

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Leyes de la óptica

Tres son las características importantes que cumple la luz:

1. **Propagación rectilínea:** La luz viaja en línea recta.
2. **Reflexión:** Cuando la luz incide en una superficie lisa, regresa a su medio original.
3. **Refracción:** La trayectoria de la luz cambia cuando penetra a un medio transparente.

REFLEXIÓN



Reflejo del Monte Hood en el lago Trillium.

La **reflexión** es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial.

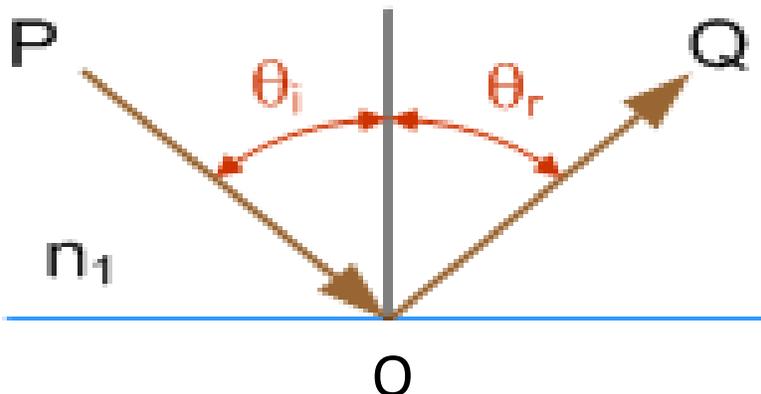
Ejemplos comunes son la reflexión de la luz, el sonido y las ondas en el agua.

Reflexión de la luz y sus leyes

Es el cambio de dirección, en el mismo medio, que experimenta un rayo luminoso al incidir oblicuamente sobre una superficie. Para este caso las leyes de la reflexión son las siguientes:

1.º ley: El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal, se encuentran en un mismo plano.

2.º ley: El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



$$\theta_i = \theta_r$$

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica



Reflejo en un espejo.

REFRACCIÓN

La **refracción** es el cambio de dirección que experimenta un rayo al pasar de un medio material a otro. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda.

Un ejemplo de este fenómeno se ve cuando se sumerge un lápiz en un vaso con agua: el lápiz parece quebrado. También se produce refracción cuando la luz atraviesa capas de aire a distinta temperatura, de la que depende el índice de refracción. Los espejismos son producidos por un caso extremo de refracción, denominado reflexión total. Aunque el fenómeno de la refracción se observa frecuentemente en ondas electromagnéticas como la luz, el concepto es aplicable a cualquier tipo de onda.

Cuando un rayo se refracta al pasar de un medio a otro, el ángulo de refracción con el que entra es igual al ángulo en que sale al volver a pasar de ese medio al medio inicial.

Explicación física



Lápiz "quebrado" debido a la refracción.

Se produce cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, sufriendo un cambio de rapidez y un cambio de dirección si no incide perpendicularmente en la superficie. Esta desviación en la dirección de propagación se explica por medio de la ley de Snell. Esta ley, así como la refracción en medios no homogéneos, son

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

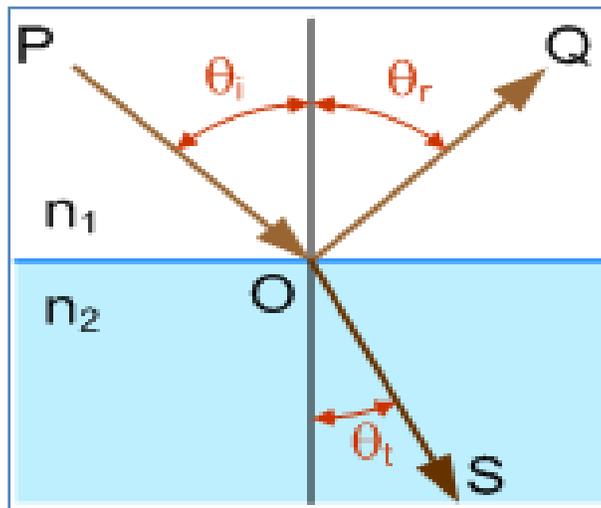
consecuencia del principio de Fermat, que indica que la luz se propaga entre dos puntos siguiendo la trayectoria de recorrido óptico de menor tiempo.

Por otro lado, la velocidad de la penetración de la luz en un medio distinto del vacío está en relación con la longitud de la onda y, cuando un haz de luz blanca pasa de un medio a otro, cada color sufre una ligera desviación. Este fenómeno es conocido como dispersión de la luz. Por ejemplo, al llegar a un medio más denso, las ondas más cortas pierden velocidad sobre las largas (ej: cuando la luz blanca atraviesa un prisma). Las longitudes de onda corta son hasta 4 veces más dispersadas que las largas lo cual explica que el cielo se vea azulado, ya que para esa gama de colores el índice de refracción es mayor y se dispersa más.

En la refracción se cumplen las leyes deducidas por Huygens que rigen todo el movimiento ondulatorio:

1º. Ley: El rayo incidente, el reflejado y el refractado se encuentran en el mismo plano.

2º. Ley: Los ángulos de incidencia y refracción son los formados entre el rayo incidente y el refractado con la perpendicular (llamada Normal) a la superficie de separación trazada en el punto de incidencia.



