

# Instalaciones III



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO

“Acondicionamiento Acústico”

Tiempo de Reverberación y Geometría de Salas

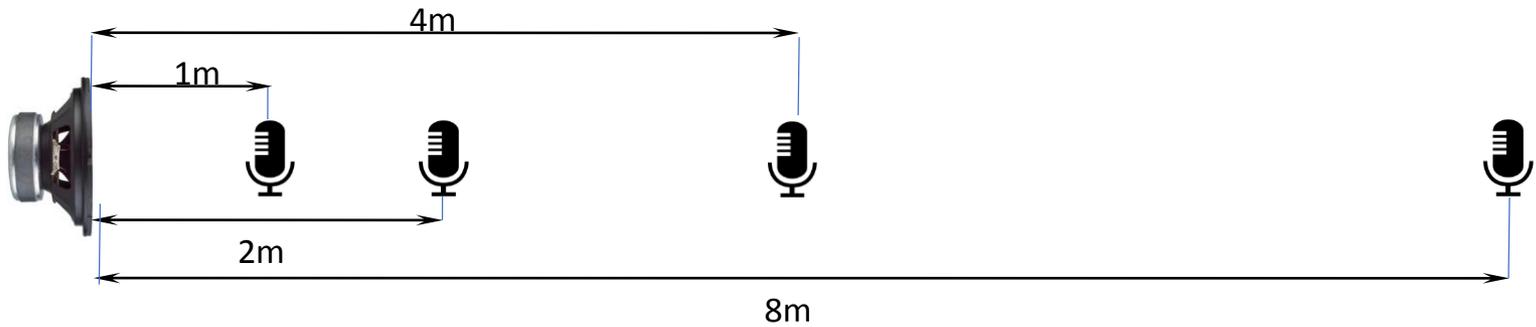
**Ing. Juan Bertrán**

*Ingeniero en Electrónica  
Especialista en Audio y Sonido*

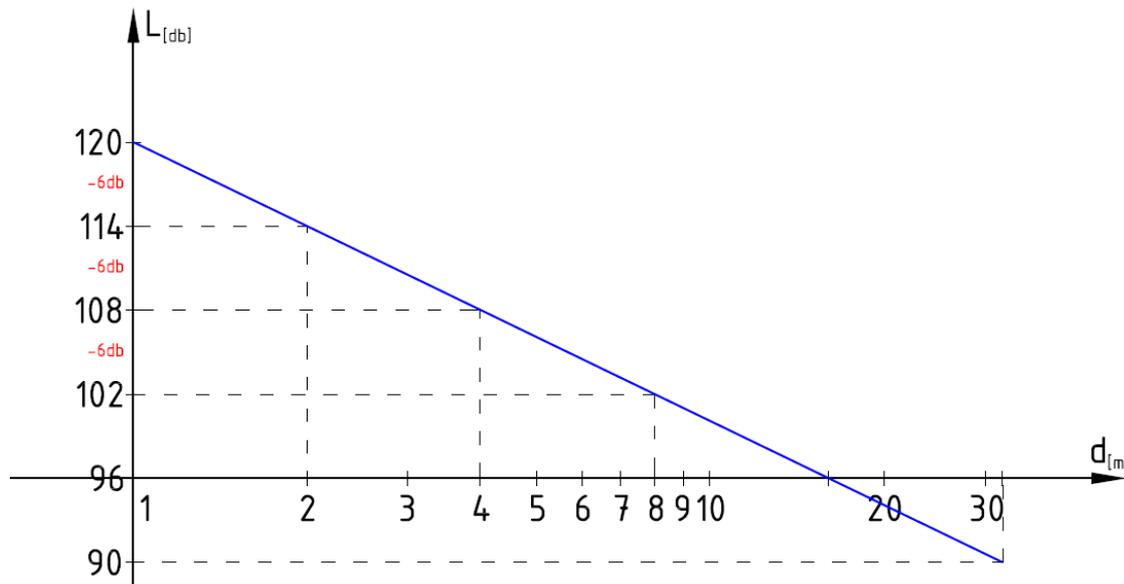
**Mg. Ing. Adriano Sabez**

*Ingeniero en Acústica  
Mg. en Acústica Arquitectónica y Medioambiental*

# Curva de la Caída del nivel con la distancia

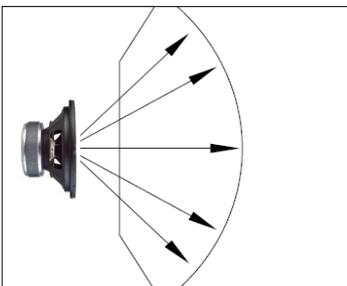
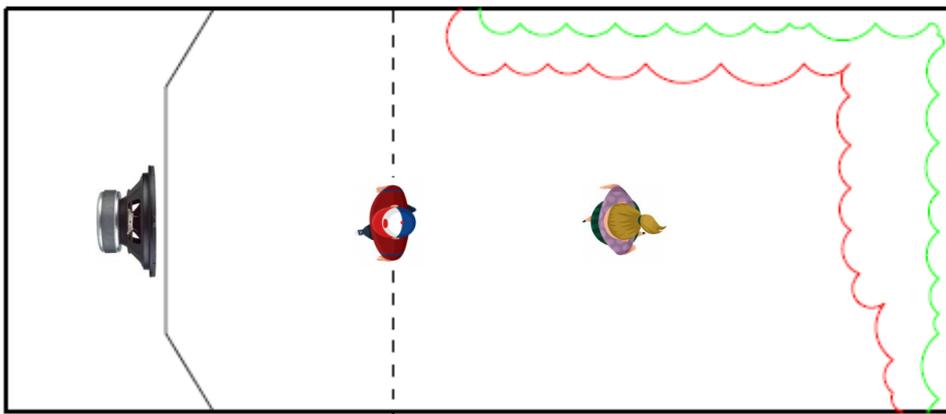


$$\Delta L_{[dB]} = 20 \log \frac{dm}{dM}$$

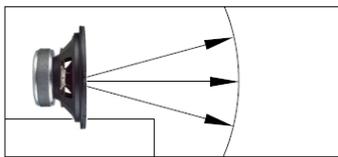


Si se duplica la distancia, la caída del nivel sonoro es de -6db

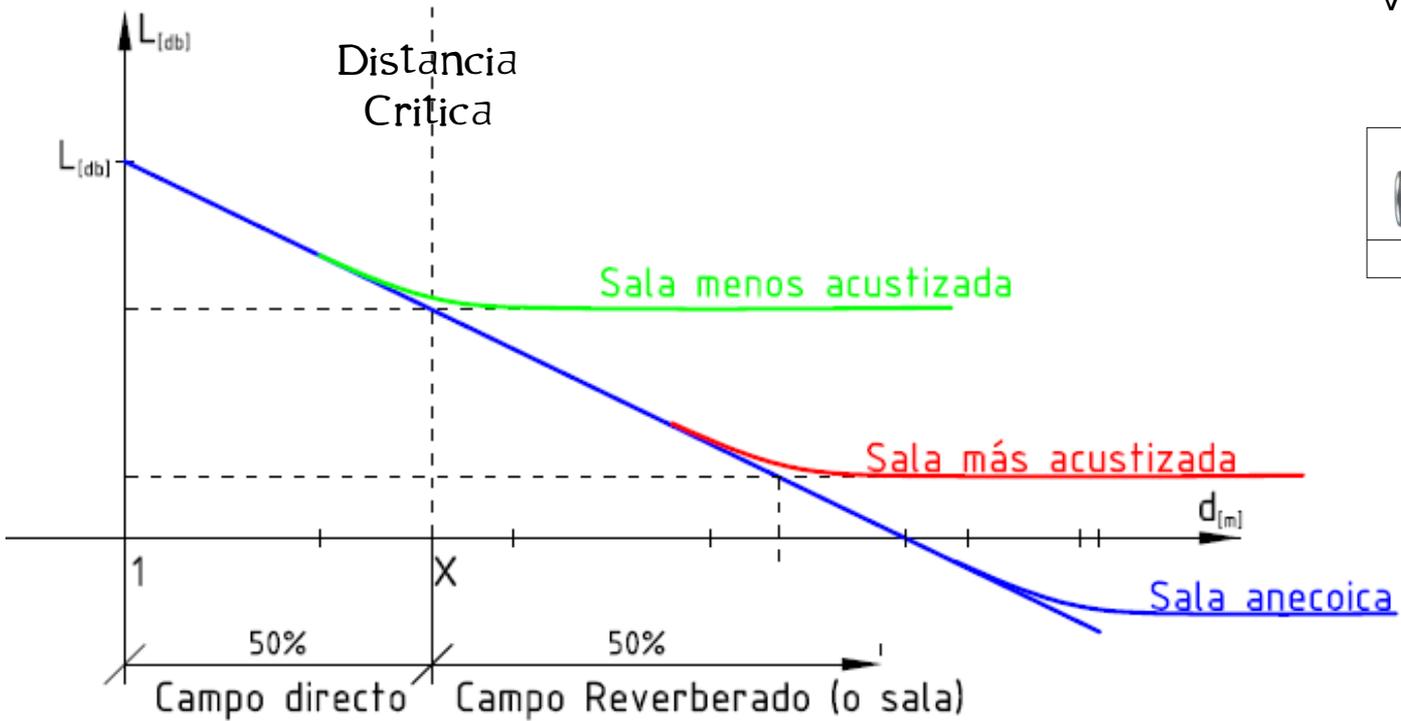
# Comportamiento del nivel sonoro en salas cerradas



