendono ad altri numerosi aspetti: primo fra tutti la dimensione delle sorgenti, poiché in un chip, il diodo vero e proprio, privo di tutti gli elementi come la lente o il riflettore, virtualmente può avere dimensioni ridottissime, anche inferiori al millimetro, mentre le lampade a ioduri, compatte o meno, vanno da 10 a 30 cm di lunghezza.

Questo si riflette sulla dimensione propria di un apparecchio a Led, che potenzialmente può essere molto piccolo; tuttavia questo, per esigenze di flusso emesso, è improbabile in applicazioni come l'illuminazione di grandi aree.

Si procederà con una dettagliata ricerca tecnologica, che porterà, in seguito, ad impostare la progettazione verso i massimi risultati possibili per il Led, verificando se sia, o meno, in grado di illuminare tutti i livelli di attività previsti.

Non esistono Led singoli capaci di prestazioni analoghe a quelle delle lampade a ioduri metallici, in termini di flusso emesso; un'alternativa valida è, però, associare numerosi Led al fine di accumulare un flusso elevato.

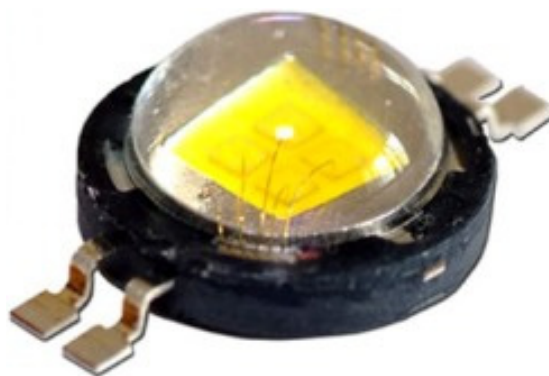


Figura 62: un led da 1,5 W circa

I Led più largamente diffusi nel campo dell'illuminazione di esterni usano tecnologia SMT, della potenza di 1 o 1,15 W, con flussi compresi tra 100 e 130 lm e quindi efficienze tra i 90 e i 130 lm/W. Si tratta di Led durevoli e affidabili e sono in assoluto i più diffusi nell'ambito dell'illuminazione architettonica, anche per grandi superfici. Questo tipo di Led, come molti altri, può operare a intensità di corrente di 350 mA oppure 525 mA, questo gli consente di aumentare considerevolmente il flusso emesso, fino al 130%; questa versatilità nella tensione di esercizio si estende, per alcuni modelli, fino a 700 o 1.000 mA.

Per accumulare un flusso paragonabile a quello di una lampada a scarica da 220.000 lm, sarebbe necessario associare dai 1.700 ai 2.200 diodi di questo tipo, cosa ovviamente impossibile per ragioni di spazio e di praticità.

La scelta del numero di Led installati in un singolo apparecchio, è obbligata dalla tecnologia ad oggi disponibile: attualmente si possono realizzare apparecchi capaci di ospitare fino a 250 diodi circa.

Esistono diodi più potenti, che assorbono da 5 a 20 W, i cui flussi emessi vanno da 350 a 1.500 lm, quindi con efficienze luminose tra i 70 e i 75 lm/W; si tratta di chip quadrati, le cui dimensioni vanno dagli 8 ai 14 cm di lato.

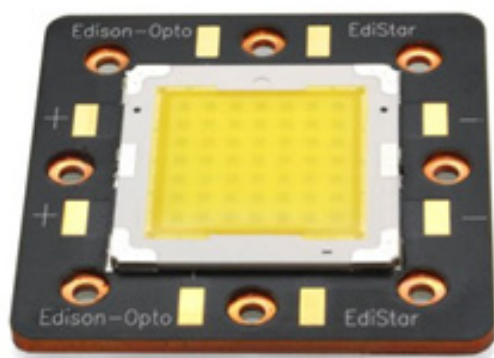


Figura 63: un chip da 100 W

A potenze superiori si possono annoverare Led da 50 fino a 100 W; questi ultimi operano tra 2.400 e 3.000 mA e sono capaci di flussi tra i 4.900 e i 7.500 lm, con efficienze comprese tra 49 e 75 lm/W. In questi casi le dimensioni sono spesso inferiori, intorno ai 5 cm di lato.

Le efficienze luminose di questo tipo di diodi non

sono certo competitive rispetto a quelle dei Led da 1,15 W e neppure le dimensioni sono agili; inoltre bisogna tener conto del fatto che questo tipo di sorgenti, operando ad intensità e potenze superiori, impongono al diodo surriscaldamenti che ne limitano l'affidabilità e la durata. Normalmente, i Led di questa potenza nominale non vengono associati in più pezzi all'interno di un singolo apparecchio, bensì si preferisce l'utilizzo di un diodo singolo, per via delle robuste necessità di dissipazione del calore.



Figura 64: un singolo diodo a 20 W installato in un riflettore

Inoltre gli apparecchi con questa configurazione hanno una limitata scelta di curve fotometriche; non rappresentano perciò una soluzione idonea alle necessità in esame, anche per via dei flussi emessi piuttosto bassi.

Cominciano ora a diffondersi soluzioni a Led a fosforo remoto, multichip, con flussi tra i 1.100 e i 3.000 lm.

Non si tratta sorgenti singole vere e proprie, ma di supporti su cui vengono installati svariati Led

ad alta potenza, coperti poi da una lente ai fosfori e installati in riflettori simmetrici intercambiabili apposti.



Figura 65: una piastra multichip priva della lente a fosfori

Queste soluzioni, pratiche e vantaggiose per molte applicazioni, sia in interni, sia in esterni, non sono però idonee al caso di studio, per via del limitato flusso emesso, delle dimensioni, circa 12 cm di diametro e degli ingombranti dissipatori, indispensabili per ciascuno dei moduli multichip. Anticipando nuovamente il discorso sugli apparecchi e sulle ottiche, si può affermare che questo tipo di soluzioni tecnologiche è inadatta al caso in esame soprattutto per l'obbligo di installare ciascuna piastra multichip nella propria ottica simmetrica, limitando le scelte in termini di curve fotometriche e quindi di collocazione degli apparecchi. Inoltre, associare un numero elevato di apparecchi di questo tipo, non determinerebbe altro se non un mosaico di curve fotometriche simmetriche a goccia più o meno ampie, senza alcun vero vantaggio pratico.



Figura 66: un apparecchio equipaggiato con piastra multichip a fosforo remoto

E' interessante notare che, mentre gli ioduri metallici costringono a selezionare la lampada più idonea in base al flusso richiesto, con la tecnologia Led è possibile utilizzare una singola tipologia di diodo, declinandone le prestazioni in base alle esigenze del caso, variandone il numero, e controllando il flusso uscente in modo autonomo, senza l'ausilio di ballast accessori. Il Led risulta quindi ampiamente più flessibile delle lampade a scarica tradizionali. In termini di resa cromatica il Led è in grado di ottenere prestazioni mediamente comprese tra il Ra 75 e 80, con punte anche superiori al 90. Una volta considerate tutte le soluzioni disponibili, si è deciso di affidare l'illuminazione della pista, e anche del resto dell'impianto, alla tecnologia più affidabile, cioè i Led da 1,15 W circa. Questa è la famiglia di Led che offre, ad oggi, la maggiore efficienza luminosa, associata alle dimensioni inferiori e alla maggiore robustezza. Il principio scelto è quindi utilizzare numerose sorgenti, ma che siano robuste, efficienti e pic-

cole. Nel paragrafo successivo, le considerazioni qui accennate alle tipologie di apparecchi disponibili, saranno ampliate ed approfondite.

Apparecchi e ottiche

Sebbene esistano proiettori equipaggiati con singoli diodi da 20 o più Watt; la soluzione più diffusa consiste nel raggiungimento del flusso richiesto, tramite la realizzazione di apparecchi in cui coesistono più Led.

Durante le ricerche preliminari di progetto sono stati presi in considerazione numerosi esempi di questo tipo, cercando, come linea guida iniziale, di ottenere i flussi più alti possibile.

In questa fase, sono state scartate le soluzioni RGB, numerose e versatili ma inadatte all'illuminazione della pista, per la resa cromatica e per la necessità di separare gli apparecchi deputati all'illuminazione coreografica da quella funzionale: i primi, infatti, devono potersi muovere ed eventualmente proiettare, oltre che fasci colorati, anche effetti. L'illuminazione funzionale e quella coreografica devono perciò coesistere e non essere alternative, quindi la scelta per il primo caso è ricaduta su Led esclusivamente bianchi.

Sorgenti luminose come il Led, spesso pressoché puntiformi, e numerose in un singolo apparecchio, mal si prestano a essere inserite in ottiche tradizionali; sarebbe, infatti, impossi-

le inserire un centinaio di Led nell'ottica di un proiettore, sia per le dimensioni, sia perché i diodi, montati su piastrina, sono bidimensionali ed emettono luce entro una semisfera e non in tutte le direzioni; senza contare che sarebbe difficile dissipare il calore prodotto da tutti i diodi associati.

Una prima possibile soluzione consiste nell'installazione, all'interno di uno supporto appositamente sagomato, di tutti i Led necessari, ciascuno con un allineamento e un'inclinazione precisa.



Figura 67: un apparecchio a Led orientati

Non si tratta di un proiettore, bensì di un mosaico di sorgenti puntiformi installate ciascuna con un orientamento proprio, in modo da ottenere una curva fotometrica precisa.

E' evidente che questo tipo di soluzione ha lo svantaggio di costringere il produttore a disegnare in modo specifico la posizione e l'inclinazione di ogni singolo diodo e di dover studiare soluzioni apposite per la dissipazione del calore. Inoltre ha lo svantaggio che ad ogni supporto

corrisponde una sola, specifica curva fotometrica; nonché la difficoltà di effettuare interventi di sostituzione, per via della precisa collocazione di ogni singola sorgente, che, se non rispettata, rischia di stravolgere l'intera curva di diffusione e quindi l'efficienza dell'apparecchio.

Per garantire una durata vantaggiosa, solitamente i Led sono montati in modo da disperdere il calore prodotto dalla giunzione, in un'unica direzione, così da approfittare di un sistema di dissipazione unico per l'intero apparecchio; in questo caso, invece, ogni Led è orientato in modo indipendente e non può sfruttare un dissipatore generale.

Come si deduce anche dalla figura 70, questo tipo di apparecchi può ospitare fino ad un massimo di 60 o 70 Led, altrimenti le dimensioni del supporto metallico sagomato diventerebbero proibitive; per questo motivo questa soluzione non è stata adottata nel progetto.

La seconda soluzione, più pratica ed economica della precedente, per fornire una curva fotometrica adeguata all'emissione di un apparecchio equipaggiato con numerosi Led, consiste nel dotare ogni singola sorgente di una lente propria, in modo da dirigere il flusso in modo consapevole. In questo modo è possibile installare tutti i Led su una piastra orizzontale, semplificando la produzione, l'installazione e la sostituzione dei diodi guasti.

Lo svantaggio di questa tipologia di apparecchi è la perdita di flusso dovuta all'assorbimento delle lenti di precisione, assenti nella configurazione precedente.



Figura 68: apparecchio a Led con lenti di precisione

Tali perdite di flusso, attualmente si attestano tra il 10 e il 20% per ogni diodo.

In sintesi le curve fotometriche sono ottenute, non attraverso l'applicazione di ottiche esterne o orientando i diodi, bensì con una serie di lenti, i cui fasci luminosi direzionati, associati adeguatamente, riproducono le curve dei comuni proiettori utilizzati per le lampade tradizionali.



Figura 69: una serie di lenti di precisione per il Led

Questo sistema, sebbene molto più complesso dell'ottica tradizionale di un proiettore, è estremamente preciso e controllato, e consente di ottenere curve fotometriche su misura per ogni richiesta.

Potenzialmente, inoltre, sarebbe possibile mo-

dificare la curva fotometrica, senza sostituire l'intero apparecchio, ma semplicemente sostituendo le lenti installate, con altre appositamente scelte.

Questa soluzione, sia per la possibilità che offre di installare numerosi diodi contenendo le dimensioni, sia per la facilità di sostituzione delle parti, è apparsa quella idonea.

Dalle considerazioni fatte fin qui è apparso evidente che fosse necessario scegliere un apparecchio che:

- Ospitasse il maggior numero di Led possibile.
- Facesse uso della famiglia di Led più affidabile, quella da 1,5 W circa.
- Alloggiasse lenti singole e non Led orientati.

Le soluzioni di questo tipo capaci dei flussi più elevati, attualmente disponibili, sono dedicate all'illuminazione di esterni, per spazi urbani o stradali o ad applicazioni decorative come il wallwashing.

In questo modo è stata individuata la tipologia di apparecchio più idonea al caso in esame, tuttavia a questa tipologia appartengono apparecchi molto diversi l'uno dall'altro.

Un primo esempio preso in considerazione conta 104 Led bianchi; il flusso di cui esso è capace comincia, secondo le linea guida scelte, ad es-

sere piuttosto interessante, attestandosi intorno ai 10.000 lm. Questo apparecchio, essendo studiato per illuminare edifici a scopo decorativo, non offre però una valida scelta di curve fotometriche.



Figura 70: un apparecchio con 104 Led bianchi

Si tratta per lo più di curve simmetriche, disponibili con ampiezze molto varie, sia molto strette che molto ampie, ma tutte rigidamente a goccia. Il caso in esame imporrebbe di scegliere le curve ad angolo di emissione più ampio possibile, ma in questa categoria di ottiche sono disponibili altri apparecchi con doti emissive superiori; di conseguenza questo apparecchio non è stato ulteriormente preso in considerazione. Inoltre, sebbene il flusso emesso sia già piuttosto alto, esso non può di certo essere paragonato a quello degli apparecchi di riferimento a ioduri; si è deciso quindi di concentrare l'atten-

zione su apparecchi con dotazione di Led ancora superiore.

A questa categoria appartengono apparecchi in cui, per via dell'elevato numero di diodi installati, le sorgenti sono divise in moduli separati ed installati in modo indipendente.

La ragione di questa caratteristica è del tutto pratica: la dimensione e il peso dell'apparecchio cominciano a divenire ingombranti, perciò è ragionevole una soluzione in cui la sostituzione dei Led guasti possa avvenire senza la disinstallazione dell'intero apparecchio.

Questo tipo di soluzione è utilizzata per lo più in apparecchi a Led pensati per l'illuminazione stradale o di grandi superfici.

A questa categoria appartiene il seguente apparecchio: si tratta di un allestimento stradale, pensato per ospitare da due a sei piastre da 60 Led ciascuna.

Il modello considerato è, ovviamente quello equipaggiato con il numero maggiore di Led,

360 diodi; tuttavia, sebbene l'allestimento di sorgenti sia molto ricco, il flusso emesso non è altrettanto elevato: 15.000 lm.

Questo dipende, ovviamente, dalla scelta dei Led installati, dotati di efficienza luminosa piuttosto bassa. Il vero limite di questa soluzione, però, è la sostanziale assenza di una vera e propria curva fotometrica: l'apparecchio infatti non fa altro che proiettare a terra un fascio luminoso rettangolare e perciò ottiene i risultati migliori solo se installato perfettamente sopra la superficie da illuminare.

Inoltre è in grado di operare ad una singola intensità di corrente, impedendo di scegliere la potenza assorbita e il flusso uscente in base alle necessità.

La scelta si è dunque orientata verso un apparecchio, sempre a tecnologia modulare, dotato di un ventaglio di caratteristiche che lo rendono decisamente più versatile ed efficiente.



Figura 71: un apparecchio stradale modulare

Apparecchio scelto

Questo apparecchio ha una struttura portante in alluminio, con profilo piatto anti-vento, realizzata in modo da poter ospitare un numero variabile di Led, da 20 a 240, adattando il flusso e la curva fotometrica alle più varie esigenze.

Nella struttura portante sono inseriti gli elementi di ancoraggio, intercambiabili a seconda del tipo di installazione richiesta (su palo, su

braccio, a soffitto ecc.) e un sistema di dissipazione di calore secondario, utile a garantire la maggiore durata possibile dei diodi.

Questo apparecchio, secondo l'ambiente in cui sarà collocato, può anche essere equipaggiato con dissipatori di calore alternativi e molto grandi, nel caso in cui la ventilazione non sia sufficiente a garantire temperature idonee.

Il flusso totale dell'apparecchio è ottenuto attraverso l'uso di barre intercambiabili, ciascuna dotata di venti Led, montati su due file da dieci, equipaggiata di dissipatore di calore primario e alimentatore interno in corrente continua da 175, 350 e 525 mA. Ciascuno dei Led è dotato di una lente di precisione.



Figura 72: l'apparecchio scelto montato su palo; sono visibili le barre Led modulari

Questa tipologia di apparecchio può, di conseguenza, avere dimensioni variabili, in ragione del numero di barre Led installate, raggiungendo, per gli allestimenti più grandi, dimensioni persino superiori a quelle degli apparecchi a ioduri.

Tuttavia è un apparecchio sicuramente versati-

le, di facile manutenzione e riparazione ed equipaggia il tipo di Led, da 1,125 W, rappresentato nella tabella 16.



Figura 73: barra da 20 Led di progetto

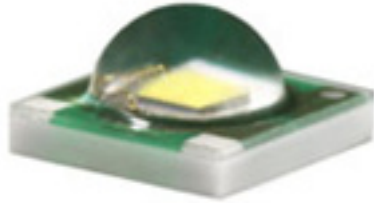
Questi apparecchi installano diodi identici per ogni tipo di allestimento; ciò che cambia è la lente di precisione installata.

Un allestimento di 240 Led di questo tipo, è in grado di emettere, al netto delle dispersioni dovute al rendimento ottico dell'apparecchio e alle lenti, 30.720 lm, a 350 mA, richiedendo 270 W, ovviamente escludendo il necessario apporto energetico richiesto dall'apparecchio.

I valori netti di potenza assorbita e flusso emesso, se confrontati con le lampade più potenti tra quelle descritte a ioduri, sono per la potenza pari ad un ottavo e per il flusso pari ad un settimo.

Se si considera che il flusso emesso sarà realmente più basso e la potenza superiore, per via delle dispersioni ottiche e del fabbisogno energetico dell'apparecchio, il paragone pende a netto vantaggio della tecnologia a ioduri metallici. Nonostante ciò, è possibile far operare l'apparecchio a tensioni superiori, ottenendo un au-

16 LED BIANCO

	25 °C e 350 mA	25 °C e 525 mA	
Potenza nominale (W)	1,125	1,687	
Flusso emesso (lm) min/med/max	123/128/134	160/167/174	
Efficienza luminosa (lm/W) min/med/max	109/114/119	95/99/103	
Resa cromatica Ra	80		
Temperatura di colore (K)	6.000 (4.300, con emissioni pari all'87%)		
Angolo di emissione (°)	115		
Dimensioni nette (mm)	3,45x3,45x2		

mento del flusso.

Questa famiglia di apparecchi propone curve fotometriche di ogni tipo, comprese quelle analizzate nel caso delle lampade a ioduri: ad evolvente di cerchio e simmetrica.

Le considerazioni fatte allora sulle curve fotometriche, sebbene la tecnologia degli apparecchi a Led sia differente, sono valide anche in questo caso, con la sola eccezione dovuta alle grandi differenze di flusso.

Tale differenza, infatti, impone di utilizzare curve fotometriche con cui sia possibile concentrare verso la pista la maggiore quantità di flusso possibile, evitando le dispersioni indesiderate.

Tutte le valutazioni relative al tipo di curva fotometrica scelta, saranno chiarite nel paragrafo successivo, legandole direttamente agli esiti del calcolo illuminotecnico.

E' fin da ora evidente che il Led non sia in grado di illuminare attività agonistiche, per via dei flussi limitati. Si cercherà comunque di ottenere un impianto il più possibile potente, per saggiare le sue massime capacità.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

Il dimensionamento preliminare dell'impianto, con questo tipo di soluzione ha suggerito, ovviamente, che, per le competizioni, sarebbe necessario un numero di apparecchi enorme; in effetti un paragone molto semplice rivela che un singolo apparecchio a ioduri di riferimento ha un flusso che supera quello di uno a Led di circa sette volte, suggerendo un totale di apparecchi a Led superiore ad 80; solo per equiparare il flusso applicato.

Ovviamente questa soluzione è impensabile, sia per ragioni economiche sia pratiche; è necessario, quindi, cercare di sfruttare al meglio le curve fotometriche disponibili per il Led e verificare il livello di attività più adatto al Led.

Per prima cosa si è cercato di comprendere quanti apparecchi fossero necessari per raggiungere un illuminamento a terra almeno pari

17 APPARECCHIO LED -modello IA- illuminazione della pista

Sorgenti alloggiare	240 Led
Potenza nominale (W) (350 mA; 525 mA)	292; 437
Tensione di alimentazione (V)	350; 525
Flusso emesso (lm): (4.300 K, 6.000K, 350 mA) (4.300 K, 6.000K, 525 mA)	20.225; 23.247 26.292; 30.221
Peso netto (Kg)	14,97
Dimensioni (mm)	314x806,45x133
Rendimento ottico	75%
Classe di isolamento	1

a 200 lx, se possibile.

Dopo aver considerato i flussi emessi a 350 mA, si è deciso di aumentare l'amperaggio fino a 525 mA; questo determina un generale calo dell'efficienza luminosa dei Led ma, d'altra parte, un aumento delle emissioni del 30%, ovviamente associato ad un aumento della potenza assorbita del 50%.

Inoltre si è scelto di utilizzare il Led a 6.000 K di temperatura colore, poiché, a parità di resa cromatica, quello a 4.300 k ha flussi inferiori.

La scelta della temperatura colore è anche supportata dalle raccomandazioni F.I.F.A. e U.E.F.A. in ambito di illuminazione in caso di riprese te-

levisive.

Secondo queste premesse, sapendo che la superficie della pista è pari a 1.768,24 m², con un calcolo di massima, si è stimato che sarebbe stato necessario installare almeno una ventina di apparecchi.

Nelle tabelle 17 e 18, sono descritti gli apparecchi provvisti delle due diverse curve fotometriche disponibili.

Sono state qui messe alla prova entrambe le curve fotometriche: da un primo confronto con le analoghe curve degli apparecchi di riferimento, sono state subito notate delle differenze che hanno poi influito sulla scelta finale

18 APPARECCHIO LED -modelloI- illuminazione della pista

Sorgenti alloggiare	240 Led
Potenza nominale (W) (350 mA; 525 mA)	292; 437
Tensione di alimentazione (V)	350; 525
Flusso emesso medio (lm): (4.300 K, 6.000K, 350 mA) (4.300 K, 6.000K, 525 mA)	13.340; 15.333 17.342; 19.933
Peso netto (Kg)	14,97
Dimensioni (mm)	314x806,45x133
Rendimento ottico	50% con backlight shield
Classe di isolamento	1

In sintesi è stato possibile verificare che la curva fotometrica simmetrica non è in grado, per via della scarsa ampiezza, di garantire una idonea uniformità di illuminamento a terra; di conseguenza si è preferito concentrare le sperimentazioni quella asimmetrica.

La curva simmetrica a goccia, sebbene nettamente più vantaggiosa in termini di rendimento ottico rispetto a quella ad evolvente, 75% contro 50%, avendo un angolo di apertura di circa la metà rispetto a quella corrispondente di riferimento, determina la concentrazione del flusso in aree ristrette e una scarsa diffusione in ampiezza.

Il montaggio su palo, per una curva fotometrica come questa, non è poi il tipo di installazione ideale; un montaggio a soffitto senza alcuna inclinazione sarebbe stata la scelta migliore, ma la situazione impone soluzioni differenti.

La curva ad evolvente di cerchio, per via dell'ampiezza del fascio ai lati, permette invece di ottenere una buona uniformità.

A differenza della curva ad evolvente analizzata nell'impianto di riferimento, quella dell'apparecchio a Led concentra parte del flusso in avanti, ma ne diffonde una parte consistente ad ombrello, permettendo di garantire una uniformità di illuminamento a terra considerevole.

Per la pista di ghiaccio, in conclusione, la curva fotometrica scelta è analoga a quella di un riflettore stradale asimmetrico, con limitazione della diffusione verso il retro dell'apparecchio.

Poiché le ottiche ad evolvente di cerchio sono caratterizzate da una forte concentrazione di flusso in direzione frontale e una più debole concentrazione in direzione posteriore, si è verificato che proprio il flusso posteriore tende a disperdersi verso le gradinate piuttosto che concentrarsi verso l'anello a bordo pista; perciò si è preferito mantenere la stessa curva fotometrica, dotandola però di lenti che fungano da "schermatura posteriore", che limitino cioè la dispersione indesiderata oltre l'anello a bordo pista.

Questo determina sì una riduzione del rendimento ottico dell'apparecchio dall'67 al 50%, ma determina una migliore concentrazione del flusso in pista e attorno ad essa.

Effettuando il calcolo illuminotecnico tramite software si è dimostrato necessario innalzare il numero degli apparecchi oltre la trentina, questo perché, sebbene in pista l'illuminamento di 200 lx sia stato abbondantemente raggiunto, non è stato possibile ottenere illuminamenti sufficienti nell'anello circostante. Per questo motivo il numero è stato elevato a 34.

L'installazione sulla pista, per via del gran numero di apparecchi da collocare utilizzando la tecnologia Led, non può più avvenire usufruendo di pali metallici; perciò la pista è stata circonda-

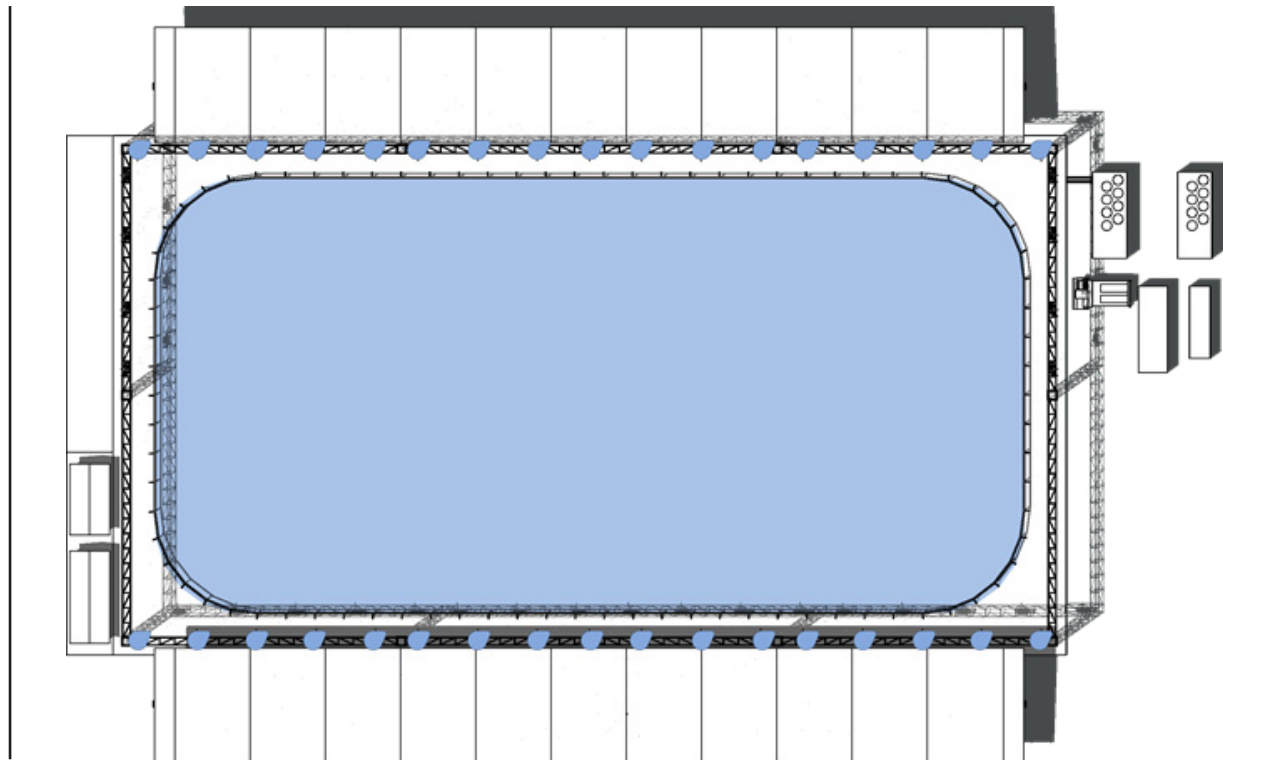


Figura 74: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione della pista e dell'anello circostante

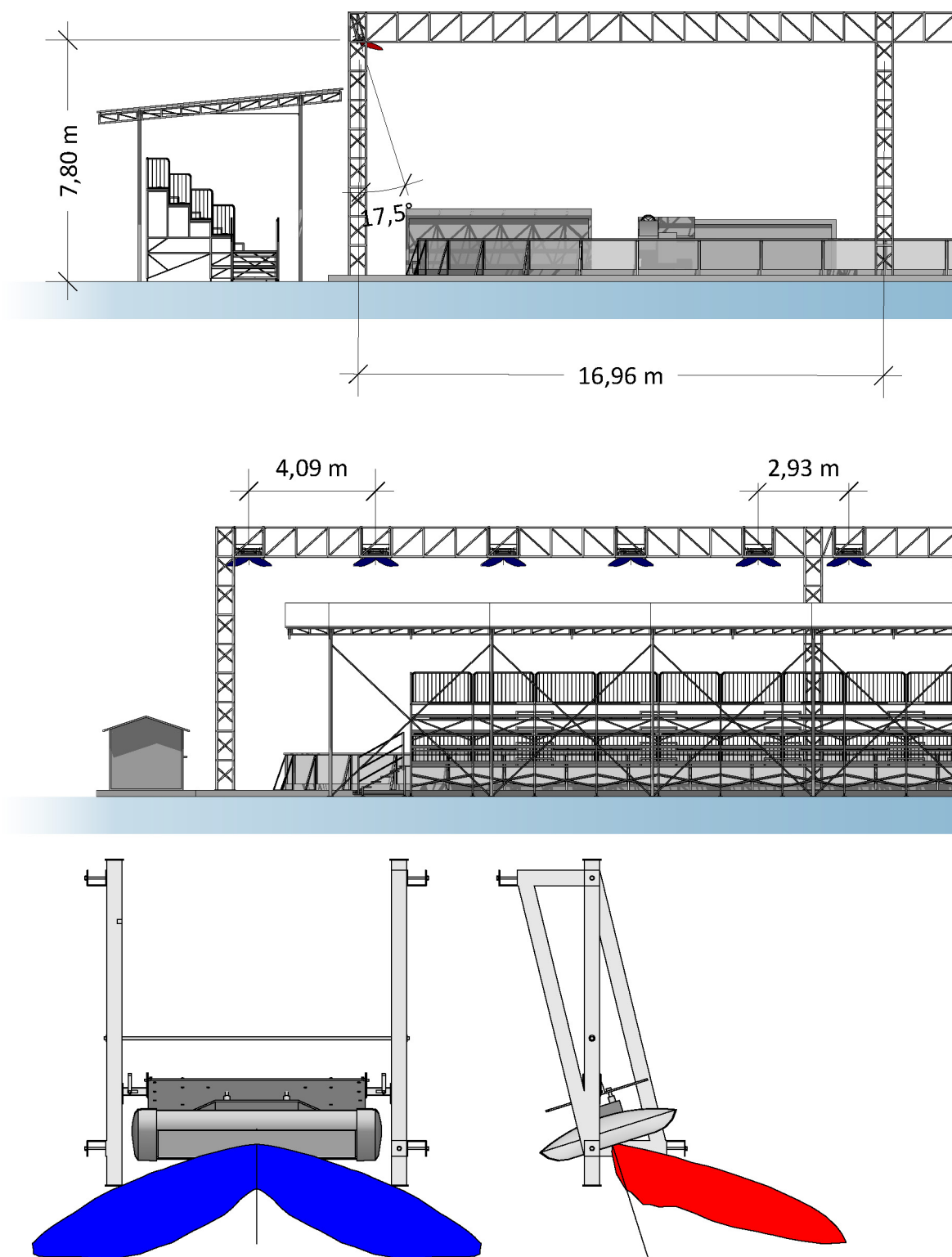


Figura 75: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione della pista. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

ta da una travatura reticolare di contorno, sostenuta da montanti anch'essi reticolari.

