Física de luz aplicada a la iluminación arquitectónica

La luz en la arquitectura

- En la arquitectura actual existe un uso exagerado de sistemas artificiales y la conceptualización de una arquitectura de geometría vítrea, con paradójicos muros cortina que, en lugar de comunicar con el exterior, crean barreras no practicables.
- Se llega así hasta el punto en que el ambiente interior, teóricamente controlado, resulta frecuentemente más inhabitable que el exterior. Arquitectura entonces que funciona "peor que el clima".

La luz en la arquitectura

- Iluminar naturalmente un edificio es algo más que la solución a un problema de consumo energético o incluso que un recurso estético de fácil incorporación a la arquitectura.
- La luz natural en la arquitectura debe ser un componente más de una filosofía que refleja una actitud más respetuosa y sensible del ser humano frente al medio ambiente en donde vive.

Principios físicos básicos

- Las radiaciones electromagnéticas tienen su origen en variaciones de la estructura atómica de los cuerpos, al producirse alteraciones en la situación orbital de los electrones, que comportan emisión de fotones al regresar aquellos a su posición de equilibrio, eliminándose así la energía sobrante en forma de radiación.
- Se distinguen dos tipos principales de fuentes de radiación visible, las de **descarga y las térmicas,** aunque para el caso de la luz natural nos bastará considerar estas últimas.

Radiación electromagnética

- Las fuentes térmicas emiten radiaciones a causa de la agitación térmica de la materia, caracterizándose por ser continuo el espectro en el campo de longitudes de onda que cubren.
- En condiciones normales las fuentes térmicas emiten sobre todo radiación infrarroja, pero al aumentar la temperatura del emisor, no solo aumenta la cantidad de energía sino que además, el valor máximo de emisión de la misma se desplaza a longitudes de onda más cortas.

Unidades y ecuaciones fundamentales de la luz como energía

- En iluminación se utilizan básicamente cuatro unidades para describir la luz y sus efectos.

Flujo luminoso

- El flujo luminoso mide la cantidad de luz por unidad de tiempo, designado por Φ , tiene como unidad el lúmen (lm).

Intensidad luminosa

- La intensidad luminosa mide el flujo en una dirección determinada, se designa por I y tiene como unidad la candela (cd = lm/estr) (estr: unidad de ángulo sólido en el que la superficie abarcada en una esfera es igual al cuadrado del radio).

Unidades y ecuaciones fundamentales de la luz como energía

- Luminación
- La luminación nos indica la claridad de una superficie emisora para un observador, designado por L tiene como unidad la candela/m2 (cd/m²).
- La iluminancia
- Por último, la iluminancia mide el flujo que llega a una superficie determinada, se designa por E y tiene como unidad el lux (lx = lm/m²)

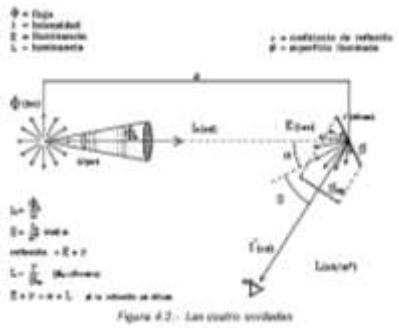

Figura 4.2.- Las cuatro unidades

Ecuaciones

- En cualquier fenómeno lumínico se verifica que, la luz procedente de una fuente emisora puntual, se expande por el espacio y al alejarse del origen la iluminancia que produce sobre una superficie decrece en razón al cuadrado de la distancia. Igualmente, si la superficie no es ortogonal al rayo incidente, la iluminancia decrece según el coseno del ángulo de desviación, de esta forma resulta:
- **E = (I d ²)cos α**
- En el caso de la radiación solar directa, dada la gran distancia del foco emisor, la variación de distancia a nivel terrestre resulta despreciable y los rayos se consideran paralelos, lo que significa que
- **E = I cos α**

El espectro visible

- La luz no transporta únicamente energía sinó que también tiene color, que es consecuencia del reparto de energía en las diferentes longitudes de onda del espectro visible, correspondiendo un color específico a cada longitud de onda, según los colores del arco iris.
- La luz solar cubre todas las zonas del espectro y muchas veces nos referimos a ella como "luz blanca".
- En el campo de la luminotecnia se utilizan unidades específicas para indicar las características cromáticas de la luz, así:

