

LA ACUSTICA INTERNA EN LAS SALAS DE ESPECTACULOS

Por JUAN BOSSUT, Ing. E. C. P.

CAPITULO PRIMERO

DEFINICION DE LA "ACUSTICA INTERNA"

Los problemas acústicos que se presentan a propósito de cualquier local, de cualquier sala, de cualquier lugar del mundo donde se hallan seres humanos, son realmente de dos clases totalmente distintas; no obstante, a pesar de ello, la mayoría de la gente no los sabe separar, ni tan siquiera concibe que se pueden separar.

En el primer problema se trata de impedir que los sonidos pasen de un sitio a otro, o por lo menos de que pierdan al hacerlo una parte considerable de su intensidad. Por consiguiente, se trata aquí de **aislar** acústicamente un sitio del otro, y los problemas correspondientes son problemas de **aislamiento acústico**. El aislamiento acústico trata de resolver los problemas referentes a un local en sus relaciones con el exterior.

El segundo problema es el del **acondicionamiento fónico**, en que interesa el valor acústico intrínseco de la sala en sí. Es este último el que estudiaremos hoy.

Todo el mundo ha observado que en muchas iglesias es difícil entender lo que dice el predicador, aunque hable con voz fuerte, despacio y claramente. También en muchos teatros y cines, especialmente en ciertas localidades, resulta molesto el esfuerzo que es necesario hacer para comprender las palabras, y la música se oye deformada. Por tanto, en estos casos, lo que molesta no son los ruidos que vienen del exterior, sino que son los propios sonidos emitidos en el interior del local los que sufren alteraciones por causas que trataremos de explicar, buscando luego los procedimientos para suprimirlas o atenuarlas.

La acústica interna, o intrínseca, de un local determinado no interesa solamente a los templos, las salas de espectáculos y de conciertos, sino a todos los lugares donde se trata de que un locutor o cualquier aparato de reproducción eléctrico-acústico, un cantante o un instrumento de música, sean claramente entendidos u oídos sin distorsiones. En esta categoría entran también las salas de conferencias, las aulas, las salas de reuniones y de mítines, las salas de consejo.

La "Acústica Interna" interesa igualmente a todos los locales, a todas las habitaciones donde hay personas que hablan y otras que escuchan. Nos referimos a los despachos, a los salones y a toda clase de habitaciones de grandes dimensiones, porque veremos más lejos que el problema se presenta de manera más aguda en los locales grandes que en los pequeños.

La misma técnica se aplica también a todos los locales que requieren científicamente ciertas condiciones acústicas determinadas, como es el caso de los estudios de emisión de radio, los estudios de toma de vistas de películas sonoras, los de doblaje y las salas de ensayos y pruebas de los laboratorios y centros de investigaciones científicas.

En fin, dicha técnica encuentra también su aplicación para hacer prácticamente posible una permanencia prolongada en sitios donde se produce una cantidad considerable de ruidos, cuyo alto nivel sería difícilmente soportado por el oído humano en condiciones normales, es decir, sin que se hayan tomado las debidas precauciones; nos referimos, por ejemplo, a los talleres de remachado, a los "stands" de prueba de ametralladoras, cañones y motores de avión.

Si en el presente estudio nos limitamos a estudiar la acústica interna de las salas de cine, es por sujetarnos a algo que quepa en los límites de un artículo; además, es porque el estudio del problema de una sala de cine es, a nuestro juicio, el mejor ejemplo que se pueda tomar. A quien domine la técnica de dicho estudio le será sumamente fácil aplicar los mismos principios a cualquier otro local.

CAPITULO II

LOS VARIOS ASPECTOS DEL PROBLEMA ACUSTICO DE UNA SALA DE CINE. COMO EMPRENDER EL ESTUDIO

Para que, desde cualquier asiento de una sala, se entiendan bien las palabras reproducidas por el altavoz, y para que la música se oiga convenientemente y sin distorsiones, hace falta que sean reunidas una serie de condiciones acústicas que dependen de tres factores.

