

TEMAS TECNICOS

ACONDICIONAMIENTO ACUSTICO DE SALAS DE ESPECTACULOS

Por Mariano Rodríguez-Avial, Arquitecto

El objetivo intentado en este artículo es el de condensar en pocas líneas los conceptos fundamentales y las normas generales a seguir en el acondicionamiento acústico de salas de espectáculos. Es, por tanto, un estudio de carácter elemental, y el interés que puede tener, si tiene alguno, es la condensación o extracto citado.

En relación con la Arquitectura, las representaciones teatrales y musicales, films sonoros, música sagrada y sermones, conferencias y reuniones, se verifican en salas o locales. Cada ocupante debe oír en buenas condiciones. Para asegurarlo hay que *acondicionar acústicamente las salas*.

Por otra parte, hay que luchar contra el ruido. Perturba las audiciones en salas, el trabajo en oficinas, el descanso y comodidad del hogar. A esto corresponde otro estudio, el *Aislamiento contra el ruido*. No tratamos ahora de éste.

ELEMENTOS DEL SONIDO

Lo origina el movimiento vibratorio de un cuerpo transmitido al aire, que lo propaga. Se llama sonido simple o puro si son vibraciones simples cuya gráfica es una senoide.

Los sonidos, en general, son complejos. Constan de uno puro (nota fundamental) y otros puros de frecuencias múltiples de la de aquél (armónicos).

En cada sonido hay tono, intensidad y timbre. El tono o altura caracteriza al sonido; es la frecuencia del sonido fundamental o *número de períodos por segundo*. Período es el tiempo de una vibración completa.

$$\text{Período} = \frac{1}{\text{Frecuencia}}$$

La gama de frecuencias musicales se extiende entre 80 y 4.200 períodos por segundo.

La *intensidad* con que se percibe el sonido depende de la amplitud del movimiento vibratorio y de la distancia a la fuente sonora. Disminuye proporcionalmente al cuadrado del alejamiento de la fuente sonora.

Por el *timbre* distinguimos dos sonidos de igual tono emitidos por instrumentos musicales distintos. Se debe a los armónicos superpuestos al sonido fundamental. Un sonido complejo no puede representarse por una senoide (figs. 1 y 2).

MEDIDA DE LA INTENSIDAD DEL SONIDO

Hay que distinguir intensidad física e intensidad auditiva. La primera mide la potencia, o sea la energía que en la unidad de tiempo actúa sobre el oído cuando éste percibe un sonido. Depende de la presión de la onda sonora.

Pero lo que nos importa es la sensación auditiva. Ocurre el notable fenómeno de que la sensación auditiva (intensidad auditiva) no varía

proporcionalmente a la excitación (intensidad física). En efecto, si oímos dos sonidos, y uno de ellos es de intensidad física diez veces superior al otro, la impresión subjetiva del que lo oye es de que la relación es mucho menor.

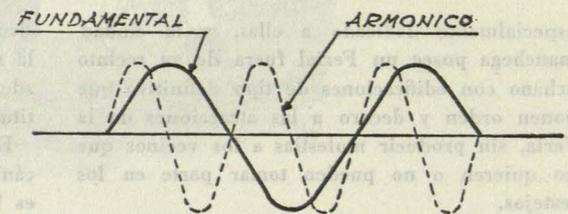


FIG. 1

La sensación obedece aproximadamente a la *ley de Fechner*, que dice: «La intensidad de la sensación auditiva varía como el logaritmo de la excitación o intensidad física.» Es decir, si tenemos sonidos cuyas intensidades físicas varían como los números 10, 100, 1.000, etc., la sensación o intensidad auditiva varía como los números 1, 2, 3, etc.

Esta ley o correspondencia es sólo aproximada. Además, varía dicha ley con la frecuencia del sonido. Para la frecuencia 1.000, es cuando dicha correspondencia se aproxima más a la ley definida.