L'altezza complessiva della struttura, sostenuta da 10 montanti, è di 8,7 m sopra la quota del tavolato d'appoggio, in modo tale da poter installare i centri luminosi degli apparecchi a 7,6 m sopra la pista e a 2 m oltre le balaustre.

Gli apparecchi dedicati alla pista sono disposti in due file da 17 pezzi ciascuna, collocate sulle travi maggiori della corona reticolare, con una inclinazione di 17,5° rispetto alla verticale verso il centro del campo, in modo da evitare che, proprio a centro pista, si formasse una zona caratterizzata da un basso illuminamento.

Il montaggio avviene attraverso una staffa modulare specifica per l'installazione di apparecchi su trave reticolare.

Come si è visto, il centro luminoso deve avere distanze minime dal centro della pista, tuttavia

non è possibile riprodurre il tipo d'installazione usata per gli apparecchi a ioduri metallici, per via della grande differenza di flusso: si è preferito quindi ridurre al minimo consentito le altezze, in cambio di un illuminamento leggermente superiore e minori dispersioni.

Confrontando un apparecchio a ioduri metallici di riferimento con uno a Led selezionato, a parità di flusso, è possibile avere un'idea chiara dell'effettiva differenza prestazionale.

Per equiparare, con gli apparecchi a Led, il flusso emesso da uno a ioduri, sono necessari 11 apparecchi come questi, operanti a 525 mA ($220.000:19.933=11$), con un dispendio energetico di 4.807 W, contro 2.213 W, circa il doppio di quello dell'apparecchio di riferimento.

Il confronto tra i due apparecchi, in sostanza, dimostra come, in questo caso specifico, per

19 ESITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO tecnologia a Led

Orizzontale medio: E_{hm}	500; 300; 100	214 (167 @ 350 mA)
Orizzontale specifico: E_{hs}	500; 300; 100	-
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,6; 0,5; 0,4	0,659 (0,68 @ 350 mA)
Rapporto orizzontale, verticale: E_{hm}/E_{vm}	$0,5 \leq E_{hm}/E_{vm} \leq 2$	1,36
Orizzontale medio per riprese televisive: E_{hmt}	800	-
Intensità (cd) nell'emisfero superiore (per impianti sportivi generici)		
O_{cd} per 1.000 lm a 90°		-
Temperatura colore (K)		
3.000-5.300 (consigliato ≥ 4000) (consigliato ≥ 5.500 per le riprese TV)		6.000
Indice di resa cromatica Ra		
60-60-20 (livello I; II; III); ≥ 80 (con riprese TV)		80
Abbagliamento Gr (atleta in pista)		
$Gr \leq 50$		$Gr \leq 33$

equiparare il flusso emesso da un'apparecchio di riferimento, ne sono necessari 11 a Led, con un dispendio energetico doppio.

La scelta di una curva fotometrica di così basso rendimento penalizza certamente l'apparecchio a Led, ma è altrettanto chiaro come questa tecnologia costringa ad aumentare notevolmente il numero degli apparecchi, aumentando i costi iniziali e il consumo energetico.

E' quindi più che ovvio, che in questo caso la tecnologia a Led sia idonea ad illuminare attività di tipo ricreativo e non oltre. Il confronto con l'analogo impianto a ioduri verrà riportato più avanti.

Esiti illuminotecnici

La pista di ghiaccio gode di un illuminamento orizzontale uniforme ma, ovviamente, i valori normativi per attività di livello elevato non sono stati raggiunti, come rappresentato in tabella 19.

Come è evidente dai valori tabulati, un impianto pensato per garantire lo svolgimento in pista di attività ricreative e propedeutiche allo sport, con la tecnologia a Led, svolge egregiamente il compito richiesto, riuscendo ad ottenere valori di uniformità persino superiori a quelle dell'impianto a ioduri di riferimento.

D'altro canto, il minore angolo di visuale che insiste tra l'occhio di un osservatore a centro pista e i centri luminosi installati, determina valori di abbagliamento superiori rispetto a quelli dell'impianto di riferimento.

I valori richiesti per le riprese televisive sono quindi, per via del livello minimo di attività, non più rilevanti.

L'anello a bordo pista, illuminato attraverso gli stessi apparecchi usati per la pista, gode di illuminamenti pressoché identici a quelli del campo di gioco.

Per valutare i livelli di abbagliamento sono stati considerati gli stessi osservatori utilizzati nel caso dell'impianto a ioduri; le posizioni sono le stesse, ma ovviamente vanno considerati come semplici spettatori a bordo pista e non più come un giudice, un operatore TV o un fotografo;

20 ESITI ILLUMINOTECNICI SULL'ANELLO A BORDO PISTA tecnologia a Led		
Orizzontale medio: E_{hm}	150	199
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	-
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,56
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (cameraman/fotografo)		
Gr≤50	Gr≤39	

riducendo così gli eventuali problemi dovuti all'abbagliamento. prestazioni delle due tecnologie a confronto.

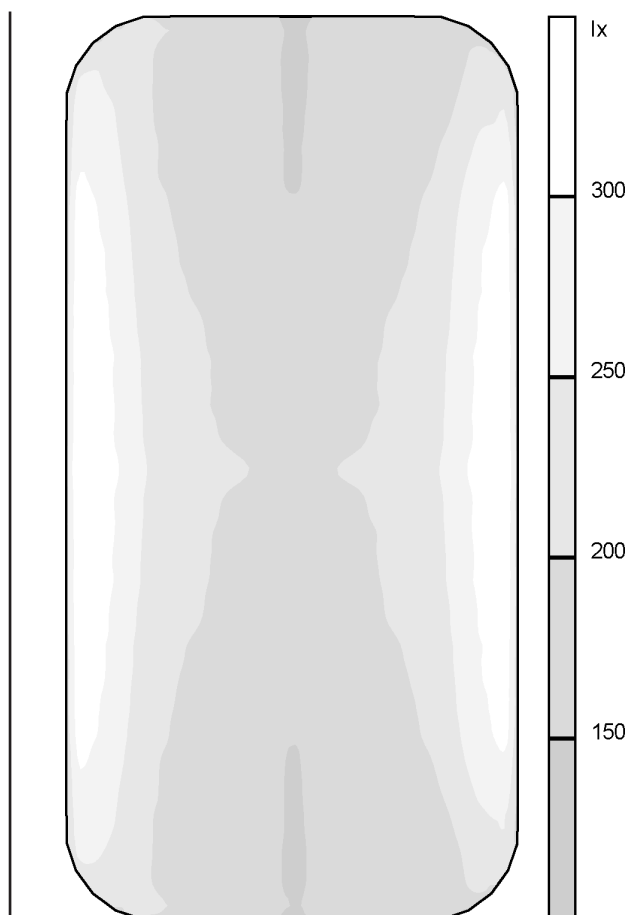


Figura 76: distribuzione degli illuminamenti sulla pista di ghiaccio

I valori di abbagliamento per i due spettatori sono ammissibili per la normativa e più alti di quelli calcolati nel precedente impianto: anche se la diminuzione dell'angolo aumenta il rischio di abbagliamento, le minori luminanze degli apparecchi a Led riescono a contenerne i valori. Nei paragrafi successivi saranno analizzati gli impianti propri delle altre aree funzionali. Gli esiti illuminotecnici relativi indicheranno le

6. Area di ingresso: compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led

L'area d'ingresso è una zona in cui si acquistano biglietti, si affittano i pattini e si cambiano le calzature, si usufruisce del guardaroba e spesso si attende di occupare un posto in tribuna o di entrare in pista.

Come l'anello a bordo pista è spesso rivestito a terra con un panno, per evitare il rischio di scivolare una volta indossati i pattini, normalmente è equipaggiato di panche per il cambio delle calzature e per l'attesa.

Questa è una zona interamente destinata al pubblico fermo o in transito, che qui svolge un compito visivo semplice: deve poter riconoscere distintamente i contorni dell'area, delle cassette di servizio, il gradino del tavolato di supporto e il contorno della pista, oltre che delle altre aree circostanti. Deve, se dotato di pattini, poter riconoscere gli eventuali ostacoli sul piano di calpestio per potersi muovere, o attendere in sicurezza.

6.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici

La progettazione illuminotecnica di tutte le aree funzionali esterne alla pista e all'anello circostante si basa sul presupposto che i requisiti di illuminamento sono molto più contenuti in confronto a quelli da rispettare in pista, sia per il tipo di attività svolta, sia per la mancanza di riprese televisive.


Sono dunque necessarie lampade con doti di flusso più contenute, doti che variano in base alla zona funzionale considerata volta per volta; la scelta si è orientata, per versatilità e semplicità, verso una singola famiglia di sorgenti, per tecnologia, dimensioni e attacco, che fosse però capace di offrire lampade con flussi differenti, a seconda delle necessità.

In secondo luogo, vista la concreta possibilità che la configurazione dell'impianto mobile pos-

21 REQUISITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INGRESSO

Livelli di illuminamento E (lux) per impianti all'aperto (locali tecnici)	
Orizzontale medio: E_{hm}	100
Orizzontale specifico: E_{hs}	100
Uniformità di illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4
Temperatura colore (K)	
	≥ 3.300
Indice di resa cromatica Ra	
	40-60 (Grado 3)

22 LAMPADA A IODURI METALLICI CON BRUCIATORE AL QUARZO

Potenza nominale (W)	150	
Tensione (V)	-	
Tensione lampada (V)	90	
Flusso emesso (lm)	13.800	
Efficienza luminosa (lm/W)	92	
Temperatura colore (K)	3.000	
Resa cromatica Ra	75	
Durata al 50% del flusso (h)	9.000	
Dimensioni (l-d) (mm)	-	
Peso (Kg)	0,02	
Codice di colore	NW	

sa variare in relazione al luogo di installazione, sarebbe ragionevole scegliere un unico tipo di apparecchio, capace di ospitare ottiche differenti e in cui, in base alle necessità, le lampade possano essere sostituite facilmente con altre identiche, ma con flusso appropriato.

Lampade

La tipologia di lampada utilizzata per l'illuminazione dell'ingresso è ancora a ioduri metallici, a doppio attacco, compatta, con bruciatore ceramico, tubolare da 15 cm circa, della durata media di 9.000 ore.

Questa famiglia di lampade è disponibile con due potenze nominali e, ovviamente, flussi differenti; ciascuna delle tipologie sarà analizzata nel paragrafo relativo all'area funzionale in cui

è utilizzata.

Nel caso dell'area di ingresso è stata scelta la lampada con potenza nominale di 150 W, capace di 13.800 lm, quindi dotata di un'efficienza luminosa pari a 92 lm/W.

Il suo indice di resa cromatica è Ra 75 e la temperatura colore è di 3.000 K.

La scelta di lampade di questo tipo, ovvero a bruciatore ceramico, è stata indotta dalla loro peculiare caratteristica di essere, a parità di potenza nominale, fino al 20% più efficaci di quelle con bruciatore tradizionale.

Apparecchi e ottiche

Per questa applicazione, sono stati utilizzati proiettori con ottica asimmetrica, di dimensioni ridotte, per l'uso in esterni, adatti alle attività

23 APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello2- illuminazione dell'area di ingresso

Lampada alloggiata	Ioduri metallici con bruciatore ceramico (150 W)
Potenza nominale (W)	166
Tensione di alimentazione (V)	230
Flusso emesso (lm)	13.800
Peso netto (Kg)	4,1
Dimensioni (mm)	424x365x119
Rendimento ottico	60%
Classe di isolamento	1




sportive o l'illuminazione di grandi aree.

Si tratta di apparecchi in alluminio con finitura anticorrosione e vetro indurito termicamente.

Questa tipologia di proiettori è in grado di alloggiare lampade con differenti potenze nominali e curve fotometriche.

Per illuminare l'area di ingresso, considerando che la sua superficie e la sua forma potrebbero variare, così come le necessità di installazione dell'apparecchio, si è cercato di trovare una soluzione fosse il più versatile possibile.

Le ottiche simmetriche, a goccia ad esempio, danno i risultati migliori se installate sopra o in prossimità delle superfici da illuminare; quelle asimmetriche ad evolvente offrono qualche libertà in più, in termini di collocazione, consentendo anche installazioni distanziate dall'area in oggetto. La scelta è perciò ricaduta su questo

tipo di soluzione.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

L'impianto d'illuminazione all'ingresso, dimensionato per ottenere un livello di illuminamento orizzontale a terra intorno ai 200 lx, è stato equipaggiato con due apparecchi, modello 2, installati su pali di 5 m, posti ai lati esterni della sua superficie.

In fase di dimensionamento, il calcolo preliminare ha suggerito la necessità di installare tre apparecchi, tuttavia è stato possibile ridurre il numero collocandoli alle estremità dell'area in

esame.

L'altezza dei pali permette di installare gli apparecchi ad una quota paragonabile a quella che avrebbero, se fossero fissati alle travi di sostegno della copertura temporanea.

In questo modo, nel caso la configurazione del luogo ospitante l'impianto non permettesse di collocare i pali, sarebbe possibile sfruttare la struttura di copertura, senza grandi variazioni nell'altezza di montaggio degli apparecchi.

Vista l'ottica scelta, l'installazione che offre i migliori risultati impone di collocare gli apparecchi alle estremità del rettangolo di ingresso, sfruttando il forte aggetto del flusso luminoso.

Ciascuno degli apparecchi, quindi, è stato instal-

lato orizzontalmente, lievemente inclinato verso i pali di 5°, in modo che al centro della superficie non si concentrassero i flussi di entrambi gli apparecchi, creando una zona caratterizzata da un illuminamento eccessivo, a scapito dell'uniformità.

La semplicità di questa scelta è dettata dalla relativa facilità del compito svolto in questa zona funzionale dell'impianto ma anche dalla possibilità di costringere gli installatori a collocare pali e apparecchi in posizioni differenti.

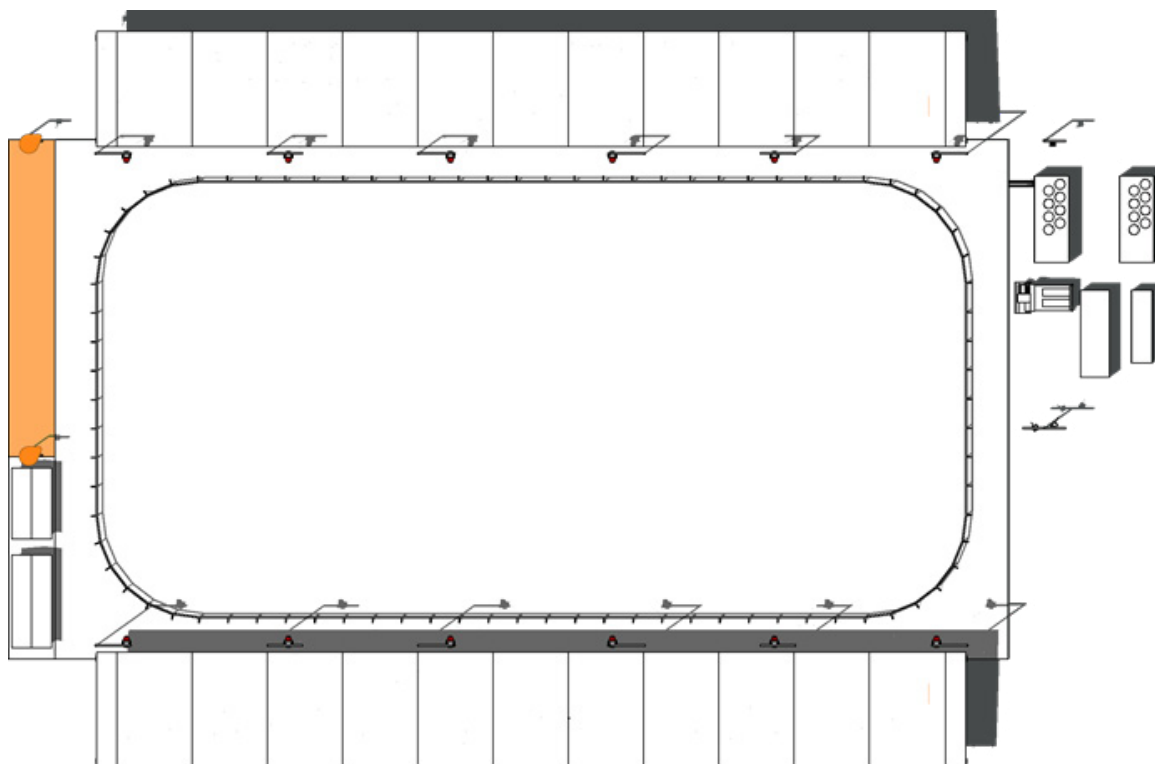


Figura 77: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di ingresso

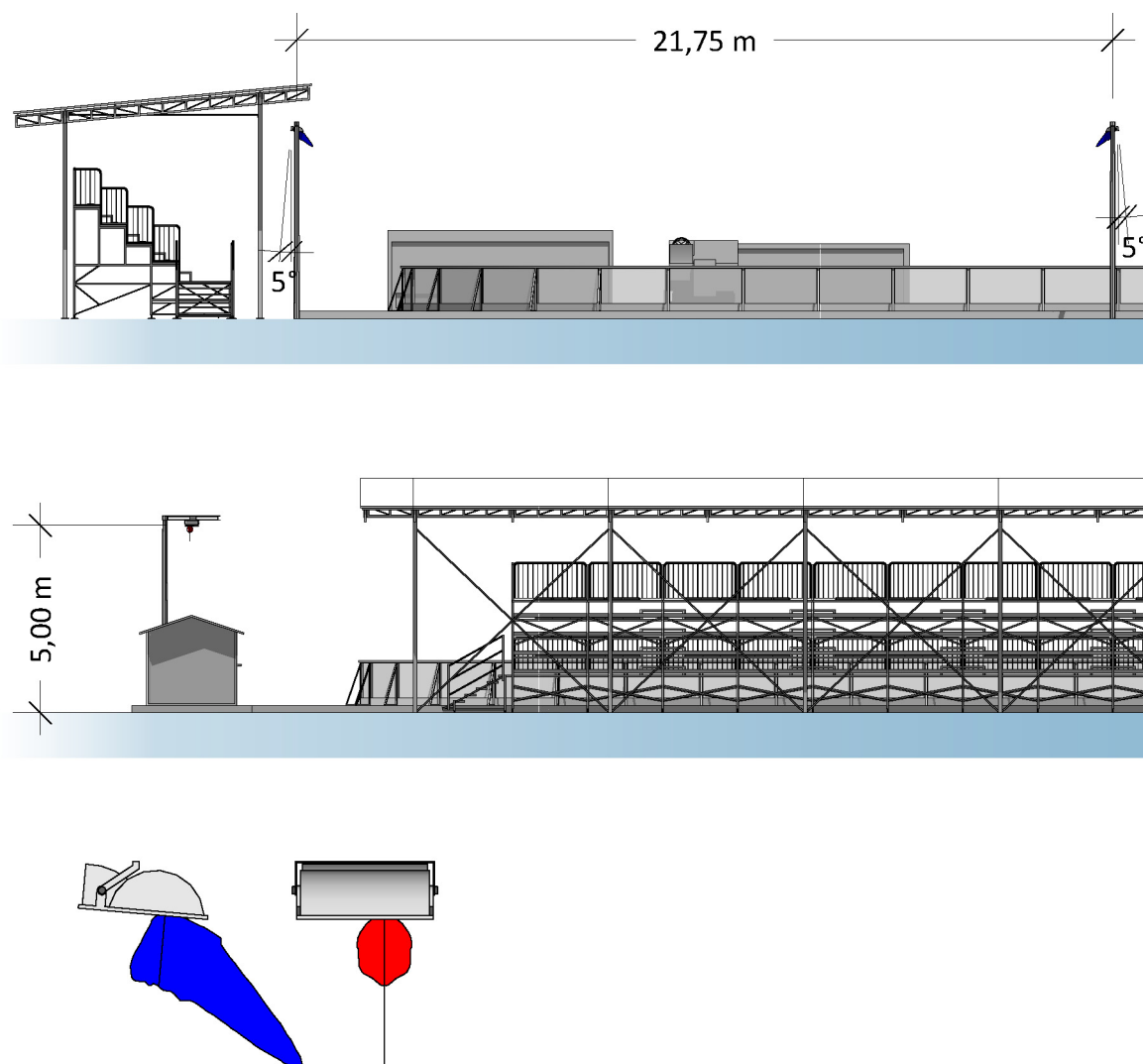


Figura 78: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione dell'area d'ingresso. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

24 ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INGRESSO tecnologia a ioduri metallici

Orizzontale medio: E_{hm}	150	260
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	260
Uniformità d'illuminazione orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,34
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (utente cambio pattini)		
Gr≤50	Gr≤41	

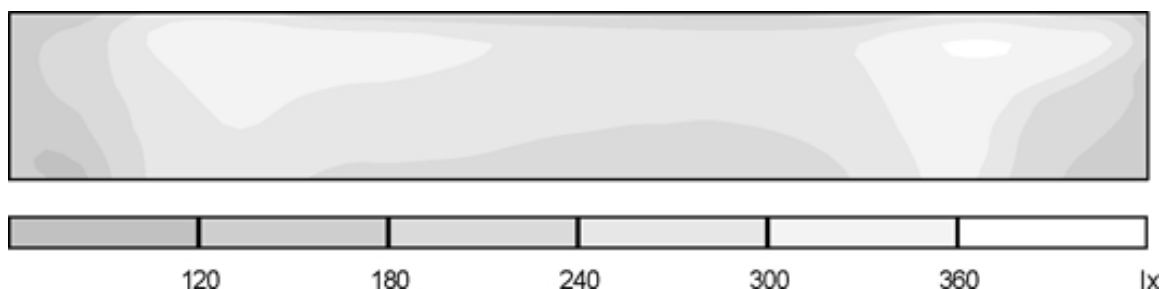


Figura 79: distribuzione degli illuminamenti nell'area di ingresso

Esiti illuminotecnici

L'esito finale ha offerto livelli di illuminamento orizzontale superiori a 200 lx.

I valori d'illuminamento sono accettabili per muoversi in sicurezza nell'area d'ingresso e di cambio calzature; il livello di abbagliamento raggiunge però valori, seppur accettabili, ancora una volta piuttosto elevati.

6.2. Tecnologia di progetto a Led

La scelta di installare gli apparecchi dedicati all'illuminazione della pista su di una trave reticolare, consente di sfruttare questa stessa struttura per collocarvi anche gli apparecchi dedicati alle altre aree funzionali non protette da una copertura, ovvero l'area di ingresso e quella di installazione degli impianti.

Poiché queste due aree sono dimensionalmente simili e si trovano, almeno nella configurazione ideale, accostate alla pista, la soluzione immagi-

nata per entrambe è molto simile.

In caso di variazioni nella disposizione delle zone funzionali, sarebbe possibile, come nell'impianto di riferimento, usare le travi che sorreggono le gradinate come supporto per gli apparecchi; con il sensibile vantaggio proprio della tecnologia a Led di poter controllare il flusso degli apparecchi, ottenendo l'emissione più adatta al caso in esame.

Il tipo di Led utilizzato qui, come in ogni altra area funzionale dell'impianto è quello già descritto in precedenza.

Apparecchi e ottiche

Il tipo di apparecchio utilizzato appartiene alla medesima famiglia di quello usato per la pista, configurato in modo tale da generare un flusso di entità inferiore.

Curva fotometrica e flusso sono stati scelti in base alle necessità di questa configurazione particolare, ma anche considerando configurazioni alternative.

25 APPARECCHIO LED -modello2- illuminazione dell'area di ingresso

Sorgenti alloggiare	120 Led Tipo 1
Potenza nominale (W) (350 mA; 525 mA)	146, 219
Tensione di alimentazione (V)	350, 525
Flusso emesso (lm): (4.300 K, 6.000K, 350 mA) (4.300 K, 6.000K, 525 mA)	9.144; 10.511 11.887; 13.664
Peso netto (Kg)	9,12
Dimensioni (mm)	314x501x133
Rendimento ottico	68%
Classe di isolamento	1

In effetti la scelta di una curva ad evolvente di cerchio consente una notevole flessibilità di utilizzo, come già sottolineato in precedenza, tuttavia in questo caso si è preferita una curva che avesse maggiore ampiezza di emissione laterale, associata all'oggetto anteriore tipico di questo tipo di curva fotometrica.

Per l'area di ingresso, sono stati utilizzati apparecchi con installati 120 Led, analoghi a quelli utilizzati in precedenza; la curva fotometrica scelta, anch'essa simile a quella dell'apparecchio usato per la pista, concentra maggiormente il flusso verso il basso.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

Secondo il dimensionamento preliminare sono necessari quattro apparecchi per raggiungere l'illuminamento richiesto. In fase di progettazione vera e propria questo numero è stato rispettato.

Gli apparecchi sono montati in modo da collocare i centri luminosi ad una quota di 7,8 m sopra lo 0 di progetto e sono tutti disposti orizzontalmente, orientati verso l'esterno della pista.