Vista en planta

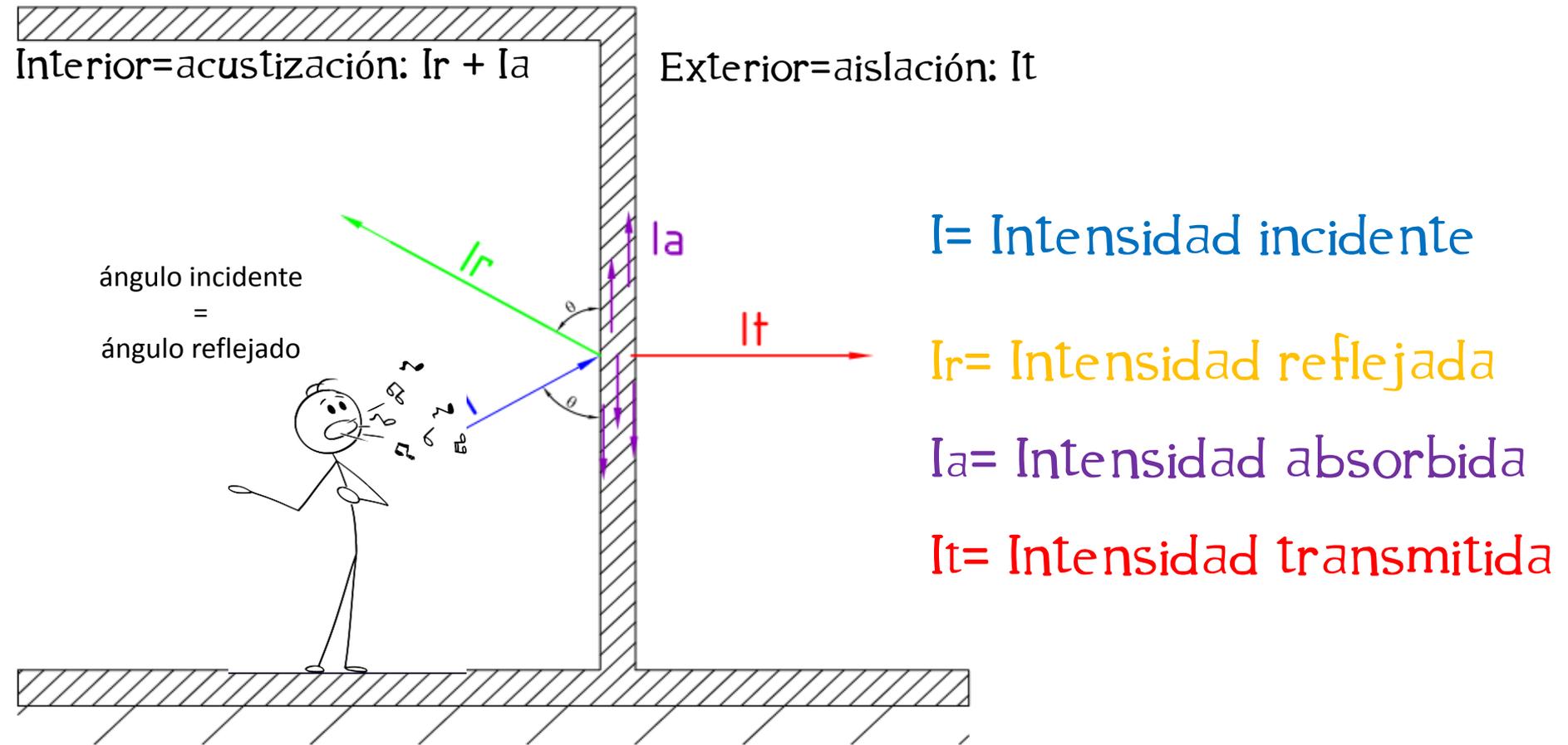


Vista lateral



# Parámetros Acústicos Fundamentales

## Reflexión, Absorción y Transmisión



# Coefficientes de Reflexión, Absorción y Transmisión

$$I_i = I_r + I_a + I_t$$

$$\left. \begin{aligned} 100 \frac{W}{m^2} &= 50 \frac{W}{m^2} + 20 \frac{W}{m^2} + 30 \frac{W}{m^2} \\ 80 \frac{W}{m^2} &= 40 \frac{W}{m^2} + 16 \frac{W}{m^2} + 24 \frac{W}{m^2} \\ 50 \frac{W}{m^2} &= 25 \frac{W}{m^2} + 10 \frac{W}{m^2} + 15 \frac{W}{m^2} \end{aligned} \right\} 1 = 0.5 + 0.2 + 0.3$$

Normalizamos (dividiendo miembro a miembro por la intensidad incidente)

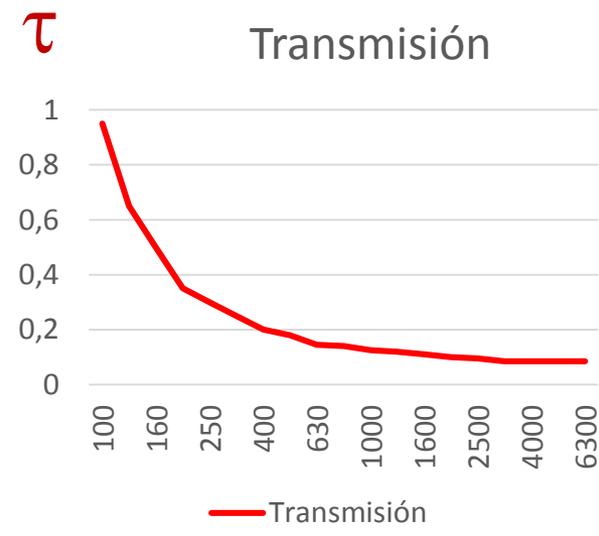
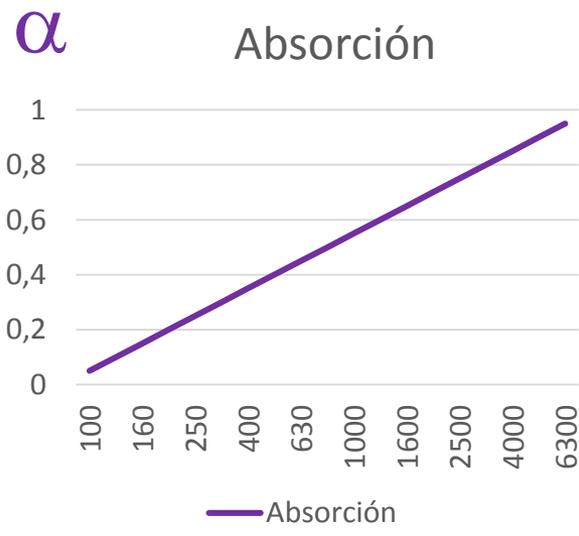
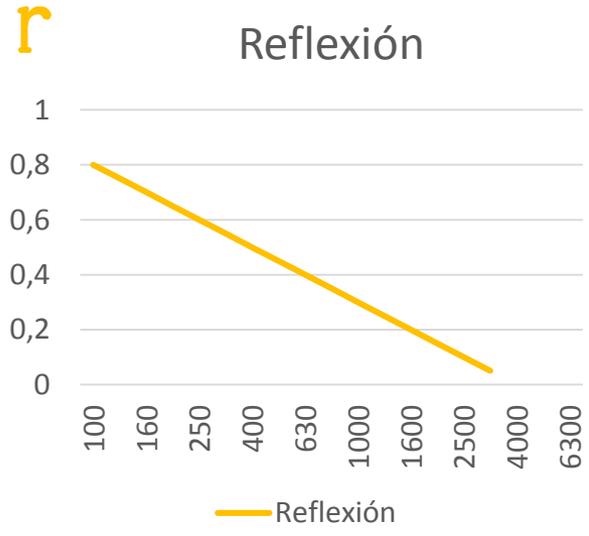
La igualdad no cambia

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_i}{I_i} &= \frac{I_r}{I_i} + \frac{I_a}{I_i} + \frac{I_t}{I_i} \\ 1 &= r + \alpha + \tau \end{aligned} \right\} \begin{aligned} 0 &< r < 1 \\ 0 &< \alpha < 1 \\ 0 &< \tau < 1 \end{aligned}$$

# Comportamiento de los parámetros acústicos a diferentes frecuencias

Ej  $r = 0,3$  ,  $\alpha = 0,55$   $\tau = 0,15$  Valores promediados con ruido rosa

## Mediciones a Varias frecuencias



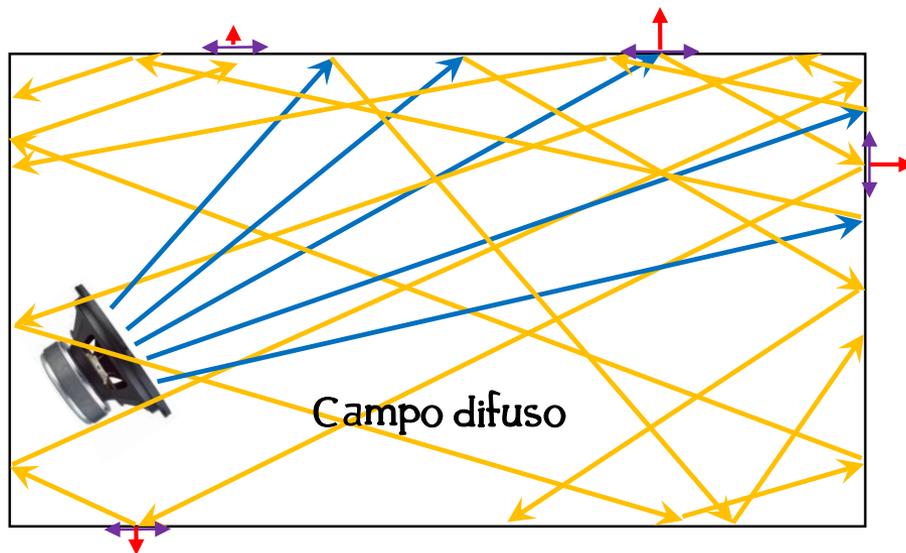
$$1000Hz = 0,3 + 0,55 + 0,15 = 1$$

# Coeficientes $r$ $\alpha$ $\tau$ de una sala

Ejemplos:

	$r$	$\alpha$	$\tau$	
	0,6	0,1	0,3	→ Sin acustizar
	0,2	0,5	0,3	→ Con tratamiento acústico

## Reflexión en una sala cerrada – Coeficiente $r$



tiempo de reverberación

A mayor  $r$ , mayor tiempo de reverberación “Tr”

$Tr_{teatro} \rightarrow 0,7s \text{ a } 1,1s$

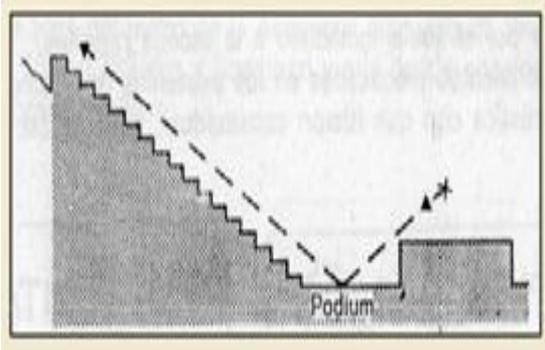
$Tr_{sala de grabacion} \rightarrow 0,1s \text{ a } 0,7s$