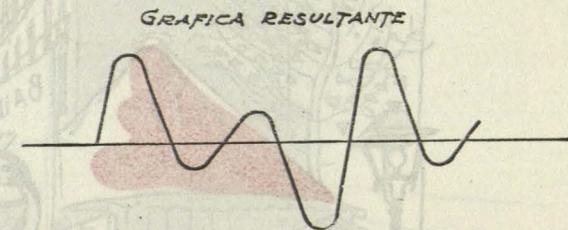


FIG. 2

DEFINICION DE LAS UNIDADES DE SENSACION O INTENSIDAD AUDITIVA

Se ha convenido en decir que dos sonidos difieren 1 *bel* cuando sus intensidades físicas están en la relación de 10 a 1. Dos sonidos difieren *n bels* cuando sus intensidades están en la relación de 10ⁿ.

En la práctica no se emplea el *bel*, pues corresponde a un intervalo muy grande para las necesidades corrientes. Se emplea un submúltiplo, el *decibel*, que es la décima parte del *bel*.

LEYES DE PROPAGACION. REFLEXION

Ya sabemos así en cuantos *decibels* difieren dos sonidos; pero para saber los *decibels* que tiene cada uno falta fijar un nivel cero, o sea una intensidad física a la que convengamos en decir que le corresponde cero *decibels*. Es lo mismo que hacemos con las temperaturas, en las que asignamos los cero grados a un determinado estado de calor.

Se conviene en *asignar el nivel cero a una intensidad física de 6 milivattios*, que es la intensidad mínima necesaria para que el oído perciba impresión de sonido.

Las definiciones anteriores se refieren a sonidos puros. Al aplicar estas unidades a sonidos complejos o ruidos se pierde mucha precisión. Sin embargo, tienen un valor práctico y cómodo, y por ello se usan corrientemente para medir cualquier sonido o ruido. Para tener una idea de los valores de la intensidad auditiva damos a continuación una escala con los valores de la intensidad en *decibels* de unos cuantos sonidos o ruidos corrientes.

	110	
	100	Motor de aviación.
En avión.....	90	Martillo neumático.
(muy ruidoso).	80	En el Metro.
En el tren.....	70	Tráfico muy intenso.
(ruidoso).	60	En el tren a vapor.
En la calle.....	50	Conversación corriente (a 1 m.).
(medio).	40	En un vagón salón tranquilo (50 km./hora).
En la casa.....	30	Calle de viviendas.
(tranquilo).	20	Jardín tranquilo.
En el campo.....	10	Conversación a media voz.
(muy tranquilo)	0	Nivel de audición.

Al llegar a 130 *decibels*, la audición se hace ya dolorosa.

PROPAGACION DEL SONIDO

Se propaga por ondas esféricas a través del aire con centro en fuente sonora. Las vibraciones del aire son longitudinales, y dan lugar a la formación de ondas de compresión y dilatación de las capas sucesivas.

La distancia que separa en cada instante dos ondas consecutivas es la longitud de onda. Si λ es longitud de onda, V velocidad de propagación y T período o tiempo de una vibración, $\lambda = V \cdot T$

Como T es igual a $\frac{1}{f}$, f (frecuencia), $\lambda = \frac{V}{f}$

Conocido f , o sea el tono, sabremos longitud de onda.

La velocidad de propagación en el aire es de 340 metros por segundo.

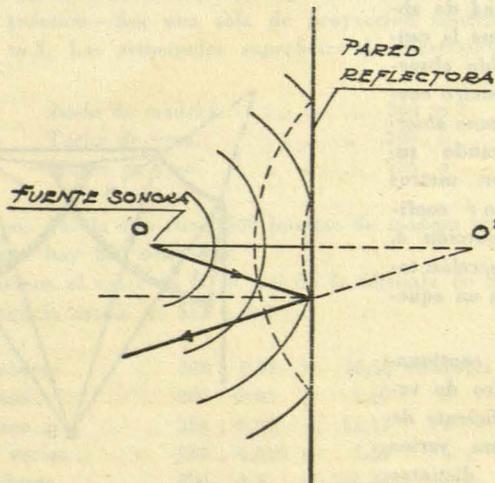


FIG. 3

Se refleja el sonido del mismo modo que la luz, pero sin que sea necesario el pulimento de la superficie. Una materia rugosa puede dispersar la luz, pero reflejar el sonido.

