

Giuliano Cammarata

# MANUALE DEL BENESSERE AMBIENTALE

L'IEQ: NORME, SOLUZIONI IMPIANTISTICHE,  
PROTOCOLLI DI VERIFICA

© Copyright Legislazione Tecnica 2024

La riproduzione, l'adattamento totale o parziale, la riproduzione con qualsiasi mezzo, nonché la memorizzazione elettronica, sono riservati per tutti i paesi.

---

Finito di stampare nel mese di giugno 2024 da

LOGO SRL

Via Marco Polo, 8 - 35010 - Borgoricco (PD)

---

**Legislazione Tecnica S.r.L.**

00144 Roma, Via dell'Architettura 16

*Servizio Clienti*

Tel. 06/5921743 - Fax 06/5921068

[servizio.clienti@legislazionetecnica.it](mailto:servizio.clienti@legislazionetecnica.it)

*Portale informativo:* [www.legislazionetecnica.it](http://www.legislazionetecnica.it)

*Shop:* [ltshop.legislazionetecnica.it](http://ltshop.legislazionetecnica.it)

I contenuti e le soluzioni tecniche proposte sono espressioni dell'esperienza maturata nel corso degli anni dagli Autori. Esse possono, quindi, soltanto essere fatte proprie dal lettore, o semplicemente rigettate, ed hanno l'intento di indirizzare e supportare il tecnico nella scelta della soluzione che maggiormente si adatta alla situazione oggetto di analisi. Rimane, pertanto, a carico del tecnico la selezione della soluzione da adottare. Il lettore utilizza il contenuto del testo a proprio rischio, ritenendo indenne l'Editore e gli Autori da qualsiasi pretesa risarcitoria.

# INDICE

---

<b>INTRODUZIONE</b> .....	17
<b>SIMBOLI E UNITÀ DI MISURA</b> .....	29

## **PARTE PRIMA LE PROBLEMATICHE DELLA PERCEZIONE SENSORIALE**

<b>CAPITOLO 1 - La percezione sensoriale</b> .....	35
Presentazione .....	35
1.1 I sensi .....	35
1.2 La percezione .....	38
1.2.1 Interpretazione storica della percezione .....	38
1.2.2 La percezione del suono .....	39
1.2.3 La percezione delle immagini .....	40
1.2.4 La percezione olfattiva e tattile .....	40
1.3 L'influenza del senso comune sulla percezione.....	41
1.4 I riferimenti oggettivi delle apparenze sensoriali .....	42
1.5 La capacità di espressione di un giudizio.....	44
<b>CAPITOLO 2 - I sensi e la percezione sensoriale</b> .....	46
Presentazione .....	46
2.1 La percezione soggettiva .....	46
2.2 La realtà condivisa .....	47
2.3 I linguaggi dei sensi.....	48
2.4 La vista .....	48
2.4.1 La percezione visiva .....	50
2.4.2 Sintesi nella visione .....	50
2.4.3 La scena visiva.....	51
2.5 L'udito .....	53
2.5.1 La percezione uditiva .....	54
2.5.2 La scena uditiva .....	54
2.6 L'olfatto .....	55
2.6.1 La percezione olfattiva .....	55
2.7 Il gusto .....	55
2.7.1 La percezione gustativa .....	56
2.8 Il tatto.....	56
2.8.1 La percezione tattile.....	57
2.9 La percezione dello spazio.....	57

2.10	La percezione del tempo .....	59
2.11	Il contenuto semantico nelle percezioni sensoriali .....	60
2.12	La velocità di percezione sensoriale.....	61
2.13	La memoria delle sensazioni .....	63
2.14	L'apparenza percettiva.....	63

**PARTE SECONDA**  
**LE PROBLEMATICHE DEL BENESSERE**  
**E GLI INTORNI DEL BENESSERE**

<b>CAPITOLO 3 - Il benessere dell'uomo .....</b>	<b>67</b>
Presentazione .....	67
3.1 Il benessere nella storia .....	67
3.2 Gli intorni del benessere .....	68
3.2.1 L'intorno termoigrometrico .....	69
3.2.2 L'intorno olfattivo e la qualità dell'aria (IAQ) .....	69
3.2.3 L'intorno acustico .....	70
3.2.4 L'intorno visivo.....	70
3.3 <i>Indoor Environmental Quality</i> (IEQ) .....	70
3.4 Il benessere gustativo .....	72
3.5 Cogenza delle norme per il benessere .....	73
3.6 La verifica del benessere nelle imprese.....	74
3.7 La consapevolezza del diritto al benessere .....	75
3.7.1 Il benessere oggettivo .....	75
3.7.2 Il benessere soggettivo .....	75
3.8 La ricerca del benessere .....	76
3.9 Il costo del benessere .....	76
3.10 L'impatto ambientale del benessere .....	77
3.11 Il comfort termico .....	78
 <b>CAPITOLO 4 - Statistica e benessere .....</b>	 <b>79</b>
Presentazione .....	79
4.1 Importanza della statistica.....	80
4.1.1 Probabilità e frequenza .....	80
4.2 Statistica e normotipo.....	81
4.2.1 La curva di visibilità relativa .....	85
4.2.2 La soglia dell'udito e l'abaco di Fletcher e Munson .....	86
4.2.3 Caratterizzazione della percezione olfattiva .....	89
4.2.4 Caratterizzazione del benessere termoigrometrico .....	90
4.2.4.1 <i>Il mancato rispetto delle condizioni di comfort</i> <i>termoigrometrico</i> .....	94
4.3 L'evoluzione delle normative sul benessere .....	95

<b>CAPITOLO 5 - Il benessere termoigrometrico .....</b>	<b>98</b>
Presentazione .....	98
5.1 Le condizioni di comfort termico in equilibrio .....	99
5.2 La norma UNI EN 7730:2006 .....	99
5.2.1 L'equazione del benessere di Fanger in equilibrio termico... ..	99
5.2.1.1 <i>Perdite di calore attraverso la pelle</i> .....	100
5.2.1.2 <i>Perdite evaporative attraverso la pelle</i> .....	101
5.2.1.3 <i>Perdite per respirazione</i> .....	102
5.2.2 L'equazione del comfort di Fanger .....	102
5.3 Il benessere in regime transitorio .....	110
5.3.1 La regolazione della temperatura corporea .....	111
5.3.2 Voto medio previsto, VMP ( <i>Predicted Mean Vote, PMV</i> ) .....	111
5.3.2.1 <i>Osservazioni sulla temperatura di comfort</i> .....	114
5.3.3 Temperatura operativa .....	114
5.3.4 Proposta di aggiornamento della UNI EN 7730:2006.....	114
5.3.5 Il comfort adattativo.....	119
5.3.6 Accettabilità, soddisfazione e adattamento del comfort termico .....	121
5.3.7 Proposta di revisione della UNI EN 7730:2006 .....	123
5.3.7.1 <i>Proposte di revisione</i> .....	124
5.3.8 Il nuovo diagramma del benessere ASHRAE .....	130
5.4 La classificazione del comfort termico .....	131
5.4.1 Ambienti moderati .....	131
5.4.1.1 <i>Lo standard ASHRAE 55:2013</i> .....	131
5.4.1.2 <i>La norma UNI EN 15251:2006 - Benessere termico adattativo</i> .....	134
5.4.1.3 <i>Categorie raccomandate per edifici riscaldati e raffreddati</i> .....	135
5.4.1.4 <i>Temperature interne per edifici non riscaldati o raffreddati</i> .....	137
5.4.1.5 <i>Il disagio termico locale</i> .....	138
5.4.2 Il nuovo metodo di calcolo ASHRAE 55:2020.....	139
5.4.2.1 <i>Limiti di applicabilità del modello adattativo</i> .....	141
5.4.2.2 <i>Il controllo solare</i> .....	141
5.4.3 Temperature di progetto - UNI TS 11300-1:2014.....	143
5.4.3.1 <i>Osservazioni sui valori di progetto cogenti</i> .....	144
5.4.4 Ambienti severi.....	145
5.4.4.1 <i>La norma ISO 7243 (Indice WBGT)</i> .....	146
5.4.4.2 <i>La metodologia PHS - Valutazione dello stress termico</i> .....	147