$Tr_{sala de control} \rightarrow 0,1s \text{ a } 0,2s$

$Tr_{sala de concierto} \rightarrow 1,1s \text{ a } 2s$



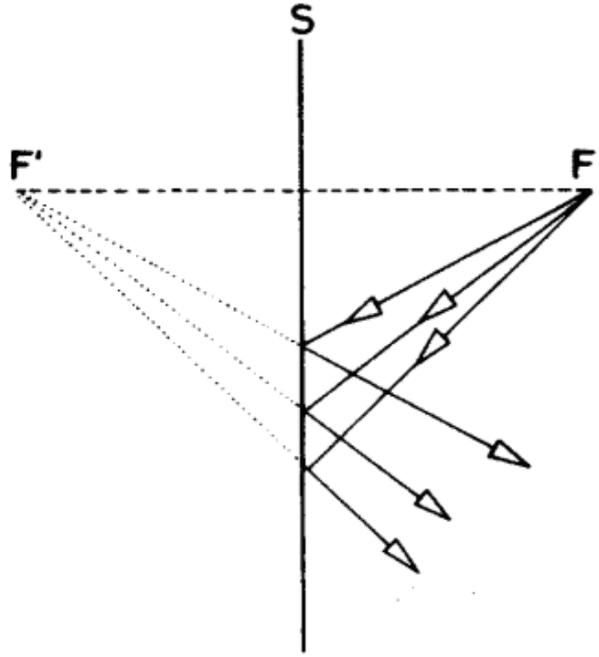
# Geometría de Salas



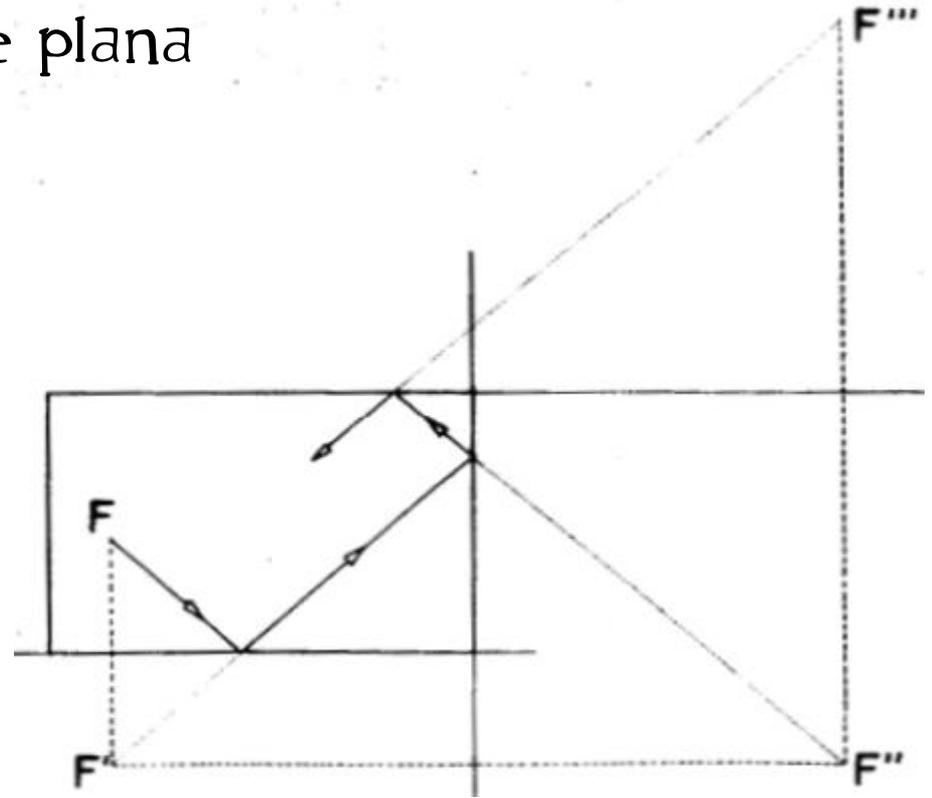
## Acústica en la Cultura Griega

La configuración de los teatros respondía al principio de reflexión del sonido para dirigirlo hacia el público, reforzando el sonido directo. Aprovechaban la ladera de una montaña para disponer un graderío semicircular.

# Reflexión sobre una superficie plana



Método de Rayos

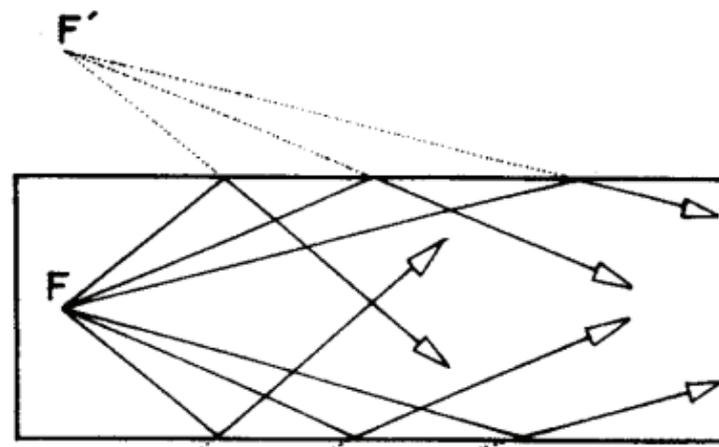


Método de Imágenes

Métodos geométrico para resolver problemas como:

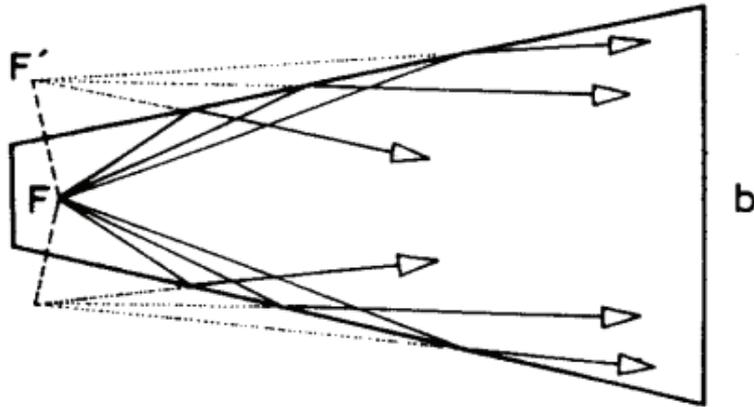
- Focalizaciones
- Ecos
- Diseño para buen sonido directo
- Diseño para el adecuado sonido reflejado

# Focalizaciones

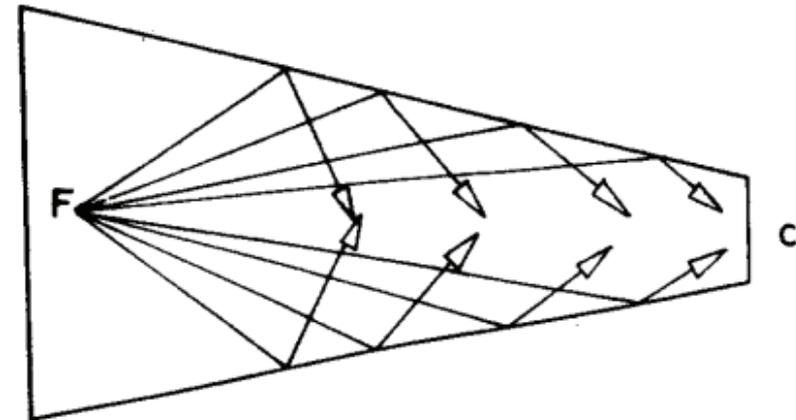


Paredes Paralelas

a Rayos alcanzan la mitad de la sala



b



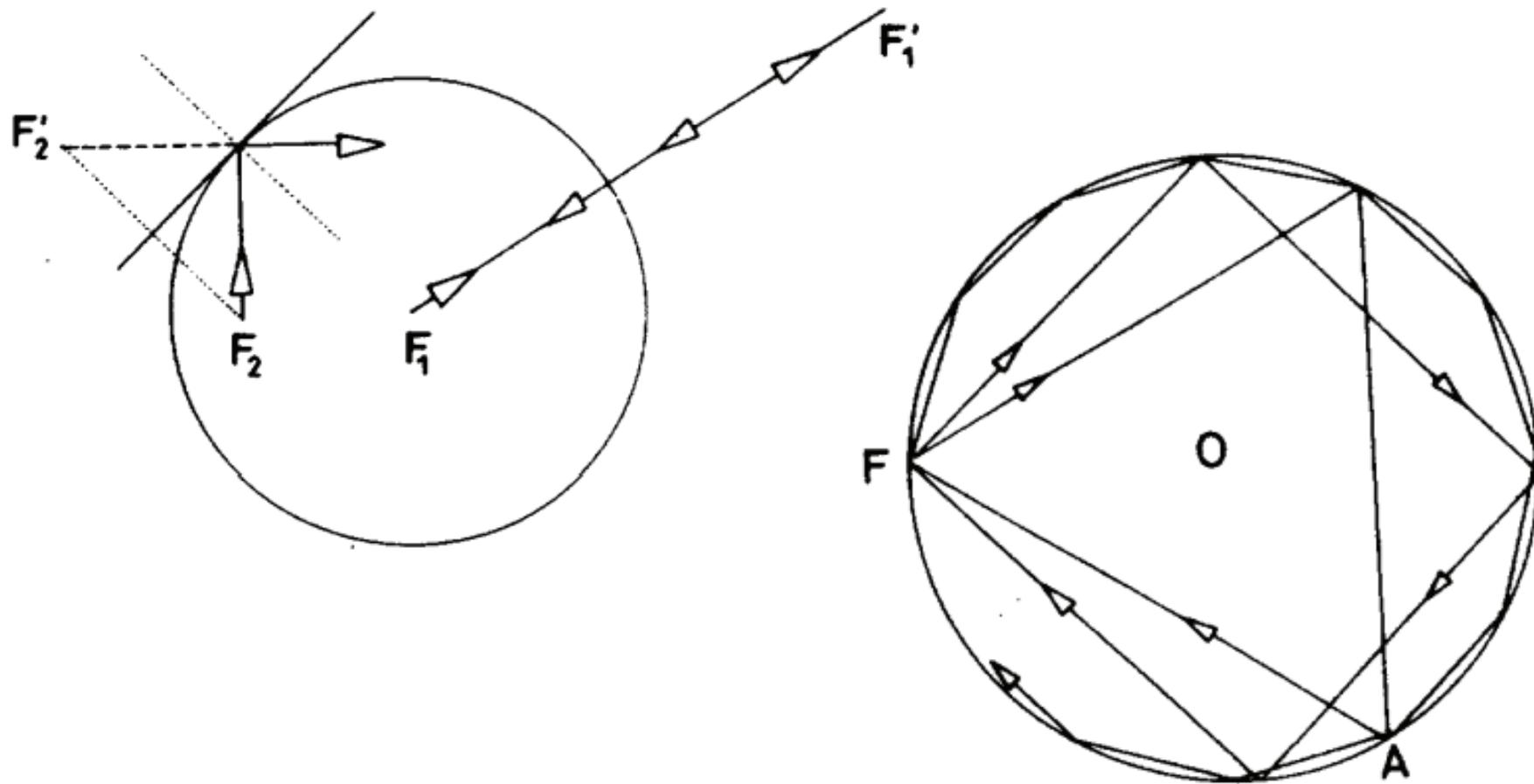
c



## Acústica en la Cultura Griega

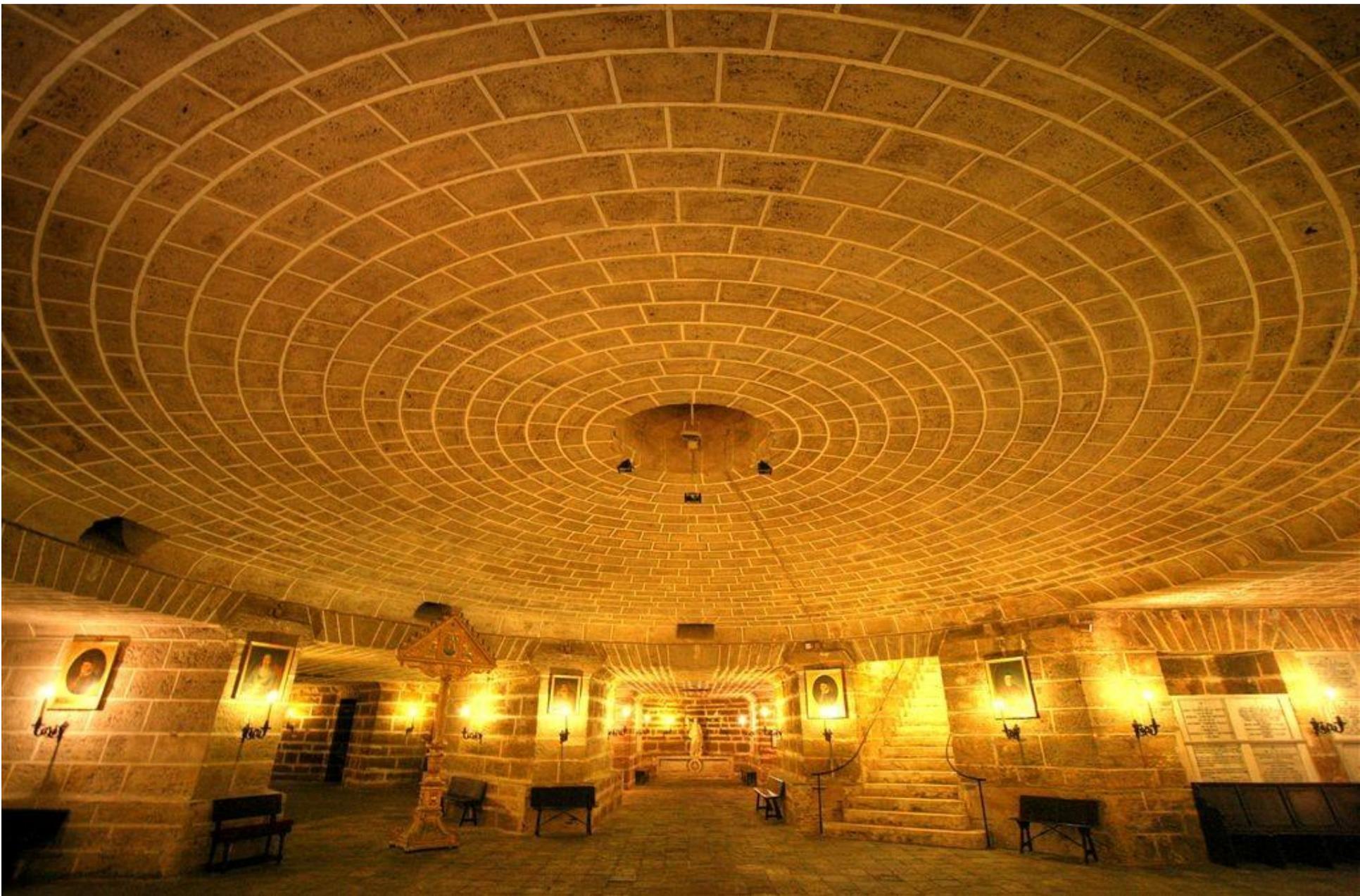
Las máscaras que llevaban los actores amplificaban la voz por medio de una abertura en la boca, con forma abocinada