La temperatura de color

- (Tc) expresa el color de una fuente de luz por comparación con el de la luz emitido por el cuerpo negro a una temperatura absoluta determinada, su unidad es el Kelvin (K).
- Como el cuerpo negro cambia de espectro según la temperatura, hacia los 3000 K la luz es rojiza, hacia los 5.000 se compensa la distribución y a mayor temperatura es azulada.
- Se define la Tc como la temperatura a la que se debe calentar el cuerpo negro para que la luz que emite sea de color similar a la luz que se pretende valorar.
- En el caso de la luz natural vemos que sus temperaturas de color son del orden de 6000 - 6500 K, coherentes con las reales de la superficie que emite esta luz (corona solar).

El índice de rendimiento de color

- El **índice de rendimiento de color** expresa la capacidad reproductora de una luz sobre el color de los objetos que ilumina se denomina IRC y se expresa en %.
- Como para tener una buena reproducción cromática la luz ha de tener energía en todas las longitudes de onda, este es el caso de la luz solar, por otro lado aquella a la que estamos más acostumbrados, en la práctica el IRC de la luz natural es del 100%.

La luz y los límites del espacio

- Reflexión- Transmisión- Absorción
- La luz se propaga por el espacio a una velocidad que a efectos arquitectónicos, podemos considerar instantánea, pero al encontrar un obstáculo material se refleja en parte, otra parte es absorbida por la superficie (transformándose en calor) y puede ocurrir que una parte se transmita al otro lado del obstáculo.

La luz y los límites del espacio

- Los coeficientes de reflexión (r), de absorción (a) y de transmisión (t) nos informan, respectivamente, del tanto por uno de la luz incidente que es reflejada, absorbida y transmitida por una superficie dada.
- La suma de los tres coeficientes siempre valdrá la unidad:

$$r + a + t = 1$$

La luz y los límites del espacio

- Como la energía puede reflejarse cualitativamente de forma distinta según el tipo de superficie, consideramos desde el punto de vista espectral y desde el punto geométrico los diferentes tipos posibles.
- a) Desde el punto de vista espectral las superficies pueden tener comportamientos distintos para las distintas longitudes de onda dentro del espacio visible.
- De esta forma la luz natural puede adquirir coloraciones diversas al reflejarse o ser transmitidas por superficies de color.

La luz y los límites del espacio

- b) Desde el punto de vista geométrico, el acabado y la estructura interna de los cuerpos puede variar la geometría de la transmisión o reflexión.
- Siempre que las irregularidades materiales sean de un orden de magnitud similar a la longitud de onda de la luz se producirá una difusión de la luz, y si estas irregularidades son mucho menores se producirá una reflexión o transmisión regular, sin modificación de la geometría de la luz incidente.
- En la práctica se pueden distinguir tres tipos básicos de comportamiento geométrico.

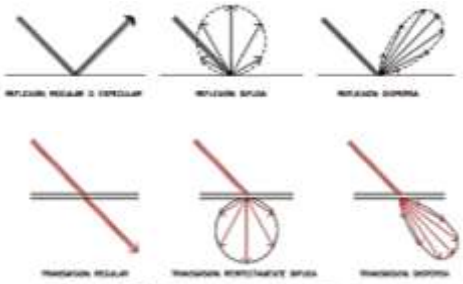

Figura 4.4 - Reflexión y transmisión. Comportamiento geométrico

La luz y los límites del espacio

- Como la longitud de onda de las radiaciones lumínicas es muy pequeña, la mayor parte de las superficies con las que trabajamos en arquitectura presentan reflexiones de tipo difuso y no son atravesadas por la luz.
- Únicamente las superficies muy pulidas y las de estructura interna molecular ordenada (cristales), tienen un comportamiento regular a la reflexión y transmisión.

La luz y los límites del espacio

- En el caso de la reflexión o transmisión difusas, la distribución resultante de la luz es tal que la luminancia L de la superficie, observada desde cualquier dirección, es constante y tiene el valor:
- $L = (Er)/\pi$ Transmisión perfectamente difusa
- $L = (Et)/\pi$ Transmisión dispersa

La luz y los límites del espacio

- En la arquitectura, donde la mayor parte de las superficies tienen reflexión difusa, este comportamiento tiende a que la luz natural se reparta más uniformemente por los espacios interiores.
- Las superficies con reflexión regular (o especular) pueden ser útiles para reflejar la luz y especialmente la radiación directa del sol, hacia direcciones específicas que resulten más convenientes.
- Igualmente, las superficies transmisoras son normalmente regulares o transparentes, por lo que permiten la entrada de los rayos directos del sol sin variar su geometría y a la vez la visión a su través, efecto normalmente favorable.