7.2.1	Definizione del rumore nella Legge 447/1995 .....	187
7.2.2	Parametri da cui dipende il rumore .....	187
7.2.3	Effetti dannosi del rumore sull'udito .....	188
7.2.4	Descrittori acustici per il rumore.....	189
7.2.5	La Legge quadro 447/1995.....	190
7.2.6	Disposizioni in materia di inquinamento acustico .....	191
7.2.7	Il rumore nel Codice civile.....	191
7.3	Il benessere acustico in relazione al rumore.....	194
7.3.1	I requisiti acustici degli edifici - D.P.C.M. 5 dicembre 1997 ..	195
7.3.2	Considerazioni sui descrittori acustici.....	196
7.3.3	Il rumore prodotto dagli impianti tecnologici .....	198
7.4	Benessere acustico e ascolto dei suoni nelle sale.....	199
7.4.1	Le qualità acustiche secondo L. Beranek .....	199
7.4.2	Le problematiche di una sala musicale .....	200
7.4.3	Le variabili in gioco .....	201
7.4.4	Comportamento ideale di una sala .....	201
7.4.5	Utilizzo dei materiali all'interno della sala .....	202
7.4.6	Distribuzione del livello sonoro .....	202
7.4.7	I principali descrittori acustici .....	203
7.4.8	Le problematiche dei descrittori oggettivi .....	204
7.4.9	Effetti delle onde dirette e delle riflessioni.....	205
7.4.10	Interpretazione uditiva delle riflessioni .....	206
7.4.11	Effetti del riverbero sull'intelligibilità .....	207
7.4.12	Effetti psicoacustici delle riflessioni immediate.....	208
 <b>CAPITOLO 8 - Il benessere visivo .....</b>		<b>210</b>
Presentazione .....		210
8.1	Le problematiche del comfort visivo.....	210
8.1.1	Le principali definizioni .....	211
8.2	Il senso morfologico .....	213
8.3	Il colore .....	215
8.3.1	Le leggi di Grassmann .....	216
8.3.2	Il triangolo del colore - CIE 1931.....	217
	8.3.2.1 <i>Temperatura del colore</i> .....	219
	8.3.2.2 <i>Effetto cromatico e indice di resa cromatica</i> .....	222
8.4	La visione degli oggetti.....	222
8.5	Il benessere visivo con luce artificiale .....	224
8.5.1	Le lampade .....	225
	8.5.1.1 <i>Le lampade a LED</i> .....	226
8.5.2	La norma UNI TS 11826:2021 .....	228
8.5.3	La norma EN 15251:2006.....	229

**PARTE TERZA**  
**GLI IMPIANTI E LE SOLUZIONI PER IL BENESSERE NEGLI EDIFICI**

<b>CAPITOLO 9 - Implicazioni impiantistiche del benessere</b> .....	233
Presentazione .....	233
9.1 Un nuovo approccio progettuale .....	234
9.2 Impianti di climatizzazione e benessere .....	235
9.3 Impianti per la qualità dell'aria.....	236
9.4 Impianti per il benessere acustico.....	237
9.5 Soluzioni impiantistiche per il benessere visivo .....	237
<b>CAPITOLO 10 - Impianti di climatizzazione e benessere</b> .....	238
Presentazione .....	238
10.1 Influenza delle condizioni di benessere termico.....	238
10.2 Norme di riferimento per la progettazione .....	239
10.2.1 Norme italiane.....	239
10.2.2 Alcune norme internazionali .....	239
10.3 Controllo della temperatura ambiente .....	239
10.3.1 Effetto della temperatura media radiante.....	240
10.3.1.1 <i>Pavimenti radianti</i> .....	240
10.3.1.2 <i>Effetto dell'isolamento termico</i> .....	243
10.3.2 Effetto della distribuzione dell'aria negli ambienti.....	243
10.3.2.1 <i>Confronto delle distribuzioni delle temperature con gli impianti</i> .....	246
10.3.2.2 <i>Differenza di temperatura fra testa e piede</i> .....	248
10.3.2.3 <i>Asimmetria radiante</i> .....	248
10.3.2.4 <i>Incidenza dell'asimmetria radiante sulla PD</i> ....	249
10.3.2.5 <i>Discomfort locale per correnti d'aria</i> .....	249
10.3.2.6 <i>Qualità degli impianti – UNI EN 15251:2007</i> ....	250
10.4 Controllo dell'umidità relativa ambiente.....	251
10.4.1 Impianti a tutt'aria.....	252
10.4.1.1 <i>Impianti a tutt'aria con ricircolo</i> .....	253
10.4.2 Impianti a soli fan coil.....	255
10.4.2.1 <i>Impianti misti: aria primaria + fan coil</i> .....	256
10.4.3 Impianti con Ventilazione meccanica controllata .....	259
10.4.3.1 <i>Deumidificazione mediante VMC con altri impianti</i> .....	260
10.4.3.2 <i>Controllo dell'umidità interna mediante VMC</i> ...	261
10.4.3.3 <i>Evitare la formazione delle muffe con la VMC</i> .	262
10.4.3.4 <i>Formazione di muffe con pannelli radianti per raffrescamento</i> .....	263
10.4.3.5 <i>Integrazione dei pavimenti radianti con le VMC</i>	264
10.4.3.6 <i>Possibilità di utilizzo delle VMC in impianti esistenti</i> .....	266