# Reflexiones sobre una superficie curva



Galerías de los susurros

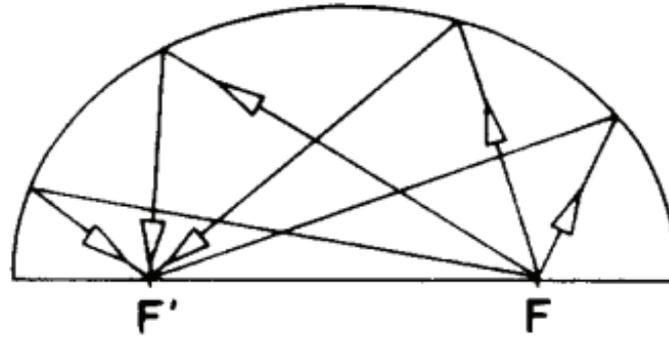
# Galería de los susurros – Cripta de la Catedral de Cádiz



# Galería de los susurros – St, Pauls Cathedral – Londres



# Reflexiones sobre una superficie cóncava

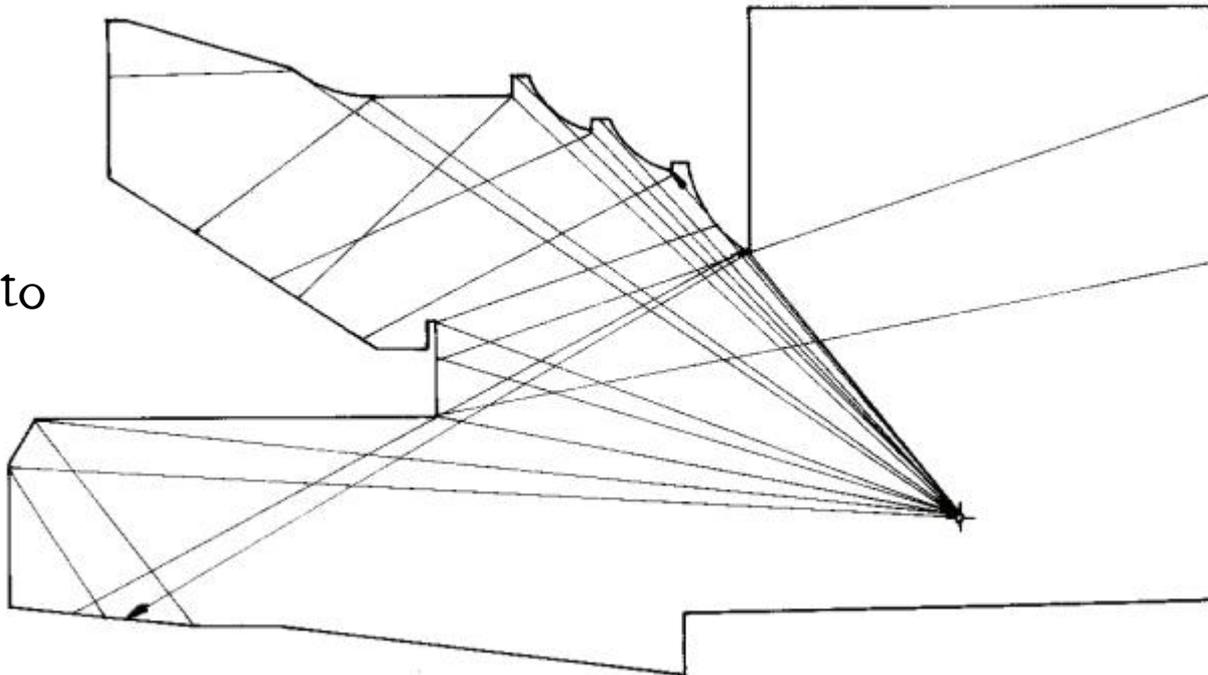


Elipse

Dos focos

Fenómeno de concentración sonora **indeseado**  
se combate con superficies convexas

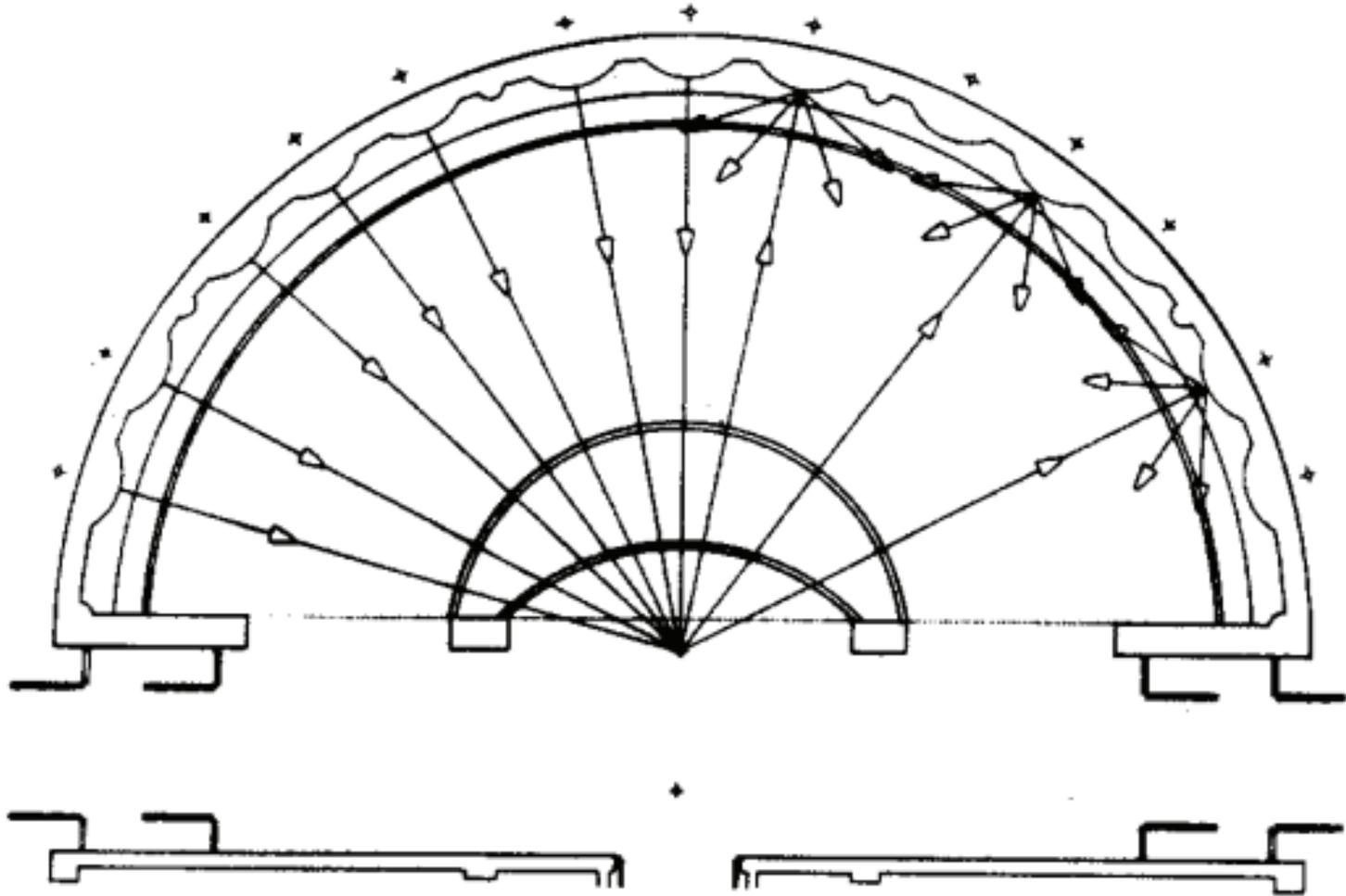
Teatro Rialto



# Teatro Rialto - Madrid

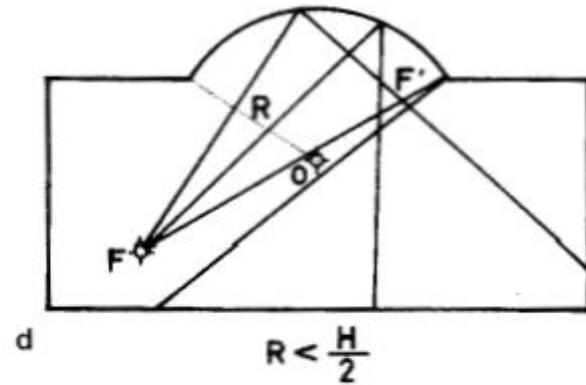
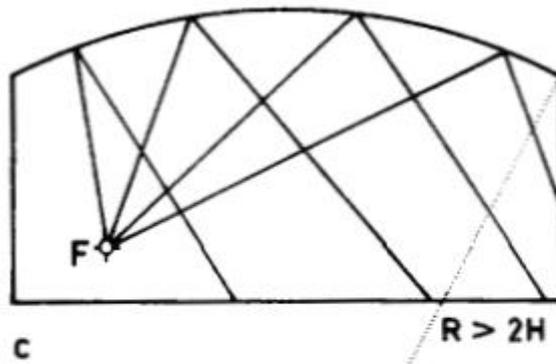
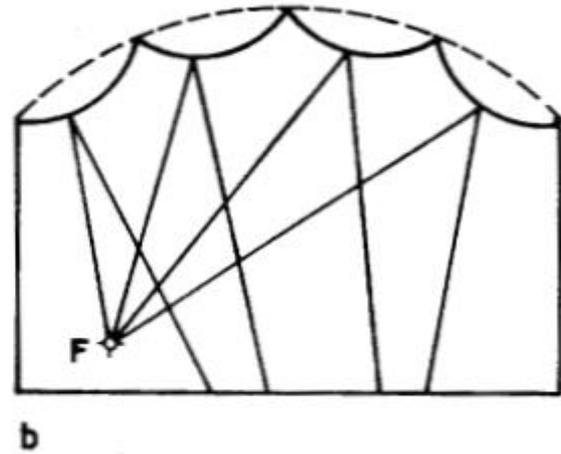
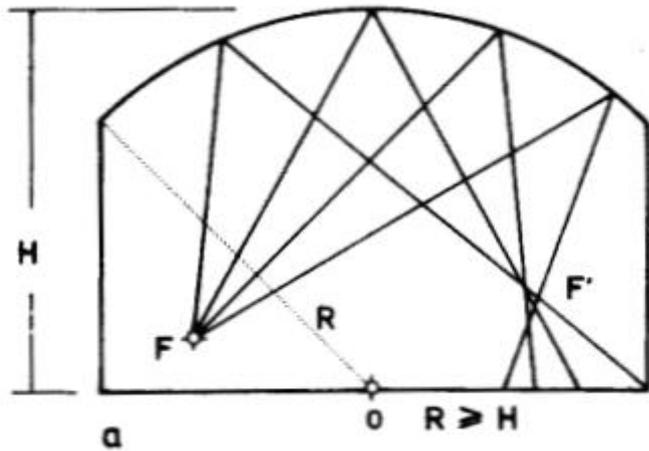