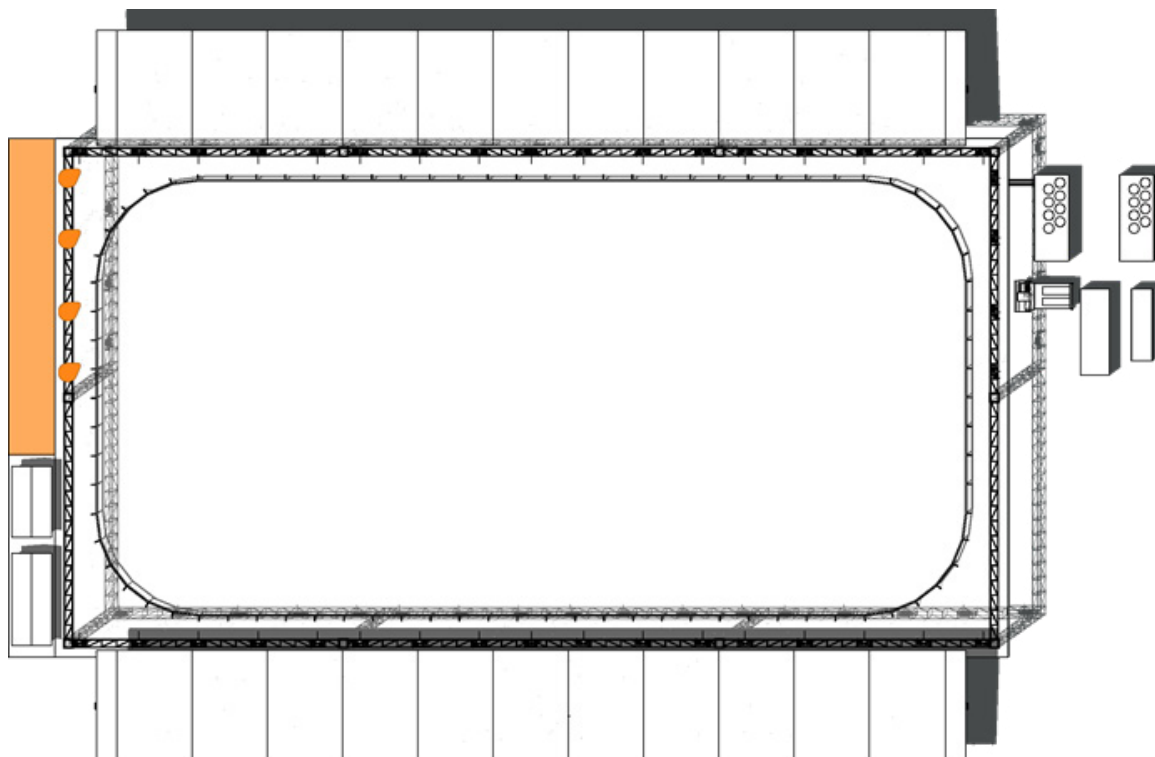


Figura 80: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di ingresso

In questo modo si ottengono valori di illuminamento ammissibili e una discreta uniformità. L'installazione avviene attraverso l'ausilio delle medesime staffe utilizzate in precedenza.

Esiti illuminotecnici

L'illuminamento medio e l'uniformità sono ammissibili e i valori di abbagliamento sono piuttosto elevati, dovuti per lo più agli apparecchi installati in pista, poichè sono percepiti in un angolo sotteso molto più basso di 20°. Confrontando brevemente le due tecnologie ap-

pare evidente che la tecnologia a ioduri metallici, installando 332 W, ottenga risultati migliori rispetto a lLed che richiede 876 W a 525 mA. I flussi e le potenze degli apparecchi rivelano, però, che le prestazioni siano in realtà del tutto analoghe e che quindi il Led sia penalizzato dal tipo di installazione, votata più alla praticità che al risparmio.

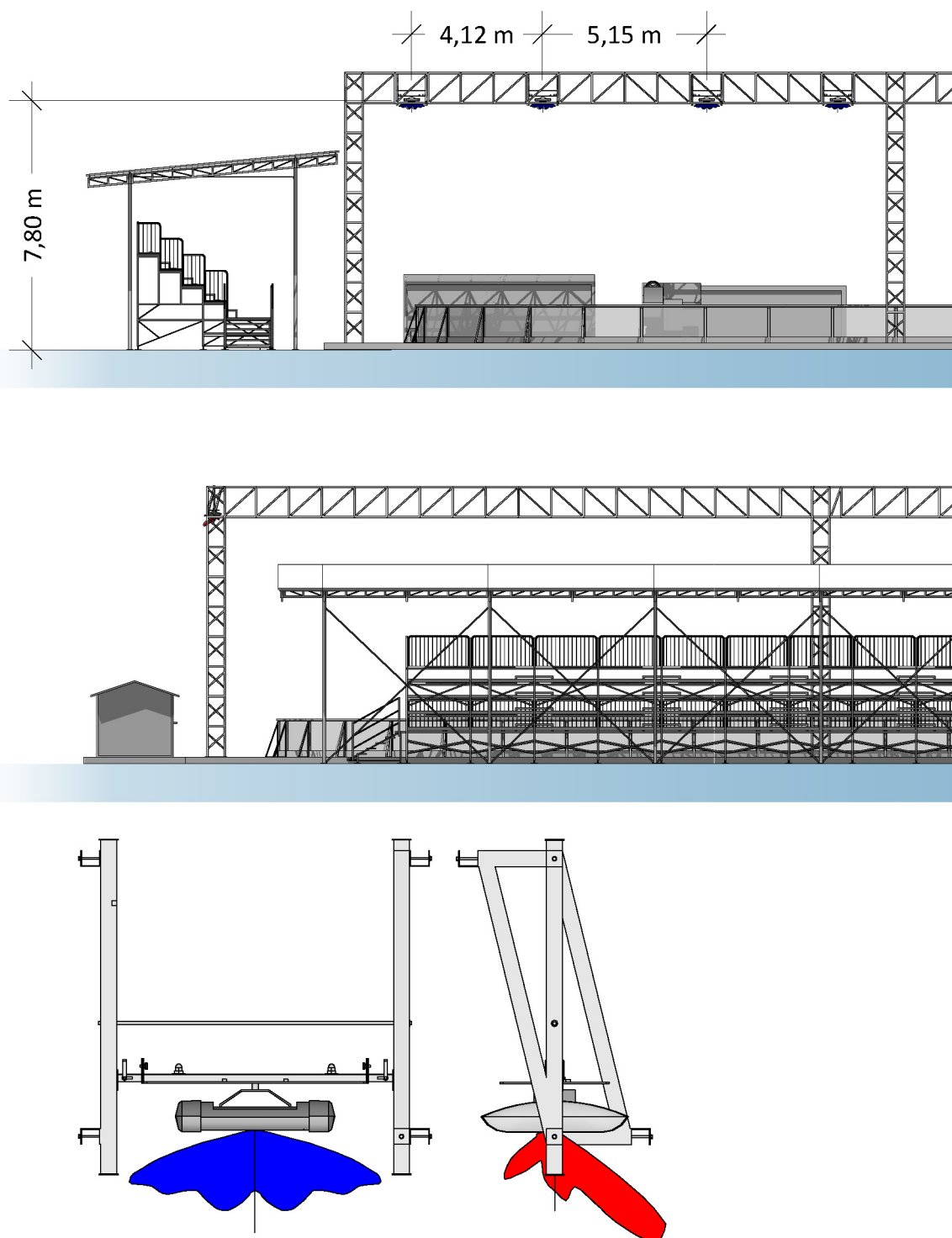


Figura 81: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione dell'area di ingresso. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

26 ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INGRESSO tecnologia a Led

Orizzontale medio: E_{hm}	150	168
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	168
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,388
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (utente cambio pattini)		
Gr≤50	Gr≤45	

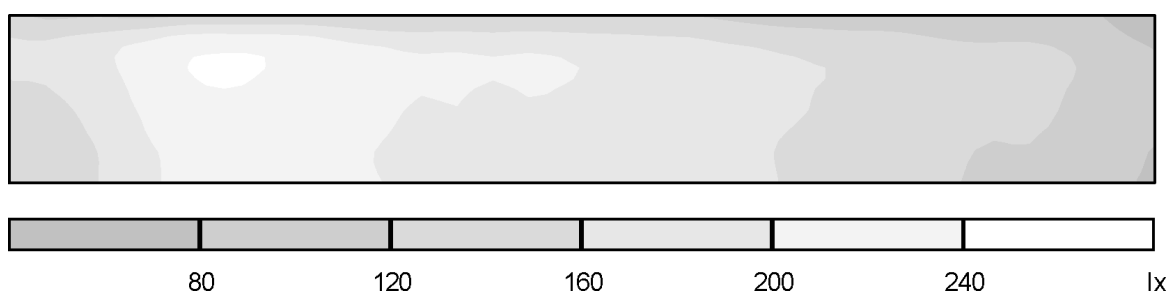


Figura 82: distribuzione degli illuminamenti nell'area di ingresso

7. Area di installazione degli impianti: compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led

L'area d'installazione degli impianti è una zona periferica del complesso, chiusa al pubblico e agli atleti e accessibile solo al personale tecnico. Qui sono ospitati il chiller, ed eventualmente il chiller di riserva, il gruppo elettrogeno, se richiesto, un container per tutte le attrezzature necessarie, dagli attrezzi di montaggio dell'impianto, fino a quelli di manutenzione della pista e una macchina rasaghiaccio, se disponibile.

Generalmente il chiller è programmato per entrare in funzione autonomamente, il gruppo elettrogeno, se presente, è sempre attivo.

La manutenzione delle macchine di raffreddamento avviene solo se strettamente necessaria e, se possibile, si effettua in officine specializzate durante i periodi di inattività dell'impianto.

Ne consegue che quest'area, dopo l'installazione dell'intero impianto, sia scarsamente utilizzata, se non per controlli, programmazione delle macchine, movimento di materiale per la manutenzione della pista, dei pattini e attrezzi.

Il refrigeratore, nel caso d'installazioni nel periodo invernale, non è sempre attivo ma svolge cicli di refrigerazione programmata allo scopo di "conservare" il ghiaccio, di conseguenza deve essere accessibile solo in caso di malfunzionamento, o peggio, di guasto.

Anche il gruppo elettrogeno è raggiunto solo in caso di malfunzionamento o di guasto, sempre che sia necessario produrre autonomamente energia da parte dell'impianto, o produrre energia di riserva; in caso contrario si dispone di un semplice quadro elettrico.

Nell'area impianti, quindi, i compiti visivi sono limitati: certamente è necessario, per il personale addetto, poter raggiungere in sicurezza i quadri elettrici e i quadri comandi, per agire sui macchinari e se necessario disattivarli o scollegarli. Del resto anche i vigili del fuoco devono potersi muovere e operare senza rischio nell'area in caso di emergenza.

Molto spesso queste aree, sono caratterizzate

27 REQUISITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI INSTALLAZIONE DEGLI IMPIANTI

Livelli di illuminamento E (lux) per impianti all'aperto (corridoi, servizi, spogliatoi, tribune)

Orizzontale medio: E_{hm}	100
Orizzontale specifico: E_{hs}	100
Uniformità di illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4
Temperatura colore (K)	
≥3.300	
Indice di resa cromatica Ra	
40-60 (Grado 3)	

da una illuminazione molto semplice, o addirittura si appoggiano agli illuminamenti derivanti dall'impianto dedicato alla pista e all'anello che la circonda.

Nel caso in esame si è indicata la presenza di un refrigeratore di emergenza, ma si è proceduto ad illuminare solo la superficie collocata in prossimità di quello principale.

7.1 Tecnologia di riferimento a ioduri metallici

La particolarità di questa zona funzionale consiste nella presenza dei grossi volumi delle macchine di raffreddamento; essi devono essere

accessibili solo esternamente, nel pannello dei comandi e in quello dei collegamenti elettrici e idraulici.

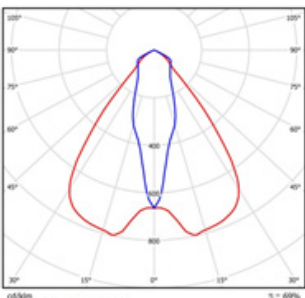

Come è ovvio gli spazi disponibili nel luogo di installazione influenzano molto la configurazione in pianta di quest'area funzionale; di conseguenza, si è pensato di garantire illuminamenti idonei a terra e un numero, delle tipologie di lampade e pali di installazione sufficienti ad illuminare correttamente, anche in caso di disposizioni differenti.

Apparecchi e ottiche

Le sorgenti utilizzate sono le stesse usate nell'a-

28 APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello3- illuminazione dell'area impianti

Lampada alloggiata	Ioduri metallici con bruciatore ceramico (166 W)
Potenza nominale (W)	166
Tensione di alimentazione (V)	230
Flusso emesso (lm)	13.800
Peso netto (Kg)	4,1
Dimensioni (mm)	424x365x119
Rendimento ottico	69%
Classe di isolamento	1

rea di ingresso.

Per la scelta degli apparecchi, valgono le considerazioni fatte in relazione all'apparecchio del modello 2 installato nell'area di ingresso.

Anche in questo caso, la versatilità, in caso di cambio di disposizione delle parti funzionali, è un presupposto considerato per la corretta scelta.

Nel caso specifico, oltre ad apparecchi identici a quelli già usati per l'illuminazione dell'area di ingresso, ne è stato utilizzato un secondo caratterizzato da una curva fotometrica asimmetrica: ampia sull'asse 0-180° e stretta su quello 90-270°.

Questo tipo di curva fotometrica si presta ad illuminare superfici strette e lunghe ed è stato

utilizzato per garantire una certa uniformità di illuminamento a terra in uno spazio residuo accanto al refrigeratore principale.

In realtà questa soluzione è stata pensata per suggerire la possibilità di dover illuminare, in caso di disposizione differente dei vari elementi, eventuali corridoi posti tra un chiller e l'altro.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

Lo scopo, durante la progettazione, è stato garantire un buon illuminamento a terra; l'unifor-

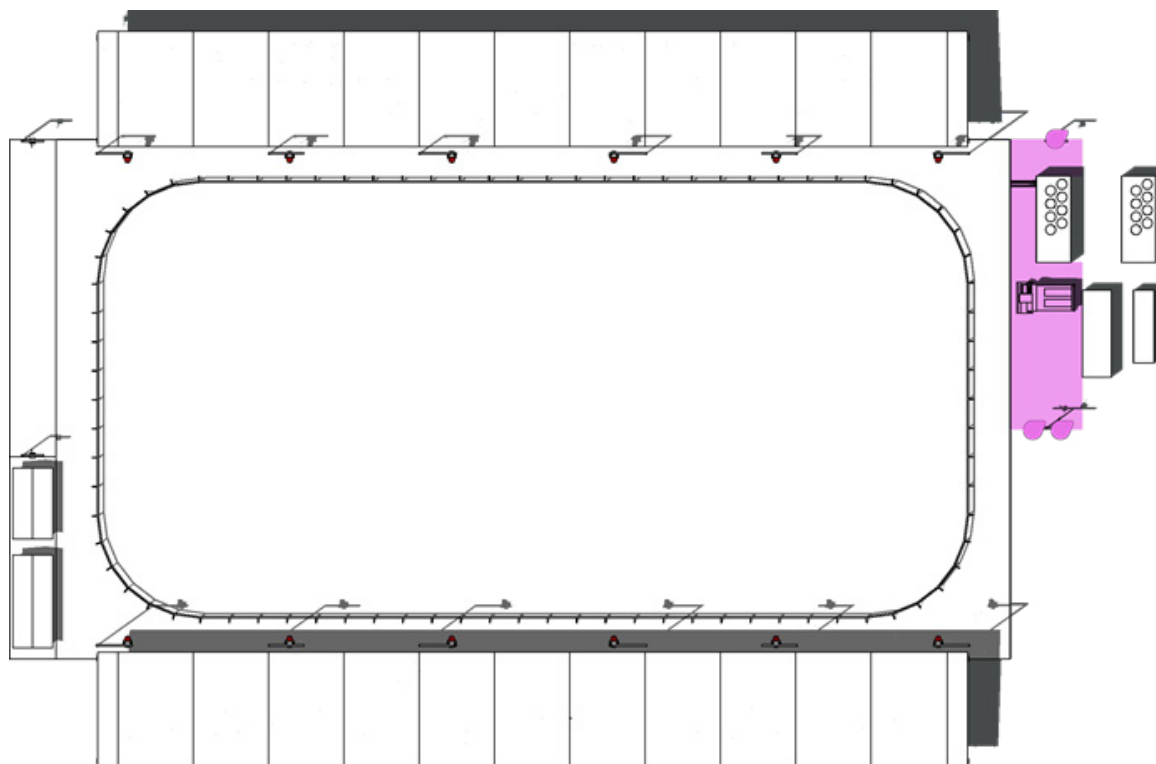


Figura 83: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area impianti

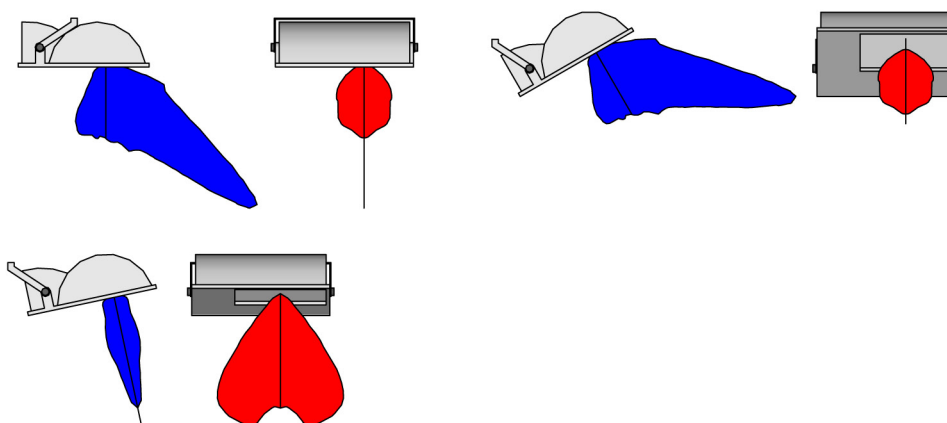
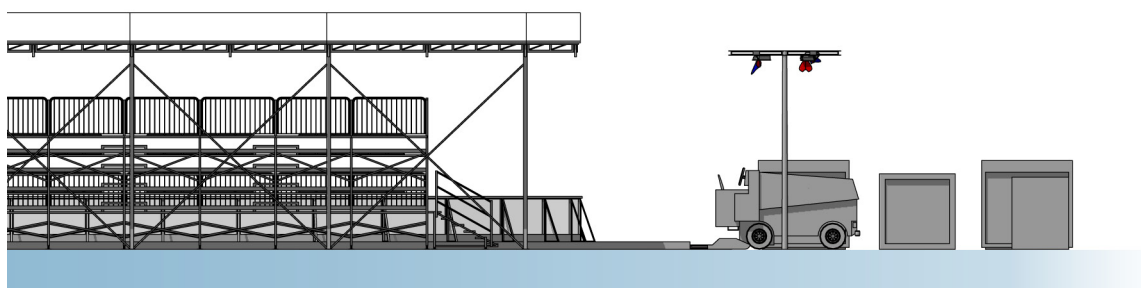
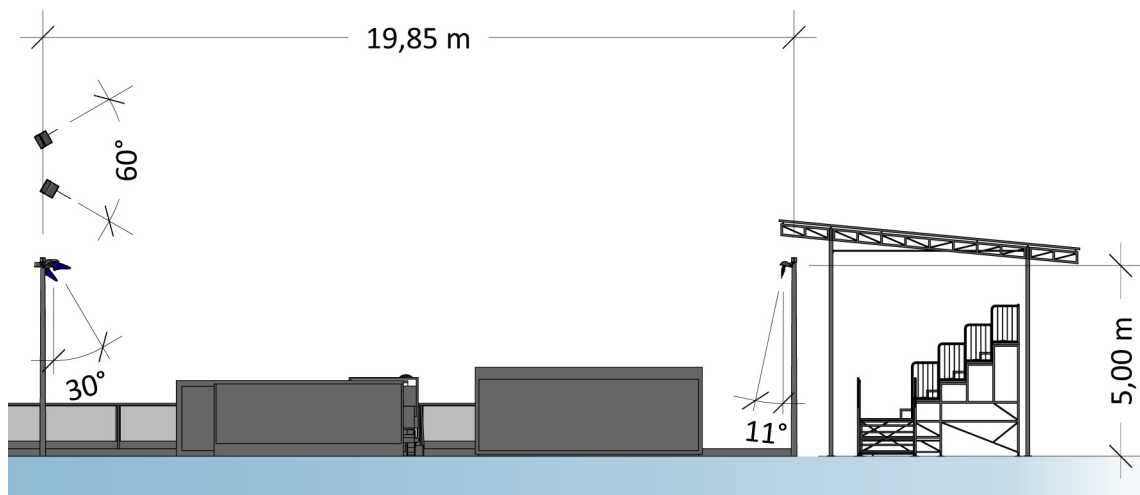


Figura 84: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione dell'area impianti. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

mità di illuminamento è stata considerata di secondaria importanza perché, non sarà sempre possibile ottenerla, col variare delle disposizioni delle macchine.

Conseguentemente si è preferito concentrare l'attenzione più verso il flusso totale, e quindi l'illuminamento medio e sulla varietà di ottiche a disposizione piuttosto che insistere sull'uniformità di illuminamento orizzontale.

L'area, in conclusione, è stata illuminata sfruttando due pali posti alle estremità, di 5 m di altezza: il primo alloggia due apparecchi a evolvente di cerchio, il secondo un singolo apparecchio modello 3. I primi sono orientati divergendo l'uno dall'altro di 60° verso il centro dell'area in oggetto, il primo installato orizzontalmente e l'altro inclinato di 30° in avanti rispetto alla verticale. L'apparecchio modello 3 è inclinato in avanti di 11°, per meglio distribuire il flusso sulla superficie a fianco del refrigeratore.

Sia nell'area impianti che in quella di ingresso gli apparecchi sono installati su pali dotati di braccio laterale.

Esiti illuminotecnici

L'area d'installazione degli impianti, secondo i calcoli preliminari, otterrebbe un illuminamento a terra di 200 lx, con 3 apparecchi, in seguito si è stabilito di installare 2 apparecchi del modello 2 e un singolo modello 3, per una potenza installata di 498 W.

L'esito finale, sebbene non perfettamente riuscito dal punto di vista dell'uniformità di illuminamento orizzontale, offre valori prossimi ai 300 lx.

I valori di uniformità d'illuminamento orizzontale, a terra, non rientrano nei valori richiesti, tuttavia, com'è già stato rilevato, questo tipo d'installazione non è definitiva, ovvero non si può considerare come l'unica soluzione possibile. Specialmente per quel che riguarda le macchine refrigeranti e gli altri eventuali macchinari, la disposizione è soggetta a numerosi cambiamenti in relazione al luogo in cui l'impianto viene allestito, perciò, in fase di progettazione si è ritenuto ammissibile accettare valori di uniformità al di sotto delle richieste, purché si avesse un

29 ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA IMPIANTI tecnologia a ioduri metallici

Orizzontale medio: E_{hm}	150	301
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	301
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,272
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (tecnico apparecchiature)		
Gr≤50	Gr≤42	

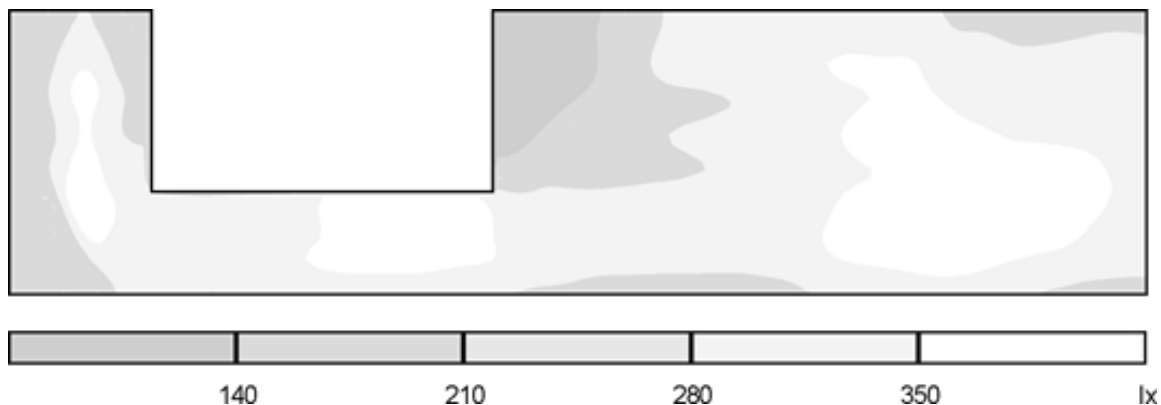


Figura 85: distribuzione degli illuminamenti nell'area di installazione impianti

ragionevole illuminamento medio.

7.2. Tecnologia di progetto a Led

La presenza della struttura reticolare che circonda la pista, a differenza dell'installazione su pali,

è una soluzione che può essere considerata invariabile, anche con configurazioni della struttura differenti; di conseguenza, da una parte, offre semplicità di installazioni e svariate soluzioni di posizionamento, dall'altra potrebbe non offrire la versatilità data dai pali, che sono posizionabili

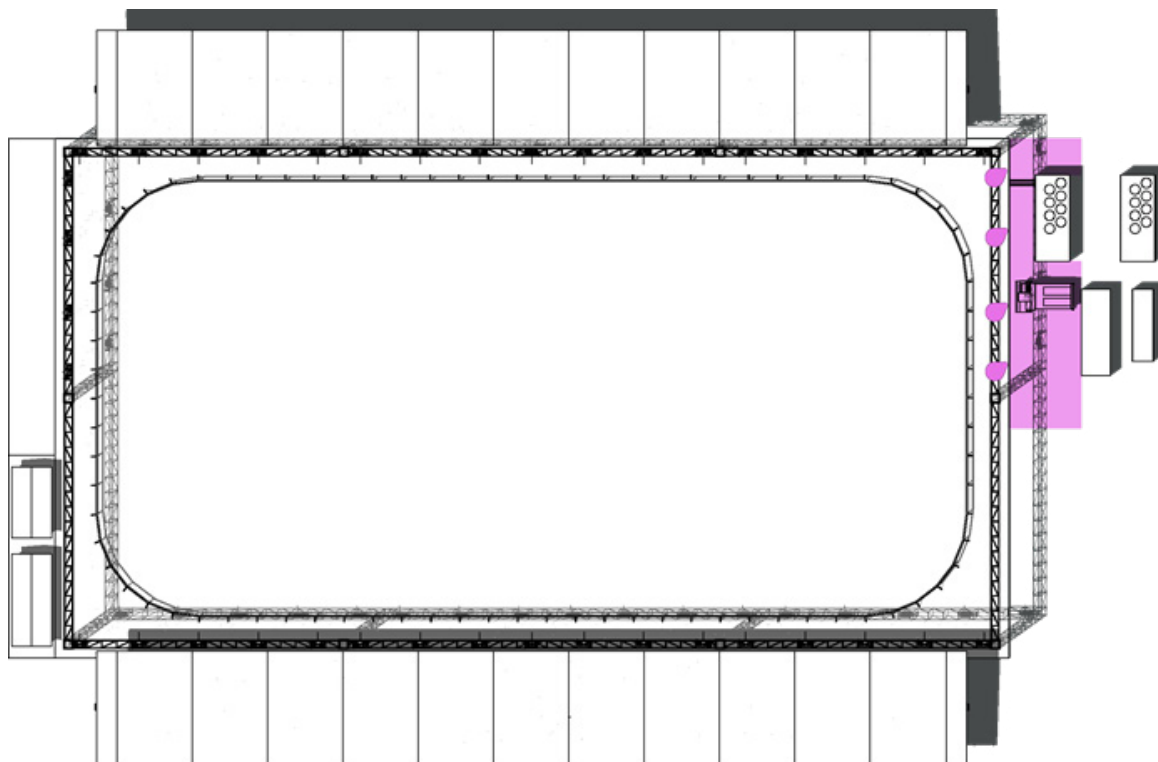


Figura 86: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area impianti

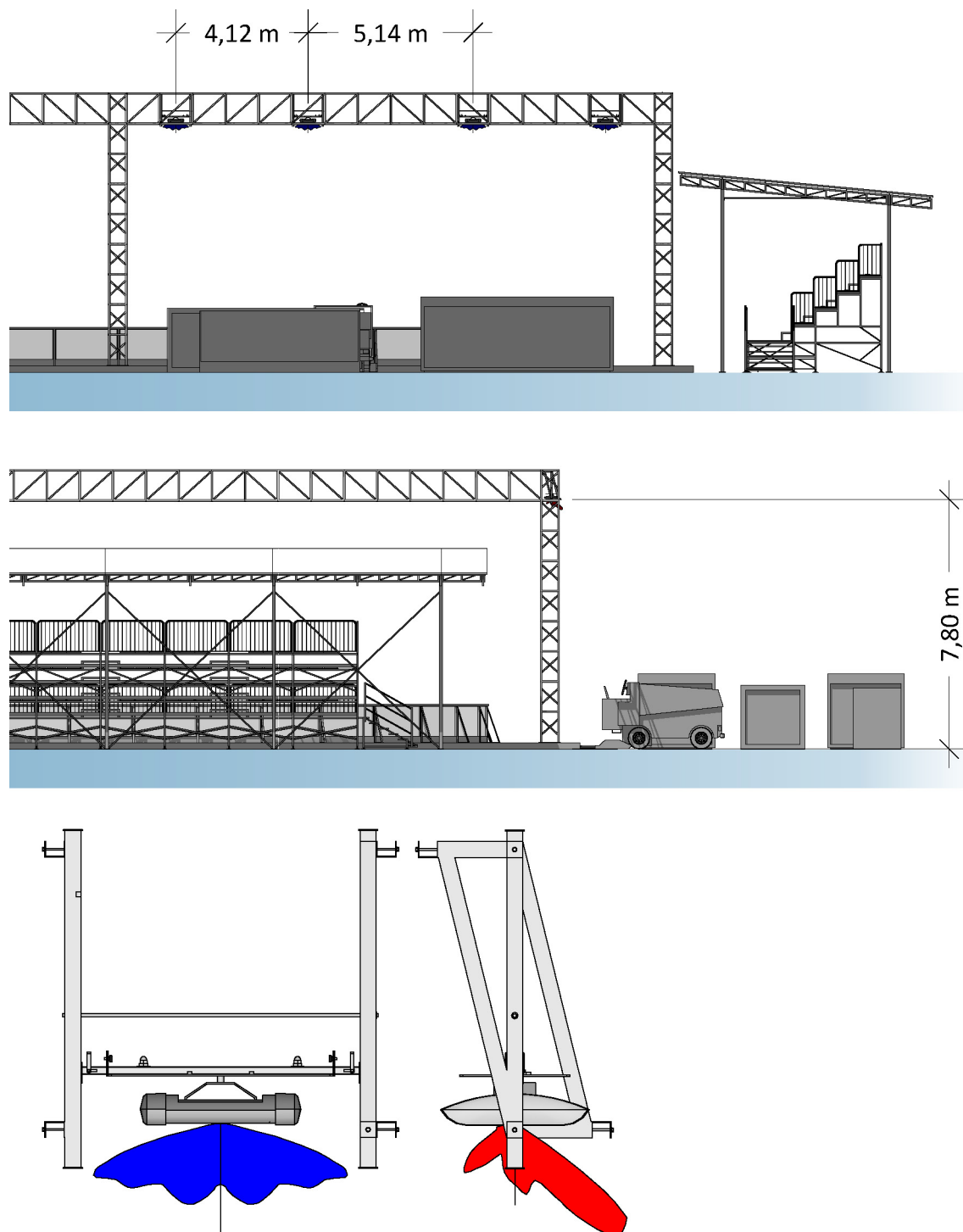


Figura 87: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione dell'area impianti. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

a piacimento. D'altra parte non sarebbe possibile, in assenza di una copertura, fare a meno della struttura reticolare, perciò essa sarà sfruttata il più possibile.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

L'apparecchio utilizzato, e la curva fotometrica di cui è dotato, sono identici a quelli usati per l'area di ingresso. Di conseguenza sono stati installati 4 apparecchi a Led modello 2.

