

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

### Leyes de la óptica

Tres de estas importantes características se resumen a continuación:

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



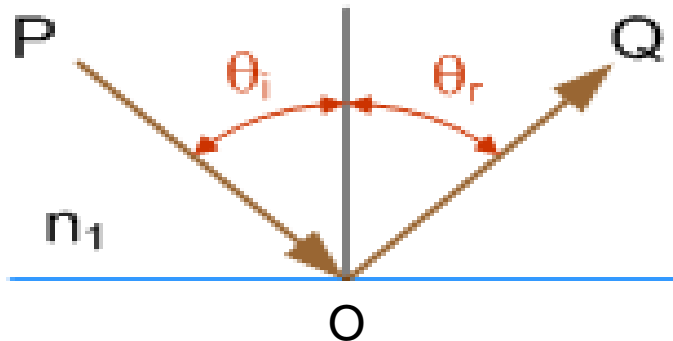
Reflejo del Monte Hood en el lago Trillium.

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

# Física Aplicada a la Arquitectura

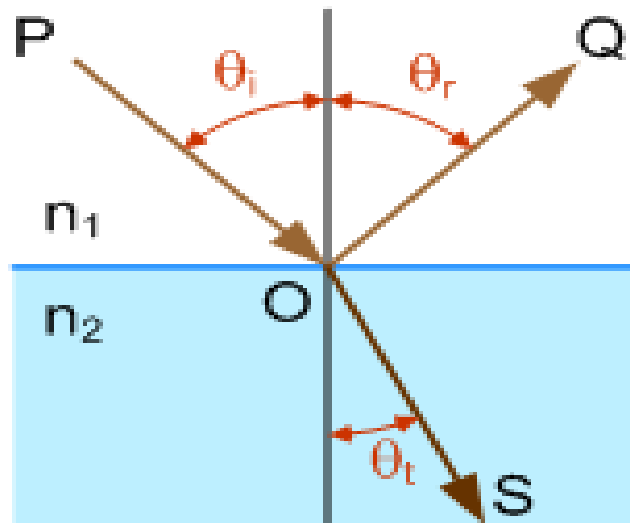
## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

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 reflexión son iguales, entendiendo por tales los que forman respectivamente el rayo incidente y el reflejado con la perpendicular (llamada Normal) a la superficie de separación trazada en el punto de incidencia.



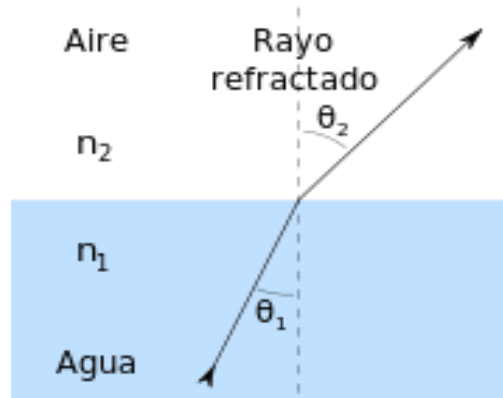
La velocidad de la luz depende del medio que atraviese, por lo que es más lenta cuanto más denso sea el material y viceversa. Por ello, cuando la luz pasa de un medio menos denso (aire) a otro más denso (cristal), el rayo de luz es refractado acercándose a la normal y, por tanto, el ángulo de refracción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

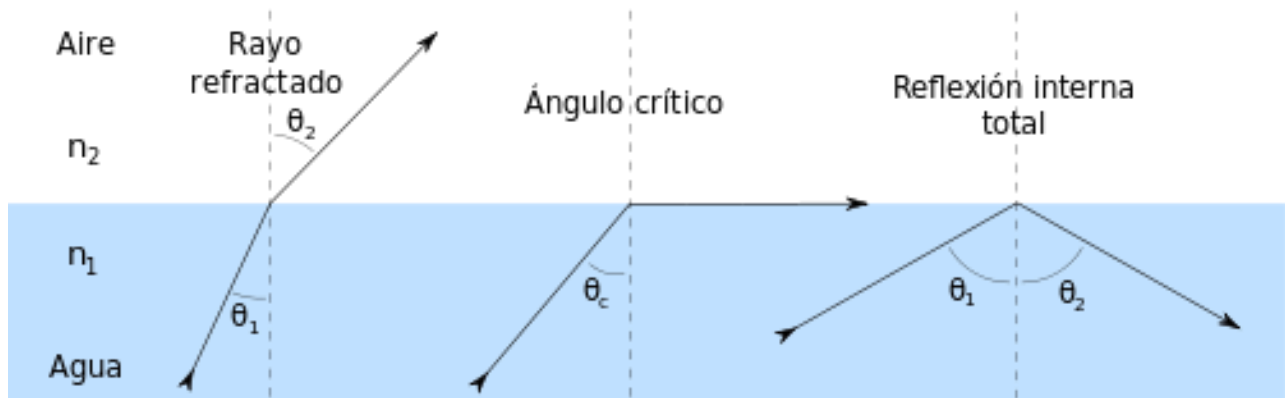
## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