<b>CAPITOLO 11 - Impianti di climatizzazione e controllo della qualità dell'aria</b> .....	268
Presentazione .....	268
11.1 Come realizzare il controllo IAQ.....	268
11.2 Calcolo della portata di ventilazione .....	270
11.2.1 La ventilazione naturale.....	271
11.2.1.1 <i>Calcolo della portata d'aria di ventilazione naturale</i> .....	274
11.2.1.2 <i>Ventilazione naturale attraverso i serramenti</i> ...	275
11.2.1.3 <i>Effetti sulla qualità dell'aria con serramenti a tenuta</i> .....	276
11.2.2 La ventilazione forzata.....	277
11.3 Controllo dell'IAQ mediante filtrazione dell'aria.....	280
11.3.1 La norma UNI EN 779:2012 .....	281
11.3.2 La norma UNI EN 13779:2008 .....	281
11.3.3 La norma UNI EN 10399:2010 .....	282
11.3.4 La norma ISO 16890:2016 .....	283
11.3.5 Filtri assoluti ULPA.....	284
11.3.6 Filtri assoluti HEPA .....	285
11.3.6.1 <i>Tipologia dei filtri HEPA</i> .....	286
11.3.7 Filtri per camere bianche - ISO 14644-1:2015 .....	286
11.3.8 Filtri per blocchi operatori e camere bianche - UNI 11425:2011 .....	287
11.3.9 Filtri a carboni attivi - UNI 10996:2002 .....	288
11.3.10 Filtri elettrostatici - UNI 11254:2007 .....	289
11.4 Controllo della qualità dell'aria per un dato inquinante.....	290
11.5 Controllo della concentrazione di CO <sub>2</sub> negli ambienti .....	292
11.6 IAQ e salubrità dell'aria.....	294
11.6.1 Salubrità dell'aria per la protezione dal contagio virale ...	294
11.6.2 Controllo dal contagio virale da SARS-CoV-2 .....	295
11.6.2.1 <i>Il contagio a breve distanza</i> .....	297
11.6.2.2 <i>Il contagio a grande distanza</i> .....	297
11.6.3 Misure di riduzione del contagio di tipo fisico e biologico	298
11.6.3.1 <i>Le correzioni di Fisk e Nazaroff</i> .....	299
11.6.4 Qualità dell'aria per la CO <sub>2</sub> e sua influenza sui contagi aerei .....	300
11.6.4.1 <i>Il metodo di Rudnick e Milton</i> .....	300
11.6.5 Sistemi attivi di sanificazione delle UTA .....	301
11.6.5.1 <i>Filtri ad alta efficienza</i> .....	303
11.6.5.2 <i>Lampade UV-C semplici ed a ionizzazione</i> .....	304
11.6.5.3 <i>Batterie di scambio</i> .....	306
11.6.5.4 <i>Canali d'aria</i> .....	306





**PARTE QUARTA**  
**PROTOCOLLI DI VERIFICA PER**  
**L'INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY (IEQ)**

<b>CAPITOLO 14 - Verifica sul campo del benessere ambientale .....</b>	<b>391</b>
Presentazione .....	391
14.1 Le verifiche strumentali per l'IEQ.....	391
14.2 Gli strumenti di misura dei parametri di benessere .....	392
14.2.1 Strumenti di misura delle condizioni del comfort termico	392
14.2.2 Strumenti di misura per la verifica della qualità dell'aria (IAQ) .....	395
14.2.3 Strumenti di misura per la verifica del comfort acustico ..	396
14.2.4 Strumenti di misura della temperatura delle pareti .....	399
14.2.5 Strumenti di misura per la verifica del comfort luminoso ..	400
14.2.6 Test di ispezione per la verifica IEQ.....	400
14.3 Verifiche della presenza di muffe, di inquinanti e di parassiti .....	401
14.3.1 Soluzioni per evitare la formazione delle muffe .....	402
14.3.2 Soluzioni di altre problematiche per l'IAQ.....	403
14.3.3 Controllo della presenza di parassiti.....	404
14.4 Quesiti per la verifica statistica delle condizioni di IEQ .....	404
<b>CAPITOLO 15 - Protocolli di verifica dell'IEQ .....</b>	<b>408</b>
Presentazione .....	408
15.1 Esigenza di verifica delle condizioni dell'IEQ .....	408
15.1.1 Verifiche della qualità del benessere ambientale .....	408
15.1.2 Verifica della compatibilità e della sostenibilità ambientale .....	409
15.1.3 Un nuovo paradigma progettuale degli edifici .....	410
15.2 Progetto di norma per uno standard europeo EPDB-IEQ .....	410
15.2.1 Criteri di progetto e dimensionamento.....	411
15.2.2 Edifici senza raffreddamento meccanico .....	411
15.2.3 Qualità dell'aria e tasso di ventilazione.....	413
15.2.4 Umidità .....	416
15.2.5 Illuminazione .....	416
15.2.6 Rumore .....	416
15.2.7 Parametri dell'ambiente interno per il calcolo dell'energia.....	418
15.2.8 Qualità dell'aria interna e ventilazione .....	420
15.2.9 Ventilazione naturale.....	421
15.2.9.1 <i>Valutazione dell'ambiente interno</i> .....	421
15.3 Standard internazionali per la verifica dell'IEQ.....	422
15.3.1 Lo standard FITWEL.....	422
15.3.2 Il protocollo WELL.....	424

15.3.2.1	<i>Differenze e analogie fra WELL e FITWEL</i>	425
15.3.3	Il protocollo BREEAM	425
15.3.4	Il protocollo LEED	425
15.3.4.1	<i>La certificazione LEED</i>	427
15.4	Protocolli nazionali	429
15.4.1	Il protocollo ITACA	429
15.4.1.1	<i>UNI/PdR 13:2015 - Sezione 0: Inquadramento generale</i>	431
15.4.1.2	<i>UNI/PdR 13:2015 - Sezione 1: Edifici residenziali</i>	432
15.4.1.3	<i>Il protocollo ITACA per edifici non residenziali</i>	434
15.5	Panoramica comparativa fra gli standard di verifica	435
15.6	Le nuove figure professionali per i protocolli di verifica	437
15.7	Sviluppi normativi europei per la compatibilità ambientale	437
15.7.1	I piani nazionali per l'efficienza energetica	438
15.7.2	Gli standard minimi per decarbonizzare gli edifici	438
<b>Conclusioni</b>		439
1	Costi per il benessere ambientale	439
1.1	Costi energetici	439
1.2	Costi ambientali	440
2	Rispetto della natura	441
2.1	Cambio del modello di vita	441
3	Applicazione delle norme per il benessere	442
3.1	Verifica delle condizioni di benessere e dell'IEQ	443
4	La coscienza delle condizioni di benessere	443

## APPENDICI

<b>Appendice A - Realtà antropica e fattori di scala</b>	445
Presentazione	445
A.1 Il mondo antropico	446
A.1.1 La misura	446
A.1.2 Fattori di scala e realtà esterna	446
A.2 Realtà microscopica e realtà macroscopica	447
A.3 Leggi della natura	448
A.3.1 Idealizzazione della realtà	449
A.4 Il senso comune	450
A.4.1 Principio di realtà	451
A.4.2 Principio di località	451
A.5 Principi non rispondenti al senso comune	451
A.5.1 Principio di indeterminazione	452