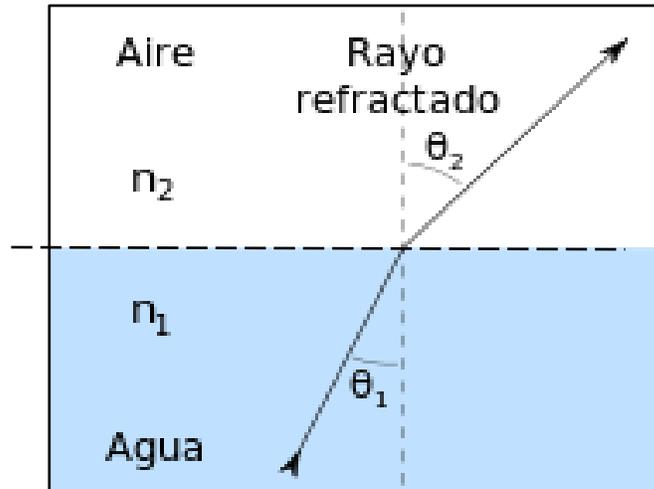
La velocidad de la luz depende del medio que atraviese, por lo que es más lenta cuanto más denso sea el material y viceversa. Por ello, cuando la luz pasa de un medio menos denso (aire) a otro más denso (cristal), el rayo de luz es refractado acercándose a la normal y, por tanto, el ángulo de refracción será más pequeño que el ángulo de incidencia. Del mismo modo, si el rayo de luz pasa de un medio más denso a uno menos denso, será refractado alejándose de la normal y, por tanto, el ángulo de incidencia será menor que el de refracción.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Índice de refracción

Es la relación entre la velocidad de propagación de la onda en un medio de referencia (por ejemplo el vacío para las ondas electromagnéticas) y su velocidad en el medio en el que se propaga.



Definición

El índice de refracción (n) está definido como el cociente de la velocidad (c) de un fenómeno ondulatorio como luz o sonido en el de un medio de referencia respecto a la velocidad (v_p) en dicho medio:

$$n = \frac{c}{v_p}$$

Generalmente se utiliza la velocidad de la luz (c) en el vacío como medio de referencia para cualquier materia, aunque durante la historia se han utilizado otras referencias, como la velocidad de la luz en el aire.

Valores para diferentes materiales

El índice de refracción en el aire es de 1,00029 pero para efectos prácticos se considera como 1, ya que la velocidad de la luz en este medio es muy cercana a la del vacío.

Otros ejemplos de índices de refracción para luz amarilla del sodio ($\lambda = 589 \text{ nm}$).

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Material	Índice de refracción
Vacío	1
Aire (*)	1,0002926
Agua	1,3330
Acetaldehído	1,35
Solución de azúcar (30%)	1,38
1-butanol (a 20 °C)	1,399
Glicerina	1,473
Heptanol (a 25 °C)	1,423
Solución de azúcar (80%)	1,52
Benceno (a 20 °C)	1,501
Metanol (a 20 °C)	1,329
Cuarzo	1,544
Vidrio (corriente)	1,52
Disulfuro de carbono	1,6295
Cloruro de sodio	1,544
Diamante	2,42
(*) en condiciones normales de presión y temperatura (101 KPa y 0 °C)	

La luz pasa del agua al aire con un ángulo de incidencia de 35° . ¿Cuál será el ángulo de refracción si el índice de refracción del agua es 1.33?

Plan: El ángulo de refracción θ_{aire} puede determinarse a partir de la ley de Snell.

Solución: Dado que $n_{\text{aire}} = 1.0$, $n_{\text{agua}} = 1.33$ y $\theta_{\text{agua}} = 35^\circ$, tenemos

$$\begin{aligned}n_{\text{aire}} \operatorname{sen} \theta_{\text{aire}} &= n_{\text{agua}} \operatorname{sen} \theta_{\text{agua}} \\(1.0) \operatorname{sen} \theta_{\text{aire}} &= (1.33) \operatorname{sen} 35^\circ \\ \operatorname{sen} \theta_{\text{aire}} &= 0.763 \\ \theta_{\text{aire}} &= 49.7^\circ\end{aligned}$$

El índice de refracción en el aire (1.0) fue *menor* que el del agua (1.33), así que el ángulo refractado en el aire es mayor que el ángulo de incidencia.

Física Aplicada a la Arquitectura

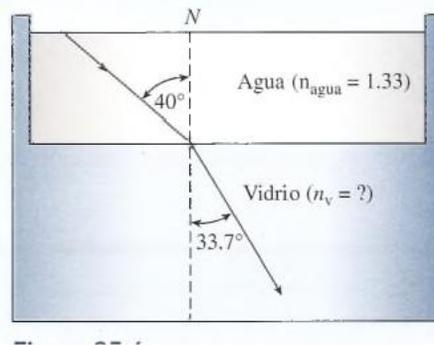
Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Un rayo de luz en el agua ($n_{\text{agua}} = 1.33$) incide a un ángulo de 40° sobre una lámina de vidrio que está en el fondo de un contenedor, como muestra la figura 35.6. Si el rayo refractado forma un ángulo de 33.7° con la normal, ¿cuál es el índice de refracción del vidrio?

Plan: El agua es el medio incidente, y el vidrio es el medio refractado. Dados los ángulos y el índice para el agua, podemos aplicar la ley de Snell para calcular el índice del vidrio.

Solución: Sustituyendo $n_{\text{agua}} = 1.33$, $\theta_{\text{agua}} = 40^\circ$ y $\theta_v = 33.7^\circ$, obtenemos

$$\begin{aligned}n_v \text{ sen } \theta_v &= n_{\text{agua}} \text{ sen } \theta_{\text{agua}} \\n_v \text{ sen } 33.7^\circ &= (1.33) \text{ sen } 40^\circ \\n_v &= \frac{(1.33) \text{ sen } 40^\circ}{\text{sen } 33.7^\circ} \\n_v &= 1.54\end{aligned}$$



Una luz roja monocromática, con una longitud de onda de 640 nm, pasa del aire a una placa de vidrio cuyo índice de refracción es 1.5. ¿Cuál será la longitud de onda de la luz dentro de este medio?

Plan: La longitud de onda será menor en el vidrio debido a la rapidez reducida de la luz.

Solución: La sustitución directa en la ecuación (35.5) nos da

$$\lambda_v = \frac{\lambda_a}{n_v} = \frac{640 \text{ nm}}{1.5}; \quad \lambda_v = 427 \text{ nm}$$

La longitud de onda en el vidrio indica que el color es azul. Si usted está observando este efecto, ¿por qué el color sigue pareciendo ser rojo?

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Calcule la velocidad de la luz amarilla en un diamante cuyo índice de refracción es 2.42.

Plan: El índice de refracción es la razón de la velocidad de la luz en el espacio libre respecto a la velocidad en el medio, así que podemos resolver para esa velocidad mediante sustitución.