Esiti illuminotecnici

I valori di illuminamento e di uniformità, come nel caso dell'area di ingresso, sono del tutto in linea con i requisiti normativi.

L'area d'installazione degli impianti, ha, per analogia d'installazione, caratteristiche simili a quelle riscontrate nell'area d'ingresso.

Come nel caso precedente, gli apparecchi che generano maggiore disturbo nell'osservatore di riferimento, non sono quelli specifici dell'area in esame, bensì quelli deputati all'illuminazione della pista di ghiaccio: infatti l'angolo sotteso tra

30 ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA IMPIANTI tecnologia a Led

Orizzontale medio: E_{hm}	150	187
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	187
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,418
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (tecnico apparecchiature)		
$Gr \leq 50$	$Gr \leq 43$	

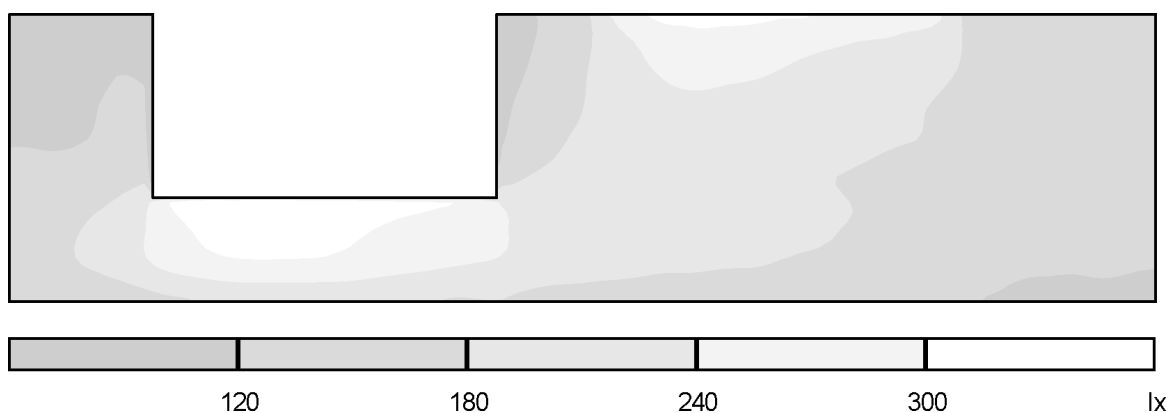


Figura 88: distribuzione degli illuminamenti nell'area di installazione impianti

l'orizzontale e la linea che unisce l'occhio con il centro delle lampade è piuttosto piccolo.

Tuttavia, anche in questo caso il valore dell'abbagliamento calcolato, risulta ammissibile per le norme F.I.S.G., qui usate come riferimento.

Anche in questo caso, potenza e flusso installati per la tecnologia a scarica, rispetto al Led, sono più convenienti dal punto di vista energetico ed economico, visto il numero di pezzi inferiore ma come per l'area di ingresso le effettive doti degli apparecchi sono simili, mentre il tipo di installazione penalizza il diodo.

Si ribadisce il fatto che questo tipo di installazione sia da considerarsi del tutto esplicativa e non assoluta, per ogni pista mobile; ne consegue che le prestazioni del Led possano essere superiori, laddove il tipo di collocazione degli elementi consenta un migliore sfruttamento delle potenzialità e delle efficienze della tecnologia di progetto.

8. Area di pertinenza delle gradinate: compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led

L'area di pertinenza delle gradinate è una zona di raccordo, atta al transito e all'eventuale attesa momentanea del pubblico, in ingresso o in uscita. E' quindi destinata agli spettatori con normali calzature e non richiede un rivestimento a terra.

Il compito visivo degli utenti consiste nel riconoscere distintamente i contorni dell'area, delle gradinate, dei sostegni e delle scalette di accesso, il gradino del tavolato e il contorno della pista e delle altre aree circostanti.

Spesso queste zone sono transennate in modo da convogliare i flussi di pubblico in modo sicuro e ordinato, senza che si formino code e senza che flussi estranei s'incrocino: di conseguenza è necessario anche poter distinguere i contorni degli ostacoli fissi e affluire o defluire in sicurezza.

8.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici

L'area di pertinenza delle gradinate è una zona di transito, perciò si è puntato ad un illuminamento orizzontale di 200 lx, concedendo poi di scendere anche a valori leggermente inferiori. Come evidente, alle estremità di ciascuno dei corridoi di accesso delle gradinate si collocano le aree di pertinenza, che sfruttano, come supporto per gli apparecchi, la struttura di copertura.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

L'apparecchio utilizzato, ancora una volta, è lo

31 REQUISITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI PERTINENZA DELLE GRADINATE

Livelli di illuminamento E (lux) per impianti all'aperto (corridoi, servizi, spogliatoi, tribune)	
Orizzontale medio: E_{hm}	150
Orizzontale specifico: E_{hs}	150
Uniformità di illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4
Temperatura colore (K)	
	≥ 3.300
Indice di resa cromatica Ra	
	40-60 (Grado 3)

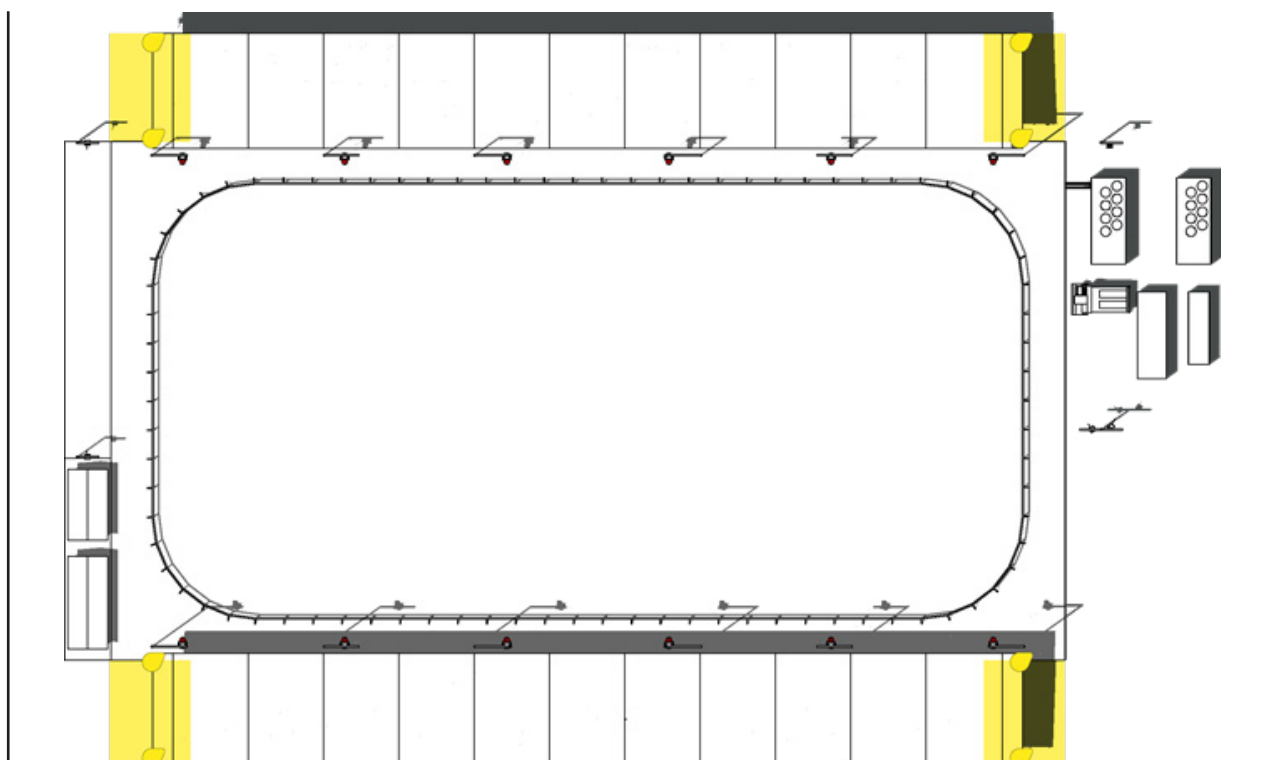


Figura 89: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate

stesso già collocato nell'area di installazione impianti e in quella di ingresso.

In fase preliminare si è dedotto che due apparecchi ad una distanza media di circa 5 m dal pavimento sono sufficienti per ottenere un illuminamento di circa 200 lx.

Per ciascuna delle quattro aree sono quindi stati predisposti due apparecchi montati al di sotto delle travi di sostegno della copertura, uno per ogni estremità. Ciascuno degli apparecchi è orientato verso il centro dell'area di pertinenza, sono perciò orientati uno all'opposto dell'altro. L'altezza di montaggio varia per i due apparecchi installati: 5,8 m per quello più vicino alla pista e 5,1 per l'altro, per via della pendenza della copertura.

Sfruttando gli aggetti della curva fotometrica propria dell'ottica stradale ad evolvente di cerchio, i due fasci opposti tendono a concentrarsi verso il centro dell'area, mentre nella direzione opposta, il profilo allargato, offre un buon illuminamento diffuso ai margini della superficie. Gli apparecchi sono tutti installati orizzontalmente.

L'installazione avviene tramite una staffa metallica apribile di facile montaggio.

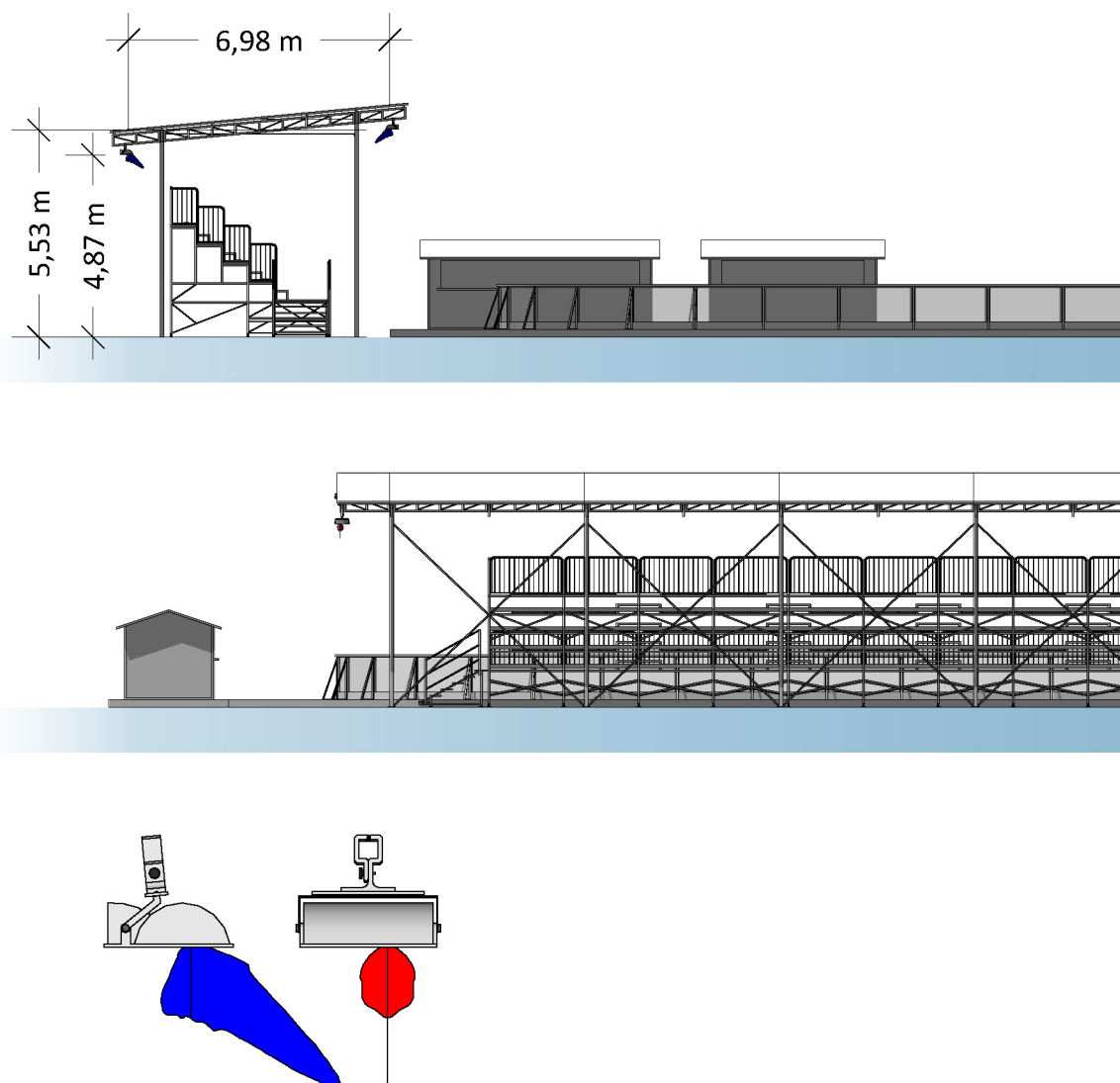


Figura 90: installazione degli apparecchi a ioduri metallici per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

32 ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI PERTINENZA DELLE GRADINATE tecnologia a ioduri metallici

Orizzontale medio: E_{hm}	150	201
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	201
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,550
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (utente ingresso/uscita)		
$Gr \leq 50$	$Gr \leq 62$	

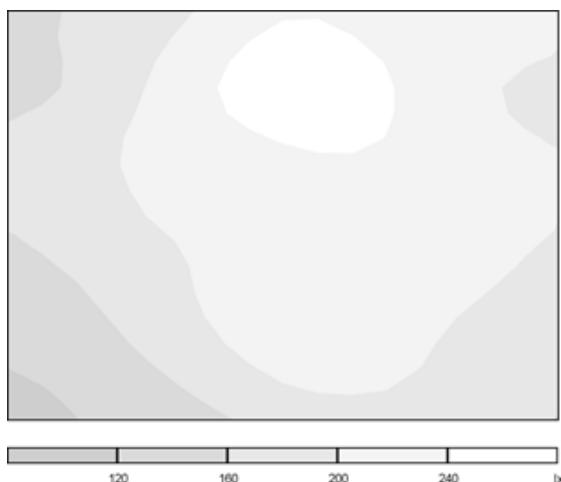


Figura 91: distribuzione degli illuminamenti nell'area di pertinenza delle gradinate

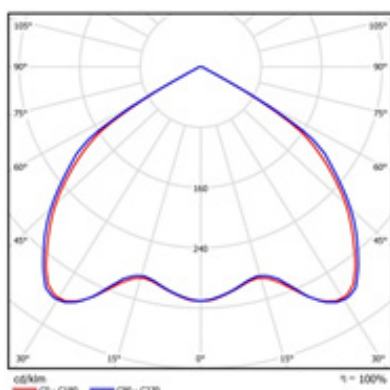
Esiti Illuminotecnici

In questo modo sono stati ottenuti valori di illuminamento medio orizzontale ammissibili.

L'area di pertinenza delle gradinate, adibita al semplice transito, ha infatti valori d'illuminamento medio, come riportati in tabella 31, pari a circa 200 lx circa per un totale di 1.328 W installati.

33 APPARECCHIO LED -modello3- illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate

Sorgenti alloggiare	120 Led Tipo 1
Potenza nominale (W) (350 mA; 525 mA)	146, 219
Tensione di alimentazione (V)	350, 525
Flusso emesso (lm): (4.300 K, 6.000K, 350 mA) (4.300 K, 6.000K, 525 mA)	10.212; 11.747 13.276; 15.271
Peso netto (Kg)	9,12
Dimensioni (mm)	314x501x133
Rendimento ottico	76%
Classe di isolamento	1



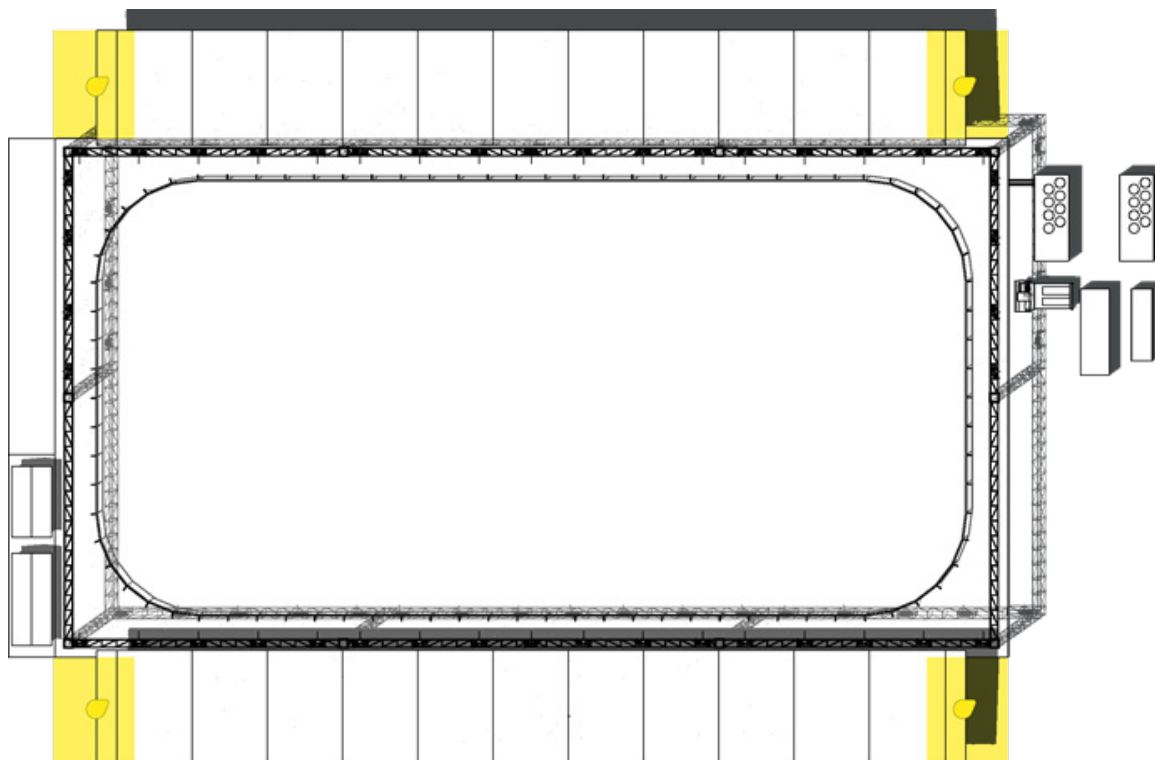


Figura 92: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate

8.2. Tecnologia di progetto a Led

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

Apparecchi e ottiche

Per le aree di pertinenza delle gradinate sono stati installati apparecchi con una curva fotometrica molto diversa dalle precedenti:

La curva fotometrica scelta è perfettamente simmetrica su entrambi gli assi di riferimento, ed è stata selezionata con l'intenzione di collocare un singolo apparecchio, in corrispondenza del centro della superficie, che fosse in grado di illuminare diffusamente l'intera area.

A differenza dell'impianto di riferimento si è scelto quindi di collocare un solo apparecchio ai sostegni della copertura, di installarlo in modo perfettamente orizzontale e centrato rispetto alla copertura stessa. L'ampiezza del fascio permette di coprire agevolmente l'intera superficie. Come nel caso dell'impianto a ioduri, l'installazione avviene attraverso una staffa metallica apribile, applicata alla travatura reticolare di sostegno della copertura.

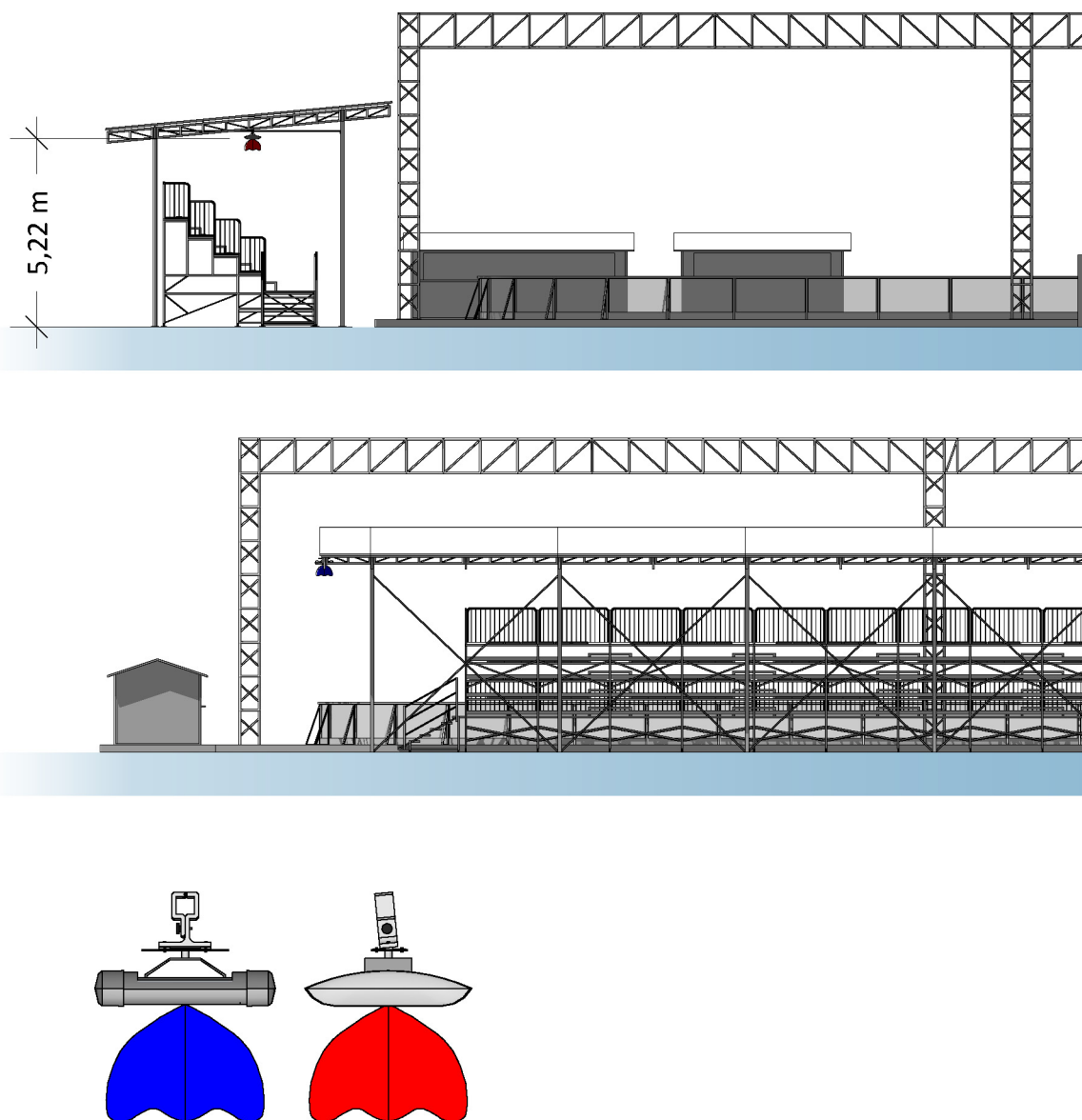


Figura 93: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

Esiti illuminotecnici

L'area di pertinenza gradinate, illuminata da un

singolo apparecchio a fascio largo, ha valori di illuminamento sufficienti a soddisfare le richieste della normativa.

La potenza installata è di 876 W, per 4 apparecchi, contro 1.328 W e 8 apparecchi per le lampade a ioduri metallici.

34 ESITI ILLUMINOTECNICI NELL'AREA DI PERTINENZA DELLE GRADINATE tecnologia a Led

Orizzontale medio: E_{hm}	150	192
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	192
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,48
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (utente ingresso/uscita)		
Gr≤50	Gr≤38	

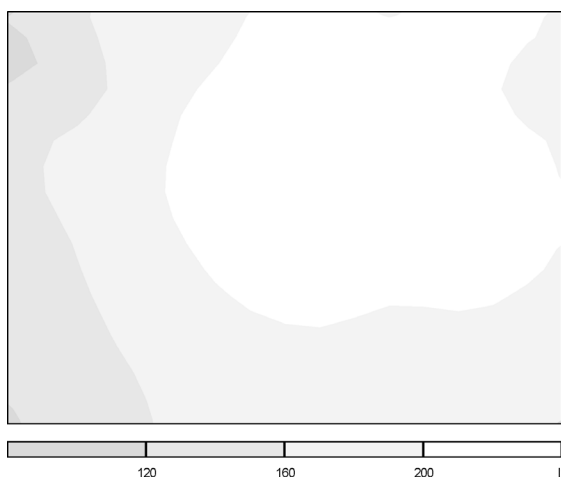


Figura 94: distribuzione degli illuminamenti nell'area di pertinenza delle gradinate

In questo caso, dove è possibile sfruttare al meglio la tecnologia a Led il risultato appare largamente superiore rispetto alle tradizionali lampade a ioduri metallici.

E' ragionevole ritenere che sfruttando al meglio il Led si possano ottenere risultati di questo tenore in ogni area funzionale, ma la varietà di configurazioni di un impianto mobile, come la pista considerata, impone di fare i conti con la praticità di installazione e non solo con la necessità di sfruttare al meglio la soluzione a Led.

9. Gradinate, compiti visivi, illuminazione a ioduri metallici e a Led

Le gradinate rappresentano l'ultima delle zone funzionali da considerare.

Nel caso preso in esame, sono strutture temporanee in acciaio, dotate di copertura anch'essa temporanea.

La gradinata è costituita da moduli di 2 m di larghezza, ciascuno capace di ospitare 12 spettatori, divisi su quattro gradoni.

Ogni gradone è realizzato in lamiera bugnata, è alto 50 cm e profondo 70, e dotato di appositi seggiolini in plastica.

Oltre ai gradoni, di fronte alla pista, si trova una passerella, rialzata a 1 m da terra, di 1,4 m di larghezza, atta al passaggio del pubblico in entrata e in uscita, in modo da evitare che gli spettatori e gli utenti a bordo pista si ostacolino.

Ogni 2,9 m circa, quindi dopo ogni fila da sei spettatori, si trova una scaletta di accesso ai gradoni larga 1,2 m.

Le gradinate sono costituite da due file, disposte ai lati lunghi della pista, di tredici moduli ciascu-

na, per un numero complessivo di 624 spettatori, sufficienti a ospitare competizioni d'interesse nazionale, che contano da 500 a 1.000 posti a sedere.

Le coperture sono realizzate da moduli larghi circa 5,2 m sostenuti da montanti in acciaio.

Il piano di tamponamento è sostenuto da un sistema di travetti reticolari e si presenta inclinato verso l'esterno della pista.

La disposizione dei travetti reticolari di copertura offre la possibilità di installare "a soffitto" degli apparecchi d'illuminazione.