- La forma geométrica de la sala.
- La naturaleza del revestimiento de todas las superficies del local.
- Las condiciones de los aparatos electro-acústicos de reproducción de los sonidos.

En realidad, estos tres factores tienen una estrecha relación entre sí. Es así que la naturaleza adecuada del revestimiento de las superficies de la sala depende enormemente de su forma y volumen. Es así también que la calidad de la cinta sonora y del aparato de reproducción tiene un valor absoluto; pero tiene también un valor relativo a los dos primeros factores, pudiendo un aparato determinado ser adecuado para una sala determinada, pero no serlo para otra.

Para realizar una acústica perfecta no basta con resolver perfectamente uno de los tres puntos que hemos mencionado, sino estudiarlos los tres a la vez; muchas veces, el estudio demuestra que dichos tres factores conducen a soluciones algo contradictorias; es necesario entonces hacer un compromiso entre tres necesidades divergentes, y buscar una solución no perfecta, sino aceptable, en el límite de las tolerancias permitidas; es casi siempre posible encontrar dicha solución de compromiso, gracias a que nuestros sentidos, nuestros oídos, no son perfectos, sino que tienen una feliz imprecisión y toman por bueno lo que no lo es con matemática precisión.

Para emprender el estudio acústico de una sala que ya existe, y por consiguiente cuya forma geométrica no puede sufrir grandes modificaciones, lo más natural es comenzar por el estudio de los revestimientos. Así comenzaremos también nuestro estudio, porque el problema de dichos revestimientos es en realidad el factor más importante **en la práctica**, y también porque, con ocasión de dicho estudio, daremos nociones que serán útiles en el de la parte geométrica.

CAPITULO III

EL REVESTIMIENTO DE LAS SUPERFICIES. EL PROBLEMA DE LA REVERBERACION

Se deben al americano W. SABINE, a principios de siglo, los primeros estudios prácticos y serios sobre la acústica de las salas de teatro, estudios que se han podido también aplicar a las de cine.

LA REVERBERACION

Al aire libre, un sonido de muy corta duración, que para simplificar supondremos instantáneo, produce una sensación auditiva también instantánea. Una serie de sonidos instantáneos **A, B, C...**, separados por intervalos iguales de tiempo, **t**, produce una serie de sensaciones auditivas también instantáneas **a, b, c...**, separadas por tiempos **t**. Es claro que no puede haber superposición de los sonidos en este caso (fig. 1).

En un ambiente limitado por paredes y techos, como es el caso de cualquier local, la energía sonora de los sonidos **A, B, C...** no desaparece en el mismo instante en que cesa la fuente sonora de emitir el sonido. La energía sonora que corresponde al sonido **A**, por ejemplo, se queda en el local algún tiempo, hasta que esté absorbida por todos los obstáculos materiales que encuentra; es decir, sobre todo por las paredes de la sala. Al ir de una pared a la otra cierto número de veces, los sonidos pierden poco a poco de su intensidad; pero mientras conserven una parte de ella, el oído sigue percibiendo algo. Este es el fenómeno de la reverberación.