Fisiología de la visión

- El sentido de la vista se basa en el funcionamiento de un órgano tan especializado como es el ojo. Este órgano tiene la pupila, que regula la cantidad de luz que penetra en el ojo mediante una abertura regulable en proporción superficial de 1 a 16.
- Cuanto más cerrada está la pupila menos cantidad de energía penetra pero la visión es más nítida y con mayor profundidad de campo. El cristalino es la lente que regula el enfoque con la deformación hasta la visión próxima con deformación máxima.

Fisiología de la visión

- Desde el cristalino, la luz atraviesa el cuerpo vítreo que rellena el globo ocular, hasta incidir en la retina, donde se forman las imágenes enfocadas por el cristalino.
- Esta retina es una partícula, sensible a la cantidad de luz mediante unas células llamadas "bastoncillos" y a la cantidad y el color (longitud de onda) de la luz mediante otras células denominadas "conos".
- En el centro de la misma, una pequeña concavidad llamada fóvea contiene solo conos de pequeño tamaño y muy apretados, que proporcionan la zona de visión nítida.

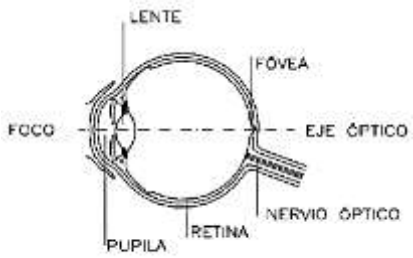

Figura 4.5.- Estructura del ojo humano

Fisiología de la visión

- El ojo humano responde a la cantidad de energía que recibe con sensaciones que no responden linealmente al estímulo.
- Como sucede con los restantes sentidos humanos la visión sigue una ley aproximadamente logarítmica según la cual incrementos iguales del estímulo no suponen incrementos de sensación iguales, sino que estos últimos son menores cuando los niveles de energía son altos que cuando son bajos.
- De esta forma:

Fisiología de la visión

$$S = K \log E + B$$

Donde:

S sensación

E estímulo

B y K constantes

Fisiología de la visión

- Este tipo de reacción permite a los sentidos humanos abarcar campos más amplios de niveles de energía, pero supone que al evaluar los efectos de la luz un incremento determinado tiene distinto valor según el nivel de que se parte.
- De esta forma un incremento de una abertura de iluminación en un espacio de 1 m^2, si previamente existía 1 m^2 de abertura se acusa mucho, en cambio un incremento de 1 m^2 en un local con 10 m2 de abertura se nota muy poco como sensación de aumento de luz en el espacio.

Fisiología de la visión

- Además de este mecanismo sensorial básico, la vista tiene capacidad para adaptarse a distintos niveles energéticos con otros sistemas.
- Ya hemos visto como la pupila variaba la superficie de entrada de la luz en una relación de 1 a 16 con un mecanismo de tipo retroactivo.
- Por otro lado las células de la retina trabajan en campos diversos, los bastoncillos son los únicos con luminancias inferiores a 10 cd/m^2, como los conos lo son por encima de las 300 cd/m^2 y entre ambos límites trabajan conjuntamente los dos tipos de células.

Fisiología de la visión

- Con los conos existe visión del color y la máxima sensibilidad corresponde al color amarillo- verdoso, reduciéndose esta sensibilidad hacia los dos límites del espectro hasta anularse.
- Esta visión con los conos se denomina fotópica.
- En la visión con los bastoncillos, denominada escotópica, no existe apreciación del color y el máximo de sensibilidad se sitúa en una zona de menor longitud de onda.

La curva de sensibilidad del ojo con visión fotópica sirve de base para definir las unidades que veíamos en el apartado
El flujo luminoso resulta de afectar el flujo total radiante por el coeficiente de sensibilidad del ojo para cada longitud de onda.