### 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 del que se trate.



**Ángulo crítico:** cualquier rayo que incida con un ángulo  $\theta_1$  mayor al ángulo crítico  $\theta_c$  correspondiente a ese par de sustancias, se reflejará en la interface en lugar de refractarse.



### Definición física

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 de fase ( $v_p$ ) 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.

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

### 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 ( $\lambda = 589 \text{ nm}$ )

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)	

### 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

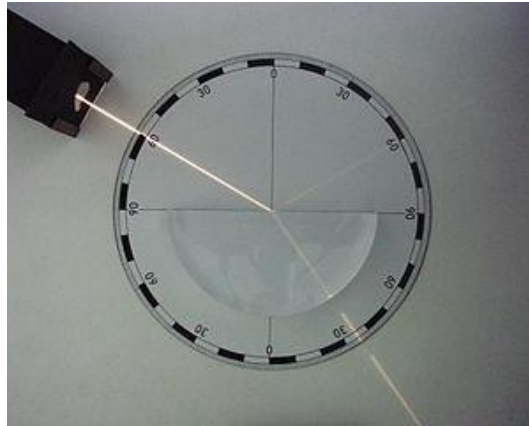
Otro ejemplo de refracción no ligado a ondas electromagnéticas es el de las ondas sísmicas. La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad del medio de propagación y, por lo tanto, de la profundidad y de la composición de la región atravesada por las ondas. Se producen fenómenos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

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

### Ley de SNELL

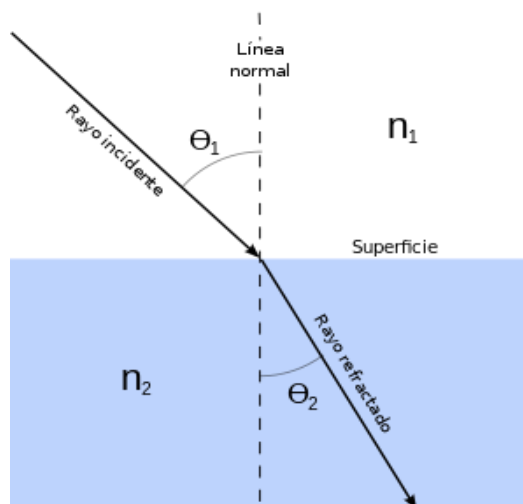


Refracción

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 óptica



# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

$n_1$  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  $\theta$  son los ángulos que se forman con respecto a la línea normal a la superficie de separación, siendo  $\theta_1$  el ángulo de la onda incidente y  $\theta_2$  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  $\theta_1$  sobre el primer medio, ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación del rayo, tendremos que el rayo se propaga en el segundo medio con un ángulo de refracción  $\theta_2$  cuyo valor se obtiene por medio de la ley de Snell.

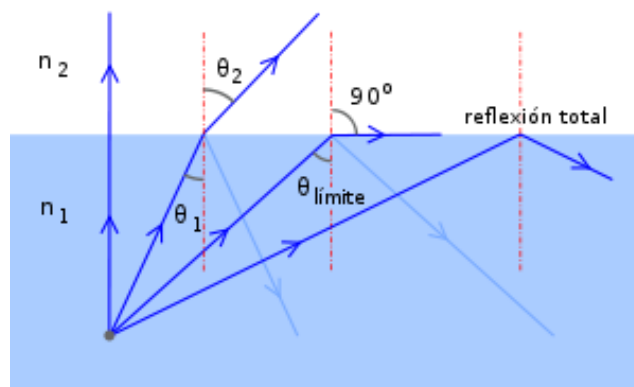
$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$$
$$n = \frac{c}{v_p}$$

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  $\theta_1$  se refracta sobre el medio con un ángulo de refracción  $\theta_2$ , entonces un rayo incidente en la dirección opuesta desde el medio 2 con un ángulo de incidencia  $\theta_2$  se refracta sobre el medio 1 con un ángulo  $\theta_1$ .