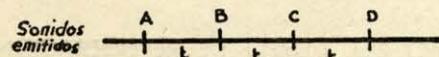


Fig. 1

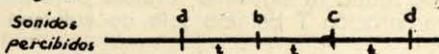


Fig. 2

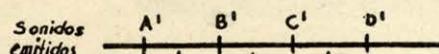
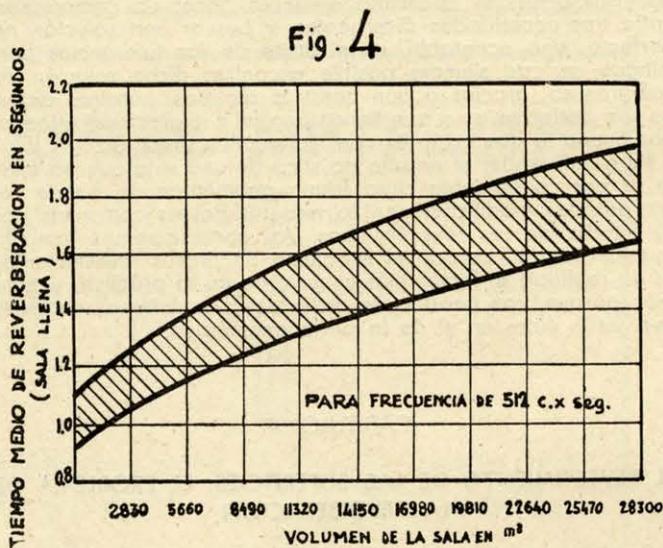


Fig. 3

Entonces, al interior de un local, un sonido instantáneo no produce al oído una sensación instantánea, sino una sensación que dura cierto tiempo T . Si ahora la fuente sonora emite una serie de sonidos instantáneos A_1, B_1, C_1, \dots (fig. 2), la sensación auditiva correspondiente consistirá en una serie de impresiones a_1, b_1, c_1, \dots , de duración T , cuyos principios seguirán separados por intervalos t . Entre el fin de la sensación auditiva producida por A_1 y el principio de la producida por B_1 , el intervalo de tiempo será $t-T$. Si T llega a ser superior a t , habrá para el oído superposición de sensaciones auditivas a_1 y b_1 . Durante el tiempo MN , el oído percibirá a la vez los sonidos A_1 y B_1 (fig. 3).

LOS TIEMPOS DE REVERBERACION CORRECTOS

Acabamos de ver que, por el efecto de la reverberación, en cualquier local los sonidos se prolongan durante cierto tiempo después de haber cesado su emisión, originando así superposiciones de sonidos. Sería un error creer que dichas



superposiciones son todas dañinas y que hay que eliminarlas sistemáticamente, suprimiendo por completo la reverberación. Para que los sonidos produzcan una sensación agradable al oído, es imprescindible que exista cierta reverberación.

El tiempo de reverberación de una sala es el tiempo necesario para que un sonido emitido en ella se extinga después de haber cesado su emisión.

Largos estudios y numerosas investigaciones han conducido a adoptar como los más adecuados para salas de cine los tiempos de reverberación de la figura 4. Dicho gráfico muestra que, para una sala de un volumen determinado, el tiempo de reverberación correcto tiene cierta tolerancia entre dos límites. Se observa que cuanto mayor es la sala mayor debe ser también su tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación de un local no es el mismo cual sea la frecuencia del sonido emitido; es decir, el número de vibraciones por segundo del sonido. Las curvas de la figura 4 valen para la frecuencia de 512 c. s. (ciclos por segundo). Para las otras frecuencias, el tiempo de reverberación correcto debe ser otro; volveremos más adelante sobre este importante punto. Pero en todo caso, para servir de base al estudio se considera siempre el caso de la frecuencia de 512, que es la frecuencia media más importante. Luego se controla si los resultados obtenidos valen también para las otras frecuencias.

CALCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACION

W. SABINE ha dado la siguiente fórmula para calcular el tiempo de reverberación T de una sala de volumen V :

$$T \text{ seg} = \frac{0,161 V}{aS} \text{ m}^3,$$

donde

$$aS = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots$$

S_1, S_2, S_3, \dots son las distintas superficies que existen en la sala; es decir, las de las paredes, suelos y techos, expresadas en metros cuadrados, y a_1, a_2, a_3 son los coeficientes de absorción del sonido de las mismas superficies.

Aclaremos el concepto de "coeficiente de absorción del sonido" de una superficie constituida por un material determinado. Consideremos un rayo sonoro que viene a tocar perpendicularmente dicha superficie; la energía mecánica de dicho rayo tiene un valor E . Al tocar la superficie considerada,

como lo veremos más lejos, el rayo se refleja, pero la energía del rayo reflejado no es E , sino una cantidad más pequeña aE , siendo " a " inferior a la unidad, porque una parte de la energía ha sido absorbida por la superficie considerada. La cantidad " a " es el coeficiente de absorción del material que constituye la superficie.