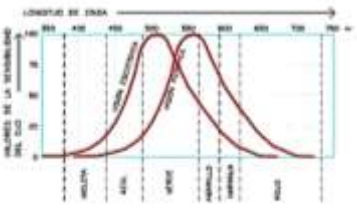

Figura 4.6.- Curva de sensibilidad del ojo humano

Fisiología de la visión

- Sensibilidad temporal de la visión
- En general los sentidos humanos tienden a adaptarse a los estímulos constantes y a sensibilizarse de acuerdo con los valores energéticos medios de su campo de percepción.
- Para adaptarse a un cambio de las condiciones de luminancia media del campo visual el ojo necesita un período de tiempo, variable según se trate del paso de la luz a oscuridad o del caso inverso.

Fisiología de la visión

- Sensibilidad temporal de la visión
- En general se consideran necesarios más de 30 minutos para una buena adaptación de la luz a la oscuridad y únicamente unos 30 segundos para el paso de la oscuridad a la luz.
- En realidad se debería considerar que son curvas de adaptación de tipo logarítmico, con respuesta rápida al principio y más lenta a medida que pasa el tiempo. Para una perfecta adaptación de la luz a la oscuridad deben pasar horas, pero los primeros instantes son los más importantes.

Fisiología de la visión

- En el diseño arquitectónico es importante este fenómeno, teniendo sobre todo en cuenta que la percepción correcta depende más del equilibrio de luminancias en el campo visual que del nivel absoluto, ya que la visión tiene capacidad de adaptación en un campo amplísimo de energías, con rendimiento correcto desde luminancias medias del orden de 50 cd/m² hasta 25.000 cd/m ².
- Por este motivo muchas veces es más importante que en los espacios arquitectónicos el usuario en movimiento puede adaptarse paulatinamente a los niveles que va encontrando, que el valor absoluto de estos niveles.

Fisiología de la visión

- La percepción espacial del ojo humano
- El ojo humano tiene un campo visual aproximadamente semiesférico (2π estereorradianes), con un ángulo sólido central de pequeña amplitud de visión precisa, correspondiente a la situación de la córnea en la retina.
- Hacia los bordes del campo visual la visión se hace borrosa, perdiéndose rápidamente la percepción de las formas y conservándose mejor la de los movimientos.
- Normalmente nuestros ojos están en constante movimiento, saltando la visión precisa de una a otra zona del campo visual que se controla globalmente con la periferia de la retina.

Fisiología de la visión

- La percepción espacial del ojo humano
- El movimiento de la cabeza complementa las posibilidades de percepción visual de nuestro entorno, pero siempre queda una zona posterior en sombra, que no percibimos ni controlamos con la vista, requiriendo el auxilio del oído para sentirnos dominadores del ambiente que nos rodea.
- Por este motivo y especialmente en locales con dificultades acústicas, puede ser importante la posición relativa de las personas en relación al espacio que ocupan.

Fisiología de la visión

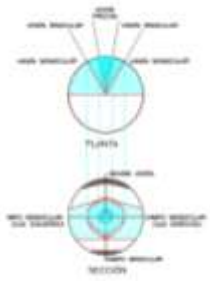

Figura 4.7 - Alzado y planta del campo visual

Fisiología de la visión

- Con la vista también se localiza la dirección de los objetos que nos rodean, básicamente dirigiendo la cabeza y los ojos hacia aquello que observamos. La acción de los músculos informa al cerebro de la dirección relativa a nuestro cuerpo, basándose para ello en gran parte en la experiencia.
- La apreciación de la distancia resulta más compleja y en ella intervienen diversos mecanismos. Por un lado existe la deformación del cristalino en el enfoque de la imagen que permite evaluar distancias muy cortas.
- Por otro lado la visión binocular permite, con el cambio de la imagen de un ojo respecto a la del otro, reconocer la situación relativa de los objetos en el campo visual, a la vez que la convergencia de los ojos nos ayuda a evaluar las distancias próximas.

Fisiología de la visión

- Finalmente, es el aprendizaje el que en mayor medida nos informa sobre la distancia a la que están situados los objetos, simplemente considerando el tamaño aparente de los mismos en relación a experiencias previas.
- El único inconveniente es que resulta un sistema poco fiable en entornos novedosos o de escala distinta a la normal, efecto que ha sido utilizado a menudo como recurso arquitectónico para producir sensaciones especiales en el espectador.