1. L'Illuminazione Naturale

L'illuminazione naturale è un elemento imprescindibile nella progettazione illuminotecnica. Il contributo di luce naturale deve essere privilegiato, in quanto oltre a benefici di tipo energetico comporta benefici psicologici sulle persone.

Si definisce un ***fattore medio di illuminazione diurna (FLD_m)*** che rappresenta il rapporto tra illuminamento medio dell'ambiente ed illuminamento che si otterrebbe nelle stesse condizioni su una superficie orizzontale esterna che riceve luce dall'intera volta celeste senza irraggiamento diretto.

Il livello di illuminamento da luce naturale in ambienti confinati dipende da:

- località
- orientamento dell'edificio
- orientamento e caratteristiche delle superfici vetrate
- edifici confinanti ed elementi naturali di paesaggio

Vale:

$$FLD_m = \frac{t \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \psi}{S \cdot (1 - r_m)}$$

- ***t*** coefficiente di trasmissione del vetro; si ricava da tabelle (0,80÷0,90)
- ***A (m²)*** superficie trasparente delle finestre
- ***ε*** fattore finestra (tiene conto della posizione e della presenza di ostruzioni), si calcola a mezzo di grafici e tabelle
- ***ψ*** fattore di arretramento della finestra rispetto al filo della facciata dell'edificio (da grafici e tabelle)
- ***S (m²)*** superficie interna dell'ambiente (soffitto, pareti e pavimento, incluso le superfici vetrate)
- r_m fattore medio di riflessione delle superfici interne dell'ambiente (molto variabile, da 0,1 – *mattoni scuri, cemento grezzo* – a 0,8÷0,9 – *intonaco bianco, alluminio*)

I valori ottimali (definiti dalle varie normative) di FLD_m variano da un minimo di 0,7% per aree occupate in modo non continuativo da lavoratori fino a 2% e più.
E' opportuno garantire rapporti maggiori di 0,16 tra ***FLDm*** puntuale minimo e ***FLDm*** puntuale massimo

Alcuni regolamenti parlano di un indice di ***rapporto illuminante (RI)***, molto semplice da calcolare e inteso come rapporto tra la superficie finestrata e la superficie pavimentata di un ambiente.

Tipologia del locale	Dimensione	RI minimo
uffici, sale riunioni, ambulatori, mense, locali di riposo, aule, locali di degenza	-	1/8
locali adibiti ad attività lavorative diverse dalle precedenti, compresi i magazzini e gli archivi, occupati durevolmente da lavoratori	< 1.000 m^2	1/10
	1.000 ÷ 3.000 m^2	1/12
	> 3.000 m^2	1/15
Locali occupati temporaneamente da lavoratori*	-	1/20

* in questi locali può anche essere ammessa una illuminazione naturale ridotta rispetto al RI indicato nei casi in cui vi siano impedimenti tecnici (strutturali e/o vincoli urbanistici) od altri ostacoli che rendono particolarmente complessa la realizzazione di superfici trasparenti.

Alcuni fattori di correzione per RI:

- per superfici a bassa trasmissione (t<0,7) si aumenta la superficie vetrata
- per esclusione di superfici vetrate con h<0,60 m
- per profondità dell'ambiente <2,5 volte h_{max} della superficie vetrata
- per presenza di tettoie, balconi,

Abbagliamento da luce naturale

- luminanza della porzione di cielo inquadrata dalla sup. vetrata
- posizione e dimensione della superficie vetrata
- contrasto di luminanza tra le superfici interne
- presenza di superfici riflettenti

Si utilizza l'indice ***DGI*** (*daylight glare index*) definito dalla UNI 10840:2000.

abbagliamento intollerabile	DGI>28
abbagliamento quasi intollerabile	DGI=28
abbagliamento fastidioso	DGI=26
abbagliamento quasi fastidioso	DGI=24
abbagliamento appena accettabile	DGI=22
abbagliamento accettabile	DGI=20
abbagliamento percepibile	DGI=18
abbagliamento appena percepibile	DGI<16