Existen otras fórmulas para la determinación del tiempo de reverberación de una sala, pero son más complicadas y no dan resultados mucho mejores que la de W. SABINE.

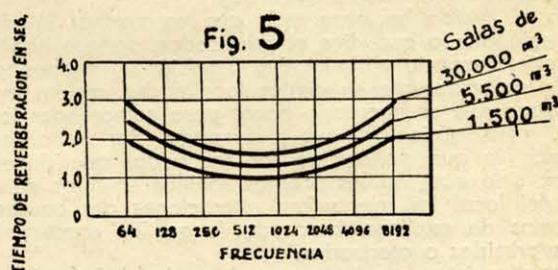
También existe un método experimental para la determinación de T , del cual no hablaremos por ser de aplicación práctica difícil.

Existen también aparatos electro-acústicos para la determinación de T . Incluso un aparato llamado "reverberómetro" da directamente, por simple lectura de una aguja sobre un cuadro graduado, el valor en segundos del tiempo de reverberación. No existe todavía en este país ningún reverberómetro.

En la práctica, la fórmula de W. SABINE permite la determinación de T por el cálculo con suficiente precisión.

VARIACIONES DE LA REVERBERACION CON LA FRECUENCIA DEL SONIDO

El coeficiente de absorción " a " no es igual para todas las frecuencias del sonido. Un material determinado puede absorber mucho las altas frecuencias y muy poco las bajas. El resultado de ello es que una sala determinada puede tener un



tiempo T correcto para la frecuencia base de 512 c./seg., pero no tenerlo para otras frecuencias.

En la práctica, no conviene tampoco que todas las frecuencias del sonido sean igualmente absorbidas. La figura 5 da los tiempos de reverberación correctos para las varias frecuencias de salas de volumen de 1.500, 5.500 y 30.000 metros cúbicos. Esos gráficos se deben a KNUDSEN.

Para hacer el cálculo del acondicionamiento fónico de una sala conviene primero, partiendo de la fórmula de W. SABINE, hacer variar los coeficientes de absorción a_1, a_2, a_3, \dots hasta que el tiempo de reverberación T de la frecuencia de 512 sea comprendido entre las curvas de la figura 4. En efecto, como no se puede hacer variar el volumen V de la sala, ni tampoco las superficies S_1, S_2, S_3, \dots de las paredes, suelos y techos, lo único que se puede hacer es cambiar la naturaleza de dichas superficies, revistiéndolas de materiales absorbentes que tengan un coeficiente de absorción distinto del de la escayola o de cemento o del de la madera, que son generalmente los materiales naturales en cualquier sala.

Prácticamente, una sala desnuda, es decir, sin ningún revestimiento de sus paredes y techo, tiene siempre un tiempo de reverberación exagerado, y es preciso aumentar " aS " para disminuir T . Lo que se busca entonces es revestir paredes y techos con materiales absorbentes que absorban más que la escayola y el cemento.

Una vez que se ha conseguido un tiempo T correcto para la frecuencia 512, es necesario comprobar que el tiempo de reverberación será también correcto para las bajas frecuencias de 128 y 256 c./seg. y las altas de 2.048 y 4.096 c./seg., utilizando para ello las curvas de KNUDSEN.

LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION Y LOS MATERIALES ABSORBENTES. SUS COEFICIENTES DE ABSORCION

Damos en el cuadro I adjunto los coeficientes de absorción de varios materiales que se emplean en la construcción y de los materiales absorbentes.

Se observa que, entre los materiales de construcción, todos los productos pétreos tienen coeficientes de absorción muy pequeños, lo que viene a decir que absorben poco los sonidos, en la proporción solamente de 1 a 3 %.