Solución: A partir de la ecuación (35.1) tenemos

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{o} \quad v = \frac{c}{n}$$
$$v = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.42} = 1.24 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Refracción de ondas de radio

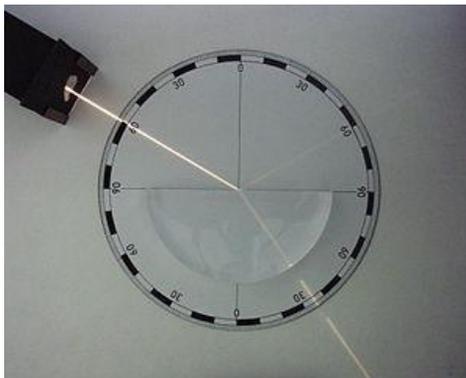
El fenómeno de la refracción es un fenómeno que se observa en todo tipo de ondas. En el caso de las ondas de radio, la refracción es especialmente importante en la ionosfera, en la que se producen una serie continua de refracciones que permiten a las ondas de radio viajar de un punto del planeta a otro.

Refracción de ondas sísmicas

Otro ejemplo de refracción no ligado a ondas electromagnéticas es el de las ondas sísmicas. La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad del medio de propagación y, por lo tanto, de la profundidad y de la composición de la región atravesada por las ondas. Se producen fenómenos de refracción en los siguientes casos:

- Refracción entre la transición entre dos capas geológicas, especialmente entre el manto terrestre y el núcleo de la Tierra.
- En el manto, por pequeñas desviaciones de la densidad entre capas ascendentes menos densas y descendentes, más densas.

Ley fundamental de la refracción: Ley de SNELL



Refracción

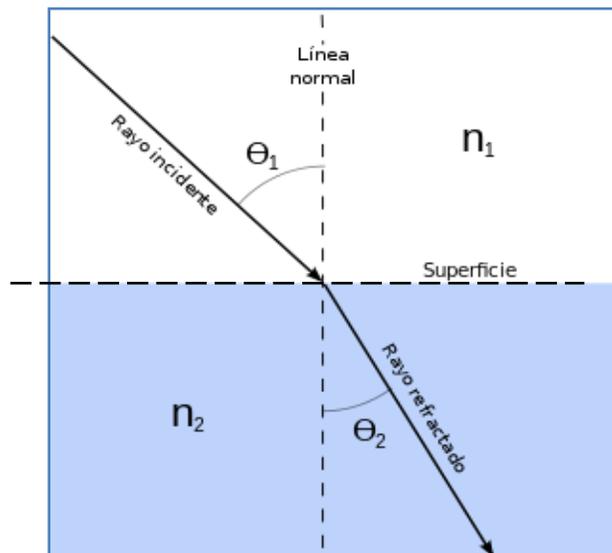
Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

La **ley de Snell** es una fórmula simple utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto. El nombre proviene de su descubridor, el matemático holandés Willebrord Snel van Royen (1580-1626). La denominaron "Snell" debido a su apellido, pero le pusieron dos "l" por su nombre Willebrord el cual lleva dos "l".

La misma afirma que el producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie separatriz de dos medios. Aunque la ley de Snell fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz se puede aplicar a todo tipo de ondas atravesando una superficie de separación entre dos medios en los que la velocidad de propagación de la onda varíe.

Descripción



n_1 y n_2 son los índices de refracción de los materiales. La línea entrecortada delimita la línea normal, la cual es la línea imaginaria perpendicular a la superficie. Los ángulos θ son los ángulos que se forman con respecto a la línea normal a la superficie de separación, siendo θ_1 el ángulo de la onda incidente y θ_2 el ángulo de la onda refractada.

Consideremos dos medios caracterizados por índices de refracción n_1 y n_2 separados por una superficie S. Los rayos de luz que atraviesen los dos medios se refractarán en la superficie variando su dirección de propagación dependiendo del cociente entre los índices de refracción n_1 y n_2 .

Para un rayo luminoso con un ángulo de incidencia θ_1 sobre el primer medio, ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación del rayo, tendremos que el rayo se propaga

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

en el segundo medio con un ángulo de refracción θ_2 cuyo valor se obtiene por medio de la ley de Snell.

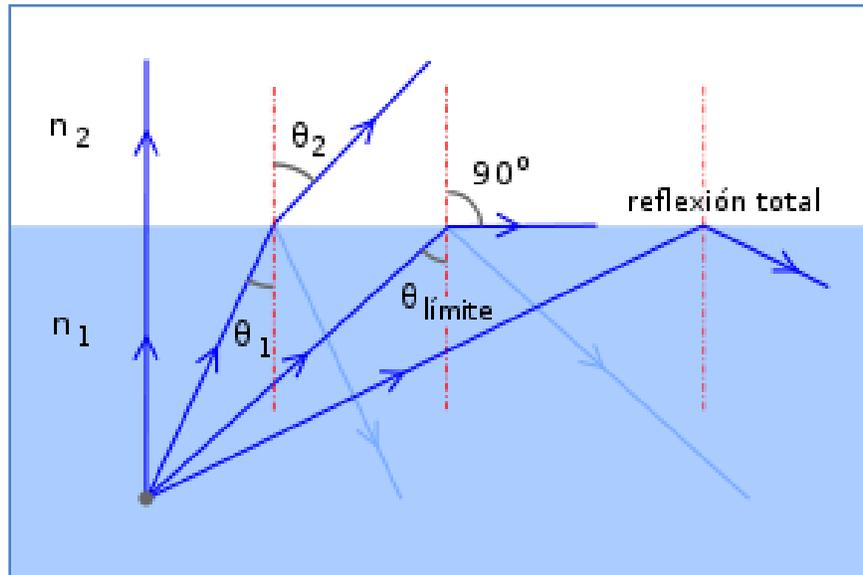
$$n_1 \text{ sen}(\theta_1) = n_2 \text{ sen}(\theta_2)$$

Obsérvese que para el caso de $\theta_1 = 0$ (rayos incidentes de forma perpendicular a la superficie) los rayos refractados emergen con un ángulo $\theta_2 = 0$ para cualquier n_1 y n_2 .