Lo spettatore ha compiti visivi differenti dagli altri fin qui esaminati: deve poter riconoscere senza sforzo tutte le parti del corridoio, dei gradoni, dei seggiolini e delle scalette di accesso e di smistamento. Inoltre deve poter percepire distintamente tutti gli ostacoli, le persone in transito e gli occupanti dei seggiolini per potersi muovere in sicurezza e senza rischio.

Una volta seduto deve poter vedere la pista, in

35 REQUISITI ILLUMINOTECNICI SULLE GRADINATE

Livelli di illuminamento E (lux) per impianti all'aperto (corridoi, servizi, spogliatoi, tribune)

Orizzontale medio: E_{hm}	150
Orizzontale specifico: E_{hs}	150
Uniformità di illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4
Temperatura colore (K)	
≥3.300	
Indice di resa cromatica Ra	
40-60 (Grado 3)	

modo chiaro ed efficace, per apprezzare i gesti tecnici e distinguere gli atleti, senza l'inconveniente dell'abbagliamento.

dotte. Questo non è possibile modulando il flusso alla sorgente, quindi si è preferito illuminare l'area con numerose lampade di bassa potenza.

9.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici

Apparecchi e ottiche

Lampade

Per l'illuminazione delle gradinate è stata utilizzata una tipologia di lampade analoga a quella scelta per le altre aree funzionali accessorie rispetto alla pista, ma di potenza inferiore.

Questo tipo di sorgente è stata scelta pensando di applicare numerosi apparecchi alla copertura, al fine di prevedere, in caso di necessità, un'accensione parziale, per ottenere illuminazioni ri-

L'apparecchio scelto ha un'ottica ad evolvente di cerchio, analoga a quelle già usate in precedenza, è stato selezionato pensando di sfruttare l'oggetto del flusso per illuminare trasversalmente i gradoni. L'idea è collocare l'apparecchio in modo da dirigere le intensità uscenti inferiori verso i gradoni più vicini, quelli più alti, e le intensità maggiori verso i gradoni più lontani, quelli più bassi; in tal modo si sfrutta nel modo migliore questo tipo di curva fotometrica.

36 LAMPADA A IODURI METALLICI CON BRUCIATORE AL QUARZO

Potenza nominale (W)	70
Tensione (V)	-
Tensione lampada (V)	90
Flusso emesso (lm)	6.200
Efficienza luminosa (lm/W)	88
Temperatura colore (K)	3.000
Resa cromatica Ra	75
Durata al 50% del flusso (h)	9.000
Dimensioni (l-d) (mm)	-
Peso (Kg)	0,02
Codice di colore	NW



37 APPARECCHIO A IODURI METALLICI -modello4- illuminazione delle gradinate

Lampada alloggiata	Ioduri metallici con bruciatore ceramico (70 W)
Potenza nominale (W)	85,7
Tensione di alimentazione (V)	230
Flusso emesso (lm)	6.200
Peso netto (Kg)	4,1
Dimensioni (mm)	424x365x119
Rendimento ottico	60%
Classe di isolamento	1

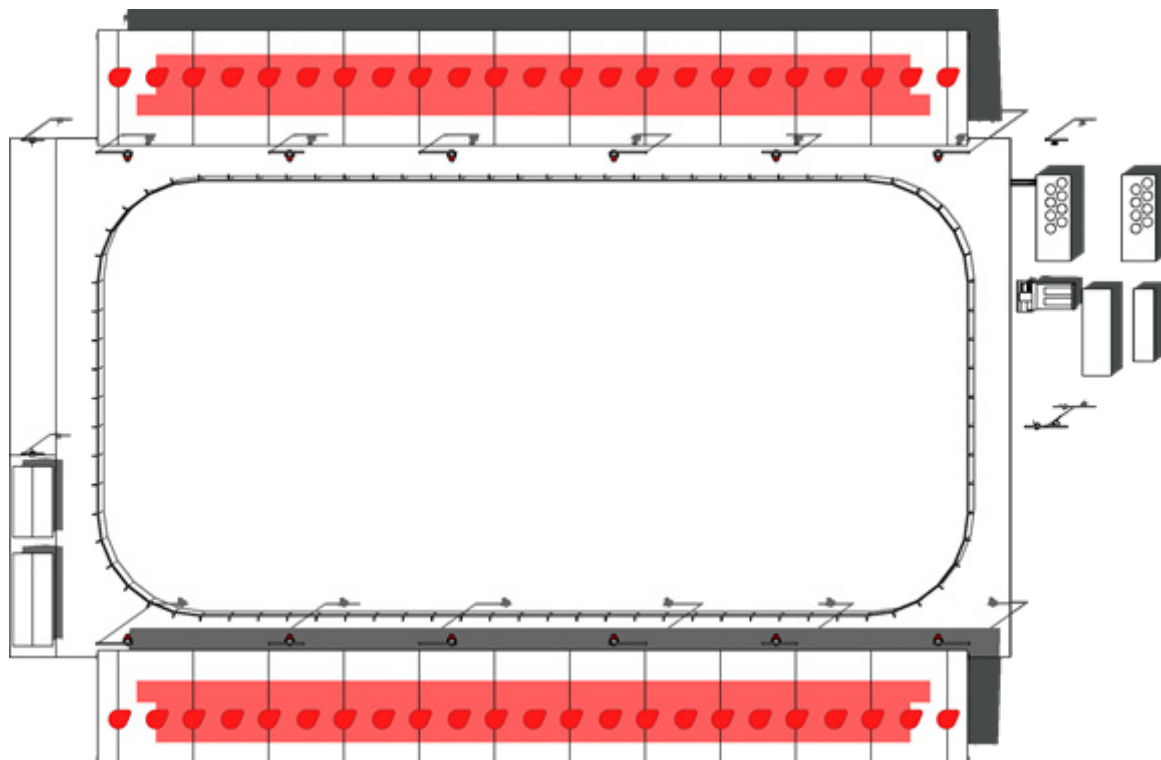
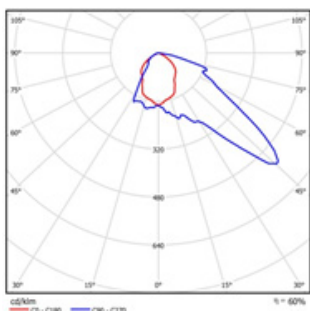


Figura 95: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione delle gradinate

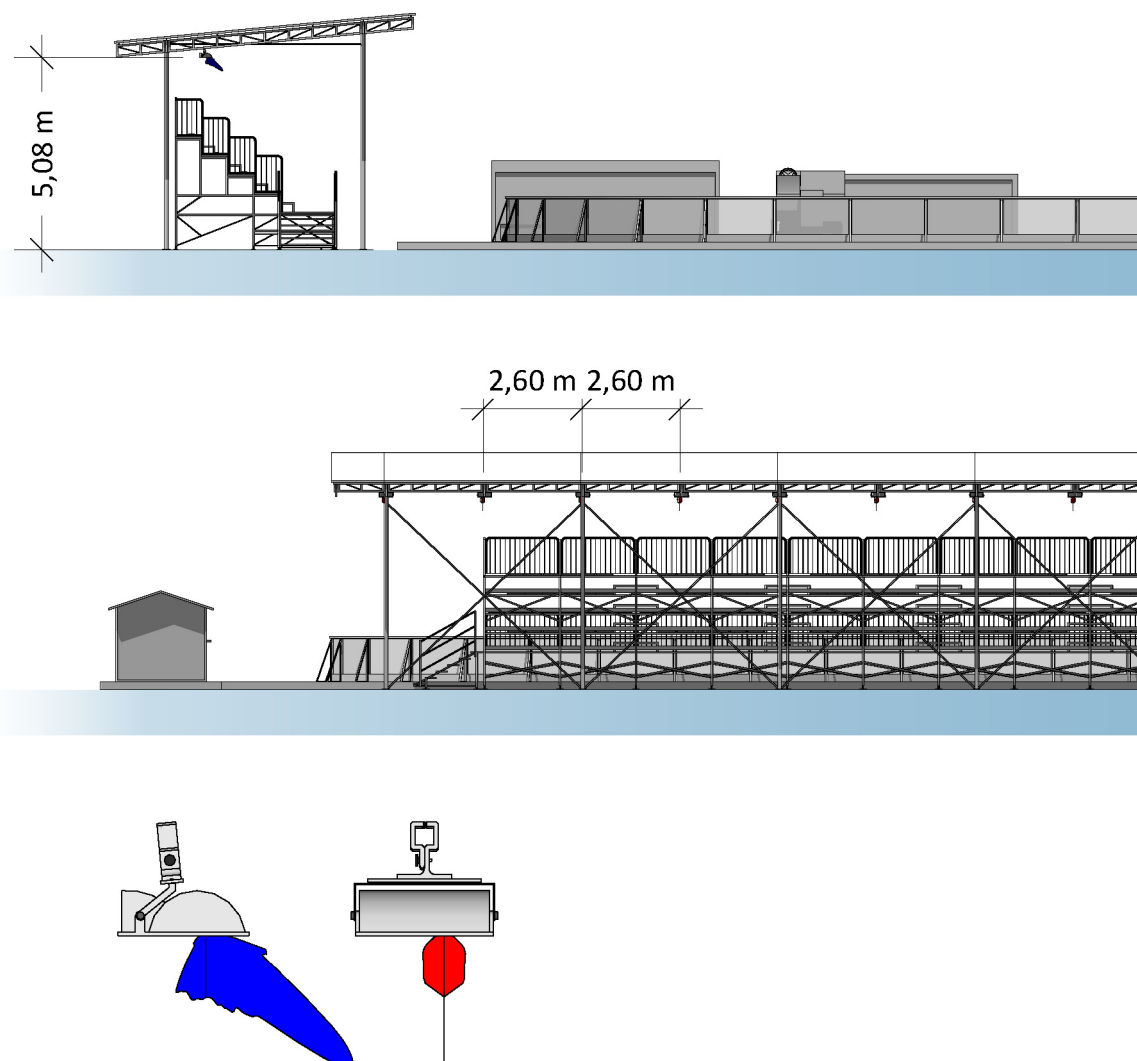


Figura 96: installazione degli apparecchi a lodi metallici per l'illuminazione delle gradinate. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

Secondo il principio progettuale appena spiegato, l'installazione è avvenuta attraverso la staffa già utilizzata nell'area di pertinenza, collocando gli apparecchi sopra il penultimo gradone, oriz-

zontalmente, e puntando le intensità maggiori verso la pista.

Sono stati quindi installati 23, ciascuno su una delle travi reticolari di sostegno.

Esiti illuminotecnici

Questo sistema consente di ottenere illuminamenti, sui vari piani di calpestio, piuttosto uniformi, variabili di circa il 26% rispetto al valore minimo, compresi tra 180 e 220 lx, entrambi valori accettabili.

È evidente che la soluzione scelta presenta elevati valori d'illuminamento uniformemente diffusi.

Inoltre il rischio di abbagliamento è limitato, tenendo conto che il calcolo suggerisce che i valori più elevati riguardano un osservatore intento a dare le spalle alla pista, condizione nella quale un utente si trova mediamente solo per il tem-

po utile a prendere posizione nel suo sedile.

La potenza totale installata è di 3.942,2 W per un numero considerevole di apparecchi.

9.2. Tecnologia di progetto a Led

Apparecchi e ottiche

Le considerazioni fatte per la progettazione dell'illuminazione delle gradinate a ioduri, sono state rispettate anche nel caso della tecnologia a Led.

L'ottica ad evolvente di cerchio è stata scelta an-

38 ESITI ILLUMINOTECNICI NELLE GRADINATE tecnologia a ioduri metallici

Orizzontale medio: E_{hm}	150	181, 206, 221, 217, 208
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,63-0,871-0,808-0,793-0,598
Indice di resa cromatica Ra		
65		80
Abbagliamento Gr (spettatore in gradinata)		
Gr≤50		Gr≤33

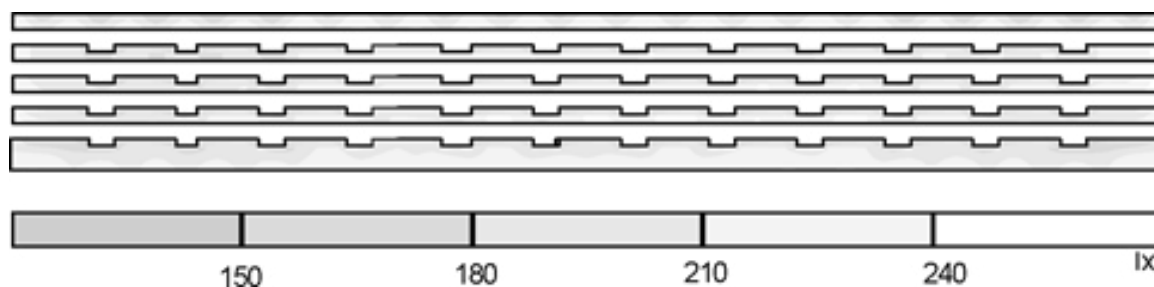


Figura 97: distribuzione degli illuminamenti nelle gradinate

39 APPARECCHIO LED -modello4- illuminazione delle gradinate

Sorgenti alloggiare	60 Led
Potenza nominale (W) (350 mA; 525 mA)	73; 109
Tensione di alimentazione (V)	350; 525
Flusso emesso (lm): (4.300 K, 6.000K, 350 mA) (4.300 K, 6.000K, 525 mA)	4.465; 5.132 5.804; 6.672
Peso netto (Kg)	7,44
Dimensioni (mm)	314x349x133
Rendimento ottico	67%
Classe di isolamento	1

(configurazione con 60 Led installati)

che in questo caso; così come è stata riprodotta la stessa disposizione degli apparecchi.

In questo caso, per ridurre il numero degli apparecchi, si è cercato di trovare una curva fotometrica che offrisse lateralmente un ombrello più ampio; in questo modo sarebbe stato possibile aumentare la distanza tra un apparecchio e il successivo.

Numero, collocazione, orientamento e installazione degli apparecchi

L'installazione degli apparecchi per le gradinate è identica a quella scelta per l'impianto di riferimento a ioduri: gli apparecchi sono agganciati alle travette di sostegno della copertura, tramite le staffe apribili e sono perfettamente orizzontali. Il loro numero è di 12 pezzi per gradinata, circa la metà di quelli necessari per la tecnologia di riferimento.

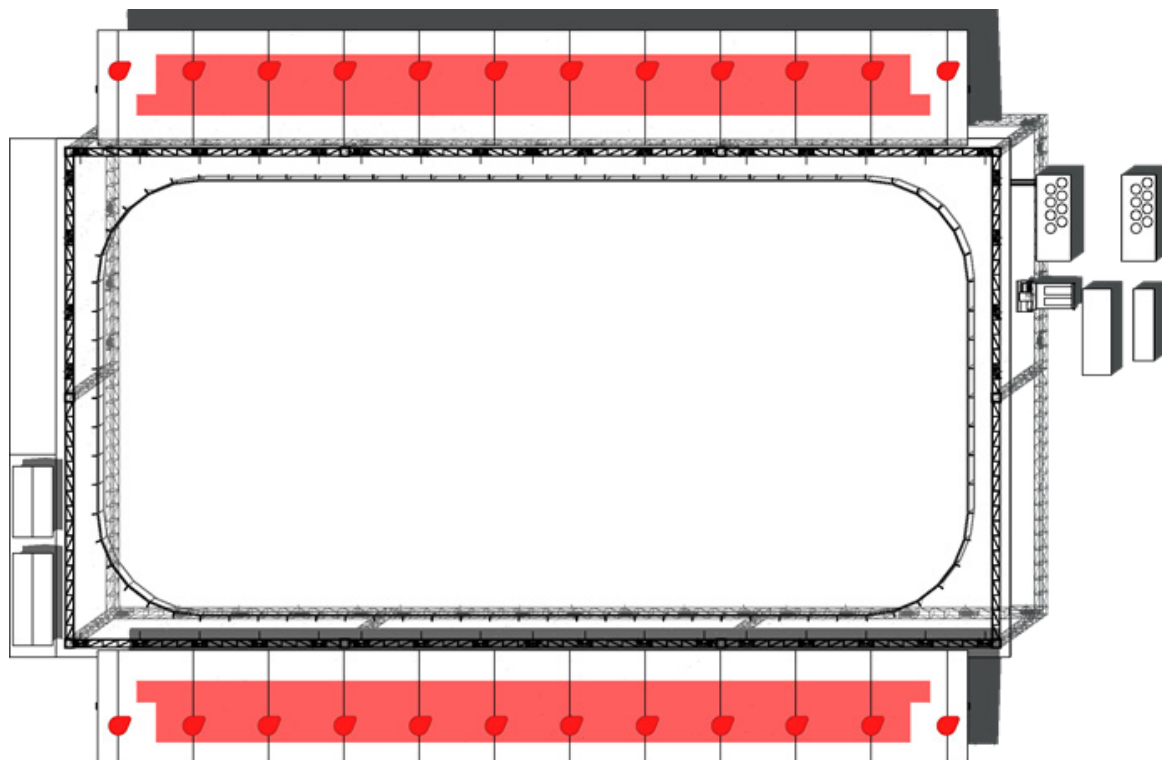


Figura 98: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione delle gradinate

40 ESITI ILLUMINOTECNICI NELLE GRADINATE tecnologia Led

Orizzontale medio: E_{hm}	150	167, 220, 238, 150, 164
Orizzontale specifico: E_{hs}	150	
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,4	0,494; 0,770; 0,587; 0,842; 0,580
Indice di resa cromatica Ra		
65	80	
Abbagliamento Gr (spettatore in gradinata)		
Gr≤50	Gr≤37	

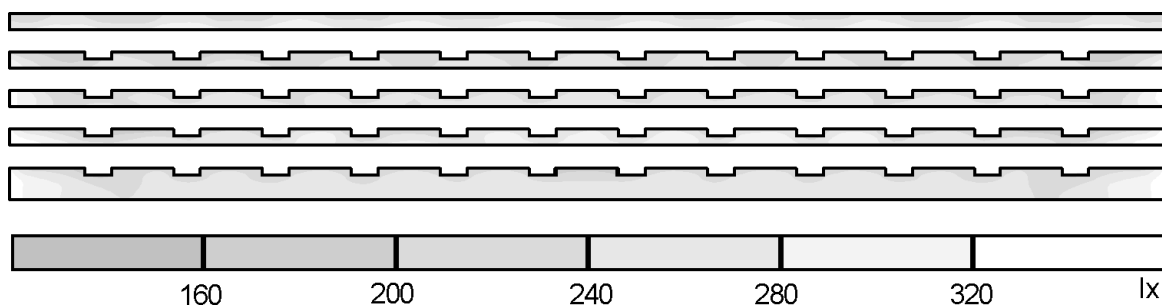


Figura 99: distribuzione degli illuminamenti nelle gradinate

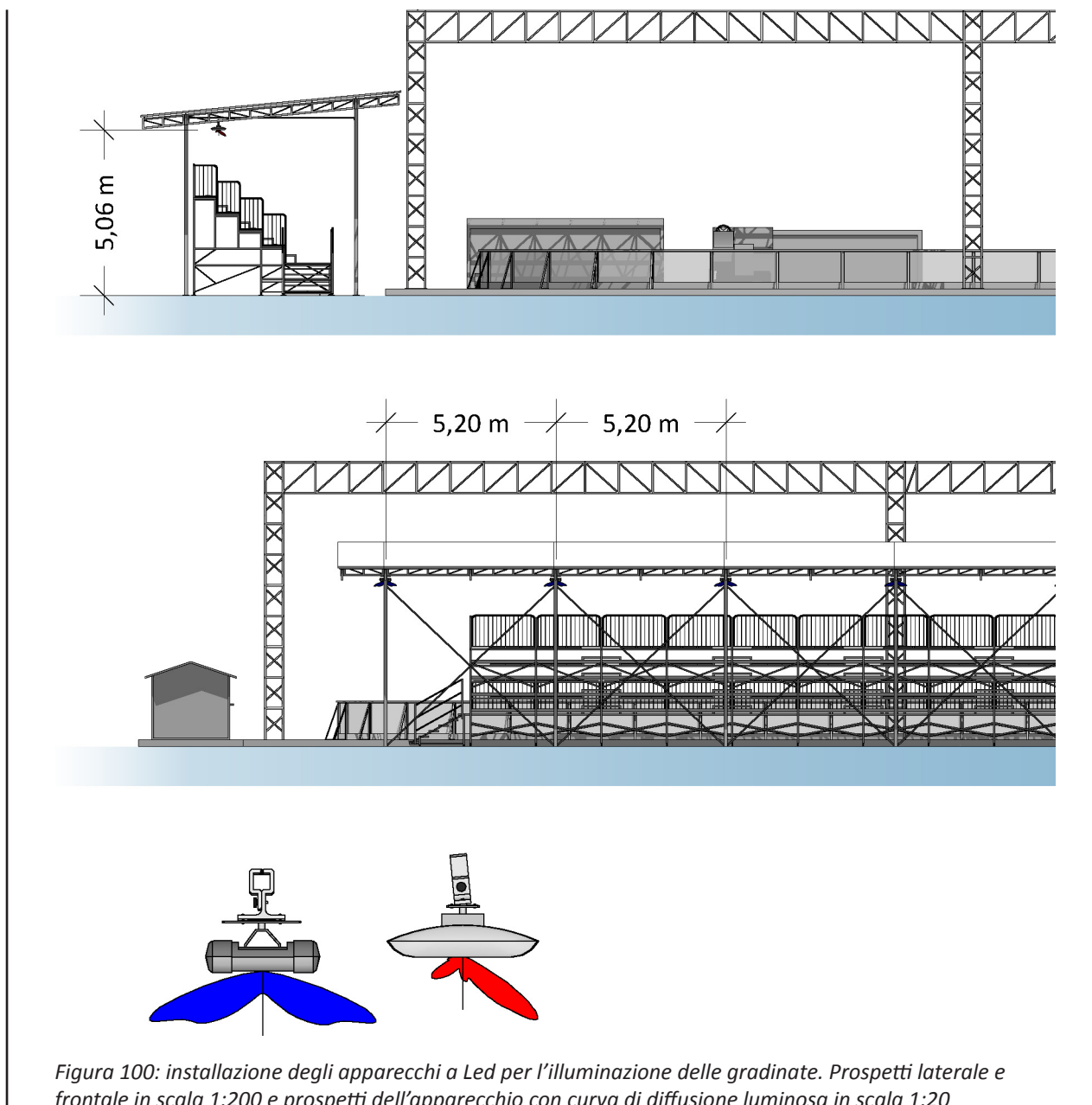


Figura 100: installazione degli apparecchi a Led per l'illuminazione delle gradinate. Prospetti laterale e frontale in scala 1:200 e prospetti dell'apparecchio con curva di diffusione luminosa in scala 1:20

Esiti illuminotecnici

Le gradinate, hanno usufruito di una soluzione del tutto analoga a quella già utilizzata per l'impianto di riferimento e gli esiti illuminotecnici,

per via della lieve differenza di flusso a vantaggio del Led, ma soprattutto della curva fotometrica più marcatamente ampia ai lati, sono mediamente superiori.

Un secondo vantaggio è la possibilità di modulare il flusso, evitando di installare apparecchi in

un numero elevato.

Come nel caso precedente, un utente posto sulle gradinate si trova al sicuro da un abbagliamento dovuto agli apparecchi installati a bordo pista, ma subisce un lieve disturbo da parte di quelli collocati sotto la copertura.

I valori rientrano comunque entro quelli richiesti dalla normativa vigente.

Il vantaggio offerto dal Led risiede sia nel numero degli apparecchi che nella potenza installata, pari a 2.616 W contro i 3.492,2 richiesti dalle lampade tradizionali.

10. ILLUMINAZIONE DELLA PISTA CON APPARECCHIO TEORICO

Al fine di comprendere quale sia l'effettivo potenziale del Led, si è pensato di suggerire quale fosse l'esito illuminotecnico dell'illuminazione in pista con un apparecchio che ne sfrutti le doti emissive e di efficienza con il diodo dalle migliori prestazioni ad oggi disponibile.

Questa ipotesi, presuppone che gli apparecchi siano capaci di supportare questo tipo di diodo; tuttavia il compromesso è plausibile, per via del fatto che questo Led appartiene ad una famiglia vicina a quella utilizzata negli apparecchi reali.

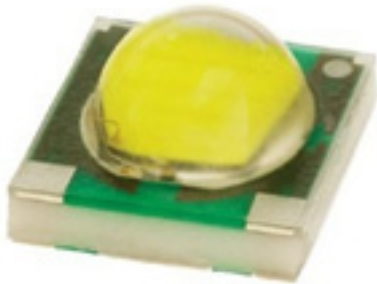
Numero e collocazione, nonché altezza e inclinazione degli apparecchi sono identici a quelli già utilizzati per gli apparecchi reali.

La differenza consiste nelle emissioni, offrendo un flusso totale superiore di circa 2.000 lm.

Sebbene la differenza non sia abissale, la simulazione serve tuttavia a comprendere quale sia la migliore prestazione possibile, ottenuta con il migliore Led disponibile installato su un apparecchio di questo tipo.

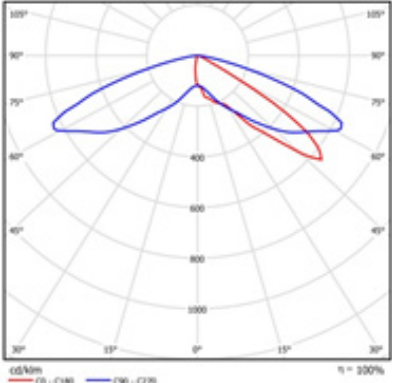

Dall'analisi dei dati emerge che il vantaggio in termini di illuminamento è di poche decine di lx. Allo stato attuale un apparecchio come quello scelto, equipaggiato con i migliori Led attualmente disponibili emette, anche 525 mA, flussi diverse volte più bassi, più prossimi a quelli dell'apparecchio a Led scelto, che a quelli di una lampada di riferimento per l'illuminazione della pista.

41 LED BIANCO TEORICO

	25 °C e 350 mA	25 °C e 525 mA	
Potenza nominale (W)	1,05	1,5	
Flusso emesso (lm)	139	180,7	
Efficienza luminosa (lm/W)	132	120	
Resa cromatica Ra	80		
Temperatura di colore (K)	6.000		
Angolo di emissione (°)	125		
Dimensioni nette (mm)	3,4; 3,4; 20		

42 APPARECCHIO LED TEORICO illuminazione della pista

Sorgenti alloggiare	240 Led Tipo 2
Potenza nominale (W) (@525 mA)	583,2
Tensione di alimentazione (V)	525
Flusso emesso medio (lm):	21.684
Peso netto (Kg)	14,5
Dimensioni (mm)	314x806x133
Rendimento ottico	50% con backlight shield
Classe di isolamento	1

	
--	---

43 ESITI ILLUMINOTECNICI SULLA PISTA DI GHIACCIO tecnologia a Led

Orizzontale medio: E_{hm}	500; 300; 100	231
Orizzontale specifico: E_{hs}	500; 300; 100	-
Uniformità d'illuminamento orizzontale; E_{hmin}/E_{hm}	0,6; 0,5; 0,4	0,649
Rapporto orizzontale, verticale: E_{hm}/E_{vm}	$0,5 \leq E_{hm}/E_{vm} \leq 2$	0,85
Orizzontale medio per riprese televisive: E_{hmt}	800	-
Intensità (cd) nell'emisfero superiore (per impianti sportivi generici)		
Ocd per 1.000 lm a 90°	-	
Temperatura colore (K)		
3.000-5.300 (consigliato ≥ 4000) (consigliato ≥ 5.500 per le riprese TV)	6.000	
Indice di resa cromatica Ra		
60-60-20 (livello I; II; III); ≥ 80 (con riprese TV)	80	
Abbagliamento Gr		
$Gr \leq 50$	$Gr \leq 33$	

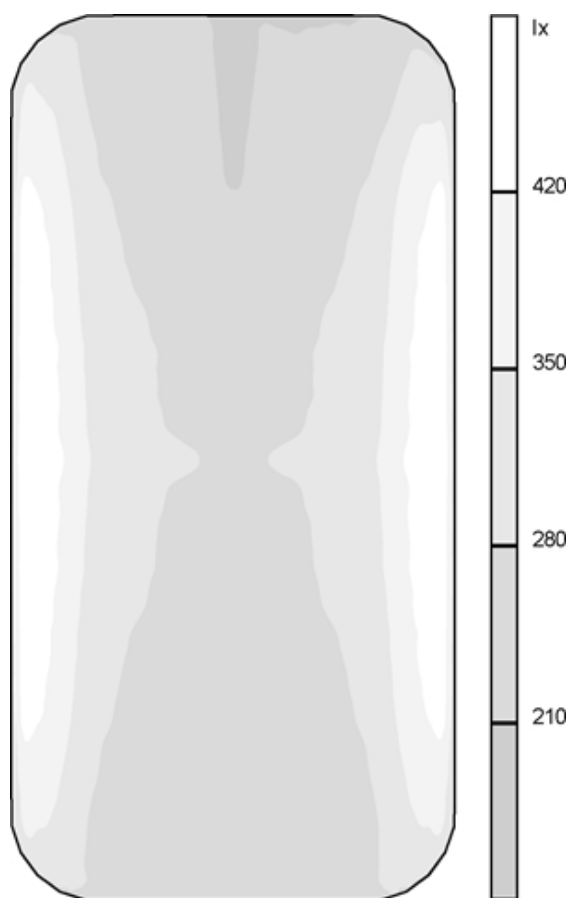


Figura 101: distribuzione degli illuminamenti sulla pista di ghiaccio

II. CONTROLLO E LIMITAZIONE ALL'ABBAGLIAMENTO

Le altezze di montaggio, l'inclinazione degli apparecchi, l'angolo minimo consentito sono gli aspetti critici che intervengono nell'aumentare il rischio di abbagliamento.