Si O es la fuente sonora (fig. 3), los rayos reflejados se comportan como si procedieran de una fuente sonora virtual O' , simétrica de O respecto a la superficie de reflexión.

Las condiciones de la audición en una sala dependen en su mayoría de la reflexión del sonido.

La persistencia de la impresión en el tímpano es de $\frac{1}{15}$ de segundo.

Por otra parte, la velocidad de propagación es de 340 m./seg., y en $\frac{1}{15}$ de segundo recorrerá el sonido 22 m. Luego, si la diferencia de recorrido entre rayo directo y rayo reflejado es mayor que 22 m., llegará el reflejado cuando ya terminó la impresión sonora del directo; se perciben dos sonidos distintos y hay *eco* (fig. 4).

REFLEXIONES EN EL INTERIOR DE UNA SALA

Figura 5.— S es fuente sonora; A , el auditor. Tras el rayo directo llegan al auditor una serie de rayos reflejados en instantes sucesivos, según longitud del camino recorrido por cada uno. Cada percepción es más débil que la anterior, por ser más largo el recorrido. La impresión es la de un alargamiento de intensidad decreciente, del sonido escuchado (cola sonora). Este es el fenómeno de la reverberación. El sonido puede sufrir 200 ó 300 reflexiones antes de extinguirse completamente.

Hay rayos reflejados que llegan con diferencia de recorrido respecto al directo, mucho mayor de 22 m., pero menor que 22 m. respecto a los reflejados que llegaron antes. Así, el rayo 6 difiere en su recorrido respecto al 1 más de 22 m., pero menos respecto al 4 y al 5. No hay, por tanto, *eco* en este caso.

El peligro corriente de *eco* tiene lugar cuando la diferencia de recorrido entre el rayo directo y el reflejado de una sola reflexión supera a 22 m. Por ejemplo, en sala con techo muy alto (fig. 6).

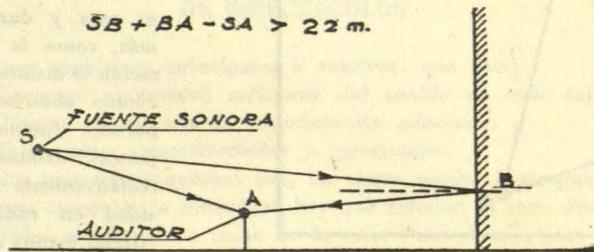


FIG. 4

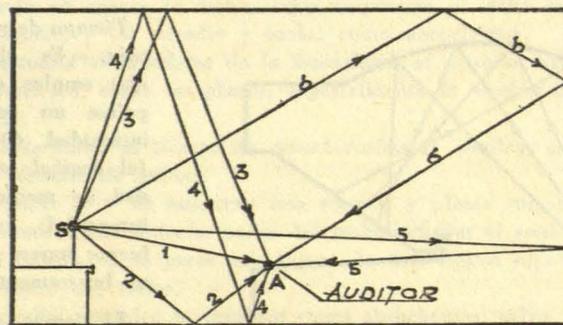


FIG. 5

Las superficies cóncavas producen concentración del sonido, casi siempre peligrosa (fig. 7).

Especialmente, cuando el haz reflejado tiene recorrido mayor que 22 m. respecto al directo (fig. 8), hay eco muy molesto.

Aunque respecto a reflejados anteriores sea el recorrido menor que 22 m., se percibirá, superpuesto a la cola sonora, pero claramente, un fuerte eco del sonido producido.

Las superficies convexas, por el contrario, dispersan los rayos que reflejan. Tienen por esto aplicación para dispersar los rayos en los casos en que su reflexión normal sería nociva, y no interesa, por otra parte, la absorción, sino que conviene difundirlos por toda la sala (fig. 9).

INTERFERENCIAS Y RESONANCIAS

Las interferencias se producen por superposición de una onda directa y una reflejada procedente, por ejemplo, de una pared plana de gran superficie. Al llegar defasadas puede producirse en algún punto reforzamiento o concentración molesta de sonido, o, al contrario, zonas de silencio.

Las resonancias pueden producirse cuando hay concordancia entre la frecuencia de vibración propia de un cuerpo contenido en la sala y la frecuencia del sonido producido.