La simetría de la ley de Snell implica que las trayectorias de los rayos de luz son reversibles. Es decir, si un rayo incidente sobre la superficie de separación con un ángulo de incidencia θ_1 se refracta sobre el medio con un ángulo de refracción θ_2 , entonces un rayo incidente en la dirección opuesta desde el medio 2 con un ángulo de incidencia θ_2 se refracta sobre el medio 1 con un ángulo θ_1 .

Una regla cualitativa para determinar la dirección de la refracción es que el rayo en el medio de mayor índice de refracción se acerca siempre a la dirección de la normal a la superficie. La velocidad de la luz en el medio de mayor índice de refracción es siempre menor.

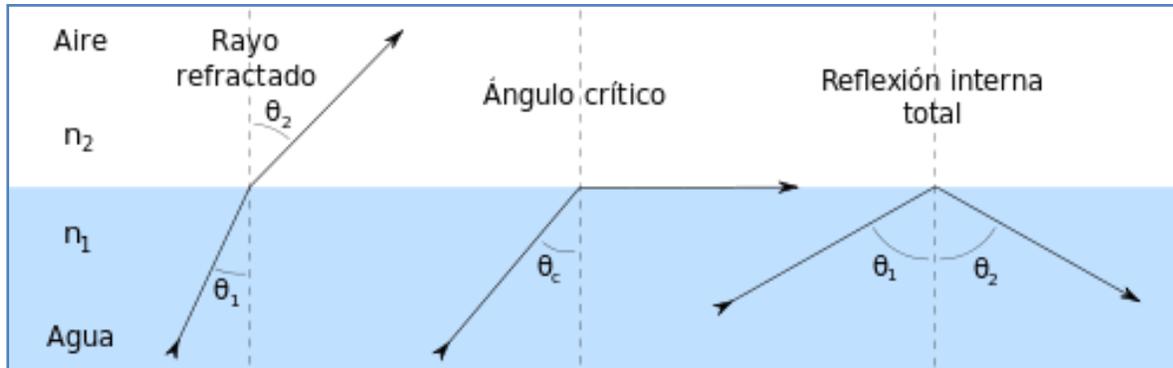
REFLEXIÓN INTERNA TOTAL



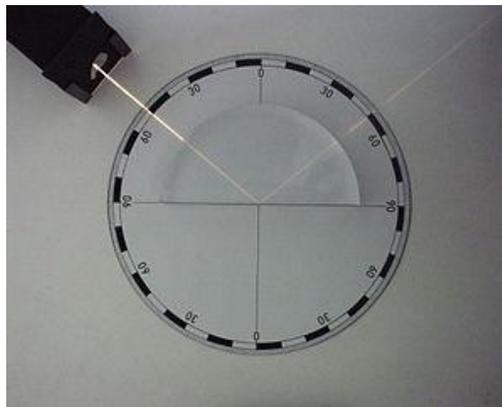
Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Ángulo crítico: cualquier rayo que incida con un ángulo θ_1 mayor al ángulo crítico θ_c correspondiente a ese par de sustancias, se reflejará en la interface en lugar de refractarse.



Cuando el ángulo de incidencia es mayor o igual al ángulo crítico, la luz no puede refractarse y se refleja totalmente en la frontera. Los ángulos del dibujo corresponden a la frontera aire-agua.



Reflexión interna total

Un rayo de luz propagándose en un medio con índice de refracción n_1 incidiendo con un ángulo θ_1 sobre una superficie sobre un medio de índice n_2 con $n_1 > n_2$ puede reflejarse totalmente en el interior del medio de mayor índice de refracción. Este fenómeno se conoce como reflexión interna total o ángulo límite y se produce para ángulos de incidencia θ_1 mayores que un valor crítico cuyo valor es el siguiente.

De la ley de Snell se tiene:

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$$

Para que haya reflexión interna total, se debe cumplir que:

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2}$$

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Entonces:

$$\text{sen}(\theta_2) = \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1$$

Así, el ángulo límite será:

$$\theta_{\text{limite}} = \text{arcsen}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Si $n_1 > n_2$, entonces $\theta_2 > \theta_1$. Eso significa que cuando θ_1 aumenta, θ_2 llega a $\frac{\pi}{2}$ radianes (90°) antes que θ_1 . El rayo refractado (o transmitido) sale paralelo a la frontera. Si θ_1 aumenta aún más, como θ_2 no puede ser mayor que $\frac{\pi}{2}$, no hay transmisión al otro medio y la luz se refleja totalmente.

La reflexión es realmente total (100%) y sin pérdidas. Es decir, mejor que los espejos metálicos (plata, aluminio) que solo reflejan 96% de la potencia luminosa incidente.

Reflexión del sonido

Cuando una **onda sonora** golpea una superficie plana es reflejada de manera coherente asumiendo que el tamaño de la superficie reflectiva es lo suficientemente larga con relación a la longitud de la onda que incide. Tómese en cuenta que las ondas del sonido audible tienen un amplio rango de frecuencias (de 20 Hz hasta 20000 Hz), al igual que la longitud de onda (que puede variar de 20 mm hasta 17 m). Como resultado, se obtiene que la naturaleza en general, así como el comportamiento del fenómeno de reflexión varía de acuerdo con la estructura y la textura de las superficies de reflexión; por ejemplo, una superficie porosa tiende a absorber grandes cantidades de energía, mientras que una superficie áspera (donde áspero es relativo a la longitud de onda) reflejará las ondas en todas direcciones dispersando la energía de la onda, en lugar de reflejar el sonido en forma coherente. Esto nos lleva al campo de la **Acústica arquitectónica**, porque la naturaleza de estas reflexiones son críticas para la sensación del espacio en un auditorio.

Reflexión sísmica

Las **ondas sísmicas** producidas por terremotos o por otras fuentes tales como explosiones, pueden ser reflejadas por capas dentro de la Tierra. El estudio de las ondas sísmicas reflejadas en las profundidades ha dado a los sismólogos la oportunidad de determinar las capas que conforman la estructura de la Tierra. El estudio de las ondas sísmicas reflejadas de poca profundidad se utiliza en sismología por reflexión, que estudia la corteza de la Tierra en general, y en particular para encontrar posibles yacimientos de petróleo o gas natural.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

EJERCITACIÓN

PROBLEMAS RESUELTOS

1- Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de 30° .