A.6	Percezione della realtà antropica.....	453
A.7	Percezione della realtà non antropica.....	454
	A.7.1 Dualismo onda-particella .....	456
	A.7.2 Principio di sovrapposizione .....	456
	A.7.3 <i>Entanglement</i> quantistico.....	456
A.8	Meccanica quantistica e biologia .....	457
	A.8.1 Fotosintesi.....	457
	A.8.2 Mutazioni del DNA.....	457
	A.8.3 Magnetoricezione.....	457
	A.8.4 Interazione della luce con la retina .....	458
A.9	Percezione sensoriale e qualità percettive.....	459
	A.9.1 Qualità primarie e qualità secondarie .....	459
A.10	Effetto Osservatore.....	459
	A.10.1 La funzione d'onda .....	461
	A.10.2 Interpretazione quantistica della percezione.....	461
	A.10.3 Nuovo esperimento sull'effetto Osservatore .....	462
	A.10.4 Biocentrismo.....	463
	A.10.5 La percezione sensoriale e l'interpretazione quantistica....	463
<b>Appendice B - Richiami di acustica .....</b>		<b>465</b>
	Presentazione .....	465
B.1	Cenni di acustica fisica.....	465
	B.1.1 La celerità del suono.....	465
	B.1.2 Onde piane e onde sferiche.....	467
	B.1.3 Lunghezza d'onda e frequenza.....	467
	B.1.4 Potenza sonora.....	469
	B.1.5 Intensità sonora.....	469
	B.1.6 Toni puri.....	470
	B.1.7 Le armoniche .....	471
	B.1.8 Suoni complessi.....	471
B.2	Acustica fisiologica.....	471
	B.2.1 L'orecchio umano.....	472
	B.2.2 Livelli sonori .....	476
	<i>B.2.2.1 Livello di potenza sonora .....</i>	<i>476</i>
	<i>B.2.2.2 Livello di pressione sonora.....</i>	<i>477</i>
	<i>B.2.2.3 Livello di intensità acustica.....</i>	<i>477</i>
	<i>B.2.2.4 Livello di densità sonora.....</i>	<i>477</i>
	B.2.3 Livelli di pressione ponderati - Le scale fonometriche .....	478
	<i>B.2.3.1 Livello equivalente - Leq .....</i>	<i>478</i>
	B.2.4 Isolamento acustico e potere fonoisolante .....	479
B.3	Riverberazione acustica.....	481
B.4	Cenni di acustica delle sale.....	483
B.5	I descrittori acustici oggettivi .....	487
	B.5.1 Tempo di riverberazione.....	488

B.5.2	Caratteristiche del tempo di riverberazione .....	491
B.5.3	Valori sperimentali dei fattori di assorbimento .....	492
B.5.4	Riflessione e diffusione acustica delle pareti .....	493
B.5.5	Utilizzo dei materiali all'interno della sala .....	494
B.6	Distribuzione del livello sonoro.....	494
B.6.1	Le problematiche dei descrittori oggettivi .....	495
B.7	Nuovo approccio all'acustica delle sale .....	496
B.7.1	Informazioni ottenibili dalla risposta impulsiva.....	498
B.8	Spazio oggettivo e spazio soggettivo di una sala .....	501
<b>Appendice C - Richiami di illuminotecnica .....</b>		<b>503</b>
Presentazione .....		503
C.1	Principali unità di misura illuminotecniche.....	503
C.1.1	Grandezze soggettive e grandezze oggettive .....	503
C.1.1.1	<i>Flusso luminoso</i> .....	504
C.1.1.2	<i>Intensità luminosa</i> .....	505
C.1.1.3	<i>Luminanza</i> .....	507
C.1.1.4	<i>Illuminamento</i> .....	507
C.1.1.5	<i>Radianza</i> .....	508
C.2	Fisiologia dell'occhio .....	509
C.3	Principi della visione.....	511
C.3.1	Adattamento visivo.....	514
C.3.2	Accomodamento .....	514
C.3.3	Contrasto.....	515
C.3.4	Brillanza .....	516
C.3.5	Abbagliamento visivo .....	517
C.3.6	Fattore di resa del contrasto .....	518
C.3.7	Acuità visiva .....	519
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>521</b>



**Pagine non disponibili  
in anteprima**



### 5.3 IL BENESSERE IN REGIME TRANSITORIO

In regime transitorio non si ha più l'equilibrio dei termini di scambio indicati nella [2] ma occorre tenere conto dell'accumulo termico (*storage*), e quindi si ha la nuova equazione:

$$M - (\pm L) \pm E \pm R \pm C = S \quad [19]$$

ove, in aggiunta al simbolismo già evidenziato, si indica con  $S$ , dall'inglese *storage*, l'energia accumulata dal corpo. Nei casi fino ad ora esaminati (condizioni di comfort) si è posto  $S = 0$  e quindi si è supposto sempre valido l'equilibrio termodinamico fra il corpo e l'ambiente esterno.

Al fine di studiare le condizioni transitorie si sono fatte diverse ipotesi di calcolo. Gagge, Fobelets e Berglund (1972) proposero di considerare il corpo umano come la somma di corpi cilindrici sovrapposti e composti, dove:

- a) il cilindro interno rappresenta la massa corporea vera e propria (scheletro, muscoli, organi interni);
- b) il cilindro esterno rappresenta lo strato superficiale del corpo, ossia la pelle.

Il modello di Gagge presuppone alcune ipotesi operative:

- la temperatura di ciascun cilindro è costante e pari a  $t_{cr}$  e  $t_{sk}$  rispettivamente;
- la conduzione attraverso lo strato esterno (pelle) è trascurabile;
- il metabolismo, la produzione di lavoro esterno e le perdite per respirazione sono dovuti al cilindro interno;
- i due cilindri scambiano calore in modo passivo attraverso il contatto diretto e attraverso il sistema di flusso sanguigno controllato dal sistema di termoregolazione.

Il bilancio transitorio che si può scrivere esprime il fatto fisico che l'accumulo termico eguaglia la differenza tra il flusso di calore entrante e quello uscente.

Per il modello a due cilindri si ha, per lo strato interno (*core*):

$$S_{cr} = M - L - (C_{res} + E_{res}) - Q_{cr-sk} \quad [20]$$

e per lo strato esterno (*skin*):

$$S_{sk} = Q_{cr-sk} - (C + R + E_{sk}) \quad [21]$$

Nelle precedenti equazioni si indicano con  $S_{cr}$  e con  $S_{sk}$  gli accumuli termici nel *core* e nella pelle (*skin*), e  $Q_{cr-sk}$  rappresenta il calore trasportato dal *core* verso la pelle (esterna) sia per conduzione attraverso i tessuti corporei che per convezione attraverso il flusso sanguigno. Tutte le grandezze sono espresse in  $W/m^2$ .