Una pared delgada de madera contrachapada, con una cierta frecuencia propia de vibración, puede vibrar por efecto de una voz de tenor al dar notas de aquella frecuencia, convirtiéndose en fuente sonora secundaria (resonancia). El cuerpo que entra en vibración puede ser el aire contenido en una cavidad reducida, como un nicho.

REVERBERACION

Se comprende que, en cuanto es un poco larga, dificulta mucho la audición. A cada sonido se superpone la cola sonora del anterior; la audición resulta confusa, especialmente para entender las palabras cuyo ritmo es mucho más rápido que el de la música.

Conviene, sin embargo, algo de reverberación, si no la audición es seca y dura. Además, como la reverberación se disminuye, haciendo absorbentes las paredes (menos reflejantes), disminuye correlativamente la intensidad en cada punto (llegan menos rayos reflejados para refuerzo), y puede ser insuficiente.

El principal problema del acondicionamiento acústico es conseguir una duración conveniente de reverberación.

Tiempo de reverberación. — Es el tiempo que emplea en extinguirse un sonido de intensidad 60 decibel (el decibel es la unidad de medida de la intensidad), cuando la fuente sonora se detiene bruscamente.

El tiempo de reverberación conveniente depende de: la clase de audición, el volumen de la sala y la frecuencia del sonido.

Hay gráficas según la clase de audición, dando el tiempo conveniente de reverberación en función del volumen. Ejemplo: la figura 10 para salas de cine sonoro. El tiempo de reverberación tiene tolerancia entre dos límites. Esta gráfica vale para la frecuencia 512 ciclos/segundo (la media importante).

Es práctico el siguiente cuadro (Hemardinquer), que da los tiempos convenientes de reverberación en el caso de sonidos naturales y en el caso de reproducción por altavoz, y tratándose de las frecuencias más corrientes. (Quizá da valores un poco altos.)

Volumen de la sala en m ³		Tiempo en segundos para sonidos naturales	Tiempo en segundos para reproducción en altavoz
Menos de	200 m.3	Máx. 1,3	Máx. 0,8
De	200 a 600 »	» 1,4	» 0,9
»	600 a 1.200 »	» 1,5	» 1,0
»	1.200 a 2.600 »	» 1,6	» 1,1
»	2.600 a 4.300 »	» 1,8	» 1,2
»	4.300 a 7.000 »	» 1,9	» 1,4
»	7.000 a 10.000 »	» 2,1	» 1,6
»	10.000 a 15.000 »	» 2,3	» 1,9

Se debe acondicionar la sala para que su tiempo de reverberación sea el conveniente cuando la frecuencia es la media (512 c./s.). Debe luego comprobarse si para otras frecuencias (bajas y altas) los tiempos de reverberación son correctos. Estos los sabemos por el gráfico de la figura 11. Para salas de volumen dado, determina los tiempos correctos de reverberación según las frecuencias.

COMO SE HALLA EL TIEMPO DE REVERBERACION QUE TIENE UNA SALA (PARA SONIDOS DE UNA CIERTA FRECUENCIA)

Depende del volumen de la sala y del valor absorbente de sus materiales (para esa frecuencia). Cuanto más absorben, menos reflejan y, por tanto, más corta es la cola sonora o reverberación.

Coefficiente de absorción de un material. Al llegar la onda sonora a una pared, parte se refleja y parte se pierde (atraviesa la pared o se extingue en ella). La relación entre energía perdida y energía total es el coeficiente de absorción.

Como unidad de absorción se toma la cantidad de sonido absorbida por un metro cuadrado de ventana abierta. Multiplicando superficie S en metros cuadrados por coeficiente de absorción a, tendremos absorción total aS medida en aquella unidad.

Damos a continuación un cuadro de valores del coeficiente de absorción para varios materiales y distintas frecuencias.