Calcular:

a) ¿Qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul componentes de la luz blanca, si los valores de los índices de refracción del vidrio para estos colores son, respectivamente, $n_{rojo} = 1,612$ y $n_{azul} = 1,671$.

b) ¿Cuáles serán los valores de la frecuencia y de la longitud de onda correspondientes a cada una de estas radiaciones en el vidrio, si las longitudes de onda en el vacío son, respectivamente, $\lambda_{rojo} = 656,3 \text{ nm}$ y $\lambda_{azul} = 486,1 \text{ nm}$?

Datos

$$\theta_i = 30^\circ$$

$$n_{\text{vidrio rojo}} = 1,612$$

$$\lambda_{rojo} = 656,3 \text{ nm}$$

$$n_{\text{vidrio azul}} = 1,671$$

$$\lambda_{azul} = 486,1 \text{ nm}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

a) Aplicando la ley de Snell.

$$1 \text{ sen } \theta_i = n_{\text{vidrio rojo}} \text{ sen } \theta_r \Rightarrow \text{sen } \theta_r = \frac{\text{sen } 30^\circ}{n_{\text{vidrio rojo}}} = \frac{0,5}{1,612} = 0,31 \Rightarrow \theta_r = \text{arcsen } 0,31 = 18,07^\circ$$

$$1 \text{ sen } \theta_i = n_{\text{vidrio azul}} \text{ sen } \theta_r \Rightarrow \text{sen } \theta_r = \frac{\text{sen } 30^\circ}{n_{\text{vidrio azul}}} = \frac{0,5}{1,671} = 0,299 \Rightarrow \theta_r = \text{arcsen } 0,299 = 17,41^\circ$$

$$\Delta\theta = 18,07^\circ - 17,41^\circ = 0,66^\circ$$

$$\Delta\theta = 0,66^\circ$$

b)

$$f_{\text{rojo}} (\text{vacío}) = f_{\text{rojo}} (\text{vidrio})$$

La frecuencia es la misma en el aire que en el vidrio.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

$$c = \lambda_{0\text{rojo}} f_{\text{rojo}} \Rightarrow f_{\text{rojo}} = \frac{c}{\lambda_{0\text{rojo}}} = \frac{310^8}{656,310^{-9}} = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{rojo}} = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$c = \lambda_{0\text{azul}} f_{\text{azul}} \Rightarrow f_{\text{azul}} = \frac{c}{\lambda_{0\text{azul}}} = \frac{310^8}{486,1 \cdot 10^{-9}} = 6,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{azul}} = 6,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$c = \lambda_{\text{rojo}} f_{\text{rojo}}$$

$$v_{\text{vidrio rojo}} = \lambda_{\text{vidrio rojo}} f_{\text{rojo}}$$

$$\text{Dividiendo} \rightarrow n = \frac{c}{v}$$

$$n_{\text{vidrio rojo}} = \frac{c}{v_{\text{vidrio rojo}}} = \frac{\lambda_{0\text{rojo}} f_{\text{rojo}}}{\lambda_{\text{vidrio rojo}} f_{\text{rojo}}} = \frac{\lambda_{0\text{rojo}}}{\lambda_{\text{vidrio rojo}}} \Rightarrow \lambda_{\text{vidrio rojo}} = \frac{\lambda_{0\text{rojo}}}{n_{\text{vidrio rojo}}} = \frac{656,3 \cdot 10^{-9}}{1,612} = 4,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{vidrio rojo}} = 4,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$c = \lambda_{\text{azul}} f_{\text{azul}}$$

$$v_{\text{vidrio azul}} = \lambda_{\text{vidrio azul}} f_{\text{azul}}$$

$$\text{Dividiendo} \rightarrow n = \frac{c}{v}$$

$$n_{\text{vidrio azul}} = \frac{c}{v_{\text{vidrio azul}}} = \frac{\lambda_{0\text{azul}} f_{\text{azul}}}{\lambda_{\text{vidrio azul}} f_{\text{azul}}} = \frac{\lambda_{0\text{azul}}}{\lambda_{\text{vidrio azul}}} \Rightarrow \lambda_{\text{vidrio azul}} = \frac{\lambda_{0\text{azul}}}{n_{\text{vidrio azul}}} = \frac{486,1 \cdot 10^{-9}}{1,671} = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{vidrio azul}} = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

2- Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque con un ángulo de 30° .

a) ¿Qué ángulo forman entre sí los rayos reflejado y refractado?

b) Si el rayo luminoso se propagase desde el agua hacia el aire ¿a partir de qué valor del ángulo de incidencia se presentará el fenómeno de reflexión total? $n_{\text{agua}} = 4/3$

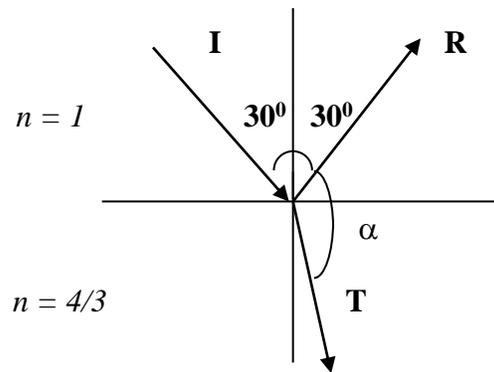
Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

a)

$$\theta_i = 30^\circ$$

$$n_{\text{agua}} = 4/3$$



Por la ley de Snell

$$1 \text{ sen } 30^\circ = 4/3 \text{ sen } \hat{r}$$

$$\text{sen } \hat{r} = \frac{\text{sen } 30^\circ}{4/3} = \frac{0,5}{4/3} = 0,375 \Rightarrow \hat{r} = \text{arcsen } 0,375 = 22,02^\circ$$