2. L'Illuminazione Artificiale

La progettazione di in impianto di illuminazione deve essere coerente con le ***caratteristiche dell'ambiente*** (dimensioni, forma, luce naturale, finestrature e loro coefficienti di trasmissione, pareti e pavimento), la sua ***funzione*** (commerciale, produttiva, sanitaria) ed i ***compiti visivi*** degli utilizzatori.
Gli elementi da considerare sono:

- distribuzione delle luminanze
- illuminamento e sua uniformità
- abbagliamento
- resa del colore
- colore apparente della luce

La UNI EN 12464-1:2005 consiglia per i fattori di riflessione:

- soffitto 0,6÷0,9
- pareti 0,3÷0,8
- piani di lavoro 0,2÷0,6
- pavimento 0,1÷0,5

Altri criteri per la ***distribuzione delle luminanze*** sono:

- rapporto minimo 1:3 tra L delle aree imm. circostanti il compito visivo ed L del compito visivo
- rapporto minimo 1:10 tra L delle aree periferiche del campo visivo ed L del compito visivo

Si definisce ***illuminamento medio mantenuto (E_m)*** quel valore di illuminamento medio su una superficie al di sotto del quale non si può scendere (rif. cap. 5.3 della norma UNI EN 12464-1:2004.

Si definisce anche un ***fattore di manutenzione (M)*** come rapporto tra illuminamento medio sul piano di lavoro dopo un dato periodo ed illuminamento medio sullo stesso piano di lavoro ad installazione nuova.

Si dovrà pertanto procedere, per un buon progetto, alla individuazione del valore di illuminamento medio di progetto e dividerlo per il fattore di manutenzione M individuato in base al programma di manutenzione definito dal progettista.

$$\mathbf{E=E_m/M}, \text{ con } \mathbf{M<1}$$

E=20 lux è il livello minimo di illuminamento raccomandato e consente il riconoscimento dei tratti del volto; altri livelli raccomandati sono 30-50-75-100-150-200-300-500-750-1000-1500-2000-3000-5000 lux. In zone occupate continuativamente 200 lux è il valore di illuminamento minimo.

Uniformità dell'illuminamento

Tra area oggetto del compito visivo e area immediatamente circostante (0,5 m), per evitare affaticamento visivo ed abbagliamento

Illuminamento medio nella zona del compito $E_{compito}$ *(lx)*	*Illuminamento minimo nelle zone circostanti* E *(lx)*
>750	500
500	300
300	200
<200	$E_{compito}$

I rapporti tra illuminamento minimo e medio non devono essere comunque inferiori a

- 0,7 nella zona del compito
- 0,5 nelle zone immediatamente circostanti il compito

Abbagliamento

Per la valutazione si utilizza l'indice unificato **UGR** (*Unified Glare Rating*):

$$UGR = 8\log_{10}\left(\frac{0{,}25}{L_b}\sum_i \frac{L_i^{\,2}\omega_i}{p_i^{\,2}}\right)$$

- L_b *(cd/m²)* luminanza di sfondo, calcolata con E_{ind}/π con E_{ind} illuminamento verticale indiretto al livello dell'occhio dell'osservatore
- L_i *(cd/m²)* luminanza delle parti luminose di ogni apparecchio nella direzione dell'occhio dell'osservatore
- ω_i *(sr)* angolo solido della sorgente (i)
- p_i indice di posizione di Guth (funzione della distanza longitudinale tra occhio e piano trasversale della sorgente e della distanza trasversale tra occhio e piano longitudinale della sorgente)

abbagliamento intollerabile	UGR>28
abbagliamento quasi intollerabile	UGR=28
abbagliamento fastidioso	UGR=25
abbagliamento quasi fastidioso	UGR=22
abbagliamento appena accettabile	UGR=19
abbagliamento accettabile	UGR=16
abbagliamento percepibile	UGR=13
abbagliamento appena percepibile	UGR<10

Indice di resa del colore (R_a)