# Reflexiones sobre una superficie cóncava



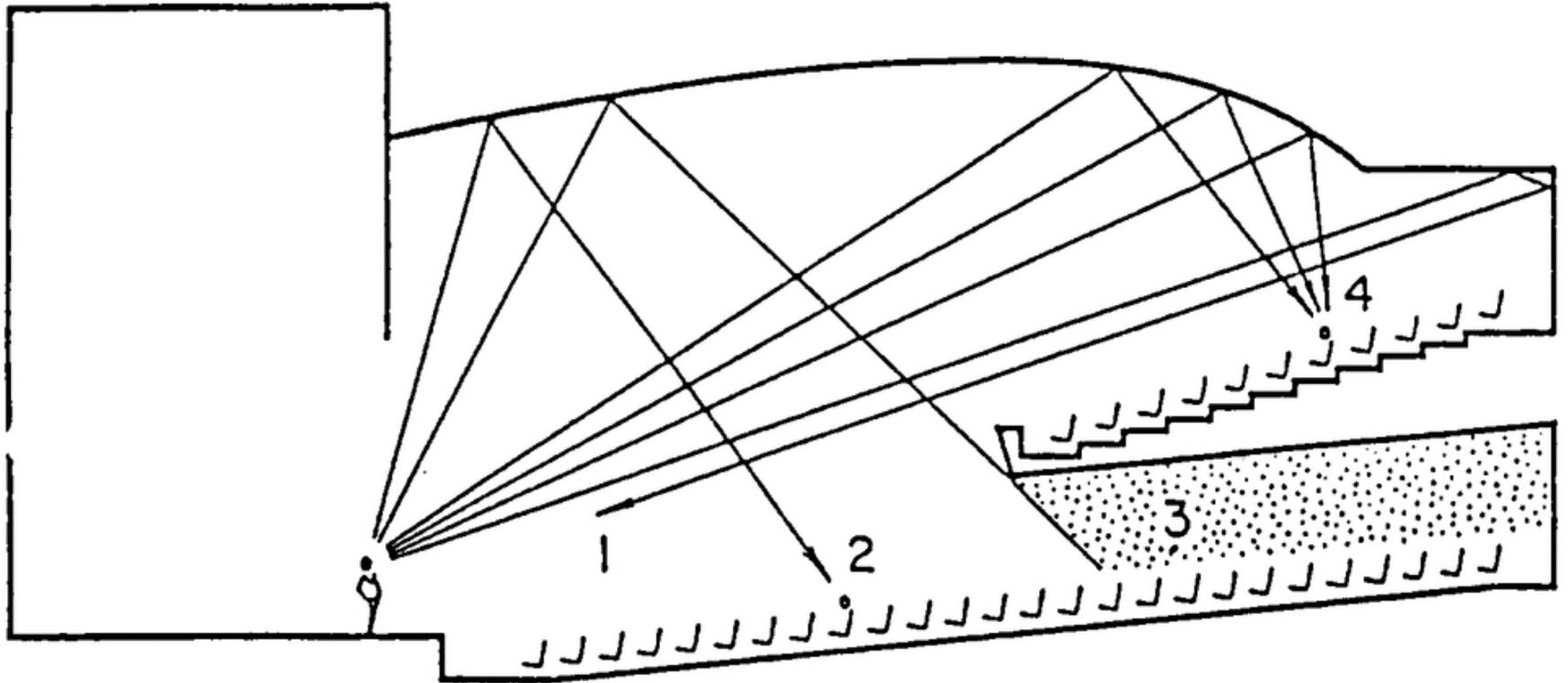
Corrección de una focalización  
mediante la superposición de figuras convexas

# Reflexiones sobre una superficie cóncava

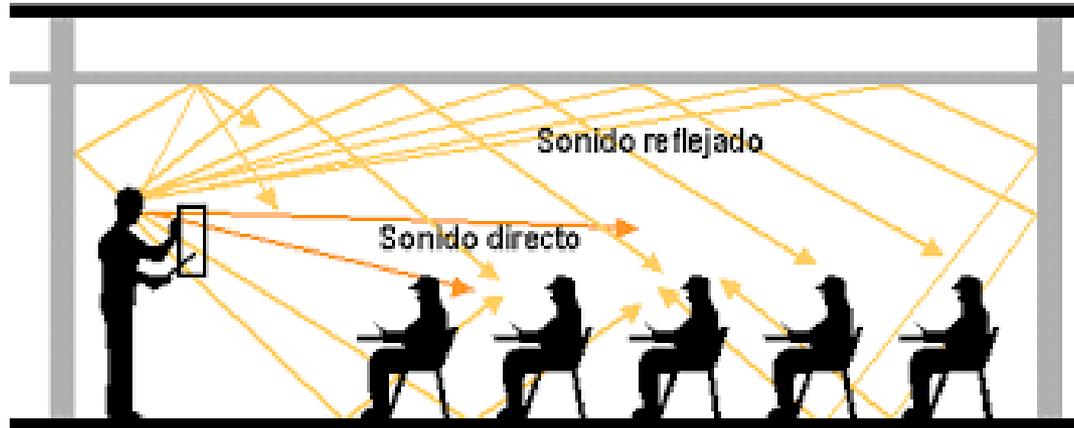




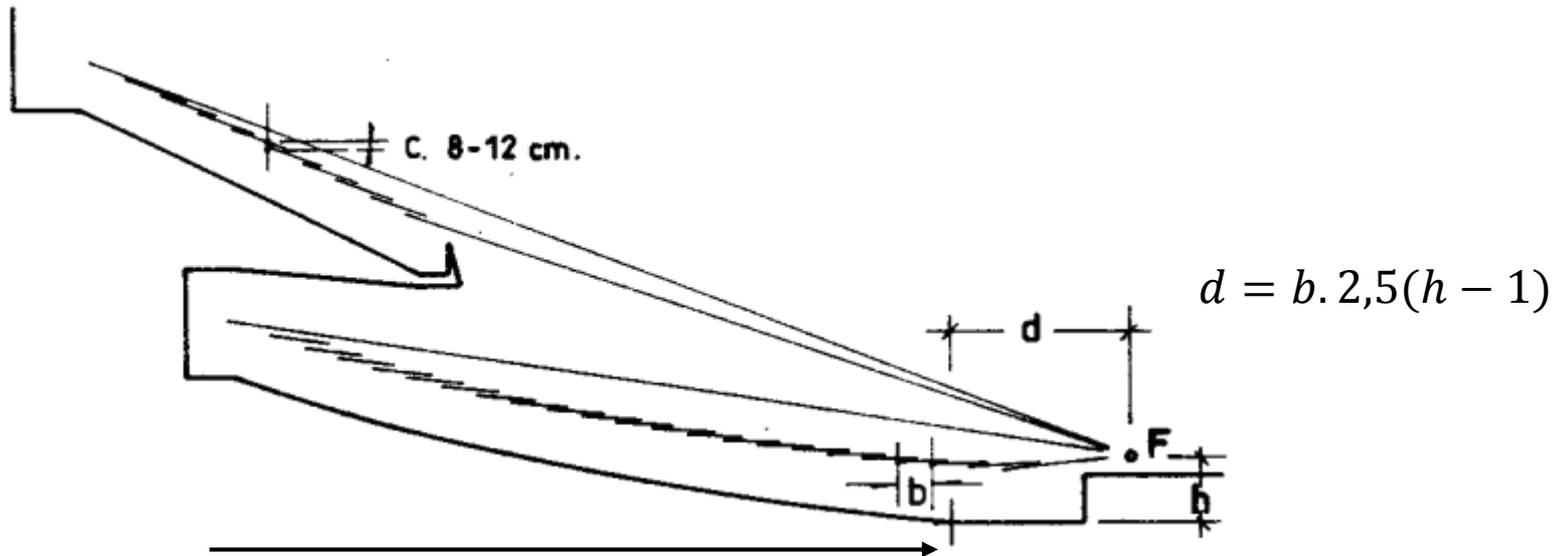
# Reflexiones sobre una superficie cóncava



# Diseño para un buen sonido directo



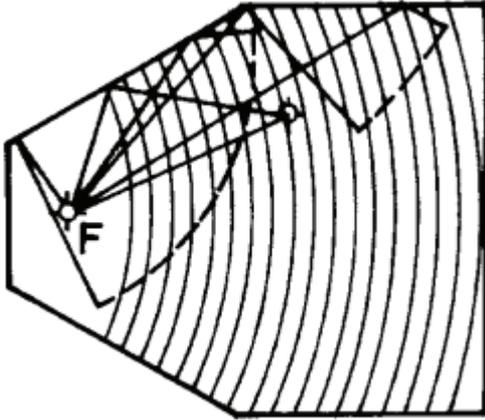
El sonido que atraviesa la zona ocupada por el público sufre una absorción a razón de  $0,65 \frac{dB}{m}$



La elevación entre dos filas consecutivas, debe ser del orden de 8 a 12 *cm*, para que el sonido directo llegue libre de las cabezas de espectadores anteriores

# Diseño para un buen sonido reflejado (o reverberado)

- Sala con superficies no muy absorbentes
- Procedimientos geométricos orientamos las superficies para direccionar las reflexiones, al menos en las frecuencias altas y medias.
- Las reflexiones permiten obtener la necesaria sonoridad en las zonas más alejadas de la fuente.



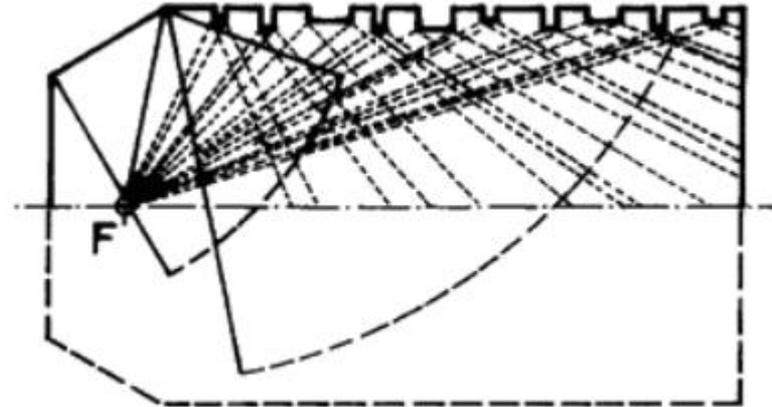
## Sala para **audición verbal**

- Reflexiones fuertes con pequeños tiempos de retraso
- Evitar reflexiones tardías.