El ángulo incidente es igual que al ángulo reflejado (30°) por tanto los rayos reflejado y refractado formarán un ángulo $\alpha = 180^\circ - 30^\circ - 22,02 = 127,98$

$$\alpha = 127,98^\circ$$

b) La reflexión total se presenta a partir de un ángulo de incidencia llamado límite (\hat{i}) para el cual el ángulo refractado tiene un valor de 90° . Esto sólo puede suceder cuando el rayo pasa de un medio más refringente a otro menos, en éste caso el rayo pasa del agua al aire, el primer medio es el agua y el segundo el aire. Aplicando la ley de Snell.

$$4/3 \text{ sen } \hat{i} = 1 \text{ sen } 90^\circ$$

$$\text{sen } \hat{i} = \frac{\text{sen } 90^\circ}{4/3} = \frac{3}{4} = 0,75 \Rightarrow \hat{i} = \text{arcsen } 0,75 = 48,59^\circ$$

$$\hat{i} = 48,59^\circ$$

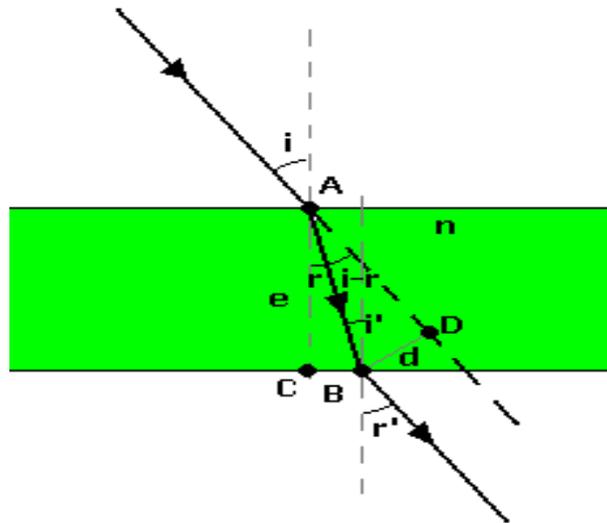
3- Sobre una lámina de vidrio de caras planas y paralelas, de espesor 2 cm y de índice de refracción $n_{\text{vidrio}} = 3/2$, situada en el aire, incide un rayo de luz monocromática con un ángulo de 30° .

a) Compruebe que el ángulo de emergencia es el mismo que el ángulo de incidencia.

b) Determine la distancia recorrida por el rayo dentro de la lámina y el desplazamiento lateral, del rayo emergente.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica



Solución

El rayo incide desde el aire en una cara bajo un ángulo i y se refracta, acercándose a la normal, con un ángulo r , pasando al interior; atraviesa la lámina e incide en la parte interior de la otra cara con un ángulo i' refractándose, alejándose de la normal, saliendo al aire con un ángulo emergente r' .

Al estar la lámina rodeada de aire, como la ecuación de la refracción es la misma y por ser el ángulo de la primera refracción igual al ángulo de incidencia de la segunda refracción, $r = i'$, el ángulo emergente debe ser igual al de incidencia: $r' = i$.

$$1^{\text{a}} \text{ refracción: } 1 \operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r$$

$$\text{En este caso: } r = \operatorname{arc} \operatorname{sen} (\operatorname{sen} 30 / 1,5) = 19,47^{\circ}$$

$$2^{\text{a}} \text{ refracción: } n \operatorname{sen} i' = 1 \operatorname{sen} r'$$

$$\text{Pero: } r = i'; \quad 1 \operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r = n \operatorname{sen} i' = 1 \operatorname{sen} r'; \quad r' = i$$

En este caso como incide con 30° , el ángulo emergente es 30°

Los rayos incidente y emergente son paralelos. Para determinar la distancia recorrida y la separación entre estos rayos utilizamos los triángulos ABC y ABD:

$$\cos r = e / AB \quad ; \quad AB = e / \cos r$$

$$\operatorname{sen} (i - r) = d / AB \quad ; \quad d = AB \operatorname{sen} (i - r)$$

En este caso:

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

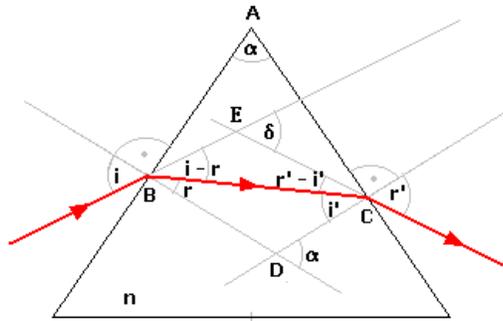
$$AB = 2 / \cos 19,47 = 2,12 \text{ cm}$$

$$d = 2,12 \text{ sen } (30 - 19,47) = 0,39 \text{ cm}$$

4- Sobre la cara lateral de un prisma de vidrio de índice de refracción $n_{\text{vidrio}} = 1,4$ cuyo ángulo en el vértice es de 50° y que se encuentra en el aire, incide un rayo de luz con un ángulo de 20° .

Determinar:

- a) Ángulo de desviación sufrido por el rayo.
- b) Ángulo de desviación mínima de este prisma.



Solución

Según el dibujo y el enunciado:

$$a = 50^\circ$$

$$i = 20^\circ$$

$$n_{\text{vidrio}} = 1,4$$

El ángulo de desviación entre el rayo incidente y el emergente es $d = i + r' - \alpha$, como puede deducirse a partir del cuadrilátero ABCD y de los triángulos BDC y BEC.