Negli impianti qui descritti, il punto che sembrerebbe più problematico è la pista, poiché è caratterizzata dal rischio che un utente, in pista o no, sia disturbato dagli apparecchi che la illuminano; sia per l'altezza di installazione, sia per l'inclinazione. In sintesi, esiste il rischio che apparecchi fortemente emissivi, è il caso degli ioduri, o molto numerosi, nel caso dei Led, entrino nel campo visivo di un fruitore.

In realtà gli apparecchi che illuminano la pista disturbano maggiormente gli utenti più lontani da essa, che non siano protetti dalla copertura.

Tuttavia i valori di abbagliamento consentiti dalle norme F.I.S.G. e C.O.N.I., che in queste pagine sono state usate come riferimento, sono piuttosto ampi, quindi è stato semplice rispettarli.

Per verificare gli eventuali effetti di disturbo causati dagli impianti sono stati collocati alcuni osservatori di riferimento in ciascuna delle aree funzionali, impostando l'altezza di mira naturale di una persona che cammina, e calcolando le luminanze di sfondo secondo il metodo preciso suggerito dalla norma CIE 112.

Le scelte fatte in fase di simulazione delle caratteristiche ottiche del ghiaccio erano impostate ad ottenere valori di riflessione speculare piut-

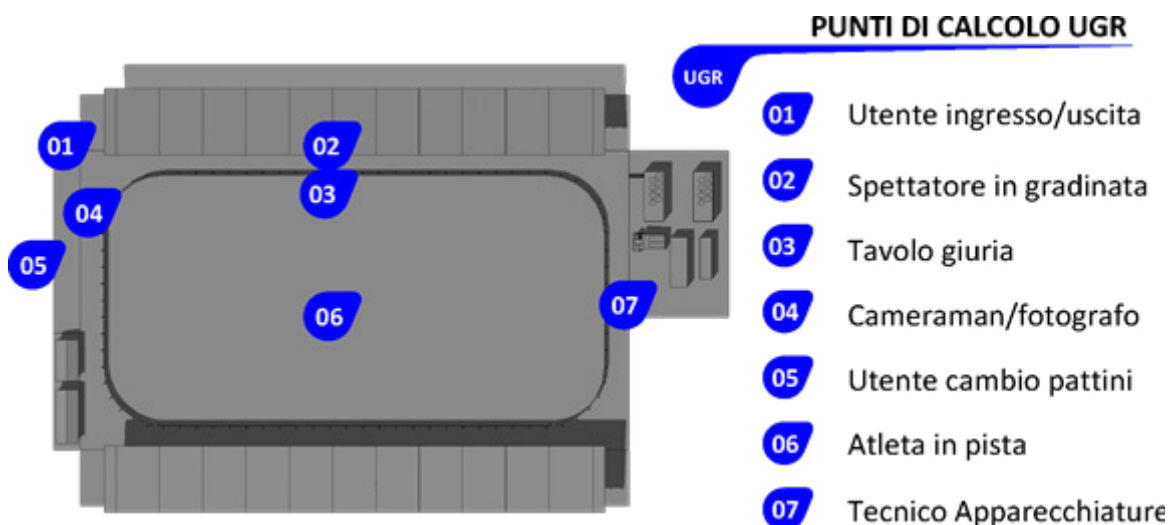


Figura 102: collocazione degli osservatori per il calcolo delle luminanze di velo

tosto alti, ottenendo quindi abbagliamenti indiretti, il più possibile disturbanti per chi si trovasse in pista o accanto ad essa.

Nella figura 105 sono schematizzate le posizioni dei vari osservatori di riferimento utilizzati in tutti i calcoli illuminotecnici effettuati per ciascuna delle tecnologie messe alla prova.

12. QUADRO ELETTRICO

Senza scendere in dettagli specifici, è possibile descrivere l'impianto nelle sue linee indipendenti principali: una prima linea serve l'illuminazione della pista e del bordo pista.

Una seconda alimenta l'impianto d'illuminazione delle gradinate e delle aree di transito a esse collegate. Una terza linea serve l'illuminazione dell'area d'ingresso e una quarta alimenta l'illu-

minazione degli impianti tecnici.

Una quinta e una sesta linea serviranno all'alimentazione dell'impianto di diffusione audio e di quello d'illuminazione coreografica.

Una settima e ultima linea alimenta l'illuminazione di locali di servizio, come la biglietteria e il deposito pattini.

Questo genere di ramificazione delle linee consente, quindi, all'impianto di refrigerazione di operare autonomamente e all'illuminazione di funzionare in modo indipendente in ciascuna delle sue parti, le cui necessità di accensione e spegnimento sono ovviamente differenti. Allo stesso modo è necessario poter attivare in modo indipendente l'impianto luci coreografiche e il comparto audio.

13. CONDIZIONI DI UTILIZZO E MANUTENZIONE

Il caso di una pista di ghiaccio temporanea, allestita con gradinate anch'esse mobili, è piuttosto semplice nella sua valutazione finalizzata alla definizione di un programma manutentivo.

L'intero impianto, durante l'anno solare, ha una attività limitata ai mesi invernali e autunnali, generalmente l'ultimo e il primo trimestre dell'anno, più la possibilità di essere installato in luoghi turistici durante il periodo estivo; questa opportunità è tuttavia da considerarsi piuttosto rara, poiché solo le città dal grande afflusso turistico estivo, scelgono di offrire servizi di questo genere.

Quindi l'attività di un impianto sportivo di questo tipo può essere sintetizzata in sei mesi di funzionamento e sei mesi di stoccaggio in deposito.

L'attività giornaliera è invece piuttosto prolungata, e solitamente va dalle nove o dieci del mattino, fino alla mezzanotte.

Considerando che il periodo in analisi è quello compreso tra ottobre e marzo, la necessità di operare con l'ausilio dell'illuminazione artificiale è giornalmente piuttosto lungo.

Considerando che gli orari di accensione degli impianti di illuminazione pubblica o sportiva hanno un orario variabile, dipendente dal mese di attività e dalla fascia geografica considerata, è possibile stimare l'orario di accensione compre-

so tra le ore 17 e la mezzanotte, quindi un totale di 7 ore di esercizio giornaliero.

Il totale delle ore di funzionamento, per 30 giorni mensili e sei mesi è di 1.260, un margine agevole per qualunque tipo di impianto luminoso, in termini di manutenzione programmata.

Si tenga conto che l'impianto di illuminazione funzionale e coreografico di una pista di ghiaccio outdoor rispettano questi orari di accensione, ma gli impianti di diffusione audio rispecchiano invece di quelli di apertura dell'attività.

Gli interventi di manutenzione sull'impianto di illuminazione di una pista di ghiaccio temporanea avvengono, quindi, con cadenza semestrale, e sono facilitati dalla possibilità di agire sui singoli apparecchi non installati, ma collocati in magazzino, dove gli interventi di pulizia, di sostituzione lampade e riparazione, possono essere effettuati a terra.

Il rischio di guasti degli apparecchi durante il periodo di attività tuttavia sussiste, ma rientra a questo punto negli interventi manutentivi straordinari, deputati al personale che gestisce e installa l'impianto

Per quel che riguarda le altre parti tecniche della pista, specialmente i refrigeratori, come si è visto gli impianti sono spesso provvisti di apparecchi ausiliari, specialmente nel caso di piste di dimensioni olimpioniche, che forzatamente, per via della dimensione e della difficoltà di trasporto, restano installate spesso per l'intera durata del periodo di esercizio. Anche in questo caso, eventuali attività manutentive ordinarie vengono svolte al termine dell'attività.

14. DESCRIZIONE SINTETICA DEGLI IMPIANTI

Esaminando l'impianto di riferimento e quello di progetto per le attività ricreative, in modo sintetico, ma mantenendo la distinzione per aree funzionali, è possibile avere un'idea semplice ma efficace degli allestimenti di apparecchi per ciascuna tecnologia.

Confrontando gli impianti sinteticamente descritti nella tabella 44, emerge per prima cosa che l'impianto a Led offre un risparmio netto, in termini di potenza installata di circa il 30% rispetto all'impianto di riferimento.

Nella tabella, i valori indicati in grassetto sono, nel confronto dei due impianti, quelli più vantaggiosi.

Il consumo dell'impianto a Led è effettivamente

44 DESCRIZIONE SINTETICA DEGLI IMPIANTI

	Impianto a ioduri metallici	Impianto a Led
Pista di ghiaccio per attività ricreative		
Potenza installata	13.696 W	9.928 W @ 350 m
Illuminamento medio	191 lx	167 lx
Numero di apparecchi	16 da 70.000 lm	34 da 15.360 lm
Anello a bordo pista		
Potenza installata	-	-
Illuminamento medio	349 lx	199 lx
Numero di apparecchi	-	-
Area di ingresso		
Potenza installata	332 W	876 W
Illuminamento medio	260 lx	168 lx
Numero di apparecchi	2 da 13.800 lm	4 da 13.664 lm
Area di installazione impianti		
Potenza installata	498 W	876 W
Illuminamento medio	301 lx	187
Numero di apparecchi	3 da 13.800 lm	4 da 13.664 lm
Aree di pertinenza delle gradinate (4)		
Potenza installata	1.328 W	876 W
Illuminamento medio	201 lx	192
Numero di apparecchi	8 da 13.800 lm	4 da 15.271 lm
Gradinate (2)		
Potenza installata	3.942,2 W	2.616 W
Illuminamento medio	206 lx	188 lx
Numero di apparecchi	46 da 6.200 lm	24 da 6.672 lm
Totale		
Potenza installata	19.796,2 W	15.172 W (-25%)

inferiore, compatibilmente con le possibilità di sfruttamento della tecnologia legate al tipo di installazione.

Considerando che, nella tabella 44, sono stati messi a confronto i due impianti, così come sono stati progettati, emerge che il Led è in grado di offrire prestazioni complessivamente più efficienti rispetto alla tecnologia di riferimento in pista, nell'area di pertinenza delle gradinate e nelle gradinate stesse; dove, ad illuminamenti paragonabili, corrispondono consumi inferiori.

Nel caso di apparecchi con flussi contenuti, come nelle gradinate, le prestazioni finali del Led sono superiori, in termini di consumo energetico e numero di apparecchi installati.

Tuttavia, questi vantaggi si limitano, in pista, alle attività ricreative; per le altre attività la tecnologia a ioduri risulta ancora superiore. Si tenga conto inoltre che, allo scopo di elevare i flussi emessi, spesso gli apparecchi a Led operano ad 525 mA; questa scelta consente di ottenere emissioni superiori del 30% circa, ma determina un generale aumento dei consumi del 50%.

Gli apparecchi a ioduri sono in grado di offrire illuminamenti orizzontali decisamente maggiori, a patto di alimentare l'impianto con una potenza molto elevata, specialmente nel caso della pista durante le attività agonistiche.

Un aspetto da non sottovalutare è la differenza tra le curve fotometriche degli apparecchi installati di una e dell'altra tecnologia; questa differenza determina a seconda dei casi una diffusione della luce più o meno efficiente anche a parità di flusso; perciò confrontare le due tecno-

logie è un esercizio in cui è necessario prestare particolare attenzione.

Le differenze tra le due tecnologie si fanno particolarmente evidenti sulla pista di ghiaccio: qui, la tecnologia a ioduri metallici raggiunge ottimi risultati con un numero contenuto di apparecchi ad alte potenze assorbite ed altrettanto alte emissioni. Il Led, per via dell'impossibilità di raggiungere la parità del flusso emesso, non è assolutamente in grado di fingere da alternativa laddove si vogliono ospitare i massimi livelli di attività.

Facendo un passo indietro e tornando a valutare le sorgenti e le loro efficienze per le attività ricreative, si evince che: la lampada usata in pista, con i suoi 87,5 lm/W è inferiore rispetto al Led a 350 mA e 114 lm/w e rispetto al Led a 525 mA e 99 lm/W. Tuttavia questo confronto va arricchito con il dato del numero delle sorgenti necessarie per ottenere flussi paragonabili: per ottenere i 70.000 lm di una singola lampada di riferimento sono necessari tra i 419 e i 547 Led in un singolo apparecchio.

Il Led si dimostra superiore nel confronto con le lampade a ioduri con flussi e potenze limitate, non certo con le lampade più potenti poiché i suoi flussi sono troppo piccoli per avere un paragone ragionevole.

E' chiaro che al giorno d'oggi in applicazioni come queste, ovvero grandi superfici che devono avere un illuminamento elevato ed uniforme, il Led è ancora una tecnologia poco adeguata per tutti i livelli di attività, sebbene i margini teorici di miglioramento siano altissimi e le pos-

45 CONFRONTO PRESTAZIONALE TRA APPARECCHI

Illuminazione della pista per attività ricreative	
Ioduri metallici	Led
Potenza: 856 W (16 pezzi)	Potenza: 292 W @ 350 mA (34 pezzi)
Flusso netto: 43.400 lm	Flusso netto: 15.360 lm
Rendimento ottico 62%	Rendimento ottico 50%
E_m : 191 lx	E_m : 167 lx
Illuminazione dell'anello a bordo pista	
Potenza: 856 W	Potenza: 292 W @ 350 mA
Flusso netto: 43.400 lm	Flusso netto: 15.360 lm
Rendimento ottico 62%	Rendimento ottico 50%
E_m : 185 lx	E_m : 171 lx
Illuminazione dell'area di ingresso	
Potenza: 166 W (2 pezzi)	Potenza: 219 W (4 pezzi)
Flusso netto: 8.556 lm	Flusso netto: 13.664 lm
Rendimento ottico 62%	Rendimento ottico 68%
E_m : 260 lx	E_m : 168 lx
Illuminazione dell'area di installazione degli impianti	
Potenza: 166 W (3 pezzi)	Potenza: 219 W (4 pezzi)
Flusso netto: 8.556 lm, 12.282 lm	Flusso netto: 13.664 lm
Rendimento ottico 62%, 89%	Rendimento ottico 68%
E_m : 301 lx	E_m : 187 lx
Illuminazione dell'area di pertinenza delle gradinate	
Potenza: 166 W (8 pezzi)	Potenza: 219 W (4 pezzi)
Flusso netto: 8.556 lm	Flusso netto: 15.271 lm
Rendimento ottico 62%	Rendimento ottico 76%
E_m : 201 lx	E_m : 192 lx
Illuminazione delle gradinate	
Potenza: 85,7 W (46 pezzi)	Potenza: 101 W
Flusso netto: 3.720 lm	Flusso netto: 6.672 lm
Rendimento ottico 60%	Rendimento ottico 67%
E_m : 206 lx	E_m : 187 lx

sibilità fornite dal continuo miglioramento delle efficienze luminose siano considerevoli.

Altro aspetto da considerare è la fattibilità di un impianto di questo genere; come si è visto dimensionalmente gli apparecchi a Led, sebbene le sorgenti siano molto piccole, possono diventare molto ingombranti, rendendo difficoltoso il trasporto e l'installazione; senza contare che il numero di dispositivi a Led in pista è quasi il doppio di quelli a ioduri, con conseguenti costi iniziali molto più elevati.

Il confronto tra i due impianti, della tabella 45 impostato sul flusso installato e sulla potenza installata, sebbene viziato dalle differenze dovute alle curve fotometriche, il numero e il tipo di installazione, rende più evidente lo scarto tra le due tecnologie.

15. ILLUMINAZIONE COREOGRAFICA

Così come è stato già fatto per l'illuminazione funzionale, si procederà con un confronto tra le tecnologie tradizionali e le possibili alternative a Led.

Lo scopo principale dell'impianto di illuminazione coreografica è fornire un commento cromatico e luci d'atmosfera alle varie attività svolte sulla pista di ghiaccio.

Gli eventi che necessitano di questo tipo di allestimento sono tre: la ricreazione, gli spettacoli organizzati o gli eventi itineranti e le esibizioni professionistiche.

La ricreazione, o "discoteca su ghiaccio", vede come protagonisti utenti dilettanti o amatoriali, impegnati nel puro e semplice intrattenimento sportivo.

Questo tipo di attività è accompagnato da musica radiofonica in diffusione e, esattamente come una discoteca tradizionale, necessita di un'illuminazione apposita fatta di effetti stroboscopici, forme proiettate (i cosiddetti "gobos") e colori cangianti.

Lo scopo di questo commento luminoso è semplicemente rendere dinamico e gradevole l'am-



Figura 103: un esempio di illuminazione a scopo ricreativo su una pista di ghiaccio indoor

biente ed enfatizzare i ritmi musicali su cui gli utenti pattinano.

Durante queste attività, esattamente come in una discoteca, l'illuminazione funzionale in pista può essere del tutto assente o limitata ad altre zone specifiche, come gli ingressi, le uscite e le gradinate.

Gli spettacoli organizzati sono eventi speciali, basati anche su una vera e propria struttura narrativa di tipo teatrale e una coreografia appositamente studiata.

Sono spettacoli interpretati, è il caso di dirlo, da atleti professionisti o semi-professionisti, allestiti in palazzetti del ghiaccio o in piste all'aperto, secondo un vero e proprio calendario di tournée.

L'illuminazione coreografica, in questo caso, ha lo scopo di enfatizzare la narrazione o di accompagnarla e favorirla, accentuando gesti e movenze degli attori principali.

Di conseguenza saranno necessari per lo più luci colorate, eventualmente con gobos selezionati, stroboscopiche e occhi di bue, il tutto programmato in un progetto luci prestabilito.

Il tipo di illuminazione è perciò un ibrido tra quello utilizzato per lo sport puro e quello pensato per uno spettacolo vero e proprio: saranno presenti tutti gli effetti e i colori presenti nei casi precedenti e una base di illuminazione funzionale minima per garantire una buona visibilità in pista.

Ne deriva che questo tipo di attività non vengano, preferibilmente, svolte in impianti all'aperto temporanei, se non appositamente realizzati o

allestiti con un impianto adeguato.

Bisogna inoltre tener conto che spesso questo genere di spettacoli è pensato in forma realmente teatrale, perciò con una vera e propria scenografia allestita in pista contro uno dei lati lunghi o corti; questo eventualmente determina la chiusura al pubblico di una delle gradinate, almeno nel caso qui considerato.



Figura 104: l'elaborato allestimento scenografico di un celebre spettacolo sul ghiaccio

Le esibizioni professionistiche possono essere considerate come il naturale anello di congiunzione tra le due attività sopra descritte; in altre parole si tratta di esibizioni di atleti professionisti o semi-professionisti, eseguite in una serata organizzata, ma priva di una struttura teatrale. Spesso gli atleti ripetono coreografie realizzate in gara, rivedute per aumentarne la spettacolarità, il trasporto e la piacevolezza, o ne eseguono di nuove appositamente pensate per il piacere degli spettatori.

Ciò significa che il tasso tecnico è alto, ma non vi è pressione agonistica: il risultato è uno spettacolo tecnicamente di alto livello e di grande



Figura 105: un esempio di illuminazione coreografica durante un'esibizione

intrattenimento.

In questo tipo di serate, si alternano in pista atleti differenti, ciascuno con il proprio brano musicale e la propria coreografia, il che significa che ciascuno avrà un piccolo progetto luci personalizzato. L'illuminazione d'insieme è paragonabile a quella degli spettacoli organizzati.

Le esigenze sono quindi numerose e variegate, ma nella prassi un palazzo del ghiaccio è normalmente attrezzato per ospitare eventi di tutte e tre le tipologie descritte.

Si tenterà quindi di realizzare un impianto di illuminazione coreografica in grado di fare altrettanto.

Prima di procedere con l'analisi di un impian-

to di riferimento a ioduri metallici è necessario sottolineare che, la progettazione di questo tipo specifico di allestimento riguarda esclusivamente la pista. In effetti la pista è l'unico luogo dell'intero sistema che richiede questo tipo di illuminazione; le altre parti dell'impianto continuano a funzionare con i loro apparecchi specifici in base alle necessità.


15.1. Tecnologia di riferimento a ioduri metallici

Per prima cosa è necessario suddividere gli apparecchi utili ad allestire un impianto luci coreografiche nelle loro tipologie principali, catalogandole per funzione ed effetto, descrivendone poi la tecnologia utilizzata e le caratteristiche illuminotecniche ed energetiche.


La prima tipologie sono le cosiddette **"teste mobili"**, si tratta di apparecchi dotati di un braccio rotante su una base fissa e un proiettore fissato al braccio mobile, a sua volta capace di oscillare. Il fascio luminoso può quindi muoversi in quasi ogni direzione in base ad una semplice programmazione preimpostata.

Il proiettore vero e proprio è poi allestito con ruota cambiacoloro removibile, un dimmer, un otturatore e un'ottica meccanica in grado di allargare e stringere il cono di emissione luminosa entro ampiezze variabili da 12-34° fino a 24-60°. Gli angoli di rotazione e oscillazione sono pari a

46 LAMPADA A ALOGENURI METALLICI

Potenza nominale (W)	575	
Tensione lampada (V)	-	
Flusso emesso (lm)	49.000	
Efficienza luminosa (lm/W)	85	
Temperatura colore (K)	7.200	
Resa cromatica Ra	70	
Durata al 50% del flusso (h)	1.000	
Dimensioni (l-d) (mm)	125	
Peso (Kg)	0,055	
Codice di colore	2	

47 TESTA MOBILE AD ALOGENURI METALLICI

Lampada alloggiata	Alogenuri metallici (575 W)	
Potenza nominale (W)	720	
Tensione di alimentazione (V)	-	
Flusso emesso (lm)	49.000	
Peso netto (Kg)	15,5	
Dimensioni (mm)	470x446x588	
Classe di isolamento	1	

530° e 280°.

Il proiettore può ulteriormente essere equipaggiato con una ruota di mascherine di effetti proiettabili.

Questo genere di apparecchi, sebbene in grado di operare anche all'aperto, richiede particolari attenzioni, dovute soprattutto alla sensibilità alle polveri e allo stress a cui sono sottoposti gli elementi di ancoraggio: è necessario infatti prevedere, nel caso l'apparecchio sia appeso, una catenella di sicurezza scarica, che intervenga nel

caso gli ancoraggi dovessero cedere.

Questo tipo di apparecchi è equipaggiato con lampade ad alogenuri metallici come quelle di tabella 46; trattandosi di apparecchi deputati alla diffusione di luce colorata, non si presterà particolare attenzione agli indici di resa cromatica.

La seconda categoria di apparecchi è costituita dai così detti "scanners" ovvero apparecchi fissi, in cui l'intero flusso luminoso viene convogliato verso uno specchio mobile, in modo da

48 LAMPADA A SCARICA COMPATTA

Potenza nominale (W)	250
Tensione lampada (V)	207
Flusso emesso (lm)	18.000
Efficienza luminosa (lm/W)	72
Temperatura colore (K)	6.700
Resa cromatica Ra	75
Durata al 50% del flusso (h)	3.000
Dimensioni (l-d) (mm)	108
Peso (Kg)	-
Codice di colore	-



direzionare il fascio luminoso ovunque si voglia, oppure verso specchi prismatici che ruotando ottengono l'effetto di sfera specchiata.

Oltre a questo gli apparecchi sono equipaggiati di gobos rotanti dotati di 11 mascherine diverse ciascuno. Normalmente questi apparecchi portano lampade ad alogenuri metallici come quelle indicate in tabella 48, o lampade a scarica compatte meno potenti.

Le installazioni al coperto possono contare su una ulteriore tipologia di apparecchi, spesso collocata sopra al centro della pista; si tratta di scanners multipli, dedicati alla produzione si-

multanea di numerosi effetti luminosi sia attraverso gobos colorati che grafici.

Questo tipo di apparecchio è però ben diverso dai precedenti, dovendo suddividere il flusso di una singola sorgente su più specchi mobili, sei per la precisione, deve essere equipaggiato con lampade molto potenti, come quelle descritte nella tabella 51. Questo tipo di apparecchio è quindi equipaggiato con filtri colorati o gobos grafici, sia statici che dinamici a seconda della programmazione scelta.


Tale apparecchio, sebbene sia molto potente e versatile, non può essere installato in alcun

49 SCANNER AD ALOGENURI METALLICI

Lampada alloggiata	Alogenuri metallici (575 W)
Potenza nominale (W)	720
Tensione di alimentazione (V)	-
Flusso emesso (lm)	49.000
Peso netto (Kg)	16
Dimensioni (mm)	306, 759, 304
Classe di isolamento	1



50 SCANNER A SCARICA

Lampada alloggiata	Scarica compatta (250 W)	
Potenza nominale (W)	300	
Tensione di alimentazione (V)	-	
Flusso emesso (lm)	18.000	
Peso netto (Kg)	12	
Dimensioni (mm)	246, 493, 310	
Classe di isolamento	1	

modo sulla pista in esame, tuttavia sarebbe presente in coppia in un impianto indoor di dimensioni olimpiche ben equipaggiato.


L'impianto è quindi costituito da:

- 12 teste mobili da 49.000 lm, 720 W, usati come cambiacolore e spot dove necessario.
- 8 scanner da 49.000 lm, 720 W, usati come cambiacolore e proiettori di gobos.

- 6 scanner da 18.000 lm, 300 W, usati con effetto a sfera specchiata.

Per un totale di 16.200 W installati e un flusso totale, utile come riferimento, di 1.088.000 lm. Trattandosi di apparecchiature con parti mobili e dalle caratteristiche tali da renderle più sensibili agli agenti atmosferici rispetto ai comuni apparecchi per l'illuminazione, si è pensato di installarli sotto la copertura delle gradinate ad un'altezza di montaggio di 5,8 m, il più vicino possibile ai margini della pista.

51 LAMPADA A IODURI METALLICI

Potenza nominale (W)	1.200	
Tensione lampada (V)	100	
Flusso emesso (lm)	110.000	
Efficienza luminosa (lm/W)	91,6	
Temperatura colore (K)	6.000	
Resa cromatica Ra	80	
Durata al 50% del flusso (h)	1.000	
Dimensioni (l-d) (mm)	220	
Peso (Kg)	-	
Codice di colore	-	

52 SCANNER MULTIPLO A SCARICA

Lampada alloggiata	Scarica compatta (1.200 W)
Potenza nominale (W)	1.500
Tensione di alimentazione (V)	-
Flusso emesso (lm)	110.000
Peso netto (Kg)	48
Dimensioni (mm)	1.000, 1.000, 500
Classe di isolamento	1

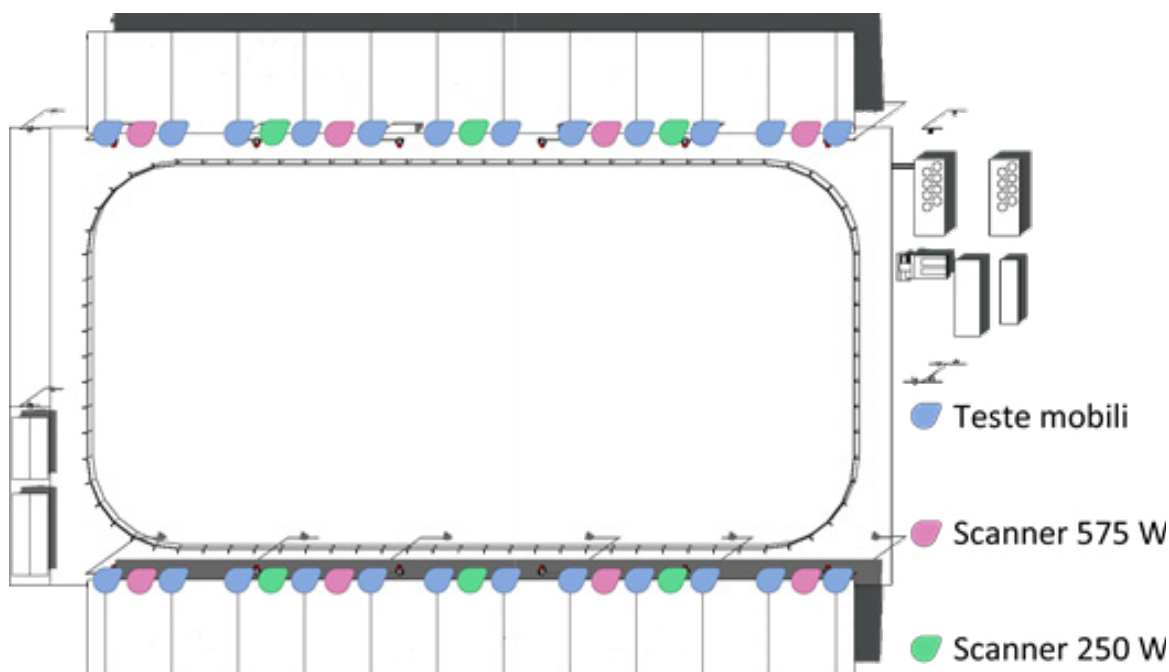


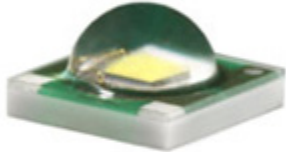
Figura 106: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione coreografica nell'impianto ad alogenuri

15.2. Tecnologia di progetto a Led


Il metodo usato fino a qui, nel progettare l'impianto a Led, dopo aver analizzato quello di riferimento a ioduri metallici, consiste nel cercare di riprodurre il flusso necessario ad ottenere risultati di illuminamento ragionevoli, nelle varie aree funzionali della struttura.