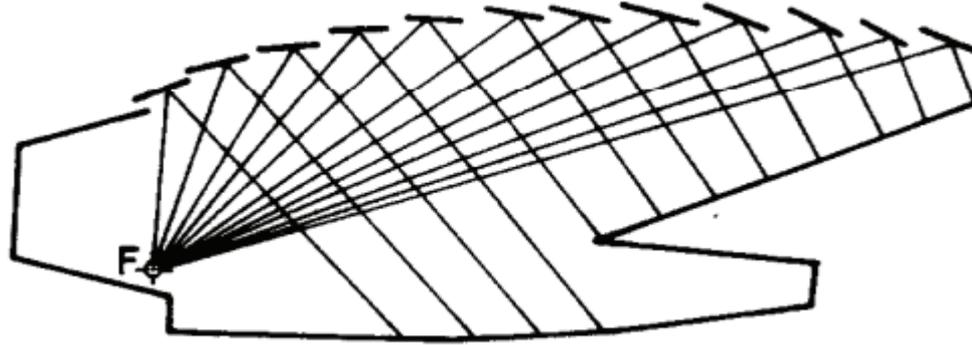
Diseño para que el receptor escuche el sonido directo, seguido inmediatamente de una o dos fuertes reflexiones antes de 30 ms.

## Sala para **audición musical**

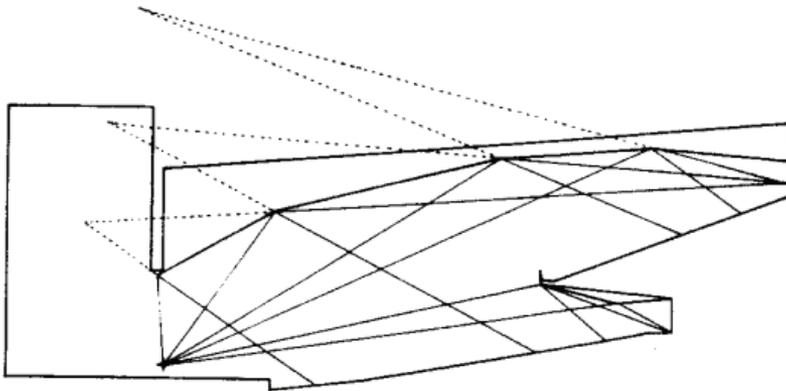
- Proveer al auditorio de muchas reflexiones con decaimiento gradualmente
- Elementos *difusores* para dispersar el sonido en todas las direcciones.



# Diseño para un buen sonido reflejado (o reverberado)

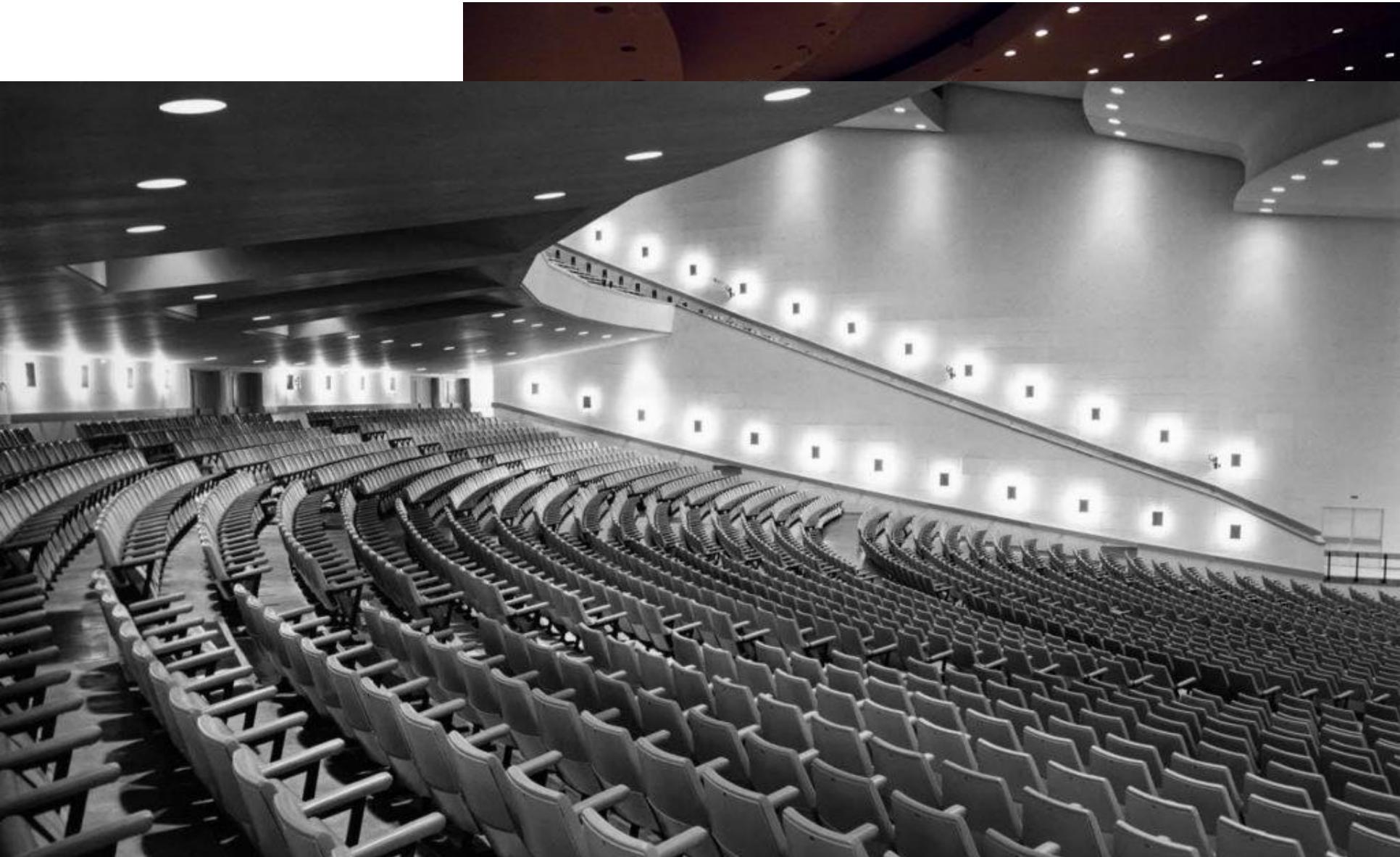


Planos reflectantes que hacen converger las reflexiones sobre el público

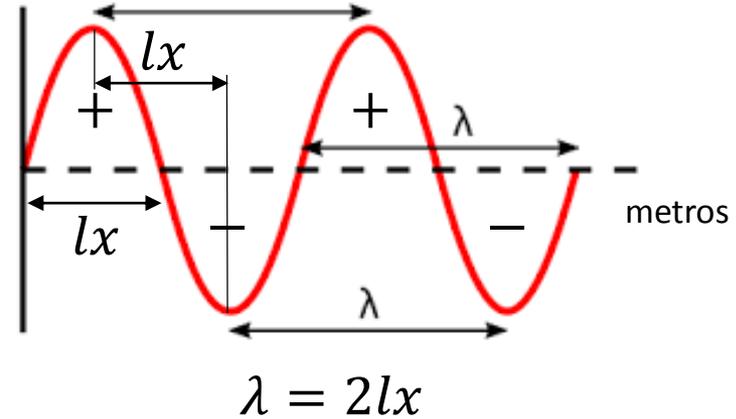
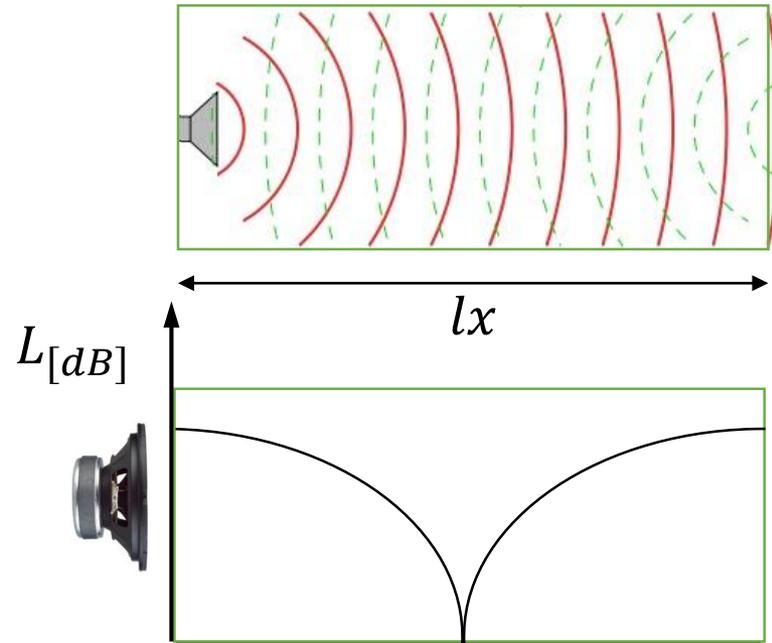


- Incrementa el nivel sonoro mediante la superposición de reflexiones.
- Compensa la pérdida de intensidad sufrida por la distancia.

# Auditorio Universidad de Cheste, Valencia



# Modos Normales de resonancia en un recinto



Resonancia “Amplitud máxima de oscilación de un elemento, cuando sus dimensiones coinciden con el “ $\lambda$ ” de una onda, o con múltiplos enteros de la misma”

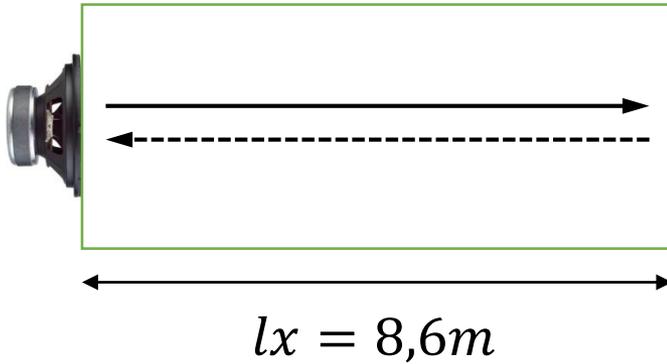


Cuerda guitarra 1

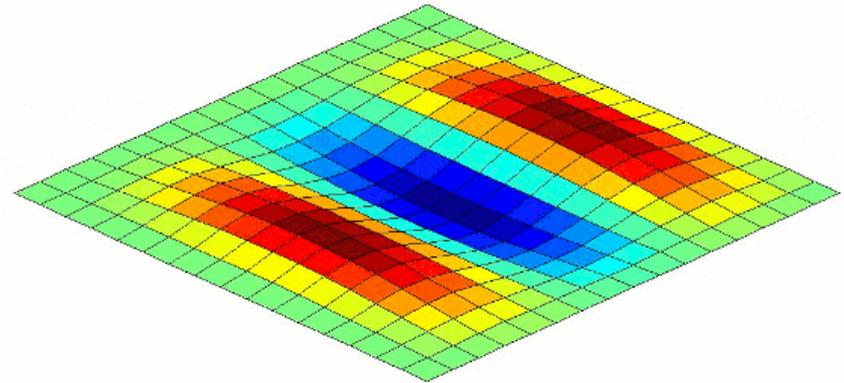
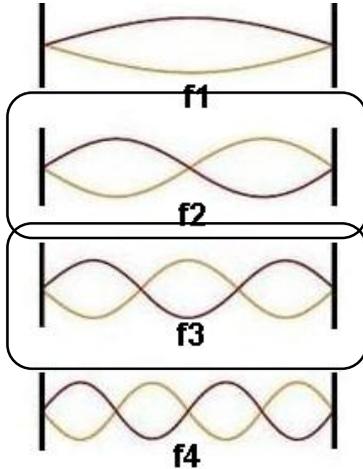