In fase di progetto è importante valutare la capacità delle sorgenti di rendere i colori.
La norma UNI EN 12464-1:2004 al punto 5.3 riporta i valori limite di R_a per diversi ambienti, compiti ed attività.
In nessun ambiente di lavoro vanno utilizzate lampade con R_a inferiore ad 80

Per quanto riguarda indicazioni numeriche sull'illuminamento artificiale il riferimento è la UNI EN 12464-1:2004, che in particolare fissa i seguenti standard:

- E_m illuminamento medio mantenuto, in lm
- Uniformità di illuminamento
- UGR indice unificato di abbagliamento
- R_a indice di resa del colore
- Temperatura di colore della luce

Contrasto

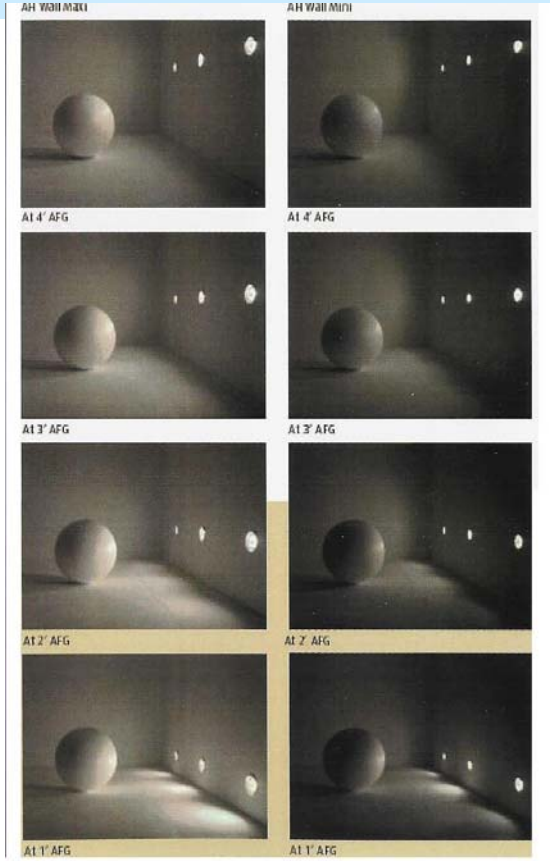
La percezione di un oggetto è funzione del contrasto di luminanza e di colore dell'oggetto e dello sfondo (o di adattamento).

Il contrasto viene espresso dalla relazione $$C = \frac{L_{oggetto} - L_{sfondo}}{L_{sfondo}}$$

Il contrasto è però anche un parametro soggettivo; si definisce quindi una ***sensibilità al contrasto*** dell'osservatore come rapporto tra luminanza dello sfondo e minima luminanza percepibile dall'occhio (parametro soggettivo).

Il ***fattore di resa del contrasto*** (UNI 10380:1994) è il rapporto tra il contrasto C in condizione di illuminazione reali ed il contrasto C_R in condizioni di riferimento (riflessione dello sfondo perfettamente diffusa).
Il valore ottimale del *fattore di resa del contrasto* è non inferiore a 0,7.

4. Contrasto ed Abbagliamento



Abbagliamento

Il fenomeno dell'abbagliamento si presenta come una sensazione molto fastidiosa, in quanto l'occhio viene sollecitato da valori di luminosità che superano quelli limite di adattamento fisiologico.

L'abbagliamento può essere causato da:

- valori eccessivi di luminanza nel campo visivo
- contrasti di luminanza troppo elevati

L'abbagliamento prodotto da una sorgente è funzione:

- della sua luminanza
- della sua dimensione
- della sua posizione nel campo visivo

Abbagliamento

In funzione dell'entità del fenomeno si parla di:

- *abbagliamento debilitante (disability glare)* di tipo fisiologico perché riduce la visibilità e la prestazione visiva; esso può essere:
  - *abbagliamento indiretto* (riflessione speculare di uno o più oggetti che ricevono luce da sorgenti interne o esterne al campo visivo)
  - *abbagliamento diretto* (causato da livelli di illuminamento orizzontale e verticale, luminanza delle sorgenti e loro angolo solido, dimensioni del locale, coefficienti di riflessione di pareti e soffitto, ...)