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.

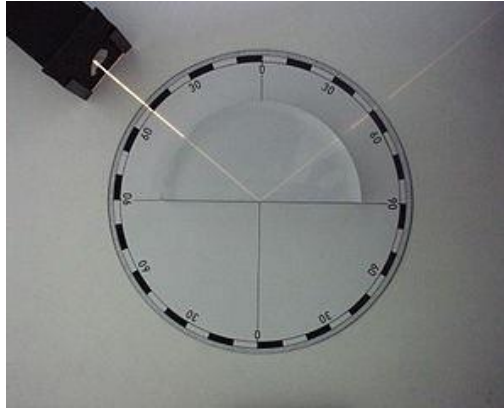
### Reflexión interna total



# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

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  $\theta_1$  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  $\theta_1$  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:

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

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  $\theta_1$  aumenta,  $\theta_2$  llega a  $\frac{\pi}{2}$  radianes ( $90^\circ$ ) antes que  $\theta_1$ . El rayo refractado (o transmitido) sale paralelo a la frontera. Si  $\theta_1$  aumenta aún más, como  $\theta_2$  no puede ser mayor que  $\frac{\pi}{2}$ , no hay transmisión al otro medio y la luz se refleja totalmente.



# Física Aplicada a la Arquitectura

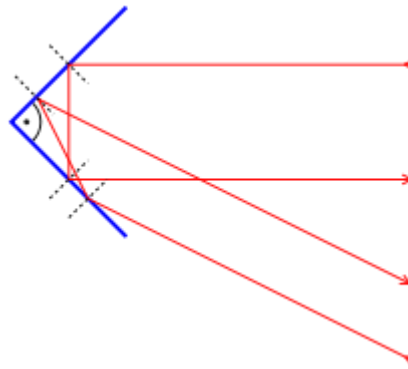
## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

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.

### Historia

La ley de Snell fue descubierta primero por Ibn Sahl en el siglo XIII, que la utilizó para resolver las formas de las lentes anaclásticas (las lentes que enfocan la luz con aberraciones geométricas). Fue descubierta otra vez en el siglo XVI y enunciada nuevamente en el siglo XVII, por Willebrord Snel y John Locke. En los países francófonos la ley de Snell se conoce como "segunda ley de contracción".

### Retrorreflexión



Principio de funcionamiento de un reflector de esquina.

La **retrorreflexión** es la capacidad que tienen algunas superficies que por su estructura pueden reflejar la luz de vuelta hacia la fuente, sin que importe el ángulo de incidencia original. Este comportamiento se puede observar en un espejo, pero únicamente cuando éste se encuentra perpendicular a la fuente; es decir, cuando el ángulo de incidencia es igual a  $90^\circ$ . Se puede construir un retrorreflector simple colocando tres espejos ordinarios de forma que todos sean perpendiculares entre sí (un reflector esquinero). La imagen que se produce es igual a la imagen producida por un espejo, pero invertida. Tal como se observa en la figura, la combinación de las diferentes superficies hace que el haz de luz sea reflejado de vuelta a la fuente.

Si a una superficie se le aplica una pequeña capa de esferas reflectivas es posible obtener una superficie con una capacidad limitada de **retrorreflexión**. El mismo efecto se puede obtener si se dota a las superficies con una estructura similar a pequeñas pirámides (reflexión esquinera). En ambos casos, la estructura interna de la superficie refleja la luz que incide sobre ella y la envía directamente hacia la fuente. Este tipo de superficies se utilizan para crear las señales de tránsito y las placas de los automóviles; en este caso particular no se desea una retrorreflexión perfecta, pues

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

se quiere que la luz retorne tanto hacia las luces del vehículo que emite el haz de luz como a los ojos de la persona que lo va conduciendo.