En la primera refracción:

$$1 \text{ sen } 20 = 1,4 \text{ sen } r ; \quad r = \text{arc sen } (\text{sen } 20 / 1,4) = 14,14^\circ$$

$$\text{Del triángulo BDC se obtiene: } r + i' = 50 ; \quad i' = 50 - 14,14 = 35,86^\circ$$

En la segunda refracción:

$$1,4 \text{ sen } 35,86 = 1 \text{ sen } r' ; \quad r' = 55,1^\circ$$

$$\text{La desviación de los rayos es: } d = 20 + 55,1 - 50 = 25,1^\circ$$

El ángulo de desviación mínimo se corresponde a un ángulo de incidencia tal que sea igual al ángulo emergente, $i = r'$, y por tanto el ángulo de la primera refracción es la mitad del ángulo del prisma:

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

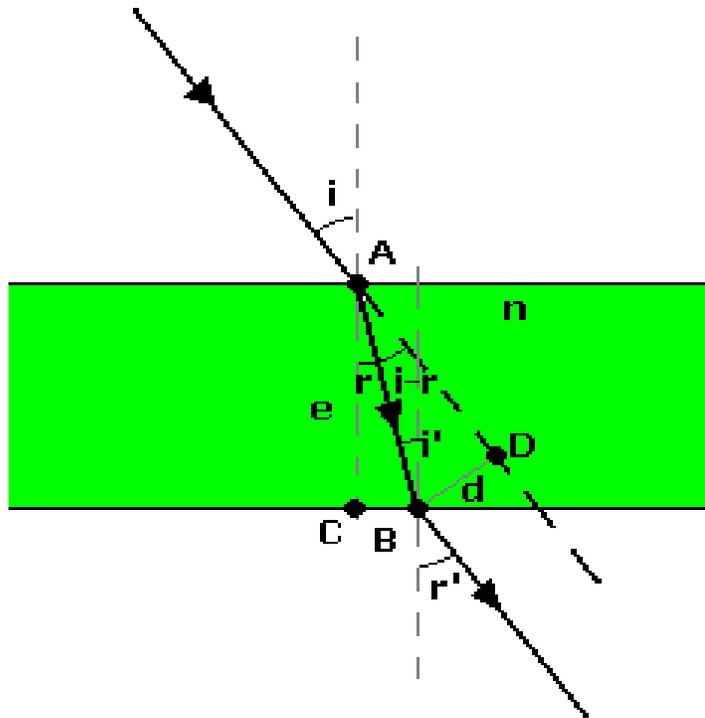
$$r = a/2.$$

En este caso: $r = 50/2 = 25^\circ$

$$1 \operatorname{sen} i = 1,4 \operatorname{sen} 25^\circ ; \quad i = 36,28^\circ$$

5- Una lámina de vidrio de caras plano-paralelas, situada en el aire, tiene un espesor de $d = 8 \text{ cm}$ y un índice de refracción de $n_{\text{vidrio}} = 1,6$. Calcular para un rayo de luz monocromática que incide en la cara superior de la lámina con ángulo de 45° .

- Los valores del ángulo de refracción en el interior de la lámina y del ángulo de emergencia.
- El desplazamiento lateral experimentado por el rayo.
- Dibujar la marcha geométrica del rayo.



Solución

El rayo incide desde el aire en una cara bajo un ángulo i y se refracta, acercándose a la normal, con un ángulo r , pasando al interior; atraviesa la lámina e incide en la parte interior de la otra cara con un ángulo i' refractándose, alejándose de la normal, saliendo al aire con un ángulo emergente r' .

Al estar la lámina rodeada de aire, como la ecuación de la refracción es la misma y por ser el ángulo de la primera refracción igual al ángulo de incidencia de la segunda refracción, $r = i'$, el ángulo emergente debe ser igual al de incidencia: $r' = i$

1ª refracción: $1 \operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r$

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

En este caso: $r = \arcsin(\sin 45 / 1,6) = 26,23^\circ$

2ª refracción: $n \sin i' = 1 \sin r'$

Pero: $r = i'$; $1 \sin i = n \sin r = n \sin i' = 1 \sin r'$; $r' = i$

En este caso como incide con 45° , el ángulo emergente es 45° .

Los rayos incidentes y emergentes son paralelos. Para determinar la separación entre estos rayos utilizamos los triángulos ABC y ABD:

$$\cos r = e/AB \quad ; \quad AB = e / \cos r$$

$$\sin(i - r) = d/AB \quad ; \quad d = AB \cdot \sin(i - r) = e \sin(i - r) / \cos r$$

En este caso:

$$d = 8 \sin(45 - 26,23) / \cos 26,23 = 2,87 \text{ cm}$$

PROBLEMAS PROPUESTOS

1- Un faro sumergido en un lago dirige un haz de luz hacia la superficie del lago con $\hat{i} = 40^\circ$.

Encontrar el ángulo refractado. ($n_{\text{agua}} = 1,33$)

Rta: $58,7^\circ$

2- Encontrar el ángulo límite para la reflexión total interna de la luz que pasa del hielo ($n = 1,31$) al aire. Haz un dibujo.

Rta: $49,7^\circ$

3- Una capa de aceite ($n_{\text{aceite}} = 1,45$) flota sobre agua ($n_{\text{agua}} = 1,33$). Un rayo de luz brilla dentro del aceite con un $\hat{i} = 40^\circ$. Encontrar el ángulo que forma el rayo con el agua.

Rta: $44,49^\circ$

4- ¿Cuál es la frecuencia de la luz que tiene una longitud de onda en el aire de 546 nm? ¿Cuál es su frecuencia en el agua? ¿Y su velocidad en el agua? ¿Y su longitud de onda en el agua? $n_{\text{agua}} = 1,33$

Rta: $f_{\text{aire}} = f_{\text{agua}} = 5,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$; $v_{\text{agua}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $\lambda_{\text{agua}} = 400 \text{ nm}$

5- Un haz de rayos de luz llega desde el aire a la superficie plana de medio de un material transparente cuyo $n = \sqrt{2}$ formando un ángulo de 45° . Determinar con qué ángulo abandonará la superficie.

Rta: 45°

6- Un rayo luminoso incide en una cara lateral de un cubo de vidrio de $n_{\text{vidrio}} = 1,5$, que está sumergido en agua ($n_{\text{agua}} = 1,33$). ¿Con qué ángulo debe incidir el rayo para que al salir la luz haya reflexión total en la cara superior horizontal del cubo?

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Rta: $62,46^\circ$

7- Si un rayo de luz monocromática se propaga del agua al aire ¿a partir de qué valor del ángulo de incidencia en la superficie de discontinuidad entre ambos medios se presentará el fenómeno de reflexión total? El valor del índice de refracción absoluto del agua es $n_{\text{agua}} = 4/3$.