In questo caso, l'unica area funzionale interessata è la pista, e su di essa insiste un flusso totale, installato nell'impianto di riferimento, pari a 1.088.000 lm, pari a circa la metà del flusso installato per l'illuminazione funzionale a ioduri. Si procederà quindi cercando di ottenere, con apparecchi a Led, una quantità di flusso totale analoga a quella dell'impianto di riferimento, compatibilmente con le differenze dovute alle

53 LED RGB

	25 °C e 350 mA	25 °C e 525 mA	
Potenza nominale (W)	1,15	1,725	
Flusso emesso (lm)	48,5-87,2-27	63-88,5-35,1	
Efficienza luminosa (lm/W)	41-75,8-23,4	36,5-51,3-20,3	
Resa cromatica Ra	-	-	
Temperatura di colore (K)	-	-	
Angolo di emissione (°)	125		
Dimensioni nette (mm)	3,4; 3,4; 20		

54 TESTA MOBILE A LED I

Sorgenti alloggiare	192 Led RGB	
Potenza nominale (W)	450	
Tensione di alimentazione (V)	250	
Flusso emesso (lm)	10.400	
Peso netto (Kg)	22	
Dimensioni (mm)	514, 588, 328	
Classe di isolamento	1	

distinte tecnologie.

Per prima cosa è necessario dire che, come nel caso dell'illuminazione funzionale, la tecnologia Led non è in grado di fornire apparecchi analoghi a quelli di riferimento; ciò dipende dalle dimensioni delle sorgenti.

Come è già stato chiarito in precedenza lo svantaggio principale del Led consiste nel dover associare numerose sorgenti per ottenere flussi analoghi a quelli delle lampade a ioduri, finendo per raggiungere dimensioni irragionevoli. Questo problema si ripercuote anche nel caso di apparecchi pensati per l'illuminazione coreografica.

Le teste mobili, ad esempio, dovendo ospitare sia la lampada, sia i dispositivi rotanti come filtri


colorati o mascherine da proiettare e sia le parti elettriche e meccaniche responsabile delle rotazioni e dell'oscillazione della testa stessa, oltre che gli eventuali diaframmi per lo zoom del fascio luminoso, non può ospitare sorgenti troppo voluminose.

Inoltre il Led non può essere usato all'interno di una camera di un riflettore, ma deve, in un modo o nell'altro, essere orientato in modo da dirigere il flusso uscente entro la stessa emisfero di tutti gli altri diodi presenti.


Di conseguenza tutti i Led presenti dovranno essere affiancati per realizzare una testa mobile, con l'esito finale di un limitato numero di Led e quindi un flusso altrettanto limitato.

Tuttavia quella a Led è una tecnologia che offre

55 LED BIANCO

Potenza nominale (W)	50 @ 9 A	
Flusso emesso (lm)	1.200	
Efficienza luminosa (lm/W)	24	
Resa cromatica Ra	50	
Temperatura di colore (K)	6.500	
Angolo di emissione (°)	125	
Dimensioni nette (mm)	28x27	

56 TESTA MOBILE A LED 2

Sorgenti alloggiare	7 Led 50 W	
Potenza nominale (W)	463	
Tensione di alimentazione (V)	240	
Flusso emesso (lm)	8.000	
Peso netto (Kg)	16,6	
Dimensioni (mm)	377, 220, 471	
Classe di isolamento	1	

altri vantaggi: prima di tutto non sono necessari filtri colorati, perché attraverso la miscelazione RGB il Led è in grado di ottenere oltre sedici milioni di colori, sfumando gradualmente da una tonalità all'altra, contro i cinque colori normalmente installati negli apparecchi tradizionali. Inoltre il Led è naturalmente provvisto della capacità di regolazione del flusso, senza la necessità di ballast o diaframmi appositi.

Gli effetti stroboscopici possono essere facilmente ottenuti regolando la frequenza di accensione e spegnimento

Per il resto, come la tecnologia di riferimento, è portata all'installazione di accessori come mascherine rotanti o lenti di qualunque genere.

Resta però più che evidente che sarà necessario


immaginare una diversa soluzione per l'intero impianto, prevedendo un numero elevato di sorgenti ed effetti analoghi ottenuti con apparecchi differenti da quelli a ioduri.

La categoria delle "teste mobili" è presente anche con equipaggiamento Led, con cui tuttavia non è possibile ottenere flussi che si avvicinino ai 49.000 lm delle lampade a ioduri.

Va inoltre aggiunto che questo tipo di apparecchi installa diodi di tre colori diversi, che non sempre hanno emissioni analoghe a quelle dei Led bianchi già ampiamente analizzati, ma spesso inferiori, specialmente per il colore blu.

Solitamente il numero di diodi per ciascun colore è lo stesso, salvo che non sia diversamente specificato; in tabella 51 viene riportato il tipo di

57 SCANNER A LED RGB

Sorgenti alloggiare	48 Led	
Potenza nominale (W)	70	
Tensione di alimentazione (V)	240	
Flusso emesso (lm)	2.600	
Peso netto (Kg)	2,6	
Dimensioni (mm)	400, 180, 170	
Classe di isolamento	1	

Led che normalmente è installato in apparecchi coreografici e che verrà considerato valido per tutti gli apparecchi considerati in seguito.

L'apparecchio a testa mobile riportato in tabella 54 è tra i più potenti disponibili, per via del numero di Led installati; è un apparecchio privo di ottica e di mascherine rotanti, perciò è evidente che potrà svolgere solo le funzioni di cui è naturalmente capace un dispositivo Led RGB: cambiacolor, dimmer e strobo.

E' da subito evidente quale sia la differenza di flusso con le teste mobili a ioduri; volendo equiparare il flusso emesso da questo tipo di apparecchi a ioduri, con la tecnologia Led, per ogni dispositivo a scarica, ne servirebbero cinque a diodi, per un totale di 60 pezzi: un numero mol-

to elevato e anche difficile da installare.


Per la proiezione di gobos e per la funzione di spotligh, viene utilizzata una seconda testa mobile, rappresentata in tabella 56, equipaggiata con sette Led bianchi ad elevata potenza nominale, come quelli indicati in tabella 55.

Questo tipo di diodo, nonostante la limitata efficienza luminosa, è idoneo per una testa mobile, per via delle ridotte dimensioni e il flusso luminoso piuttosto elevato.

L'apparecchio che lo monta è dotato di iride meccanica, per lo zoom del fascio emesso, una ruota di sei filtri colorati motorizzata, sostituibile con ruote di altrettante mascherine.

A questo punto, con l'installazione di queste due tipologie di teste mobili con caratteristiche

58 CAMBIACOLORI A LED RGB

Sorgenti alloggiare	108 Led	
Potenza nominale (W)	178	
Tensione di alimentazione (V)	240	
Flusso emesso (lm)	5.800	
Peso netto (Kg)	13	
Dimensioni (mm)	570, 310, 190	
Classe di isolamento	2	

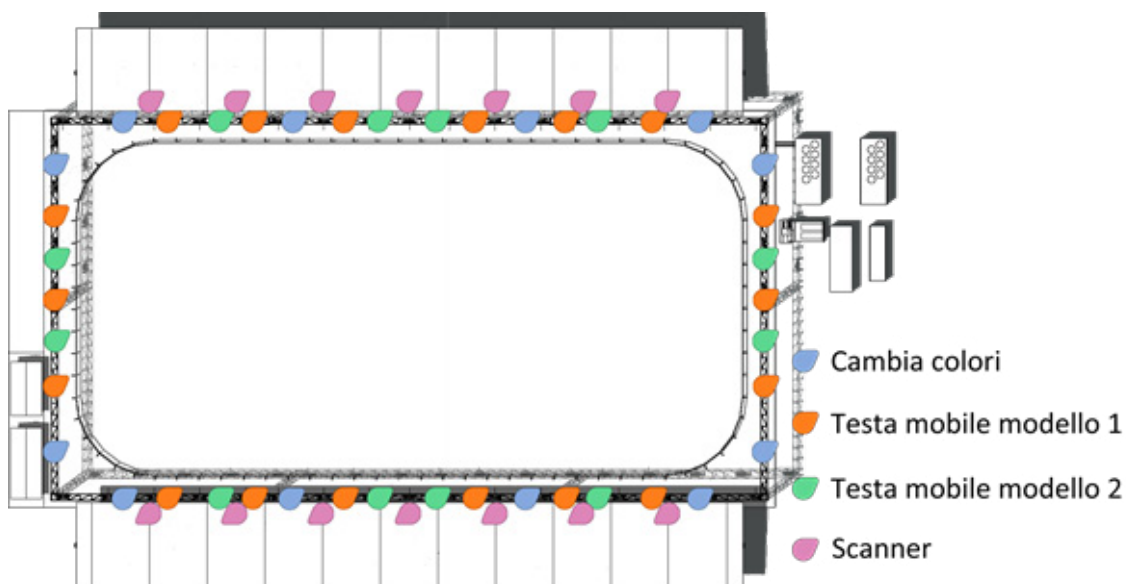


Figura 107: disposizione degli apparecchi per l'illuminazione coreografica nell'impianto a Led

così varie, la presenza di **“scanner”** veri e propri può risultare anche superflua, poiché alcune delle funzioni dello scanner sono svolte dall'ultimo apparecchio analizzato; tuttavia sarà in ogni caso preso in considerazione uno scanner equipaggiato a led.

Come è evidente anche questo apparecchio non è in grado di equiparare il flusso emesso dalla lampada a ioduri, tuttavia è dotato di cambi colore, dimmer, strobo e maschera rotante a 6 gobos, quindi una dotazione di effetti superiore a quella dell'equivalente a tecnologia a scarica. Allo scopo di aumentare il flusso incidente sulla pista è possibile installare apparecchi cambi colore fissi, rappresentati in tabella 58, dotati di tre diversi gruppi da 36 Led indipendenti. Ciascuno dei gruppi può essere orientato diversamente dagli altri e gestito elettronicamente dalla centralina DMX in modo del tutto autonomo. La quantità di flusso emesso dall'impianto a io-

duri metallici è molto difficile da raggiungere con la tecnologia a Led e l'ordine di grandezza del numero di apparecchi da installare sarebbe, come si è visto, proibitivo, superando i 60 pezzi, solo per le teste mobili più potenti.

Per questo, motivo una soluzione ragionevole potrebbe consistere nell'installare un numero di cambi colore fissi intorno alla pista, per garantire varietà cromatica e una buona distribuzione dei flussi, per poi allestire un comparto di scanner e teste mobili sufficiente a garantire dinamismo ed effetti luminosi mobili e rotanti.

Questo tipo di impianto risulterà comunque molto meno potente del suo equivalente a ioduri e non garantirà una uniformità di effetti proiettati sulla pista paragonabile quello di confronto.

Sintetizzando, saranno installati:

- 18 cambiacolori fissi, installati sulla struttura reticolare.
 - 14 scanner, installati alla struttura di supporto della copertura.
 - 12 teste mobili modello 1, installati sulla struttura reticolare.
 - 12 teste mobili modello 2, installati sulla struttura reticolare.
- mento, almeno in questo campo specifico.

In questo modo il flusso installato totale è di 361.600 lm a fronte di 56 apparecchi, contro i 1.088.000 lm per 26 apparecchi dell'impianto di riferimento.

Il consumo energetico, di contro, non è altrettanto vantaggioso, 15.140 W contro 16.200 W installati. Questo dipende dalla limitata potenza emissiva degli apparecchi a Led e dalla scarsa efficienza luminosa delle sorgenti a tecnologia RGB.

Ne consegue che l'impianto sia molto meno efficace, sia dal punto di vista del flusso emesso, sia da quello della potenza assorbita e di conseguenza da quello della qualità generale dell'illuminazione coreografica.

Certamente, la tecnologia a Led è in grado, con una dotazione di apparecchiature inferiore di ottenere un maggior numero di effetti: strobo, regolazione del flusso e variazione di colore non necessitano di parti meccaniche o altri sistemi di controllo, tuttavia l'esito finale è che essa risulti comunque meno valida di quella di riferi-

L'analisi svolta fino a qui ha messo in evidenza le effettive capacità della tecnologia Led allo stato attuale. Le scelte fatte in fase progettuale non erano però finalizzate esclusivamente a dimostrare le capacità emissive dei Led più potenti disponibili oggi, bensì a valutarne le reali prestazioni illuminotecniche in un campo applicativo specifico, da cui trarre conclusioni di più ampio respiro. Queste valutazioni, in ultima analisi, consentiranno di proporre sinteticamente la soluzione a Led più vantaggiosa possibile per questo tipo di applicazione.

Limitare lo studio alla misurazione dei flussi emessi dai Led di potenza di ultima generazione e alla catalogazione delle loro efficienze luminose, per poi confrontarli con quelli delle lampade tradizionali, non sarebbe stato sufficiente per comprenderne l'effettivo avanzamento tecnologico e la reale capacità di affiancare o soppiantare altre più tradizionali sorgenti luminose. Valutare la reale bontà di una tecnologia è possibile unicamente mettendola alla prova, anche se solo attraverso la simulazione del calcolo illuminotecnico informatico.

Tale simulazione è stata eseguita con dati effettivamente disponibili, con sorgenti luminose reali, le cui caratteristiche sono fornite dagli stessi produttori.

L'unica concessione fatta in fase di confronto è stata ipotizzare un apparecchio equipaggiato

con i Led più efficienti disponibili sul mercato, applicandoli a un'ottica realmente esistente, immaginando le eventuali perdite di flusso dovute all'installazione di lenti di precisione, ancora una volta utilizzando valori forniti dalle stesse aziende produttrici.

Tale apparecchio ipotetico è stato poi alimentato con tensioni di corrente standard o più alte, tenendo infine conto delle eventuali perdite di flusso dovute alla temperatura di colore scelta.

Ma tale breve concessione è stata fatta al solo scopo di mettere sul banco di prova la sorgente a Led nella sua espressione massima disponibile fino ad oggi, e di utilizzare i risultati di tale prova per verificare se e quanto, l'avanzamento tecnologico di cui sta godendo i Led in questi anni, faccia di esso la sorgente luminosa del futuro.

Non si pretende in questa sede di dare risposte definitive e neppure di prevedere il futuro sviluppo di questa tecnologia troppo in là nel tempo, ma sarà possibile inquadrare le prospettive prossime di avanzamento e le soluzioni che probabilmente nei prossimi anni si dimostreranno vincenti.

59 CONFRONTO TRA SORGENTI

	Ioduri metallici	Led
dimensioni	17-30 cm	2x2 cm; 3x3 cm
Peso (Kg)	0,187	0,015
Presenza sostanze nocive	mercurio	-
Smaltimento	rifiuti pericolosi	Rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche
Confronto costi al pezzo	100	1
Necessità accessori	-	sì
Emissioni U.V.	integrate al fascio luminoso	opposte al fascio luminoso
Temperature esercizio apparecchi	-40 °C, +50 °C	-40 °C, +55 °C
Tempi accensione	2-10 min, 2-15 min	istantaneo
Spettro temperatura Colore	continuo	Lacuna nel rosso
Resa Cromatica Ra	60 - 90	60 - 90
Potenza Nominale (W)	400 - 2.000	1,15
Flusso emesso	35.000 - 220.000	139
Efficienza luminosa (lm/W)	87-110	132
Durata media (h)	20.000 - 12.000	50.000
Potenza aggiuntiva apparecchi	10%	8%
Rendimento ottico apparecchi	60 - 80%	90% lenti, 50 - 80% apparecchi
Regolazione del flusso	-	sì
Modularità	-	Barre da 20 Led

I. TECNOLOGIA A LED: ANALISI DELLE CARATTERISTICHE

I.1. Caratteristiche tecnologiche, illuminotecniche ed energetiche

In queste pagine saranno nuovamente prese in considerazione le caratteristiche tecnologiche del Led in un confronto diretto con quelle delle lampade a ioduri metallici, sia negli aspetti noti, sia in quelli emersi dagli esiti di progetto.

In tabella 59 sono considerati tutti gli aspetti sensibili delle due sorgenti, a partire dalle dimensioni, allo smaltimento, allo spettro di emissione, fino alle considerazioni illuminotecniche ed energetiche.

In seguito a questo molteplice confronto, emerge che il Led sia una sorgente che a oggi deve la propria fortuna soprattutto alla sua durevolezza, alla sua modularità, alla versatilità e alle ridotte dimensioni, senza contare le innegabili doti di efficienza luminosa delle sorgenti più recenti.

Tuttavia, il vero vantaggio che sta sospingendo il Led a essere la sorgente più utilizzata nei prossimi

mi anni è l'assoluta versatilità, dote che si presta perfettamente a quelle che sono le caratteristiche del mercato attuale e futuro.

In effetti, lo stesso Led di potenza che equipaggia un apparecchio pensato per l'illuminazione di grandi superfici, o per l'illuminazione architettonica, è installato in una torcia elettrica da sub o da speleologia e allestisce i fari d'imbarcazioni e veicoli. Inoltre, dal punto di vista tecnologico e commerciale, per il produttore non vi è la minima differenza, poiché i Led sono venduti sotto forma di nastri arrotolati.

Questa caratteristica è impensabile per qualunque altra sorgente al mondo, ancor di più per quelle a ioduri metallici, che al di fuori delle applicazioni architettoniche non hanno alcuna altra possibilità di utilizzo.

Questa è una caratteristica che non può che determinarne il successo commerciale, ma in questa sede non si cerca di stabilire quali siano le prospettive di questa tecnologia in ambito merceologico.

E' ormai chiaro che il Led non è assolutamente in grado di ottenere prestazioni paragonabili a quelle di una sorgente a ioduri, se non associando un numero enorme di diodi.

E' evidente che questa considerazione, del tutto teorica, non è possibile nella realtà perchè poco pratica; considerando gli apparecchi a Led selezionati per l'impianto di progetto e confrontandoli con quelli a ioduri più potenti dell'impianto di riferimento, si evince che il flusso totale emesso da dodici apparecchi a ioduri (2.640.000 lm) potrebbe essere raggiunto con circa 130 ap-

parecchi a diodi, rendendo la potenza installata del tutto irragionevole: oltre 58 kW contro i circa 25 raggiunti con le lampade tradizionali. Alzando l'ampereaggio da 350 a 525 mA, l'efficienza del Led diminuisce sensibilmente variando di poco la qualità generale dell'impianto.

In sintesi sarebbe necessario un numero di apparecchi a Led di oltre dieci volte superiore, un consumo energetico quasi raddoppiato, e ovviamente dei costi, sia iniziali sia successivi enormemente superiori, nel caso dell'illuminazione funzionale in pista, al massimo livello di attività. E' possibile sintetizzare queste considerazioni in pochi semplici punti, utili a comprendere l'effettiva qualità delle prestazioni degli apparecchi a Led confrontata con quella degli apparecchi a ioduri metallici e traendo le immediate conseguenze che brevi considerazioni determinano. Cominciando dagli aspetti legati alla potenza e al flusso, quindi all'efficienza luminosa, degli apparecchi a Led si può affermare che:

- Non esistono apparecchi a Led in grado di emettere flussi luminosi analoghi a quelli degli apparecchi equipaggiati con le più potenti lampade a ioduri metallici.
- Tecnicamente non è ragionevole realizzare apparecchi a Led in grado di equipaggiare più di 250 diodi circa, ne consegue una limitazione del flusso emesso.
- Un gran numero di Led e i necessari ap-

parati di dissipazione del calore determinano l'aumento delle dimensioni degli apparecchi. Gli apparecchi Led sono comunque più agili di quelli tradizionali.

- Per ottenere flussi molto elevati è necessario installare un numero proibitivo di apparecchi a Led, con conseguente aumento della potenza installata e quindi dei costi.
- Il Led ha efficienze luminose concorrenziali ad amperaggi ridotti, fino a 350 mA, già a 525 mA l'efficienza è di poco superiore a quella delle sorgenti a ioduri metallici più potenti.
- L'aumento dell'intensità di corrente di esercizio riduce l'efficienza luminosa complessiva, aumenta sensibilmente la temperatura di giunzione e riduce la durata del diodo, eliminando così uno dei vantaggi principali della tecnologia a Led rispetto a quelle tradizionali.
- La tecnologia a Led è realmente vantaggiosa, rispetto alle tecnologie tradizionali, fino a che è possibile contenere il numero dei diodi installati. allora la maggiore effi-

cienza luminosa è non solo sensibile, ma anche ben sfruttabile, anche in termini di costi di investimento.

Gli apparecchi in cui i Led sono installati, tecnologicamente non sono dissimili da quelli utilizzati per tutte le altre tecnologie, eccezion fatta per le differenze dovute al tipo di sorgente.

Le componenti elettriche, elettroniche e termiche degli apparecchi a Led sono identiche a quelle degli apparecchi di riferimento, la vera differenza consiste nelle ottiche.

- La durata dei Led è vincolata a quella degli apparecchi in cui sono installati; la sorgente è durevole ma la vita delle parti elettroniche, come gli alimentatori, è del tutto analoga alla vita di quelli presenti negli apparecchi tradizionali; così come è paragonabile il rischio di guasto. La modularità dell'apparecchio scelto riduce questo problema.
- La rottura di un singolo diodo non comporta il guasto dell'intero apparecchio e consente la sostituzione del solo pezzo danneggiato, o di una piccola parte.
- I diodi sono sensibili alle alte temperature e quindi necessitano di ingombranti

dissipatori, perciò gli apparecchi con numerosi Led diventano voluminosi.

- La regolazione del flusso luminoso, consentendo di aumentare e diminuire le emissioni, nonché impostare un programma di risparmio energetico.
- Il Led, a differenza delle sorgenti di riferimento, è la tecnologia ideale per tutte le applicazioni legate all'illuminazione di emergenza e di sicurezza: è possibile utilizzare gli stessi apparecchi funzionali a scopo di emergenza, approfittando dell'accensione istantanea e delle possibili regolazioni del flusso.
- E' virtualmente possibile ottenere curve fotometriche specifiche per ogni tipo di esigenza, grazie a lenti di precisione apposite.
- Il rendimento ottico delle lenti è elevato ma ottenere curve fotometriche specifiche abbassa il rendimento globale dell'apparecchio, riducendo i vantaggi legati alle elevate efficienze luminose del Led. Il rendimento ottico è maggiore per le curve simmetriche.

- Il costo di apparecchi equipaggiati con lampade più emissive a ioduri metallici e con 250 Led è inferiore.

La luce emessa dal Led è molto diversa da quella delle lampade di riferimento; questo aspetto può, di volta in volta, essere un vantaggio o un problema.

- Per alcune applicazioni lo spettro di emissione del Led, avendo una forte lacuna nelle onde appartenenti alla sensazione del rosso, può non essere idoneo.
- Il Led emette calore, come tutte le sorgenti, ma non nella direzione del flusso luminoso, perciò è la sorgente più adatta ad illuminare una pista di ghiaccio.

Conseguentemente è facile comprendere che l'applicazione del Led in ambito sportivo è proibitiva ai livelli di attività più elevati: in primo luogo per via della radicale differenza dalle sorgenti tradizionali: da una parte le lampade a ioduri sono grandi e molto emissive, dall'altro i Led sono molto piccoli e, sebbene abbiano un'elevata efficienza, sono pur sempre alimentati con poco più di un Watt, ne consegue che il flusso non possa che essere molto ridotto.

Il Led dunque non è pronto per sostituire integralmente le sorgenti tradizionali nell'illumina-

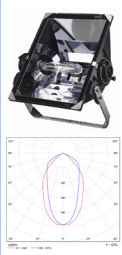
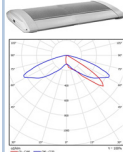
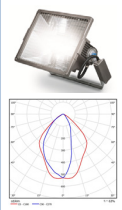
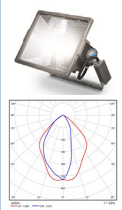
zione d'impianti sportivi, traendone un sicuro e innegabile vantaggio; in realtà si ottengono una durata superiore e un parziale risparmio energetico, ma i costi iniziali e i valori di illuminamento medio a terra sono invece del tutto inadeguati per alcuni livelli di attività: troppo elevati i primi e molto ridotti i secondi.

Il Led consente di illuminare, sempre a costo di installare un cospicuo numero di apparecchi, con gli oneri che ne conseguono, una pista che non abbia la necessità di ospitare competizioni internazionali, ma che si limiti a consentire attività ricreative, o che sia di dimensioni ridotte rispetto a una olimpionica, ottenendo ottimi ri-

sultati per gli standard normativi richiesti.

Nel caso di attività ricreative outdoor il risparmio energetico è molto vantaggioso, pari al 30% circa e la maggiore varietà delle curve fotometriche disponibili, non dipendenti a ottiche reali, permette una migliore distribuzione dei flussi.

L'uso di diodi con potenza assorbita superiore, 20 o 50 W, capaci di flussi luminosi considerevoli, non garantisce prestazioni concorrenziali: come si è visto, questa famiglia di diodi, fino ad oggi, ha avuto una diffusione limitata e gli apparecchi che li alloggiavano ne possono contare un numero esiguo, limitando così il flusso emesso. Basti pensare che, nel caso degli apparecchi

60 CONFRONTO TECNOLOGICO PER LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista outdoor		Ioduri metallici	Led
E_m 100 lx; uniformità di E_m 0,4			
RICREAZIONE		16 apparecchi, 856 W, 70.000 lm Rendimento ottico 62% 13.696 W installati Rendimento impianto 50,7 lm/W E_m 191 lx, uniformità di E_m 0,6	 34 apparecchi, 292 W, 15.360 lm @ 350 mA)(437 W, 19.933 lm @ 525 mA) Rendimento ottico 62% 9.928 W installati (14.858 W @ 525 mA) Rendimento impianto 52,6 lm/W (45,6 lm/W) E_m 167 lx, uniformità di E_m 0,7 @ 350 mA E_m 214 lx, uniformità di E_m 0,7 @ 525 mA
	E_m 300 lx; uniformità di E_m 0,5		
ALLENAMENTO		16 apparecchi, 1.100 W, 93.000 lm Rendimento ottico 63% 17.600 W installati Rendimento impianto 52,41 lm/W E_m 332 lx, uniformità di E_m 0,5	-
	E_m 500 lx; uniformità di E_m 0,6		
AGONISTICA		12 apparecchi, 2.213 W, 220.000 lm Rendimento ottico 62% 26.556 W installati Rendimento impianto 62,62 lm/W E_m 533 lx, uniformità di E_m 0,5	-



multichip a fosforo remoto, descritti durante lo studio delle sorgenti Led disponibili, il blocco che contiene la piastra Led, la lente ai fosfori, l'ottica e l'alimentatore, da solo è grande all'incirca come il dissipatore, il tutto per una potenza assorbita di 18 W per 1.100 lm; è facile immaginare che le dimensioni dei dissipatori necessari ai Led singoli da 50 W siano altrettanto ingombranti. Questo rende impossibile associare numerosi Led di questa potenza, senza tenere conto del fatto che la loro efficienza luminosa non è paragonabile a quella dei diodi da 1 W circa.

La fortuna commerciale del Led, al giorno d'oggi, dipende dalla validità delle prestazioni che è in grado di ottenere in alcuni campi specifici: nell'illuminazione stradale si sta imponendo come la sorgente più efficiente e durevole, nell'illuminazione d'interni ha successo per la versatilità e le ridotte dimensioni.

Vantaggi ulteriori si ottengono nel momento in cui si riesce ad evitare eccessive perdite di flusso legate all'applicazione, tramite lenti di precisione, di ottiche poco efficienti.