Para cada espectador

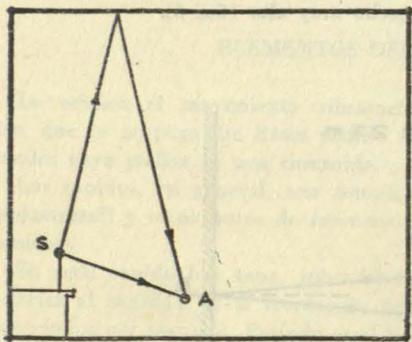


FIG. 6

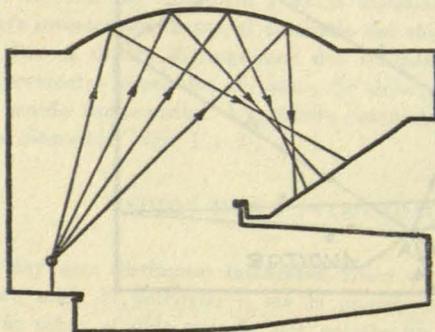


FIG. 7

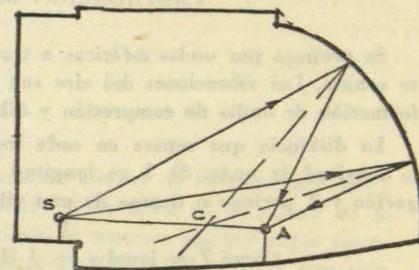


FIG 8

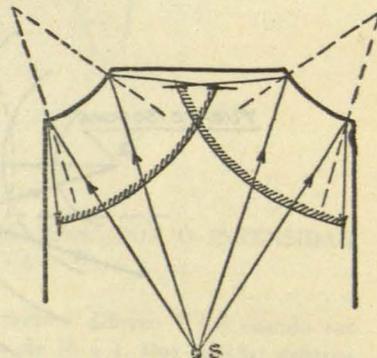


FIG. 9

y cada asiento se da, en vez del coeficiente de absorción, la cantidad total de absorción que le corresponde.

Materiales	Coeficientes de absorción para sonidos de frecuencia igual a		
	256 c./s.	512 c./s.	2.048 c./s.
Ventana abierta.....	1	1	1
Yeso.....	0,015	0,02	0,04
Ladrillo.....	0,025	0,032	0,05
Cristal.....		0,027	0,020
Madera.....	0,03	0,06	0,1
Corcho en placas de 2" de grueso...	0,17	0,35	0,34
Fibra de vidrio de 50 mm. de espesor.	0,63	0,78	0,83
Alfombra gruesa.....	0,08	0,21	0,27
Cortina de algodón.....	0,07	0,13	0,32
Cortinaje espeso con pliegues.....	0,31	0,50	0,66
Espectador.....	0,21	0,4	0,71
Silla o sillón de madera.....	0,016	0,024	0,040
Silla o sillón de tapicería con asiento y respaldo guarnecido de crin.....	0,33	0,28	0,34

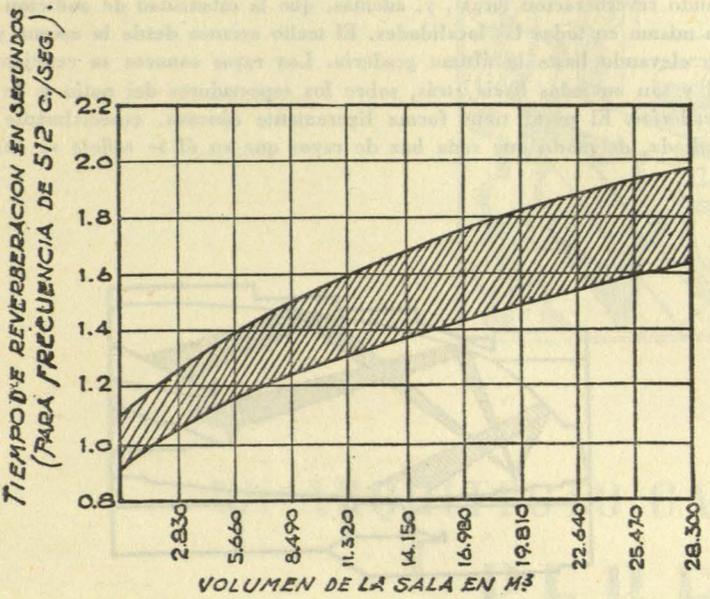


FIG. 10

El valor aproximado del tiempo de reverberación se determina aplicando la fórmula empírica de Sabine:

$$T = \frac{0,16 V}{A}$$

T, tiempo de reverberación en segundos; V, volumen en m.3, y A, unidades totales de absorción, tomando superficies en m.2.