- *abbagliamento fastidioso (discomfort glare)* di tipo psicologico e che non compromette la visione o la prestazione visiva; è causato da frequenti processi di adattamento (continue variazioni di dimensioni della pupilla)

Metodi di Stima dell'abbagliamento - 1) Curve limite di Luminanza

- *Curve limite di luminanza A e B (metodo CIE)*
  influenza di quattro fattori
  - distribuzione spaziale della luminanza della sorgente
  - geometria del sistema (angolo di osservazione)
  - illuminamento medio orizzontale sul piano di lavoro (h=0,90 m)
  - tipo di sorgente

Il grado di abbagliamento (G) viene valutato numericamente sulla base di una scala da 0 a 6 sulla base del giudizio di un campione di persone che andava da *abbagliamento nullo (G=0)* ad *abbagliamento intollerabile (G=6)*.

La ***curva di luminanza A*** è valida per apparecchi senza bordi laterali (<30 mm), illuminazioni lineari (lungh/largh > 2) bordi lineari luminosi paralleli alla direzione di osservazione
La ***curva di luminanza B*** è valida per apparecchi con bordi laterali

Classi di qualità

A compiti visivi molto difficoltosi

B compiti visivi che richiedono prestazioni visive elevate

C compiti visivi che richiedono prestazioni visive normali

D compiti visivi che richiedono prestazioni visive modeste

E per interni dove le persone sono ubicate in una posizione di lavoro delimitata ma si spostano da un posto all'altro esplicando compiti che richiedono prestazioni visive modeste

Le prime 2 classi sono relative ai lavori di ufficio e richiedono prestazioni visive elevate. Le altre 3 classi sono invece prettamente per civili abitazioni.

Le *Curve limite di luminanza A e B (metodo CIE)* trovano applicazione per:

- interni di forma parallelepipeda
- coefficienti di riflessione 0,7÷0,8 per il soffitto
- coefficienti di riflessione 0,4÷0,6 per le pareti
- coefficienti di riflessione 0,1÷0 per il pavimento

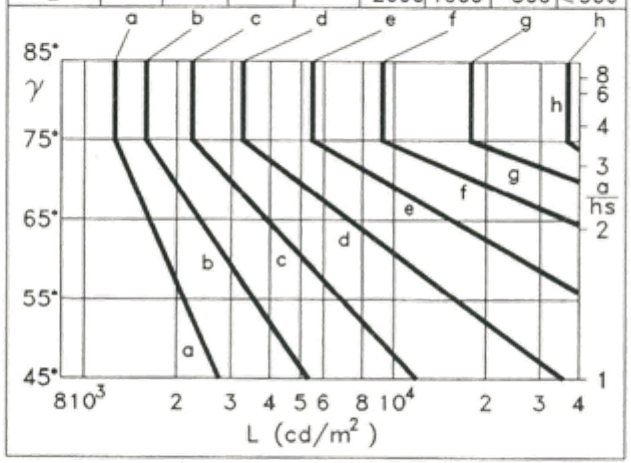
Si determina:

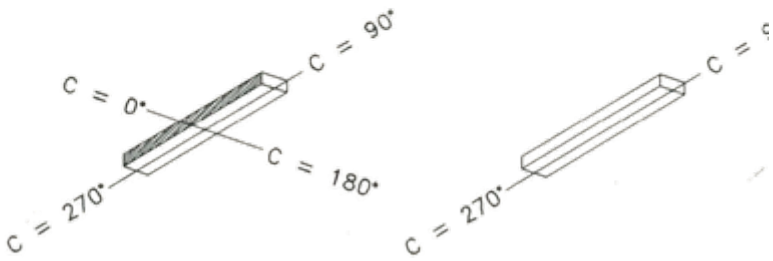
- la classe di qualità in funzione della destinazione d'uso
- il livello di illuminamento medio
- tipo e disposizione degli apparecchi

Si individuano quindi le corrispondenti curve limite *a*, *b*, …, *h* che forniscono il valore massimo di luminanza degli apparecchi in funzione dell'angolo di osservazione γ, ovvero del rapporto a/h_s.