In grandi aree, finché gli illuminamenti medi

61 CONFRONTO COSTI di installazione impianto outdoor e oneri manutentivi in pista (attività ricreativa)

		Ioduri metallici	Led
		Attività ricreative	
IMPIANTO		16 apparecchi, 856 W, 70.000 lm 13.696 W installati ricambio lampade ogni 7.000 h	 34 apparecchi, 292 W, 15.360 lm @ 350 mA(437 W, 19.933 lm @ 525 mA) 9.928 W installati (14.858 W @ 525 mA) Durata diodi 50.000 h
		16 apparecchi, 32 lampade • Costo apparecchi: 549x16=8.784 € • Costo lampade: 60x32=1.920 € • Costo totale impianto: 10.704 €	34 apparecchi • 1.100x34=37.400 € • Costo totale impianto: 37.400 €
ESERCIZIO, MANUTENZIONE e SMALTIMENTO	Ore annuali di esercizio: 7hx30ggx6mesi=1.260 h Vita dell'impianto: 25.200 h (20 anni)		
	Costi di esercizio: 0,2 €/kWh • 0,2€x13,696kWx25.200h=69.027,84 €	Costi di esercizio: 0,2 €/kWh • 0,2€x9,928kWx25.200h=50.037,12 €	
	4 sostituzioni lampade: • 60x32x4=7.680 €	Nessuna sostituzione	
	Mano d'opera, 4 lampade all'ora, per 24,33 €/h: • 24,33x32=778,56 €		
	Costi di smaltimento: • 15x34x4=2.040 €	Nessun costo	
	Totale costi: 79.536,4 €	Totale costi: 50.037,12 €	

sono contenuti, o in interni, quindi in aree di superficie piccola o media, qualunque siano gli illuminamenti richiesti, Il Led è in grado di rispondere adeguatamente alle richieste; ma illuminare una grande area con illuminamenti elevati è una sfida che non è ancora in grado di sostenere.

Il Led ha già, in alcune applicazioni, soppiantato le tecnologie tradizionali, come l'illuminazione architettonica di edifici e monumenti, o quella stradale, ambiti nei quali l'illuminamento e l'uniformità richieste hanno valori che il Led è in grado di garantire; l'illuminazione di un campo di gioco però, richiede alti illuminamenti e qui il Led mostra i suoi limiti.

Nel momento in cui saranno sviluppate e rese affidabili piastre multi-diodo, o diodi singoli ad elevata potenza assorbita, la tecnologia Led potrà affacciarsi all'ambito dell'illuminazione sportiva ad alto livello agonistico: non sono adatti, per questo tipo di applicazioni, ingombranti apparecchi da centinaia di Led con le massime efficienze ad oggi disponibili, poiché in un modo o nell'altro, risulterebbero sempre costosi e ne sarebbero necessari troppi.

La maggiore efficienza luminosa permette al Led di superare le prestazioni della tecnologia di riferimento. Una possibile alternativa è che si sviluppino apparecchi capaci di ospitare Led, ad esempio, da 30 W, capaci, fino ad oggi, di flussi luminosi di circa 4.000 lm (133 lm/W). Tuttavia queste tecnologie, per via dell'elevato wattaggio richiedono robusti sistemi di dissipazione del calore, che a oggi rendono impossibile asso-

ciare più diodi nello stesso apparecchio.

Qualora si riuscisse a potenziare le capacità dei dissipatori e collocare più sorgenti dello stesso tipo in un unico apparecchio, Il Led riuscirebbe probabilmente a competere con le sorgenti tradizionali, diventando per efficienza luminosa, versatilità e modularità la soluzione ideale: si otterrebbero apparecchi capaci di flussi prossimi a quelli a ioduri considerati, con un risparmio energetico considerevole.

Tuttavia, questo tipo di soluzioni comincia ora ad affacciarsi sul mercato, restando però ancora ancorata al Led singolo, rimanendo perciò molto adatto esclusivamente per l'illuminazione stradale o d'interni.

In conclusione, il Led singolo da 1,15 W circa non può sostituire le lampade tradizionali ad elevate emissioni, oltre i 100.000 lm, per attività professionali ma è ancora il diodo dotato delle migliori caratteristiche di durata ed efficienza luminosa.

Laddove il flusso di un apparecchio a Led sia paragonabile a quello di una lampada a ioduri, fino a 30.000 lm circa, la maggiore efficienza luminosa, la durata, la resa cromatica, il ventaglio di temperature colore, i tempi di accensione e riaccensione e la luce priva di calore, ne fanno una validissima alternativa per l'illuminazione del ghiaccio e per gli altri sport a livello amatoriale; le cui strutture, sia fisse che temporanee, sono le più diffuse sul territorio.

Tenendo anche conto dei ridotti costi manutentivi e di sostituzione delle lampade, il Led si dimostra ancora più valido per l'illuminazione del-

le attività sportiva materiali, poichè, nel tempo, determina sensibili benefici ambientali.

1.2. Capacità coreografiche

L'analisi fatta fin qui per l'illuminazione funzionale si riflette anche nelle considerazioni valide per l'illuminazione scenografica.

Il limite più grande riscontrato durante l'analisi dell'impianto coreografico è la stessa di quello funzionale: la carenza di flusso uscente, tanto che in questo tipo di applicazione la diffusione dei diodi da 20, 30 o 50 W è cominciata molto prima che nell'ambito funzionale.

Inoltre, mentre nell'illuminazione funzionale si può tollerare che l'apparecchio abbia grandi dimensioni e che le sorgenti siano equipaggiate di lenti singole, nell'illuminazione coreografica, spesso, per la presenza di specchi, mascherine o altro, è necessario che il flusso sia concentrato.

In questo specifico ambito, però, il Led ha anche vantaggi innegabili: la tavolozza dei colori, milioni contro poche unità, la regolazione del flusso e le intermittenze, lo rendono una tecnologia appetibile per molte soluzioni, sebbene le sue caratteristiche emissive non siano molto competitive, specialmente nel caso della tricromia.

Essendo spesso privo di diaframmi meccanici o altre componenti mobili, i Led garantiscono anche meno oneri manutentivi.

In questo campo applicativo specifico, inoltre, il

Led sta proponendo innovazioni di grande interesse come i pannelli a Led o addirittura le tecnologie Oled.

E' ragionevole credere che, a fronte di flussi poco competitivi, le capacità scenografiche, largamente superiori rispetto alle lampade tradizionali, garantiranno un successo crescente a questa tecnologia.

2. IPOTESI DI IMPIANTO IBRIDO A LED E IODURI METALLICI, PER UNA PISTA INDOOR

Dopo tutte le considerazioni fatte, appare evidente che il Led sia in grado di illuminare, da solo una pista di ghiaccio finalizzata alle attività ricreative, con consumi più contenuti rispetto alle tecnologie tradizionali.

La superiore efficienza luminosa del Led rispetto alle migliori lampade a scarica è nota fin dalle analisi preliminari, così come è ormai noto il limite tecnico e pratico di associare centinaia di Led in un unico dispositivo; tutto ciò non implica che sia impossibile sfruttare questa tecnologia con vantaggi considerevoli, in ambiti analoghi a quello qui esaminato.

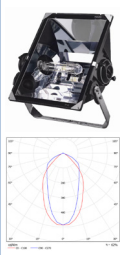
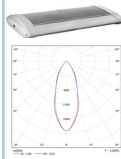
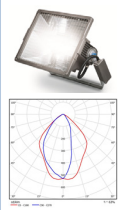
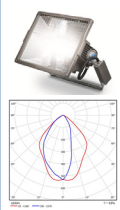
Il caso di studio, scelto per la complessità di realizzazione, è servito a dimostrare i limiti applicativi del Led e delle tecnologie a ioduri ma anche le modalità di utilizzo nelle quali essi sono in grado di rendere al meglio. I crescenti valori d'illuminamento richiesti dai vari livelli di attivi-

tà svolte in pista e le prestazioni raggiunte dalle tecnologie esaminate hanno suggerito il modo migliore per sfruttare entrambe le soluzioni: tecnicamente è più proficuo utilizzare il Led per le attività ricreative, sfruttandone l'elevata efficienza luminosa e la grande durata; Le lampade a ioduri metallici hanno migliori doti di efficienza a potenze elevate, perciò sono più idonee al raggiungimento di alti illuminamenti a terra. La tabella 62 mostra, sinteticamente, gli allestimenti necessari a soddisfare i vari livelli di attività con entrambe le tecnologie per piste indoor. Per le attività ricreative il risparmio energetico è del 40% circa, per le altre il Led è insufficiente a

soddisfare i requisiti richiesti.

È ragionevole, di conseguenza, immaginare un impianto che sfrutti in maniera ibrida i vantaggi di ciascuna tecnologia, nel quale il Led sia deputato all'illuminazione delle attività ricreative e in cui le lampade a ioduri intervengano durante gli allenamenti e le gare professionistici, permettendo anche di eseguire riprese televisive (tabella 63).

Impostando correttamente il numero degli apparecchi di ciascuna tecnologia sarebbe quindi possibile sfruttare i bassi consumi del Led, per la grande maggioranza delle ore di accensione e la potenza della tecnologia a scarica quando siano

62 CONFRONTO TECNOLOGICO PER LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista indoor		Ioduri metallici	Led
E_m 300 lx; uniformità di E_m 0,5			
RICREAZIONE		30 apparecchi, 856 W, 70.000 lm Rendimento ottico 62% 25.680 W installati Rendimento impianto 50,7 lm/W E_m 363 lx, uniformità di E_m 0,7	 48 apparecchi, 292 W, 23.495 lm @ 350 mA Rendimento ottico 75% 14.016 W installati; -40% Rendimento impianto 80,46 lm/W E_m 315 lx, uniformità di E_m 0,7 @ 350 mA
	E_m 500 lx; uniformità di E_m 0,5		
ALLENAMENTO		30 apparecchi, 1.100 W, 93.000 lm Rendimento ottico 63% 33.000 W installati Rendimento impianto 50,7 lm/W E_m 548 lx, uniformità di E_m 0,6	-
	E_m 750 lx; uniformità di E_m 0,7		
AGONISTICA		20 apparecchi, 2.213 W, 220.000 lm Rendimento ottico 63% 44.260 W installati Rendimento impianto 50,7 lm/W E_m 908 lx, uniformità di E_m 0,6	-

necessari alti illuminamenti.











Cercando di ridurre il numero delle sorgenti a scarica si riuscirebbe anche a limitare la proiezione sulla pista di calore, favorendo la conservazione del ghiaccio.

Le condizioni di una pista mobile sono, per via delle possibilità di montaggio degli apparecchi, meno favorevoli a una soluzione del genere; in una pista indoor, tale soluzione ibrida sarebbe di certo più ragionevole e facile da realizzare, approfittando del montaggio a soffitto.

Supponendo di poter installare gli apparecchi sopra la pista, in un reticolo regolare, sarebbe possibile:

- Limitare eventuali rischi di riflessioni disturbanti;
- Favorire una maggiore uniformità degli illuminamenti;
- Selezionare ottiche dotate di rendimenti ottici migliori, sia per il Led sia per gli ioduri metallici; in altre parole la scelta ricadrebbe su curve fotometriche simmetriche.
- Elevare le altezze di montaggio diminuendo il rischio di abbagliamento, escludendo il centro luminoso dal cono ottico de-

63 CONFRONTO IMPIANTI PER LIVELLI DI ATTIVITA' illuminazione della pista indoor

	Ioduri metallici	Ibrido Led/ioduri
	E_m 300 lx; uniformità di E_m 0,5	
RICREAZIONE	 <p>30 apparecchi, 856 W, 70.000 lm Rendimento ottico 62% 25.680 W installati E_m 363 lx, uniformità di E_m 0,7</p>	 <p>48 apparecchi, 292 W, 23.495 lm Rendimento ottico 75% 14.016 W installati; -40% E_m 315 lx, uniformità di E_m 0,7</p>
	E_m 500 lx; uniformità di E_m 0,5	
ALLENAMENTO	 <p>10 apparecchi, 1.100 W, 93.000 lm Rendimento ottico 63%</p>  <p>30 apparecchi, 856 W, 70.000 lm Rendimento ottico 62% 36.680 W installati E_m 617 lx, uniformità di E_m 0,5</p>	 <p>8 apparecchi, 2.029 W, 210.000 lm Rendimento ottico 62%</p>  <p>48 apparecchi, 292 W, 23.495 lm Rendimento ottico 75% 30.248 W installati: -20% E_m 613 lx, uniformità di E_m 0,6</p>
	E_m 750 lx; uniformità di E_m 0,7	
AGONISTICA	 <p>20 apparecchi, 1.100 W, 93.000 lm Rendimento ottico 62%</p>  <p>30 apparecchi, 856 W, 70.000 lm Rendimento ottico 63% 47.680 W installati E_m 790 lx, uniformità di E_m 0,7</p>	 <p>12 apparecchi, 2.029 W, 210.000 lm Rendimento ottico 62%</p>  <p>48 apparecchi, 292 W, 23.495 lm Rendimento ottico 75% 38.364 W installati: -20% E_m 819 lx, uniformità di E_m 0,7</p>

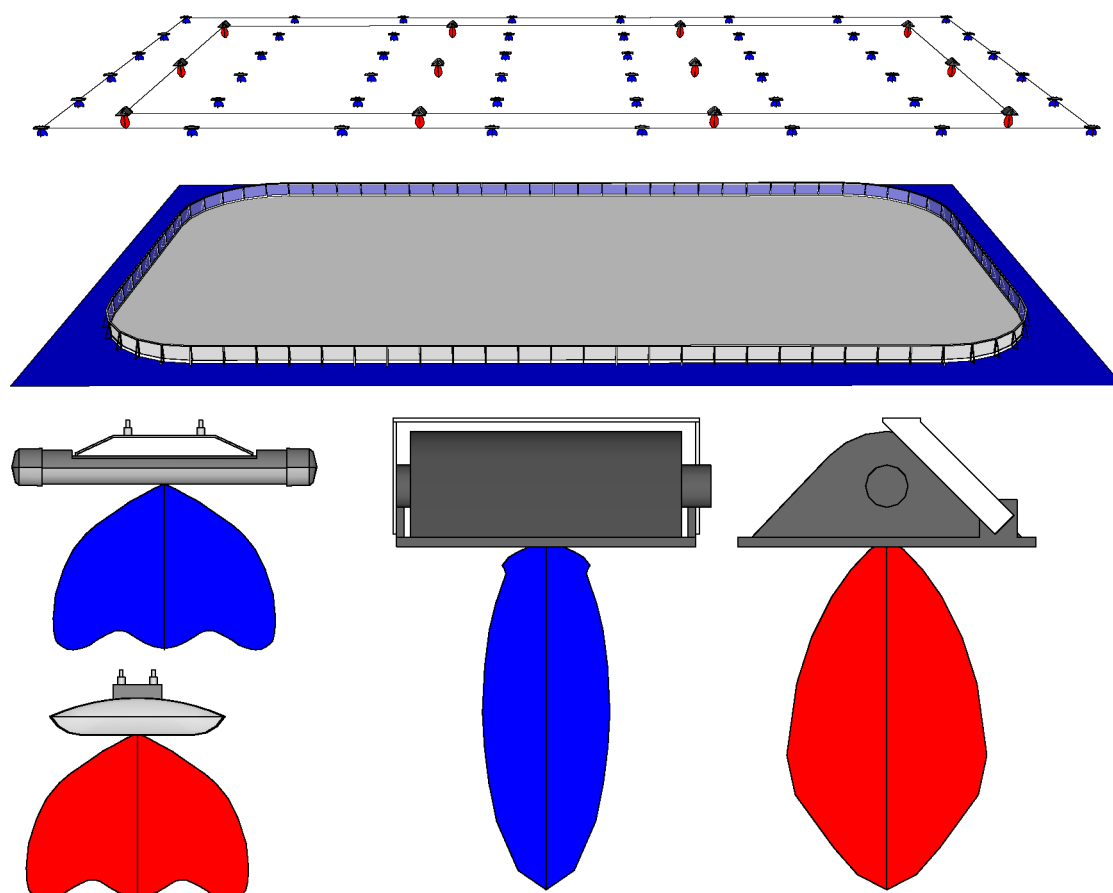


Figura 108: rappresentazione schematica dell'installazione degli apparecchi a Led e a ioduri metallici sopra la pista di ghiaccio indoor. Vista prospettica e apparecchi con curve fotometriche in scala 1:20

gli atleti in pista.

Inoltre, si è verificato che sarebbe più ragionevole far operare i Led a 350 mA, ottenendo maggiore efficienza luminosa e massimizzando la durata; in tal modo si dovrebbe ricorrere ad un numero di apparecchi elevato, limitando però la potenza assorbita.

Se dunque il Led è in grado di garantire gli illuminamenti per le attività ricreative, gli apparecchi a ioduri sono necessari solo a raggiungere gli illuminamenti utili alle competizioni e alle ripre-

se TV; perciò il loro numero può essere ridotto. Tuttavia sarebbero necessari numerosi apparecchi a Led, ma sapendo, dai dati di progetto, che essi assorbono meno di 300 W a 350 mA, contro oltre 2.000 W per quelli a ioduri, la scelta del Led appare conveniente in termini di consumo, anche a fronte di un investimento iniziale elevato.

In una pista indoor, dunque, sarebbe possibile installare, anche a notevole altezza, un reticolo regolare di apparecchi a Led con un'ampia curva fotometrica simmetrica, delle esatte dimensioni della pista, in modo da illuminare anche l'anello

circostante. All'interno del reticolo si disporrebbero poi altri apparecchi, questa volta a ioduri metallici. Utilizzando apparecchi analoghi a quelli usati in precedenza, è possibile realizzare un impianto per l'illuminazione di una pista indoor pensato secondo queste linee guida.

Parlando per prima cosa della tecnologia a Led, si potrebbero installare 48 apparecchi da 240 diodi, dotati di una curva fotometrica come quella rappresentata in tabella 59, ovvero una diffusione simmetrica e ampia. Operando a 350 mA, l'apparecchio consuma 292 W e genera 23.495 lm.

Installando gli apparecchi su 6 file regolari da 8 apparecchi, sarebbe possibile ottenere a terra 315 lx, superiore ai 300 lx richiesti per le attività ricreative indoor, e un'uniformità pari a 0,614, maggiore dello 0,5 richiesto; il tutto per un consumo totale di 14.016 W, di poco superiore a quello necessario alla pista outdoor di progetto. Disponendo alla stessa quota 12 apparecchi a ioduri, da 2.029 W e 210.000 lm, come indicato in tabella 60, in un reticolo ristretto, è possibile, facendoli operare contemporaneamente a quelli a Led, ottenere a terra un illuminamento pari a 830 lx, superiori ai 750 lx richiesti e agli 800 necessari per le riprese TV, aggiungendo un consumo di 24.348 W. La potenza richiesta totale è di 38.364 W; per ottenere un risultato analogo con la sola tecnologia a ioduri sarebbero necessari 20 apparecchi come questi per 40.580 W, con un risparmio di circa 2.000 W.

Quello che più conta, in questa soluzione è la possibilità svolgere tutte le attività ricreative,

con il solo ausilio del Led e con un consumo contenuto, per poi, quando fosse necessario, accendere l'impianto integrativo a ioduri metallici. Il Led inoltre, in caso di necessità può operare a 525 mA, con un aumento del flusso pari al 30%. La presenza del solo impianto a ioduri metallici non avrebbe tale modularità, costringerebbe, nel caso delle attività ricreative, ad accendere solo alcuni dei 20 apparecchi ipotizzati, a scapito dell'uniformità di illuminamento a terra; di conseguenza sarebbe più ragionevole utilizzare apparecchi più piccoli, meno potenti ma più numerosi. In questo modo, sarebbe possibile ottenere illuminamenti analoghi a quelli prodotti dal Led con 28 apparecchi da 856 W e 70.000 lm. La tecnologia a ioduri offre lampade e apparecchi capaci di un ampio ventaglio di potenze e flussi; in questa soluzione ipotetica, in cui l'illuminazione ricreativa è anch'essa affidata alle lampade a ioduri metallici, il consumo totale sarebbe di 23.968 W contro i 14.016 W della controparte a Led, per questo unico livello di attività, richiedendo ancora la presenza di apparecchi più potenti, a scapito del risparmio energetico.

La scelta di un impianto ibrido consente di ottenere una soluzione versatile, capace di operare nel rispetto di tutti i requisiti normativi, fornendo un risparmio energetico sia per le attività ricreative sia per quelle agonistiche, al costo dell'installazione di numerosi apparecchi.

3. LA TECNOLOGIA LED COME ALTERNATIVA TECNOLOGICA E PROSPETTIVE DI SVILUPPO

Dopo aver tratto tutte le conclusioni relative alle prestazioni della tecnologia a Led nell'ambito delle illuminazioni sportive, è possibile dedurre quali siano le prospettive per il futuro in questo campo specifico e, più in generale negli altri.

Ampie superfici e alti illuminamenti saranno probabilmente ottenuti con led a potenze elevati, poiché saranno capaci di limitare il numero delle sorgenti, a patto però di ottimizzare l'efficienza delle sorgenti, la dissipazione del calore e quindi l'affidabilità del diodo, anche se ad oggi questa prospettiva sembra ancora lontana.

Tuttavia il Led e gli alogenuri metallici restano due tecnologie troppo diverse per poter competere a tutto campo in ciascuna delle applicazioni in cui le soluzioni tradizionali sono ancora leader del settore: non è possibile, attualmente, immaginare un diodo singolo paragonabile per potenza e flusso con le lampade a scarica e presumibilmente non lo sarà a breve, per questo motivo il Led dovrà trovare soluzioni alternative per potersi confrontare equamente.

D'altra parte la sua versatilità, la sua durata, la sua robustezza, il costo contenuto, la quantità di materiale necessario alla sua realizzazione, la ricchezza e la resa cromatiche lo rendono una soluzione tecnologica capace di adattarsi a molteplici campi di applicazione, in declinazioni che, momentaneamente, sono persino difficili

da immaginare. Inoltre l'avvento di tecnologie derivate dal Led, come il già citato Oled, aprono orizzonti di grande interesse e inducono a credere che la stessa illuminazione funzionale possa, in un futuro già ragionevolmente vicino, essere completamente integrata con l'illuminazione coreografica, con la proiezione di immagini e filmati, il tutto senza soluzione di continuità. Oggi, però, esistono dei campi applicativi in cui le tecnologie tradizionali sono ancora le più efficienti, campi nei quali le esigenze di illuminamento sono ancora irraggiungibili autonomamente dal Led, in ragione delle sue caratteristiche specifiche e della sua stessa natura.

La soluzione più logica, che integri l'efficienza del Led con la potenza delle lampade a scarica tradizionali, è la coesistenza delle due tecnologie in un singolo impianto, con compiti specifici.

- A. CREMASCHI, Piste di pattinaggio su ghiaccio artificiale, Milano, Elsevier, 1986.
- D. GUTMAN, Ice skating: from axels to Zambonis, New York, Viking, 1995.
- C. SHULMAN, The complete book of figure skating, Champaign, Human Kinetics, 2002.
- J. R. HINES, World Figure Skating Museum and Hall of Fame, Champaign, University Of Illinois Press, 2006.
- R. CASTALDI, A. B. ASHARE, P. J. BISHOP, E. F. HORNBERGER, Safety in ice Hockey third volume, Philadelphia, ASTM International, 2000.
- M. ARNABOLDI, Impianti sportivi, Testo & Immagine, Milano, 2004.
- M. ARNABOLDI, Atlante degli impianti sportivi, Hoepli, Milano, 1982.
- G. BETTETINI, P. BRAGA, A. FUMAGALLI, Le logiche della televisione, Franco Angeli, Roma, 2004.
- T.C. GRENFELL, AND D. K. PEROVICH, Radiation absorption coefficients of polycrystalline ice from 400-1400 nm, in "Journal of Geophysical Research" 86, C8 1981 (Agosto), 7447-7450.
- S. G. WARREN, Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave, in "Applied Optics" 23, 8, 1984 (Aprile), 1206-1225.
- N. H. FLETCHER, The Chemical Physics of Ice, Cambridge, C.U.P. 1970.
- V. F. PETRENKO e R. W. WHITWORTH, Physics of Ice, Oxford, O.U.P. 1999.
- G. DIECKMANN, C. HEMLEBEN, M. SPINDLER, Biogenic and mineral inclusions in a green iceberg from the weddell sea, antarctica in "Polar Biology", 7, 1, 1987, 31-33.
- T. C. GRENFELL, S. G. WARREN, Representation of a nonspherical ice particle by a collection of independent spheres for scattering and absorption of radiation, in "Journal of Geophysical Research", 104, D24, 1999 (Dicembre), 31,697-31,709.
- T. C. GRENFELL, S. P. NESHYBA, S. G. WARREN, Representation of a non-spherical ice particle by a collection of independent spheres for scattering and absorption of radiation: 3. Hollow columns and plates, in "Journal of Geophysical Research", 110, D17203, 2005 (Agosto), 1-15.
- T. C. GRENFELL, A theoretical model of the optical properties of sea ice in the visible and near infrared, in "Journal of Geophysical Research", 88, C14, 1983 (Novembre), 9723-9735.
- R. L. LEE JR, Green icebergs and remote sensing, in "Journal of Optical Society America", A 7, 10,

1990 (Ottobre), 1862–1874.

B. LIGHT, G. A. MAYKUT, T. C. GRENFELL, Effects of temperature on the microstructure of first-year arctic sea ice, in “Journal of Geophysical Research”, 108, C2, 3051, 2003 (Febbraio), 33–1–16.

B. LIGHT, G. A. MAYKUT, T. C. GRENFELL, A temperature-dependent, structural-optical model of first-year sea ice, in “Journal of Geophysical Research”, 109, C06013, 2004 (Giugno), 1–16.

S. P. NESHYBA, T. C. GRENFELL, S. G. WARREN, Representation of a non-spherical ice particle by a collection of independent spheres for scattering and absorption of radiation: 2. Hexagonal columns and plates, in “Journal of Geophysical Research”, 108, D15, 4448, 2003 (Agosto), 6–1–18.

S. G. WARREN, R. E. BRANDT, T. C. GRENFELL, Visible and near-ultraviolet absorption spectrum of ice from transmission of solar radiation into snow. Applied Optics 45, 21, 2006 (Luglio), 5320–5334.

G. R. FOWLES 1989. Introduction to Modern Optics, Dover.

L. MANDEL, E. WOLF, Optical Coherence and Quantum Optics, Cambridge, 1996, C.U.P.

N. BLOEMBERGEN, Nonlinear Optics, Londra,

1996, World Scientific Publishing Company.

G. FEDERICI-VESCOVINI, Le teorie della luce e della visione ottica dal IX al XV secolo: studi sulla prospettiva medievale e altri saggi Storia del pensiero filosofico e scientifico, 2003, Morlacchi Editore.

S. LONGHI, M. NISOLI, R. STAGIRA, S. OSELLAME, Problemi di Elettromagnetismo e Ottica, Milano, 2010, Società Editrice Esculapio.

A. SACCHI, G. CAGLIERIS, Illuminotecnica e acustica, 2. ed. Torino, 1996, UTET.

G. LAURO, Tecnica della illuminazione: richiami di ottica fisica, proprietà fisiologiche dell’occhio e misure della luce, la sensazione visiva e la tecnica dell’illuminazione, del progetto di illuminazione, Milano 1949, Gorlich, Tip. D. Del Bianco e F.

F. BIANCHI, G. PULCINI; con la collaborazione di E. Aliani, Manuale di illuminotecnica, Roma, 1995, Francesco.

G. FORCOLINI, Illuminazione Led, Milano, Hoepli, 1994.

AFE, LED ou lampes en éclairage public. De quoi s’agit-il?, in “Point de vue de l’AFE”, numero 11, 5 ottobre 2009.

S. ONAYGIL, Ö. GÜLER AND E. ERKIN, Led

technologies in road lighting, CIE convention a Budapest of 27-29 May 2009.

L. DI FRAIA (a cura di), *Illuminazione a LED oggi: chimera o realtà?*, convegno del 13 marzo 2009 all' Università di Napoli Federico II.

CSS Street Lighting Project, SL1/2007, Review of the class and quality of street lighting.

CEI EN 62031:2009, Moduli LED per illuminazione generale, Specifiche di sicurezza.

CEI EN 61347-2:2007, Unità di alimentazione di lampada, Parte 2-13: Prescrizioni particolari per unità di alimentazione elettroniche alimentate in corrente continua o in corrente alternata per moduli LED.

UNI EN 13032-1:2005, Luce e illuminazione, Misurazione e presentazione dei dati fotometrici di lampade e apparecchi di illuminazione.

CIE 127:2007, Measurement of LEDs.

Draft IEC 62504, Terms and definitions for LEDs and LED modules in general lighting.

Draft IEC 62560, Self-ballasted LED-lamps for general lighting services >50 V, Safety specifications.

Draft IEC 62612, Self-ballasted LED-lamps for general lighting services >50 V, Performance re-

quirements.

Draft IEC 61341, Method of measurement of centre beam intensity and beamangle(s) of reflector lamps, including LED.

IES LM-79-08, Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products.

CIE TC2-46, CIE/ISO standards on LED intensity measurements.

CIE TC2-50, Measurements of the optical properties of LED clusters and arrays.

CIE TC2-58, Measurements of LED radiance and illuminance.

CIE TC2-63, Optical measurements of high-power LEDs.

CIE TC2-66, Terminology of LEDs and LED assemblies.

G. MONCADA LO GIUDICE, A. DE LIETO VOLLARO, *Illuminotecnica*, Milano, CEA, 2007.

P. PALLADINO, *Lezioni di illuminotecnica*, Milano, Hoepli, 2002.

L. FELLIN, G. FORCOLINI, P. PALLADINO, *Lezioni di Illuminotecnica*, Milano, Tecniche Nuove, 1999.

P. PALLADINO, Manuale di illuminazione, Milano, Tecniche Nuove, 2005.

J. B. MURDOCH, Illumination engineering: from Edison's lamp to the laser, University of Michigan, Visions Communications, 1994.