Ejemplo práctico.—Sea una sala de proyección sonora de volumen V = 3.100 m.3. Las principales superficies de materiales se distribuyen así:

Suelo de madera.....	280 m.2
Techo de yeso.....	280 »
Muros en yeso.....	556 »

Supongamos que la sala tiene 500 butacas de madera sin forrar y que ordinariamente hay 350 ocupadas.

Determinemos el valor de A = a S de la fórmula de Sabine. (Suponiendo frecuencia media de 512 c./s.)

Suelo de madera.....	280 . 0,06 = 16,80	unidades de absorción.
Techo en yeso.....	280 . 0,02 = 5,60	» » »
Muros en yeso.....	556 . 0,02 = 11,12	» » »
150 butacas vacías.....	150 . 0,024 = 3,60	» » »
350 espectadores.....	350 . 0,4 = 140,00	» » »
a S = A = 177,12		» » »

Aplicando fórmula de Sabine, $T = \frac{0,16 \cdot 3.100}{177,12} = 2,8$ seg. Pero según

cuadro antes indicado, el valor conveniente de T es 1,2 seg. De la fórmula deducimos las unidades de absorción que debiera tener la sala:

$$A = \frac{0,16 V}{T} = \frac{0,16 \cdot 3.100}{1,2} = 413.$$

Como sólo disponemos de 177 unidades, necesitamos 413 - 177 = 236. Hay que introducir en la sala materiales más absorbentes.

Empleemos, por ejemplo, fibra de vidrio de 50 mm. de espesor, sustituyendo parte de la superficie de las paredes. Plantearemos:

$$x \cdot 0,78 - x \cdot 0,02 = 236 \Rightarrow x \cdot 0,76 = 236 \Rightarrow x = 310 \text{ m.2 de superficie a revestir.}$$

Después de este cálculo debe comprobarse si para las frecuencias bajas y altas el valor de T se aproxima a lo que indique el gráfico de la figura 11.

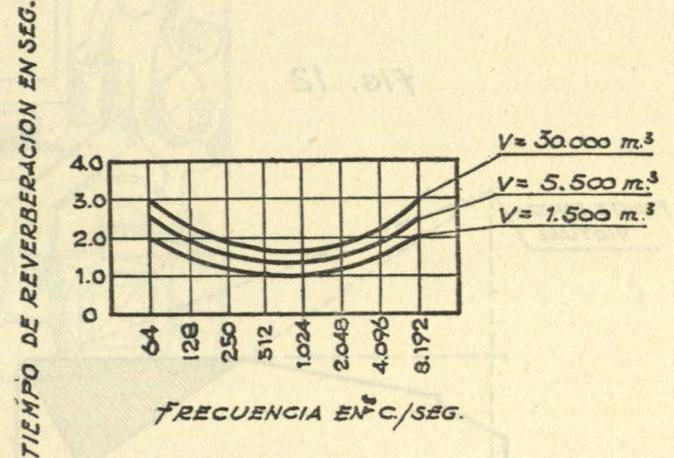


FIG. 11

NORMAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE SALAS DE ESPECTACULOS

- Hay tres problemas principales a resolver. que son:
- 1.º Conseguir intensidad suficiente del sonido en cada espectador.
- 2.º Obtener un tiempo de reverberación adecuado.
- 3.º Evitar ecos, concentraciones y resonancias.

Los dos primeros requisitos son, en cierto modo, contrapuestos. En efecto, para aumentar la intensidad hay que reforzar el rayo directo con los reflejados en paredes o techo de la sala. Pero al aumentar la reflexión, aumenta, como sabemos, la reverberación o cola sonora.

Como norma debe procurarse que los rayos, después de la primera reflexión, caigan directamente sobre los espectadores, que los absorben. Así, por una parte es reforzada la intensidad, y, por otra, como la mayor parte de los rayos sufren sólo una reflexión, llegan todos en breve tiempo a cada espectador, y la cola sonora o reverberación es corta.