### **Reflexión acoplada compleja**

La luz se refleja exactamente en la dirección de la fuente de donde proviene debido a un proceso óptico no lineal. En este tipo de reflexión, no solo se invierte la dirección de la luz; también se invierte el frente de la onda. Un reflector acoplado se puede utilizar para eliminar aberraciones en un haz de luz, reflejándola y haciéndola pasar de nuevo por el dispositivo óptico que causa la aberración.

### **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-b: 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  $30^\circ$ .

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,

$$n_{\text{rojo}} = 1,612 \text{ y } n_{\text{azul}} = 1,671.$$

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,

$$\lambda_{\text{rojo}} = 656,3 \text{ nm y } \lambda_{\text{azul}} = 486,1 \text{ nm?}$$

Datos

$$\theta_i = 30^\circ$$

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

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

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

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

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

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-b: Leyes de la Óptica

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

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

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

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

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

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

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

$$n_{\text{vidrio rojo}} = \frac{c}{v_{\text{vidrio rojo}}} = \frac{\lambda_{0\text{rojo}} f_{\text{rojo}}}{\lambda_{\text{vidrio rojo}} f_{\text{rojo}}} = \frac{\lambda_{0\text{rojo}}}{\lambda_{\text{vidrio rojo}}} \Rightarrow \lambda_{\text{vidrio rojo}} = \frac{\lambda_{0\text{rojo}}}{n_{\text{vidrio rojo}}} = \frac{656,310^{-9}}{1,612} = 4,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

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

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

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

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

$$n_{\text{vidrio azul}} = \frac{c}{v_{\text{vidrio azul}}} = \frac{\lambda_{0\text{azul}} f_{\text{azul}}}{\lambda_{\text{vidrio azul}} f_{\text{azul}}} = \frac{\lambda_{0\text{azul}}}{\lambda_{\text{vidrio azul}}} \Rightarrow \lambda_{\text{vidrio azul}} = \frac{\lambda_{0\text{azul}}}{n_{\text{vidrio azul}}} = \frac{486,110^{-9}}{1,671} = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

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

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

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

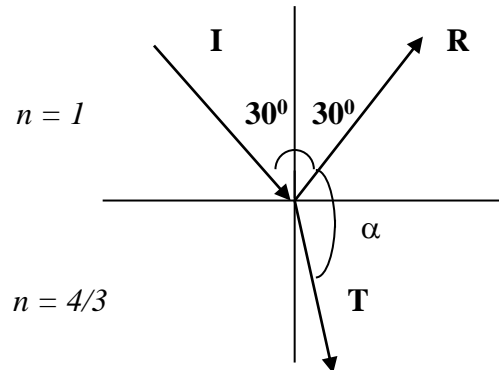
# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: 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 ( $30^\circ$ ) 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  $90^\circ$ . 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.

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

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

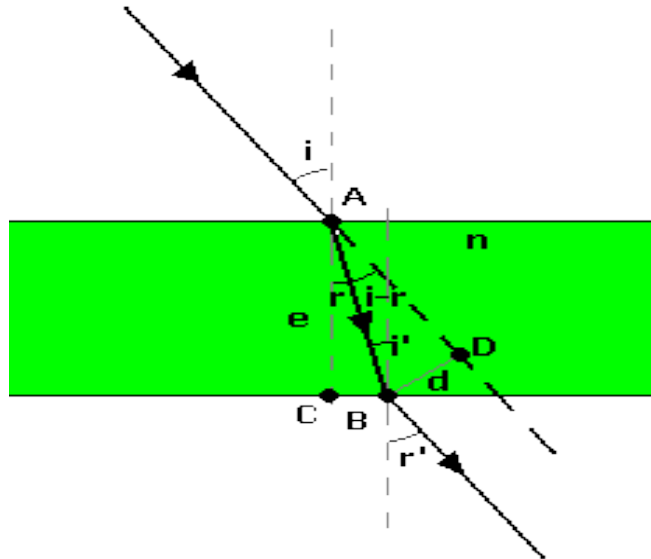
$$\hat{i} = 48,59^\circ$$

## Física Aplicada a la Arquitectura

### Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

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  $30^\circ$ .

- 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.