### 5.3.1 La regolazione della temperatura corporea

Le temperature ottimali per i due strati (pelle e *core*), dette anche “*neutre*” cioè tali da non richiedere interventi da parte del sistema di termoregolazione, sono state studiate in laboratorio e poste pari ai valori:

$$t_{sk,n} = 33.7^{\circ}C$$

$$t_{cr,n} = 36.8^{\circ}C$$

Il sistema di termoregolazione entra in funzione non appena i termoricettori situati sulla pelle indicano variazioni della temperatura superficiale o interna di qualche decimo di grado centigrado rispetto ai valori neutri.

In particolare, i ricettori hanno funzioni specifiche per misurare le variazioni di temperatura in aumento e in diminuzione (crioricettori).

Al sistema centrale di termoregolazione arrivano cinque segnali che innescano poi i processi di regolazione veri e propri.

Questi segnali sono:

- $W_{sig,cr}$  Segnale di caldo proveniente dal *core*;
- $C_{sig,cr}$  Segnale di freddo proveniente dal *core*;
- $W_{sig,sk}$  Segnale di caldo proveniente dalla pelle;
- $C_{sig,sk}$  Segnale di freddo proveniente dalla pelle;
- $W_{sig,b}$  Segnale di caldo proveniente dall'intero corpo (*body*).

Questi segnali vengono attivati a seconda che la temperatura dello strato interessato salga (reazione al caldo) o scenda (reazione al freddo) rispetto ai valori neutri sopra indicati. Le espressioni di questi segnali dipendono da variabili fisiologiche e non vengono qui riportate.

### 5.3.2 Voto medio previsto, VMP (*Predicted Mean Vote, PMV*)

L'uso dei diagrammi mostrati in precedenza presuppone che le condizioni di comfort possano valere per tutte le persone che occupano un determinato ambiente, ma nella realtà il giudizio di benessere non può affatto considerarsi uniforme.

Il carico termico per unità di area è:

$$L = \frac{M(1-\eta)}{A_D} - 0.3 \left( 57.7 - 0.07 \frac{M}{A_D} (1-\eta) - p_{cl} \right) - 0.42 \left[ \frac{M}{A_D} (1-n) - 58 \right] - 0.0017 \frac{M}{A_D} (58.5 - p_{cl}) - 0.0016(34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} F_{cl} (T_{cl}^4 - T_{mr}^4) - h_c F_{cl} (t_{cl} - t_a) \quad [22]$$

ove  $t_{cl}$  è data dalla risoluzione dell'equazione ricorsiva:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.0275 \frac{M}{A_D} (1 - \eta) - 0.155 I_{cl} \left[ 3.96 \cdot 10^{-8} F_{cl} (T_{cl}^4 - T_{mr}^4) + h_c F_{cl} (t_{cl} - t_a) \right] \quad [23]$$

con  $h_c$  dato dalla [7] e con  $T_{cl}$  e  $T_{mr}$  temperature assolute rispettivamente di  $t_{cl}$  e  $t_{mr}$ . Il carico termico è proporzionale alla fatica fisiologica del meccanismo di termoregolazione, per cui sembra ragionevole assumere che la sensazione termica, per una data attività, sia correlata a tale fatica.

Si può quindi determinare una relazione analitica che lega il Voto medio previsto, VMP, al carico termico  $L$  e all'attività metabolica per unità di area:

$$VMP = f \left( L, \frac{M}{A_D} \right) \quad [24]$$

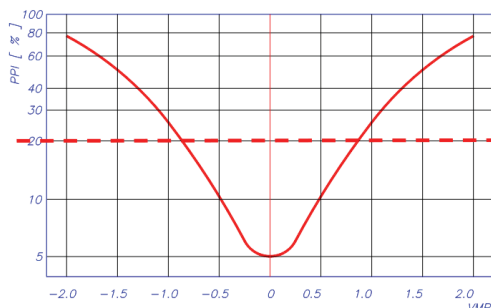
Fanger propone una relazione statistica per il Voto medio previsto in condizioni dinamiche (vedi Tabella 5.4):

$$VMP = (0.0303^{-0.036M} + 0.0275) \cdot L \quad [25]$$

con:  $M$  = metabolismo,  $W/m^2$  ed  $L$  = carico termico,  $W/m^2$ , ricavato dalla [14].

**Tabella 5.4** - Scala dei giudizi del comfort termico

-3	freddo
-2	fresco
-1	leggermente fresco
0	neutro
+1	leggermente caldo
+2	caldo
+3	molto caldo



**Figura 5.4** - Andamento della percentuale di insoddisfatti al variare del VPM

La curva di Figura 5.4, già vista nel capitolo 4, permette di prevedere la percentuale di persone insoddisfatte, PPI, in funzione del voto medio prevedibile, VMP. È opportuno osservare che anche per le condizioni di neutralità ( $VMP = 0$ ) si ha sempre almeno il 5% di insoddisfatti. Le condizioni di benessere, quindi, per quanto ottimizzate non potranno mai essere valide per tutti gli occupanti ma dovranno tendere ad avere il minimo di insoddisfatti.

Nei casi pratici è tollerabile una percentuale di insoddisfatti del 5-7% corrispondente ad un voto medio prevedibile fra -0,35 e 0,35.

In Figura 5.5 si hanno varie curve PPD-VMP al variare della condizione di VMP. Matzarakis, Mayer e Iziomon (1999) hanno riscontrato che la posizione a  $PMV = +0,4$  ( $PPD < 16\%$ ) si è invece spostata rispetto agli esperimenti. de Paula Xavier, Lamberts (2000) e Yoon, Sohn, Cho (1999) hanno mostrato rapporti diversi, riassunti in van Hoof (2008).

L'applicazione di questo approccio alla simulazione degli edifici è semplice, in quanto i sei parametri personali e ambientali, ossia la temperatura media dell'aria, la temperatura media radiante, la velocità media dell'aria (e il grado di turbolenza), l'umidità relativa e il livello di attività e di abbigliamento, sono richiesti come dati di input, rispettivamente.

La procedura di calcolo è definita in dettaglio nella norma EN ISO 7730:2006 e nella norma ASHRAE 55:2004. Le equazioni per la temperatura superficiale e il coefficiente di trasferimento di calore convettivo devono essere risolte iterativamente.

I parametri di isolamento dell'abbigliamento sono riportati nella norma EN ISO 9920:2009, mentre i valori dei tassi metabolici durante le diverse attività sono dettagliati nella norma EN ISO 8996:2021 o nella norma ASHRAE 55:2004.

Per le condizioni previste dalle norme italiane si calcola che il VMP sia pari a -0.87 a cui corrisponde una PPD del 20%, vedi linea tratteggiata in Figura 5.5. Pertanto, le condizioni operative italiane non privilegiano le condizioni di comfort ottimali ma il risparmio energetico. Con  $t = 20\text{ °C}$  e 1 Met di attività occorre un vestiario di 1,5 Clo, cioè bisogna stare in casa ben vestiti e non in abbigliamento leggero.