Teniendo en cuenta lo dicho, suele emplearse el techo como superficie reflejante, y las paredes y suelo, como absorbentes.

Para estudiar el problema de la intensidad, el método más adecuado es el geométrico, sobre los planos, especialmente la sección longitudinal de la sala.

Para determinar el tiempo de reverberación se emplea, como hemos visto, la fórmula de Sabine.

Las figuras 12 y 13 muestran una sección y planta racional de sala de cine sonoro. Las distintas zonas del techo reflejan el sonido sobre la sala y el balcón. A la parte más lejana de éste llegan rayos reflejados de dos zonas del techo.

Las paredes laterales se emplean como absorbentes, salvo en la parte baja y lejana al altavoz que se utiliza para reflejar y reforzar el sonido a los espectadores bajo el balcón. Este debe ser algo levantado hacia arriba para dejar entrar los rayos sonoros. El muro de fondo, bajo el balcón, se hace a veces inclinado y reflejante, como indica la figura 14, para reforzar también el sonido a los espectadores bajo el balcón.

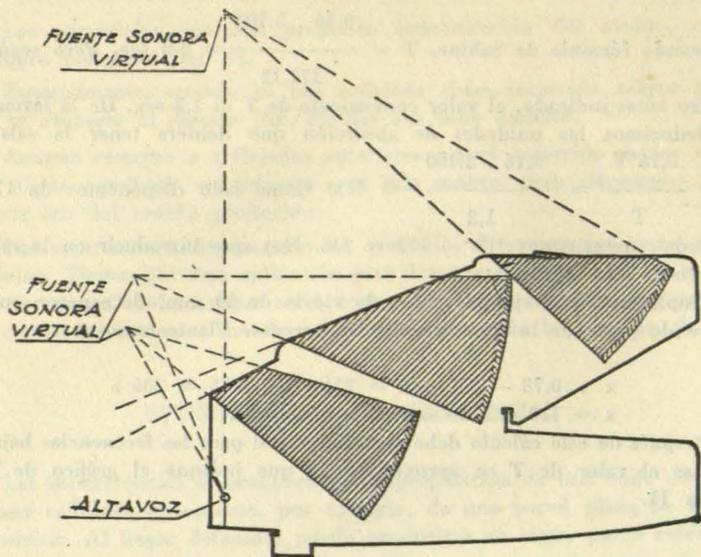


FIG. 12

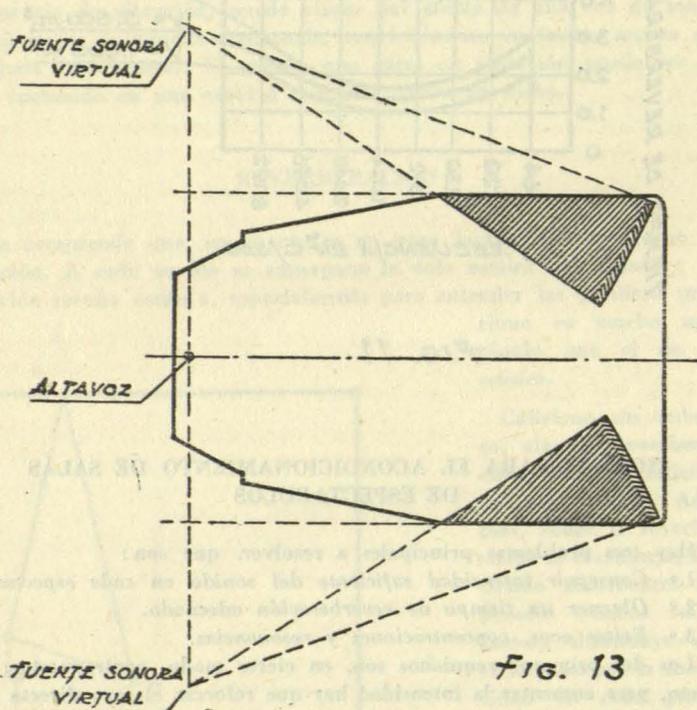


FIG. 13

Las paredes laterales y el muro de fondo se revisten, salvo en las zonas y casos indicados, con material absorbente, hasta conseguir que la fórmula de Sabine dé el tiempo conveniente de reverberación.