Curva di Luminanza "A"

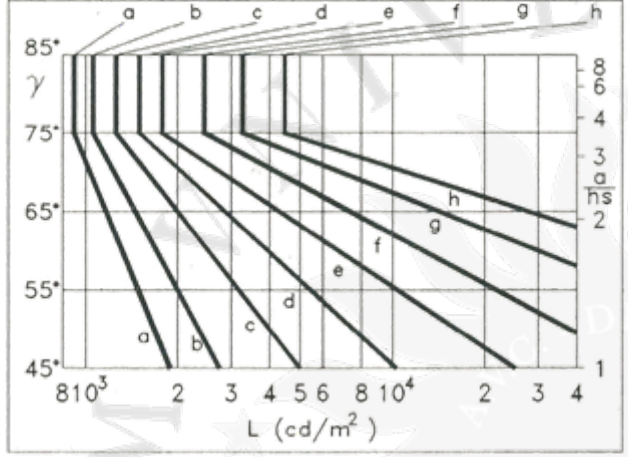
CLASSE	VALORE DI ILLUMINAMENTO (lx)							
A	2000	1000	500	≤ 300				
B		2000	1000	500	≤ 300			
C			2000	1000	500	≤ 300		
D				2000	1000	500	≤ 300	
E					2000	1000	500	≤ 300

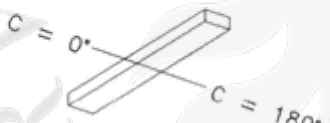




Curva di Luminanza "B"

CLASSE	VALORE DI ILLUMINAMENTO (lx)							
A	2000	1000	500	≤ 300				
B		2000	1000	500	≤ 300			
C			2000	1000	500	≤ 300		
D				2000	1000	500	≤ 300	
E					2000	1000	500	≤ 300





Metodi di Stima dell'abbagliamento - 2) Indice di Abbagliamento (CGI)

Effetti sul comfort visivo della distribuzione delle luminanze (CIE 1983)

L'abbagliamento cresce con dimensioni e numero di sorgenti (aumenta la luminanza del campo ed il limite di adattamento).

CGI varia tra 8÷30; valori consigliati tra 15÷30.

$$CGI = 8 \log \left[2 \frac{1 + \frac{E_d}{500}}{E_d + E_i} \cdot \sum_i \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right]$$

Nell'equazione:

- ***E_d (lx)*** livello di illuminamento diretto sul piano verticale in corrispondenza dell'occhio dell'osservatore
- ***E_i (lx)*** livello di illuminamento indiretto sul piano verticale in corrispondenza dell'occhio dell'osservatore
- ***i*** numero di apparecchi
- ***L_i (cd/m²)*** luminanza degli apparecchi (i)
- ***ω_i (sr)*** angolo solido della sorgente (i)
- ***p*** indice di posizione di Guth (funzione della distanza longitudinale tra occhio e piano trasversale della sorgente e della distanza trasversale tra occhio e piano longitudinale della sorgente)

Metodi di Stima dell'abbagliamento - 3) Visual Comfort Probability (*VCP*)