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  $30^\circ$ , el ángulo emergente es  $30^\circ$

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

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

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

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

En este caso:

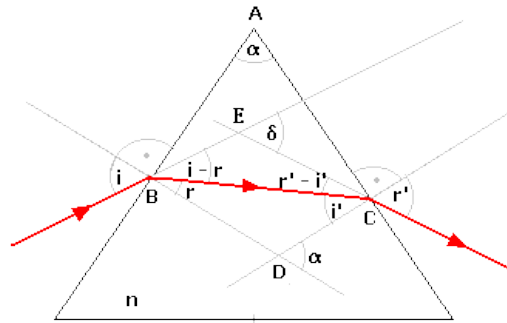
$$AB = 2 / \cos 19,47 = 2,12 \text{ cm}$$

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

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  $50^\circ$  y que se encuentra en el aire, incide un rayo de luz con un ángulo de  $20^\circ$ .

Determinar:

- Ángulo de desviación sufrido por el rayo.
- 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:

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

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

En la segunda refracción:

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

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

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

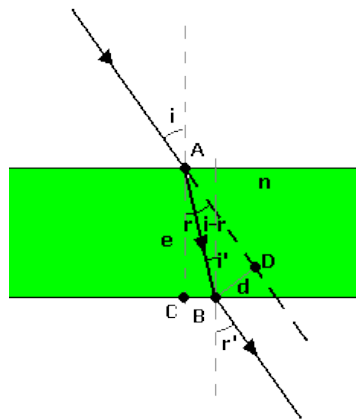
El ángulo de desviación mínimo se corresponde a un ángulo de incidencia tal que sea igual al ángulo emergente,  $i = r'$ , y por tanto el ángulo de la primera refracción es la mitad del ángulo del prisma:  
 $r = a/2$ .

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

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

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  $45^\circ$ .

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

En este caso:  $r = \operatorname{arc} \operatorname{sen} (\operatorname{sen} 45 / 1,6) = 26,23^\circ$

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

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



# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

En este caso como incide con  $45^\circ$ , el ángulo emergente es  $45^\circ$ .

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

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

$$\text{sen}(i - r) = d/AB \quad ; \quad d = AB \cdot \text{sen}(i - r) = e \text{sen}(i - r)/\cos r$$

En este caso:

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

### 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:  $28,7^\circ$

4- ¿Cuál es la frecuencia de la luz que tiene una longitud de onda en el aire de  $546 \text{ nm}$ ? ¿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:  $f_{\text{aire}} = f_{\text{agua}} = 5,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;  $400 \text{ nm}$

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

Rta:  $30^\circ$

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, de  $n_{\text{agua}} = 1,33$ . ¿Con qué ángulo debe incidir el rayo para que al salir la luz haya reflexión total en la cara superior horizontal del cubo?

Rta:  $31,43^\circ$

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:  $48,60^\circ$

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

- 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:

- Cuando pasa de un medio menos refringente (menor índice de refracción) a otro más (mayor índice de refracción) ( $n_2 > n_1$ ).
- 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  $58^\circ$  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.

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

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

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

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)  $1 \sin 30^{\circ} = 3/2 \sin r$ ;  $3/2 \sin r = 1 \sin i' \Rightarrow i' = 30^{\circ}$ .

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  $45^{\circ}$ .

- 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  $40^{\circ}$ . Sabiendo que el ángulo de desviación producido por el prisma es de  $30^{\circ}$  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)  $40^{\circ}$

b) 1,52

15- El ángulo de desviación mínima en un prisma óptico es de  $30^{\circ}$ , Si el ángulo del prisma es de  $50^{\circ}$  y éste está situado en el aire, determine:

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

Rta: a)  $40^{\circ}$

b) 1,52

16- Un prisma óptico de ángulo de refringencia  $60^{\circ}$  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:  $60^{\circ}$

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:  $120^{\circ}$ . El rayo va paralelo a la base del prisma.

# Física Aplicada a la Arquitectura

## Unidad 6-b: Leyes de la Óptica

18- Determinar el índice de refracción de un prisma cuyo ángulo de refringencia es de  $30^{\circ}$ , sabiendo que el ángulo de desviación mínima es  $16^{\circ}$ .

Rta: 1,5

19- Tenemos un prisma de vidrio (índice de refracción  $n_{\text{vidrio}} = \sqrt{2}$ ) cuyo ángulo es de  $60^{\circ}$ . En una de sus caras incide un rayo formando un ángulo de  $45^{\circ}$ , 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)  $30^{\circ}$

b)  $45^{\circ}$

c)  $30^{\circ}$

d) Como  $\theta_{\text{lim}} = 42^{\circ}$ . 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.