Cuerda guitarra 2

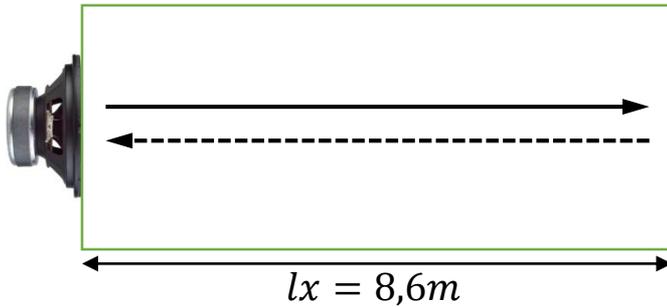
# Frecuencia de resonancia del modo normal



$$f_{lx} = \frac{\vec{v}}{\lambda} = \frac{\vec{v}}{2l_x} = \frac{344}{2(8,6)} = 20Hz$$



# Calculo de frecuencia de resonancia del modo normal de orden superior



$$f_{lx} = \frac{\vec{v}}{2lx}$$

$$f_{1x} = \frac{\vec{v}}{2lx}$$

modo normal 2

$$f_{2x} = 2 \left( \frac{\vec{v}}{2lx} \right) = 2 \left( \frac{344}{17,2} \right) = 40\text{Hz}$$

modo normal 3

$$f_{3x} = 3 \left( \frac{\vec{v}}{2lx} \right) = 3 \left( \frac{344}{17,2} \right) = 60\text{Hz}$$

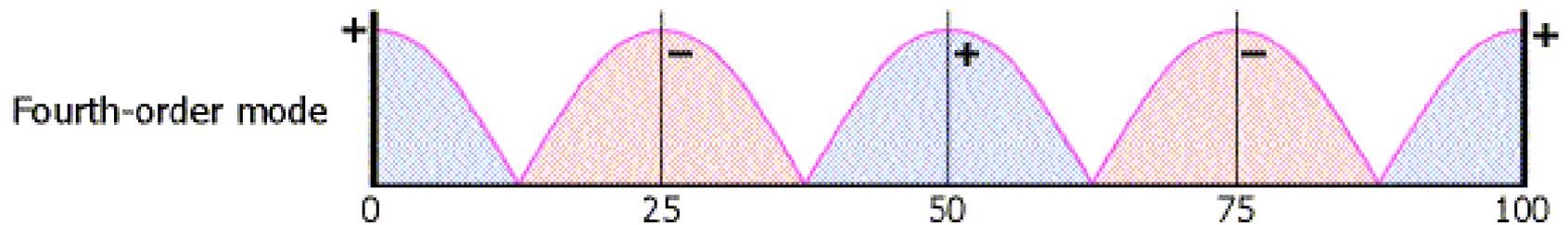
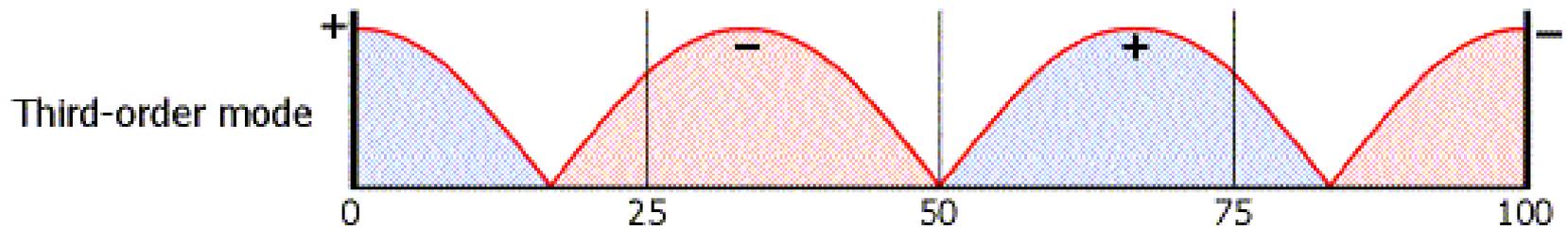
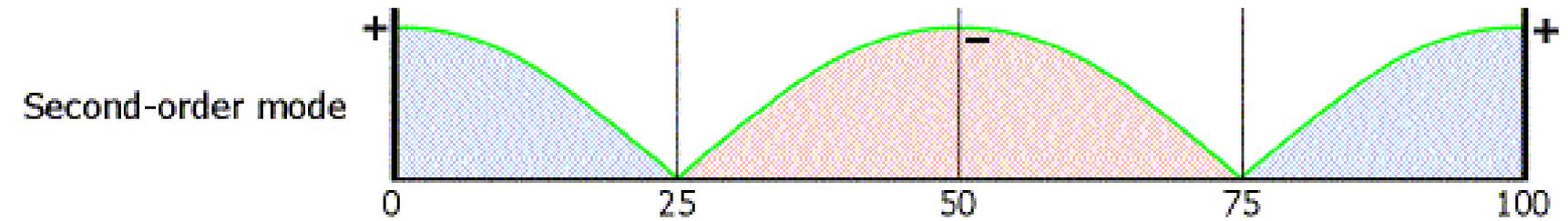
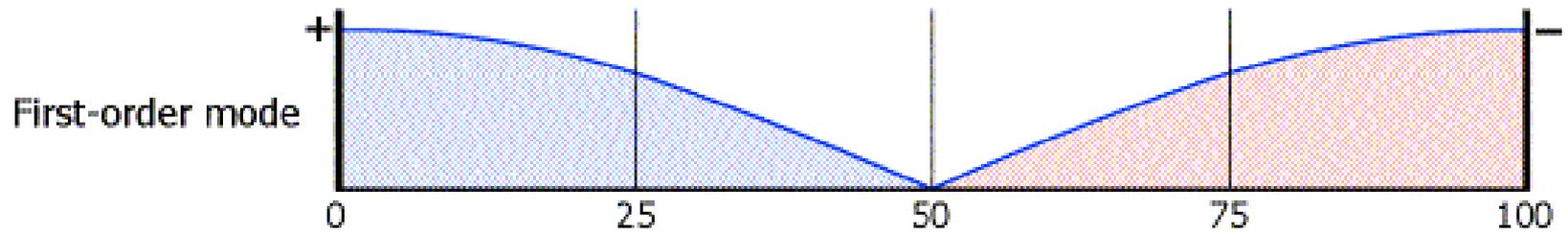
modo normal 4

$$f_{4x} = 4 \left( \frac{\vec{v}}{2lx} \right) = 4 \left( \frac{344}{17,2} \right) = 80\text{Hz}$$

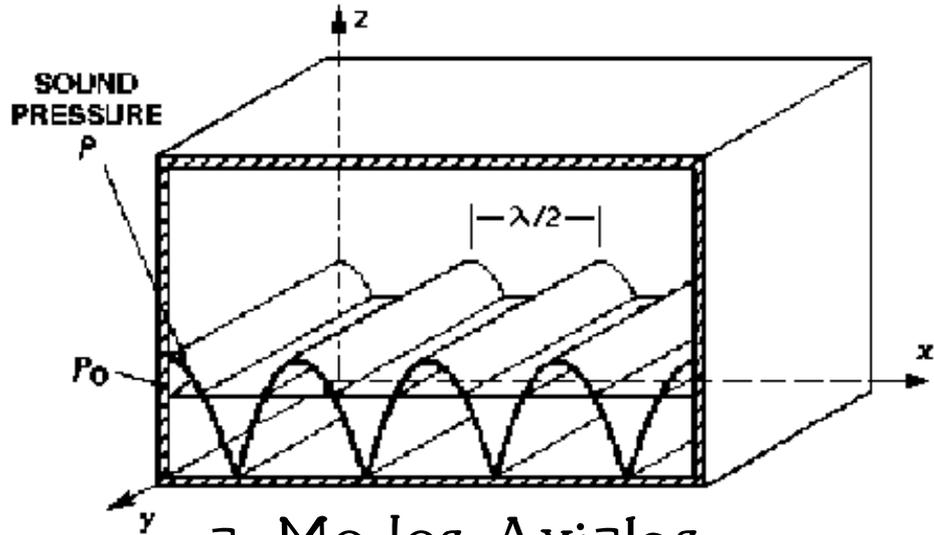
En general

$$f_{nx} = n \frac{\vec{v}}{2lx}$$

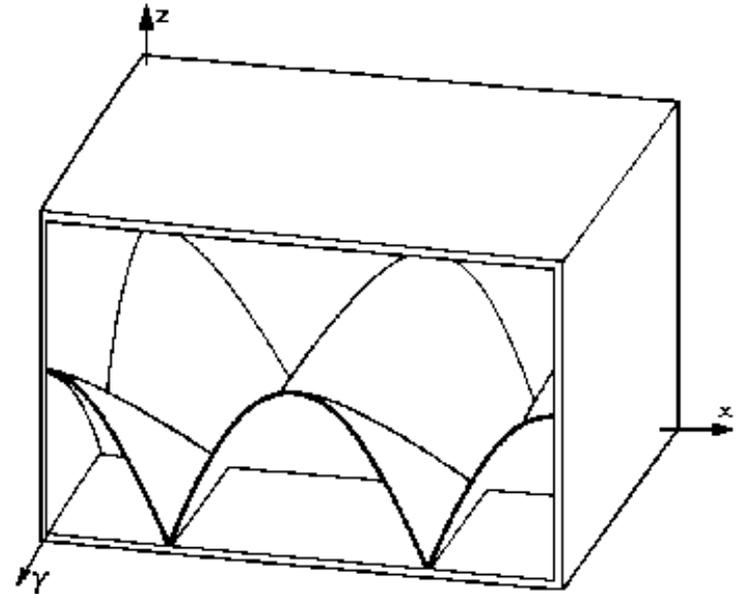
# Frecuencia de resonancia del modo normal