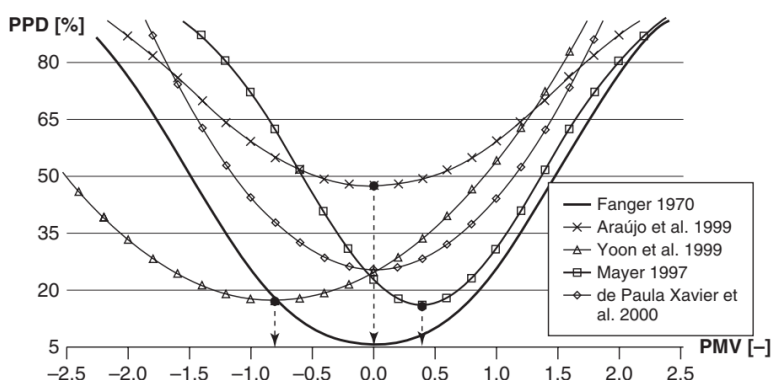


Figura 5.5 - Curve PPD-VMP al variare delle VMP



**Pagine non disponibili  
in anteprima**



È anche importante che il gradiente di temperatura sia graduale e non fortemente variabile.

### 10.3.1 Effetto della temperatura media radiante

La temperatura media radiante può essere calcolata in seconda approssimazione come media delle temperature delle pareti pesate secondo le superfici, cioè mediante la relazione:

$$T_{mr} = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + \dots + T_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

ove si ha:

$T_i$  temperatura della  $i$ -esima parete, K;

$A_i$  superficie della  $i$ -esima parete.

Per impianti di riscaldamento con radiatori o con termoconvettori o con distributori a dislocamento le differenze di temperatura fra le varie pareti sono piccole e tali da avere la condizione ideale:

$$T_a \cong T_{mr}$$

Le superfici calde, ad esempio dei radiatori, sono piccole rispetto a quelle delle pareti e quindi poco influenti. In questo caso valgono gli abachi di Fanger e i diagrammi del benessere ASHRAE, standard 55:2020.

#### 10.3.1.1 Pavimenti radianti

Se si suppone di utilizzare pannelli radianti, pareti o pavimenti o anche soffitti radianti, allora occorre considerare che la superficie del pavimento o del soffitto è 1/6 o più della superficie totale e quindi se la temperatura è elevata, oltre i 40 °C, allora la  $T_{mr}$  si discosta molto da quella dell'aria. Per una stanza cubica e pareti da 4 × 4 m<sup>2</sup> e temperature tutte di 22 °C tranne quella del pavimento a 40 °C si ha:

$$T_{mr} = \frac{16 \cdot 22 \cdot 5 + 40 \cdot 16}{16 \cdot 6} = 25 \text{ °C}$$

Se si portasse la temperatura del pavimento radiante a 50 °C si avrebbe:

$$T_{mr} = \frac{16 \cdot 22 \cdot 5 + 50 \cdot 16}{16 \cdot 6} = 26.7 \text{ °C}$$

Se la temperatura dell'aria è  $T_a = 20\text{ °C}$  la differenza  $T_{mr} - T_a$  crescerebbe molto e le condizioni di comfort richiederebbero un raffrescamento per bilanciare l'effetto della radiazione proveniente dal pavimento radiante.

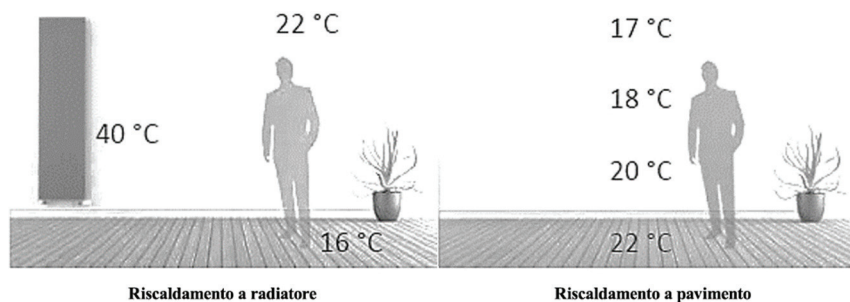
Ecco perché la temperatura superficiale dei pannelli radianti deve essere la più bassa possibile. A compensare quest'esigenza si ha una maggiore superficie del pavimento rispetto a quella di un radiatore o di un termoconvettore. Si ricordi che il flusso termico ceduto da un pavimento radiante è dato dalla relazione:

$$Q = S_p \cdot \Delta T_{pav-aria} \cdot F_c$$

ove:

- $S_p$  superficie del pavimento radiante, m<sup>2</sup>;
- $\Delta T_{pav-aria}$  differenza di temperatura fra la superficie superiore del pavimento radiante e l'aria ambiente, °C;
- $F_c$  fattore correttivo dato dal prodotto di numerosi fattori previsti dalla norma UNI EN 1264:21.

Dal punto di vista del comfort termico la distribuzione della temperatura con i radiatori è del tipo indicato nella parte sinistra di Figura 10.1, mentre quella con riscaldamento a pavimento radiante è del tipo indicato nella parte destra della stessa Figura 10.1.

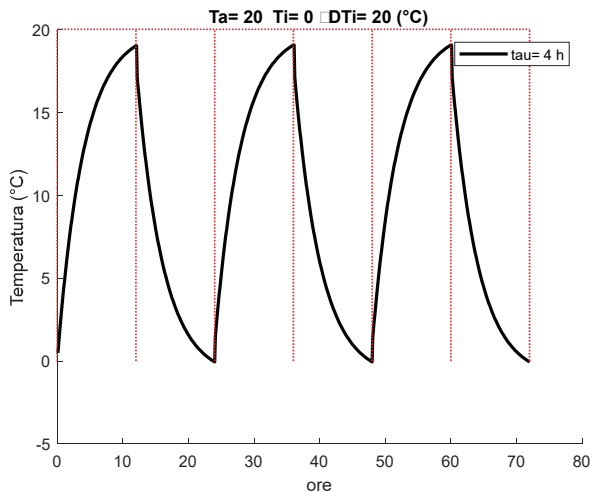


**Figura 10.1** - Gradiente di temperatura con riscaldamento a radiatori e a pavimento radiante

Il riscaldamento a pavimento radiante, e in generale con pannelli radianti, ha alcuni vantaggi così riassumibili:

- miglior diffusione del calore: nel caso di riscaldamento a pavimento la diffusione avviene per irraggiamento (non per convezione come con i termosifoni), fenomeno che garantisce una temperatura quasi costante in tutto l'ambiente;
- compatibilità con le energie rinnovabili: un impianto a termosifoni richiede un riscaldamento che possa portare l'acqua a temperature di 60-70 °C. L'impianto a pavimento lavora a temperature di 29-32 °C e quindi offre una maggiore compatibilità con fonti di energia disponibile a temperature basse, quali caldaie a condensazione (60 °C), pompe di calore (50 °C) e impianti ad energia solare (40 °C).