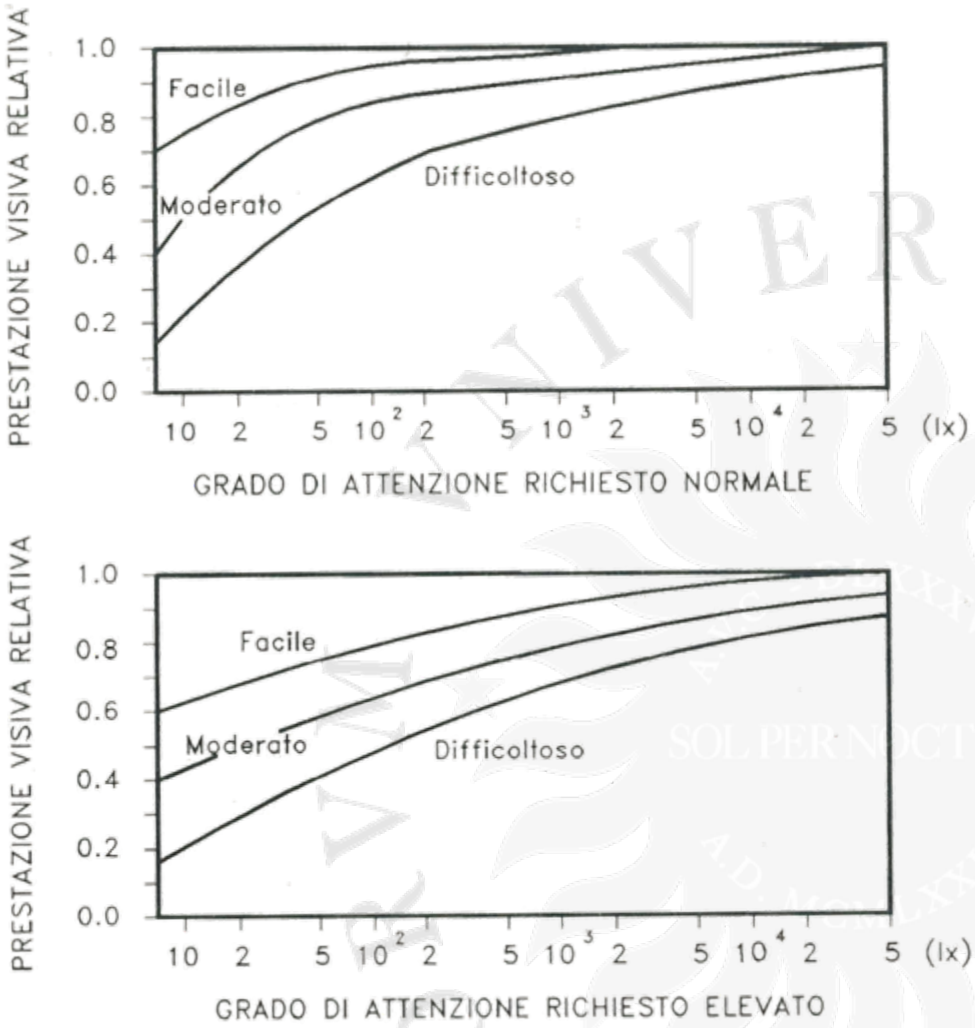
- Il VCP valuta la % di popolazione che giudica il limite tra il benessere visivo ed il fastidio.
- Il VCP considera il problema dell'abbagliamento diretto partendo da dati di una singola sorgente, ed estendendo successivamente a più sorgenti, con algoritmi esponenziali il concetto di disagio.
- L'algoritmo di calcolo è molto complesso ed i dati di ingresso non sempre sono determinabili con sicurezza.

La prestazione visiva

- l'illuminamento è il parametro fisico indicativo della quantità luminosa di un ambiente
- la ***prestazione visiva*** può essere definita come il rapporto tra il lavoro svolto con un dato illuminamento ed il lavoro svolto nella condizione di illuminamento ideale
- si privilegia la quantità di luce che incide sull'oggetto (livello di illuminamento) piuttosto che la quantità di luce emessa (luminanza)

Nei grafici viene riportata l'influenza dell'illuminamento sulla prestazione visiva relativa (rapporto tra lavoro svolto ad un dato illuminamento e lavoro svolto con illuminamento ideale).

Si nota che a partire da una certa soglia un aumento dell'illuminamento non produce un corrispondente aumento della prestazione visiva (le curve sono schiacciate).