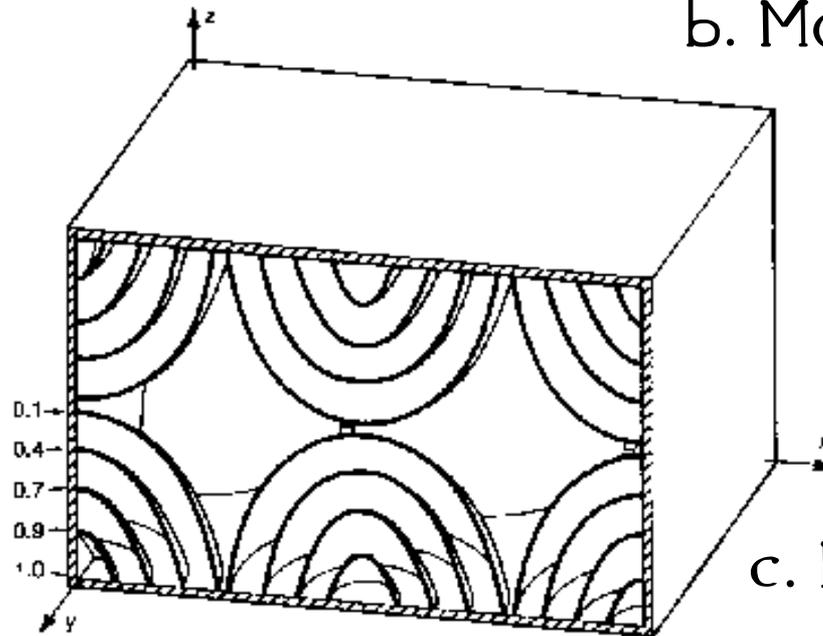
# Resonancias de los modos normales en 3 ejes



a. Modos Axiales

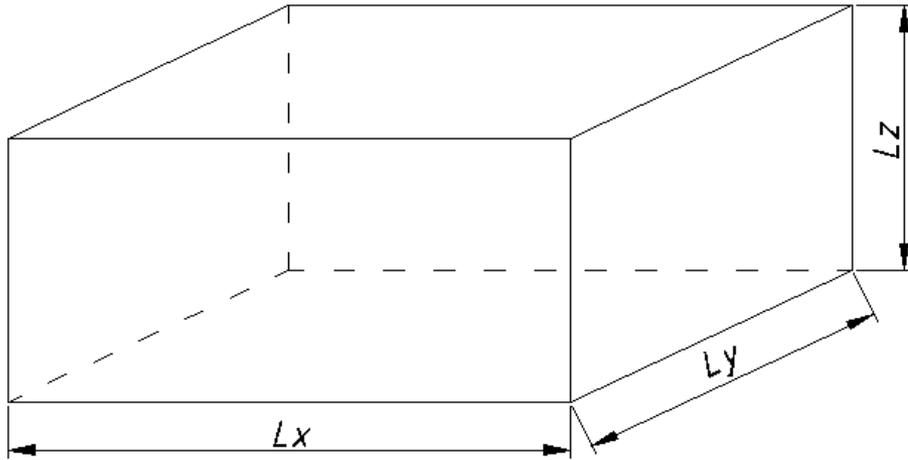


b. Modos tangenciales



c. Modos oblicuos

# Calculo de frecuencia de resonancia de los modos normales en 3 ejes



## Tipos de Modos Normales

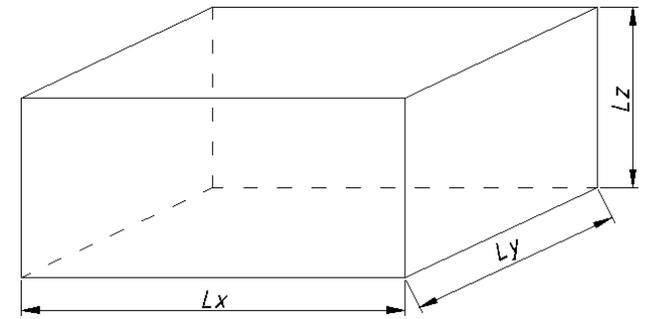
- a. Modos Axiales
- b. Modos Tangenciales
- c. Modos Oblicuos

Ecuación general para todas las frecuencias de todos los modos

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

# Ej: Modos normales más molestos

$l_x$  = Largo (10 metros)  
 $l_y$  = Ancho (5 metros)  
 $l_z$  = Alto (3 metros)



$$f_{1,0,0} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_z}\right)^2} = f_{1,0,0} = \frac{\vec{v}}{2} \cdot \frac{1}{l_x}$$

$$f_{1,0,0} = \frac{\vec{v}}{2 \cdot l_x} \quad f_{0,1,0} = \frac{\vec{v}}{2 \cdot l_y} \quad f_{0,0,1} = \frac{\vec{v}}{2 \cdot l_z}$$

$$f_{1,0,0} = \frac{344}{20} = 17,2 \text{ Hz} \quad f_{0,1,0} = \frac{344}{10} = 34,4 \text{ Hz}$$

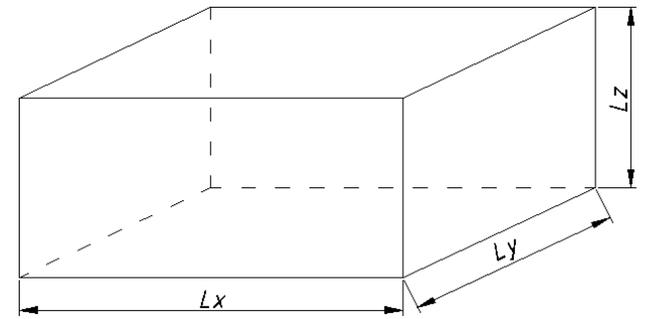
$$f_{0,0,1} = \frac{344}{6} = 57,3 \text{ Hz}$$

# Ej: Modos normales más molestos

$l_x$  = Largo (10 metros)

$l_y$  = Ancho (5 metros)

$l_z$  = Alto (3 metros)



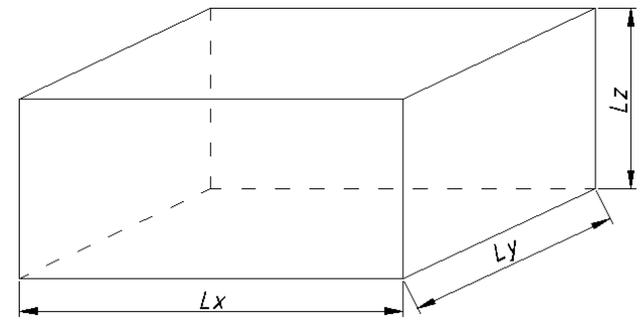
$$f_{1,1,0} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{0}{l_z}\right)^2}$$

$$f_{1,1,0} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_y}\right)^2} \quad f_{1,0,1} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_z}\right)^2}$$

$$f_{0,1,1} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_z}\right)^2}$$

# Ej: Modos normales más molestos

$l_x$  = Largo (10 metros)  
 $l_y$  = Ancho (5 metros)  
 $l_z$  = Alto (3 metros)



$$f_{1,0,0} = 17,2 \text{ Hz}$$

$$f_{0,1,0} = 34,4 \text{ Hz}$$

$$f_{0,0,1} = 57,3 \text{ Hz}$$

$$f_{1,1,0} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_y}\right)^2} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{5}\right)^2} = 38,46 \text{ Hz}$$

$$f_{1,0,1} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_z}\right)^2} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2} = 59,85 \text{ Hz}$$

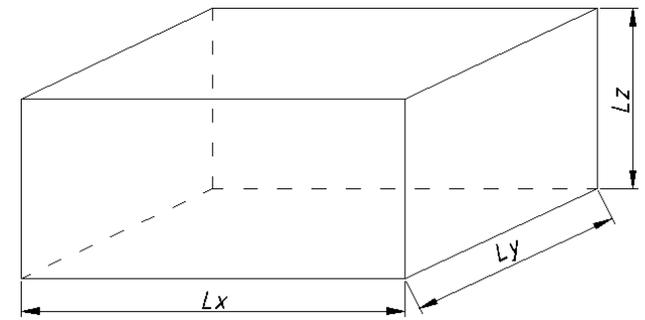
$$f_{0,1,1} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_z}\right)^2} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2} = 66,86 \text{ Hz}$$

# Ej: Modos normales más molestos

$l_x$  = Largo (10 metros)

$l_y$  = Ancho (5 metros)

$l_z$  = Alto (3 metros)



$$f_{1,0,0} = 17,2 \text{ Hz}$$

$$f_{1,1,0} = 38,46 \text{ Hz}$$

$$f_{0,1,0} = 34,4 \text{ Hz}$$

$$f_{1,0,1} = 59,85 \text{ Hz}$$

$$f_{0,0,1} = 57,3 \text{ Hz}$$

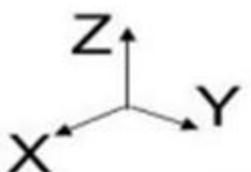
$$f_{0,1,1} = 66,86 \text{ Hz}$$

$$f_{1,1,1} = \frac{\vec{v}}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2} = 69 \text{ Hz}$$

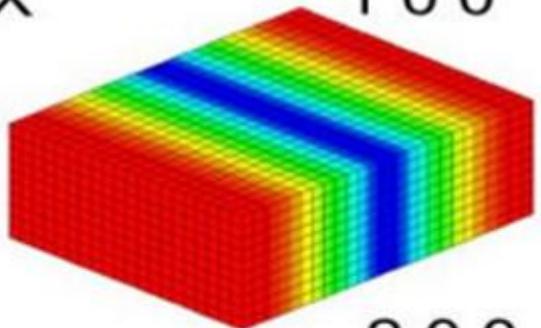
$$f_{2,0,0} = 34,4 \text{ Hz}$$

$$f_{0,2,0} = 68,8 \text{ Hz}$$

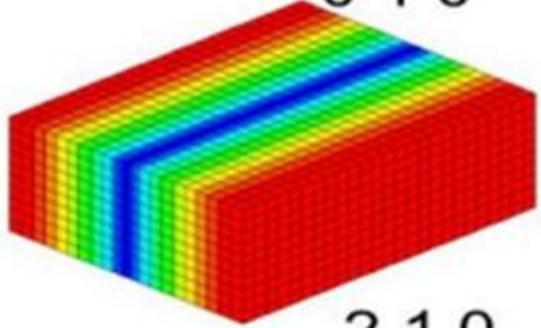
$$f_{0,0,2} = 114,6 \text{ Hz}$$



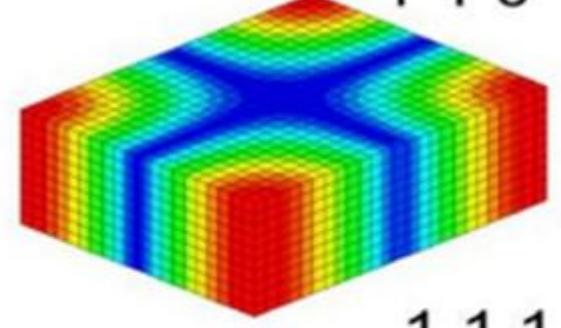
1 0 0



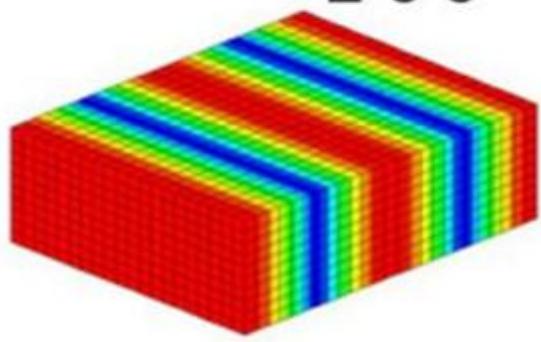
0 1 0



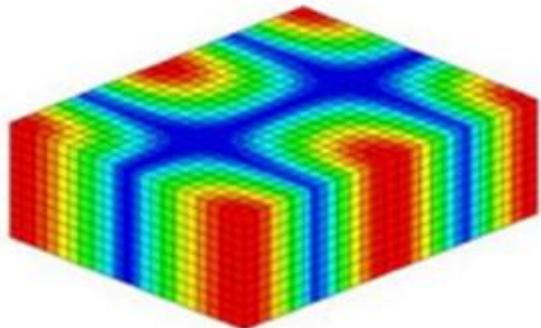
1 1 0



2 0 0



2 1 0



1 1 1