Rta: $48,60$

8- Explica en qué condiciones un rayo de luz monocromática:

- Se refracta con un ángulo de refracción menor que el ángulo de incidencia.
- Experimenta el fenómeno de reflexión total.

Rta:

a- Cuando pasa de un medio menos refringente (menor índice de refracción) a otro más (mayor índice de refracción) ($n_2 > n_1$).

b- Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo límite ($n_1 > n_2$).

9- Una fuente luminosa emite luz monocromática de longitud de onda en el vacío $\lambda_0 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (luz roja) que se propaga en el agua de índice de refracción $n = 1,34$.

Determine:

- La velocidad de propagación de la luz en el agua.
- La frecuencia.
- La longitud de onda de la luz en el agua.

Datos: velocidad de la luz en el vacío: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

Rta: a) $2,24 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

b) $2 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$

c) $4,478 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

10- Un rayo de luz monocromática que se propaga en el aire incide sobre una sustancia transparente con un ángulo de 58° respecto a la normal. Se observa que los rayos reflejado y refractado son mutuamente perpendiculares:

- ¿Cuál es el índice de refracción de la sustancia transparente para esta luz?
- ¿Cuál es el ángulo límite para la reflexión total interna en esta sustancia, si la luz se propagase desde ésta hacia el aire?

Rta: a) $1,6$; b) $38,67^\circ$

11- Un rayo de luz amarilla, emitido por una lámpara de sodio, tiene una longitud de onda en el vacío de $589 \cdot 10^{-9} \text{ m}$.

Determinar:

- Su frecuencia.
- Su velocidad de propagación y su longitud de onda en el interior de una fibra de cuarzo, cuyo índice de refracción es $n_{\text{cuarzo}} = 1,458$.
- El ángulo de incidencia mínimo para el rayo de luz que, propagándose por el interior de la fibra de cuarzo, encuentra la superficie de discontinuidad entre el cuarzo y el aire y experimenta reflexión total.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

Datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Rta: a) $1,96 \cdot 10^{-15} \text{ Hz}$
b) $2,06 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $4,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
c) $43,30^\circ$

12- Sobre una lámina de vidrio de caras planas y paralelas de espesor 2 cm y de índice de refracción $n_{\text{vidrio}} = 3/2$, situada en el aire, incide un rayo de luz monocromática con un ángulo $\theta_i = 30^\circ$.

- Compruebe que el ángulo de emergencia es el mismo que el ángulo de incidencia.
- Determine la distancia recorrida por el rayo dentro de la lámina y el desplazamiento lateral del rayo emergente.

Rta: a) $1 \text{ sen } 30^\circ = 3/2 \text{ sen } r$; $3/2 \text{ sen } r = 1 \text{ sen } i' \Rightarrow i' = 30^\circ$.
b) 2,12 cm; 0,388 cm.

13- Una lámina de vidrio de caras planas y paralelas, situada en el aire, tiene un espesor de 8 cm y un índice de refracción $n_{\text{vidrio}} = 1,6$. Calcular para un rayo de luz monocromática que incide en la cara superior de la lámina con un ángulo de 45° .

- Los valores del ángulo de refracción en el interior de la lámina y del ángulo de emergencia correspondientes.
- El desplazamiento experimentado por el citado rayo al atravesar la lámina.
- Dibujar la marcha geométrica del rayo.

Rta: a) 26,230; 450
b) 2,87 cm

14- A un prisma óptico de ángulo de refringencia $A = 50^\circ$ llega un rayo de luz monocromático bajo un ángulo de incidencia de 40° . Sabiendo que el ángulo de desviación producido por el prisma es de 30° y que el medio que rodea al prisma es aire:

- Calcular el valor del ángulo de emergencia del citado prisma.
- Calcular el valor del índice de refracción del prisma.
- Dibujar la marcha del rayo a través del prisma.

Rta: a) 40°
b) 1,52

15- El ángulo de desviación mínima en un prisma óptico es de 30° , Si el ángulo del prisma es de 50° y éste está situado en el aire, determine:

- El ángulo de incidencia par que se produzca la desviación mínima del rayo.
- El índice de refracción del prisma.

Rta: a) 40°
b) 1,52

16- Un prisma óptico de ángulo de refringencia 60° y cuyo índice de refracción es $n_{\text{vidrio}} = 1,5$ recibe un rayo de luz perpendicularmente a una de sus caras. Determinar el ángulo de desviación.

Rta: 60°

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Leyes de la Óptica

17- ¿Cuál es el ángulo de desviación mínima de un prisma equilátero cuyo índice de refracción es $n = 2$? Representa la trayectoria de un rayo que atraviesa dicho prisma en las condiciones de desviación mínima.

Rta: 120° . El rayo va paralelo a la base del prisma.

18- Determinar el índice de refracción de un prisma cuyo ángulo de refringencia es de 30° , sabiendo que el ángulo de desviación mínima es 16° .

Rta: 1,5

19- Tenemos un prisma de vidrio (índice de refracción $n_{\text{vidrio}} = \sqrt{2}$) cuyo ángulo es de 60° . En una de sus caras incide un rayo formando un ángulo de 45° , siendo la dirección del mismo hacia el vértice. Determinar:

a) Ángulo de refracción (en el interior del prisma)

b) Valor del ángulo de emergencia.

c) Ángulo de mínima desviación

d) Dibujar la marcha de la luz, en el caso de que el rayo incida normalmente a la cara, teniendo en cuenta que el ángulo límite del vidrio al aire es de $\theta_{\text{lim}} = 42^{\circ}$.

Rta: a) 30°

b) 45°

c) 30°

d) Cómo $\theta_{\text{lim}} = 42^{\circ}$. La luz se refleja totalmente.

20- Una piscina tiene una profundidad aparente de 1,8 m. ¿Cuál será su profundidad real? Haga un esquema con la marcha de los rayos luminosos para ayudarse en el cálculo.

Datos: Índice de refracción absoluto del agua $n_{\text{agua}} = 4/3$.

Rta: 2,4 m.