La prestazione visiva

È l'attitudine a reagire che una persona manifesta quando i dettagli dell'oggetto della visione (compito visivo) entrano nello spazio di osservazione.
La prestazione visiva è condizionata principalmente da tre aspetti:

- capacità visive del soggetto
  in termini di *acuità visiva* (accomodazione, regolazione della luce incidente, convergenza dell'asse visivo, motilità oculare, senso cromatico, presenza di difetti visivi, adattamento)
- caratteristiche del compito visivo
- caratteristiche dell'ambiente

Le esigenze in termini di illuminazione di un compito visivo aumentano in presenza di compiti visivi difficoltosi (osservazione ravvicinata e prolungata, frequenti cambi di visione, oggetti posti a distanze diverse, ridotto tempo di osservazione). Altri aspetti da considerare per il **COMPITO VISIVO** sono:

1. Luminanza e contrasto di luminanza

la distribuzione delle luminanze influenza l'acuità visiva (nitidezza della visione), la sensibilità al contrasto (discriminazione di piccole differenze di luminanza) l'efficienza dell'apparato visivo (accomodamento, convergenza, contrazioni della pupilla)

2. Colore e contrasto di colore

Dipende dalla luminanza, dalla composizione spettrale della luce e dalle caratteristiche delle superfici osservate

3. Dimensioni, forma e aspetto della superficie

La percezione è influenzata dalla distribuzione della luce (diffusa o concentrata) e dalla presenza di ombre e penombre

4. Posizione del dettaglio nel campo visivo

La resa è massima quando l'immagine si forma nella parte centrale della retina (fovea); la posizione dell'oggetto è quindi fondamentale quando è richiesta la percezione dei dettagli.

5. Movimento e tempo di osservazione

Il movimento di un oggetto è percepito con maggiore sensibilità dalla zona periferica della retina ed induce la rotazione dell'occhio (per riportarlo al centro della retina ed osservarlo con precisione); la precisione dipende dalle dimensioni e forma dell'oggetto in movimento, dalla sua velocità, dalla traiettoria e dal tempo disponibile per l'osservazione.

6. Durata della prestazione legata al compito visivo

Può sorgere fatica visiva che si manifesta con fotofobia, diminuzione dell'acuità visiva, visione sfocata o sdoppiata, difficoltà di accomodazione:ha come conseguenza anche la fatica muscolare (adozione di posture forzate per ridurre la distanza) e la fatica mentale (sforzo di interpretazione di segnali non nitidi, riduzione dell'attenzione e della concentrazione).

L'influenza dell' **AMBIENTE** sulla percezione visiva si manifesta con l'aspetto delle superfici degli oggetti principali (compito visivo, arredi e persone al suo intorno) del suo interno (pareti, soffitti, pavimenti, macchine) e delle sorgenti di luce (naturale – finestre e vetrate) e artificiale:

1. Distribuzione delle luminanze

L'apparato visivo è soggetto ad affaticarsi di più quanto maggiori sono le differenze di luminanza e contrasti elevati possono provocare abbagliamento; mentre luminanze e contrasti bassi danno luogo ad ambienti monotoni e poco stimolanti

2. Illuminamento

Sia in termini di basso che alto illuminamento; valori adottati dalle norme vanno da 20 lux (riconoscimento di un viso in condizioni normali) fino anche a 5000 lux; l'illuminamento dell'ambiente va correlato a quello del compito visivo e degli ambienti comunicanti e non deve presenatre eccessive disuniformità (nel passaggio tra zone a diverso illuminamento si possono determinare abbagliamenti e difficoltà di adattamento visivo)

3. Abbagliamento

Si crea nell'ambiente quando le luminanze non sono correttamente distribuite o i contrasti di luminanza sono eccessivi per la presenza nel campo visivo di sorgenti primarie di luce (abbagliamento diretto) o di superfici riflettenti (abbagliamento indiretto)

- *abbagliamento molesto (disconfort glare)*
- *abbagliamento debilitante (disability glare)*

4. Direzione della luce

Se l'illuminazione è troppo direzionale si generano ombre nette, se invece è diffusa l'assenza di ombre nuoce alla visibilità e rende l'ambiente monotono e sgradevole

5. Aspetti del colore

Inteso come interazione tra luce artificiale, luce naturale e superfici

6. Luce naturale

dimensione ed orientamento dei varchi di luce naturale (porte e finestre)