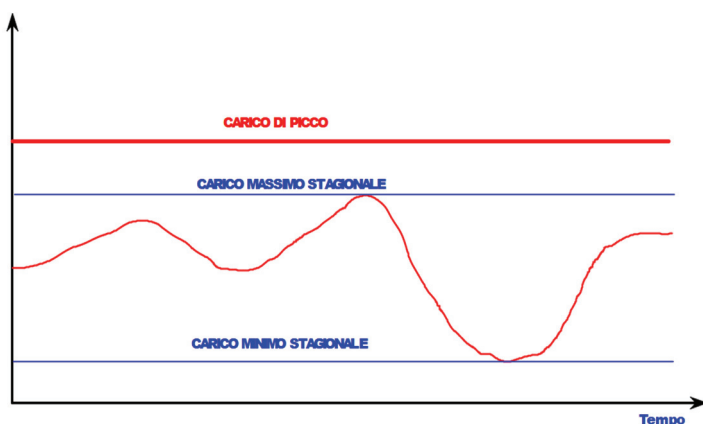
Per contro il pavimento radiante ha una maggiore massa rispetto ai radiatori e quindi un'inerzia più elevata che causa un ritardo nella risposta ai transitori termici, come illustrato in Figura 10.2.



**Figura 10.2** - Transitorio termico per un pavimento radiante

Avere una costante di tempo di oltre due ore comporta un ritardo elevato nella regolazione dell'impianto per le variazioni di temperatura esterna, vedi Figura 10.3.

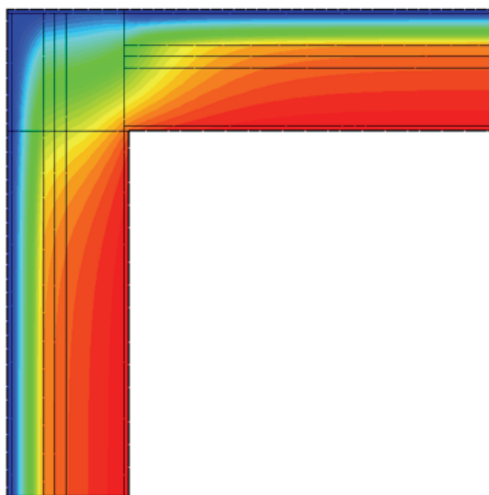
Questo sistema va molto bene nei climi freddi, zona climatica oltre la C, con temperature esterne poco variabili durante il giorno. Per zone climatiche A o B la variabilità della temperatura esterna durante le ore diurne costringe a utilizzare i pavimenti radianti a potenza ridotta per evitare il surriscaldamento ambientale.



**Figura 10.3** - Andamento del carico termico durante il giorno radiante

### 10.3.1.2 Effetto dell'isolamento termico

Le pareti isolate termicamente, specialmente se si utilizza il cappotto termico, hanno superfici interne a temperatura più elevata rispetto alle pareti non isolate: si veda la Figura 10.4 in cui la zona colorata in rosso indica la temperatura più elevata delle superfici interne.



**Figura 10.4** - Effetto dell'isolamento delle pareti

La temperatura radiante con pareti isolate risulta più elevata rispetto al caso di pareti nude e quindi si ha un miglioramento delle condizioni di comfort interno. Si osservi che l'isolante termico è quasi sempre anche un isolante acustico e, pertanto, oltre ai benefici nel comfort termico si hanno anche i benefici nel comfort acustico e, in particolare, per la verifica dei requisiti acustici delle pareti esterne, vedi capitolo 7.

### 10.3.2 Effetto della distribuzione dell'aria negli ambienti

A seconda del tipo di distribuzione dell'aria si ha una conseguente distribuzione della temperatura nell'aria interna con grado di uniformità variabile. Normalmente nei calcoli si considera la temperatura dell'aria a 1,7 m da terra, corrispondente alla posizione della testa delle persone in piedi, e a 1,1 m per persone sedute. Un grado di disuniformità elevata di temperatura fra testa e piedi produce discomfort.

Vediamo alcuni casi impiantistici comuni. In Figura 10.5 si può osservare la distribuzione di temperatura in un ambiente (studio) con riscaldamento a fan coil. Lo stesso ambiente con riscaldamento a dislocamento produce una distribuzione della temperatura



**Pagine non disponibili  
in anteprima**



### 13.4.1 Le fasi progettuali

Elementi insostituibili in fase progettuale sono:

- i destinatari dell'impianto, dei quali è bene conoscere le aspettative e le esigenze;
- i progettisti dello spazio, perché la luce modifica la percezione dei volumi e degli ambienti (interni o esterni che siano) valorizzando o compromettendo non solo l'estetica del luogo, ma anche la funzionalità.

Le fasi di progettazione illuminotecnica sono ovviamente quelle classiche e comuni a tutte le opere:

- preliminare (o di massima);
- definitiva;
- esecutiva;
- costruttiva.

La figura professionale incaricata del vero e proprio impianto di illuminazione artificiale (progetto illuminotecnico) viene talvolta indicata con il termine anglosassone di *lighting designer* e spesso coincide con il progettista degli spazi (tipicamente l'architetto).

Al progettista elettrico vero e proprio è affidato di solito il compito di progettare e dimensionare l'impianto di alimentazione del sistema di illuminazione completo delle protezioni e dei comandi, per la realizzazione della logica di funzionamento desiderata nel rispetto, oltre che dei vincoli di costo, anche dei vincoli normativi di sicurezza e di risparmio energetico.

### 13.4.2 Scelta del tipo di illuminazione

Dopo aver individuato i parametri illuminotecnici da soddisfare nell'ambiente, anche in accordo con le norme e/o leggi in vigore, nonché tutti gli altri vincoli espressi, il passo successivo è la scelta del tipo di illuminazione da realizzare.

Nel rispetto delle norme tecniche, delle leggi e delle raccomandazioni di riferimento, i valori dei parametri di progetto non possono prescindere da considerazioni economiche, di impatto ambientale o semplicemente basate sulla creatività del progettista, caso per caso. Si tratta di una fase cruciale, perché avrà un impatto importante su tutte le fasi successive.

La scelta della sorgente luminosa viene condotta sulla base dei seguenti parametri:

- potenza;
- efficienza luminosa;
- vita media e deprezzamento;
- posizione di funzionamento;
- necessità di accessori ottici supplementari;
- resa e temperatura del colore;
- facilità di manutenzione.

### 13.4.3 Dimensionamento preliminare

Il dimensionamento preliminare di un sistema di illuminazione non può essere condotto se non sulla base, almeno, della verifica delle seguenti prestazioni:

- a) illuminamento;
- b) uniformità;

a loro volta funzione della specifica applicazione e delle esigenze particolari del committente. Con riferimento ad ogni singola situazione vale, comunque, la pena di ricordare che un progetto illuminotecnico di qualità potrebbe dover garantire il rispetto di limiti specifici anche dei seguenti parametri:

- resa cromatica;
- distribuzione delle luminanze;
- abbagliamento;
- direzione e ripartizione della luce;
- colore;
- riflettenza;
- contrasto di luminanza;
- sfarfallamento;
- contributi della luce naturale, che ovviamente dipendono dal tipo di lampada e talvolta anche dal tipo di apparecchio e possono influenzare sia il numero di apparecchi di illuminazione, sia la
- disposizione dei corpi illuminanti e potenza elettrica impegnata.