El peligro de eco puede presentarse en salas de grandes dimensiones; por ejemplo, con techo muy alto, que dé más de 22 m. para diferencia de recorrido entre rayo directo y rayo reflejado en el techo. En este caso se reviste con material absorbente la zona peligrosa del techo, o también se le da forma de encasetonado, que dispersa bien los rayos sonoros.

Deben proibirse las superficies curvas cóncavas. Por ejemplo, el techo en cúpula (figura 7) produce una concentración perniciososa. El caso citado en la figura 8 da un eco reforzado muy molesto. Una planta circular como la de la figura 15 produce zonas de concentración y otras en que apenas se oye.

En la reproducción de sonidos por altavoz, como en cine sonoro, se debe evitar que cerca de aquél haya cavidades como nichos o palcos en que pueda producirse un efecto de resonancia del aire que contienen.

Un ejemplo interesante de sala proyectada acústicamente es la sala Pleyel para conciertos, en París. En ella se ha conseguido que los rayos reflejados en el techo caigan directamente sobre los espectadores (evi-

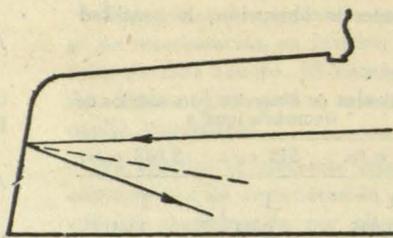


FIG. 14

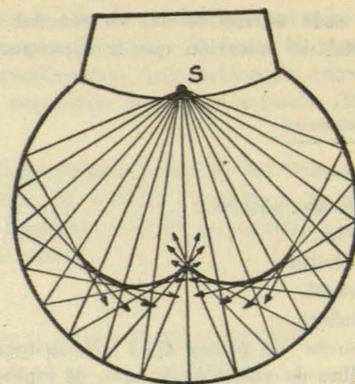


FIG. 15

tando reverberación larga), y, además, que la intensidad de audición sea la misma en todas las localidades. El techo arranca desde la escena y se va elevando hasta la última gradería. Los rayos sonoros se reflejan en él y son enviados hacia atrás, sobre los espectadores del patio y de las graderías. El perfil tiene forma ligeramente cóncava, especialmente estudiada, de modo que cada haz de rayos que en él se refleja se ensan-

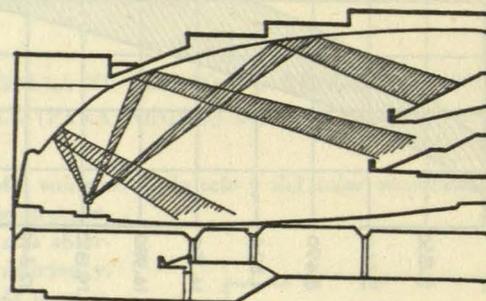


FIG. 16

cha luego según la distancia a que tiene que alcanzar, consiguiéndose igual intensidad de audición en todos los lugares. (Figuras 16 y 17. Sección longitudinal y transversal de la sala Pleyel.)

En ningún caso sobrepasa en esta sala a 22 m. la diferencia de recorrido entre rayo directo y rayo reflejado.

Salvo la superficie reflejante, todas las demás paredes son completamente absorbentes.

Las normas dadas en este artículo son generales a tener en cuenta en el acondicionamiento acústico de cualquier local.

Sirven sobre todo para salas de cine sonoro, teatros y salas de conciertos, aunque en cada caso varía el problema y tiene caracteres especiales.

Para otros locales, como asambleas o salas de reunión, estudios de registro de sonidos o de transmisión radiofónica e iglesias, hay que tener en cuenta otros detalles. Su estudio sale de los límites de este artículo.

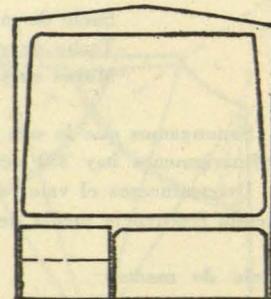


FIG. 17