A livello di progettazione preliminare, la maggior parte delle volte, tuttavia, questi ultimi aspetti possono essere tralasciati e pertanto, per esigenze espositive, non saranno ulteriormente approfonditi.

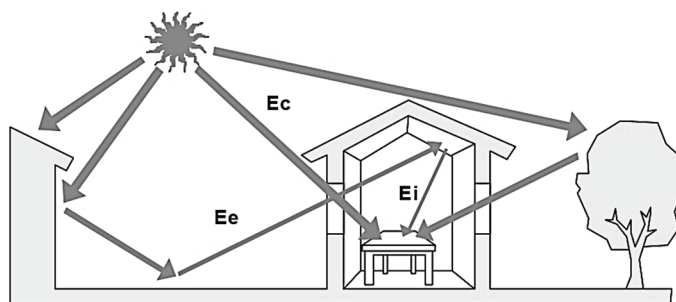
### 13.4.4 Il metodo del flusso totale

Esiste un metodo semplice per il calcolo dell'illuminamento medio, detto metodo del flusso totale, che effettua un calcolo grossolano basato sui valori medi dell'illuminamento.

Si osserva che con l'impiego di questo metodo è possibile definire univocamente solo la potenza totale richiesta per l'impianto di illuminazione e la distanza reciproca degli apparecchi. La stessa potenza, distribuita su un numero di apparecchi diverso, può portare ad un miglioramento o ad un peggioramento del comfort visivo in termini di uniformità.

In particolare, il frazionamento della potenza e l'aumento del numero di apparecchi aumentano il comfort ma incidono anche sui costi dell'impianto elettrico di illuminazione.

L'illuminazione all'interno di ambienti chiusi deve prendere in considerazione diversi fenomeni che avvengono per effetto delle riflessioni dalle pareti, dal soffitto, dal pavimento e dagli stessi oggetti interni, come esemplificato in Figura 13.26.



**Figura 13.26** - Percorsi dei raggi luminosi all'interno di ambienti chiusi

L'effetto delle riflessioni, che trova un'analogia con la riverberazione acustica, non è semplice da calcolare e occorrono sofisticati programmi di calcolo, come si vedrà più avanti.

Il metodo del flusso totale è un calcolo manuale che prevede alcune limitazioni:

- apparecchi installati in maglie regolari e orientati nello stesso modo;
- un solo tipo di apparecchio/fotometria;
- fotometria diffondente.

Si determina il valore del fattore di riflessione per soffitto, pareti e piano di lavoro; nel caso di pareti con fattori di riflessione diversi, deve essere considerata la media ponderata fra questi. Si calcola, quindi, l'indice del locale mediante la formula:

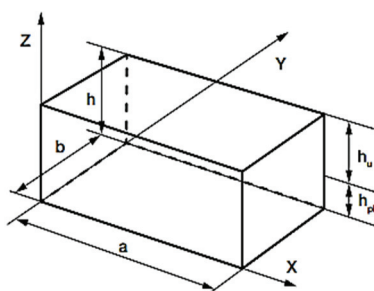
$$K = \frac{a \cdot b}{h_u \cdot (a \cdot b)} \quad [96]$$

dove:

$a$  e  $b$  sono la lunghezza e la larghezza del locale;

$h_u$  è l'altezza utile, ossia la distanza fra il piano di lavoro e l'apparecchio.

Si determina il fattore di utilizzazione  $F_u$  come intersezione, vedi Figura 13.27, della colonna corrispondente ai fattori di riflessione scelti e della riga dell'indice locale calcolato; nel caso non si abbiano valori precisi, si considera la media.



K	873	773	753	731	551	511	311	000
0,6	0,45	0,42	0,34	0,28	0,31	0,24	0,23	0,21
0,8	0,53	0,49	0,41	0,34	0,37	0,29	0,28	0,26
1,0	0,59	0,55	0,47	0,40	0,41	0,34	0,33	0,30
1,3	0,65	0,61	0,53	0,45	0,46	0,39	0,38	0,35
1,5	0,69	0,65	0,58	0,49	0,50	0,43	0,41	0,38
2,0	0,76	0,71	0,65	0,55	0,55	0,49	0,47	0,43
2,5	0,80	0,75	0,69	0,59	0,58	0,53	0,51	0,46
3,0	0,83	0,78	0,73	0,62	0,61	0,56	0,53	0,49
4,0	0,85	0,80	0,76	0,65	0,63	0,59	0,55	0,50
5,0	0,88	0,83	0,79	0,67	0,65	0,61	0,58	0,52

**Figura 13.27** - Calcolo del fattore K

Si determina il valore di illuminamento medio desiderato in funzione della tipologia dell'attività svolta all'interno del locale. Il numero di apparecchi sufficienti per ottenere il valore di illuminamento richiesto si calcola con la seguente espressione:

$$N = \frac{E \cdot A}{\Phi \cdot F_u}$$

ove:

- $N$  numero degli apparecchi;
- $E$  illuminamento richiesto;
- $A$  =  $a \times b$  è l'area considerata;
- $\Phi$  flusso del singolo apparecchio da ricavare dai suoi dati caratteristici;
- $F_u$  fattore di utilizzazione.

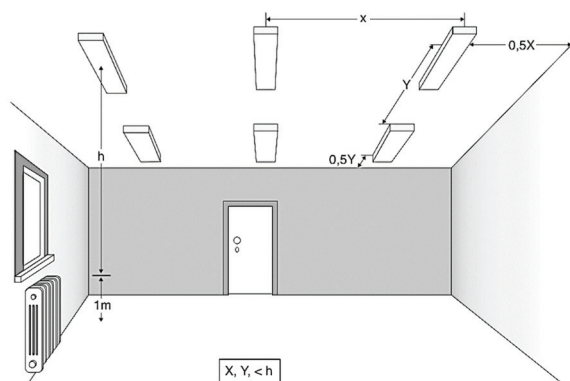
Si osservi come questo metodo sia molto semplificato e può andar bene per calcoli non precisi o per un calcolo illuminotecnico preliminare.

#### 13.4.4.1 Disposizione dei corpi illuminanti

La scelta di quanti apparecchi utilizzare e del loro posizionamento è dettata dall'esigenza di uniformare l'illuminamento in modo che il rapporto fra i lux minimi e i lux massimi non sia inferiore a 0,33.

Utilizzando apparecchiature a fascio largo per illuminazione diretta, semidiretta o diffusa in prima approssimazione si possono applicare le seguenti regole (vedi Figura 13.28):

- a) l'interdistanza fra gli apparecchi non deve essere superiore all'altezza utile (distanza misurata verticalmente tra la sorgente luminosa e il piano di riferimento, che in genere è riferito a 80 cm dal pavimento);
- b) per gli apparecchi periferici la distanza dalla parete riflettente più vicina non deve essere superiore alla metà dell'interdistanza fra gli apparecchi.



**Figura 13.28** - Disposizione dei corpi illuminanti