Entre los materiales absorbentes, se destacan particularmente el "asbestos spray", o espuma de amianto (producto que no se encuentra en la actualidad), y la fibra de vidrio.

En el cuadro I, los valores dados para los espectadores y las butacas no son realmente los valores de los coeficientes de absorción " a ", sino el producto " aS " por unidad.

Todos los materiales sin excepción no absorben de igual forma todas las frecuencias del sonido; pero hay materiales que tienen variaciones considerables en su poder absorbente,

según la frecuencia. Es el caso del corcho. Este material, en placas de 2" de espesor, tiene un coeficiente de 17 % para 256 c./seg., 35 para 512, 27 para 1.024. Lo mismo pasa con las cortinas de terciopelo espeso fruncido, cuyos coeficientes son, respectivamente, 31, 49 y 66 %.

Estos últimos materiales tienen, por consiguiente, un **poder selectivo** marcado para ciertas frecuencias. Esto produce un predominio de la absorción de ciertas notas y de ciertas armónicas; el resultado de ello es que los sonidos sufren alteraciones de sus cualidades originales, particularmente dañinas para la audición de la música, y también perjudiciales para la de la palabra.

Por regla general, se buscan los materiales absorbentes que tengan el coeficiente de absorción más elevado. En ningún caso se debe buscar el material más barato, por las dos razones siguientes:

1º Porque de un material más barato, pero de coeficiente de absorción inferior a otro, hay que colocar más metros cuadrados para lograr la misma absorción total, y, por consiguiente, en realidad no hay economía.

2º Porque los materiales baratos, además de absorber menos, absorben de forma desigual las varias frecuencias. En la mayoría de los casos, las frecuencias menos absorbidas son las bajas, que son las más perjudiciales.

CUADRO I
COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE VARIOS MATERIALES A DISTINTAS FRECUENCIAS

MATERIAL	Absorción para sonidos de							AUTORIDAD
	64 c./seg.	128 c./seg.	256 c./seg.	512 c./seg.	1.024 c./seg.	2.048 c./seg.	4.096 c./seg.	
Ventana abierta	1	1	1	1	1	1	1	
Mármol	—	0,010	—	0,010	—	0,015	—	Según Michel.
Vidrio sencillo	—	0,035	—	0,027	—	0,020	—	Según Michel.
Ladrillo sin pintar	0,021	0,024	0,025	0,032	0,042	0,05	0,07	W. C. Sabine.
Ladrillo pintado	0,011	0,012	0,014	0,017	0,02	0,023	0,025	W. C. Sabine.
Enlucido de yeso sobre tabique de rasillas	0,012	0,013	0,015	0,02	0,028	0,04	0,05	W. C. Sabine.
Madera (pino barnizado) 15 mm.	0,064	0,098	0,112	0,104	0,081	0,082	0,113	W. C. Sabine.
Parquet ("pitch pine")	—	0,05	0,03	0,06	0,09	0,1	0,22	B. R. S.
Alfombra espesa	—	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37	B. R. S.
Cortina de terciopelo de 600 gr./m ²	—	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36	P. E. Sabine.
Cortina de algodón de 465 gr./m ²	—	0,04	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35	P. E. Sabine.
Cortina pesada fruncida de 2 m/m ²	—	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	P. E. Sabine.
"Asbestos Spray" 1", sin pintar.	—	0,6	0,65	0,6	0,6	—	—	"National Physical".
Linóleo directamente sobre suelo de cemento	—	0,020	—	0,030	—	0,040	—	Según Michel.
Corcho aglomerado de 2"	—	—	0,17	0,35	0,27	0,34	—	Laboratorio Sabine.
Idem íd.	—	—	—	0,28	—	0,36	—	Según Michel.
Placas de corcho para suelo de dos centímetros espesor, enceradas	—	0,04	—	0,05	—	0,07	—	Según Michel.
Placa de corcho de suelo	0,08	0,07	0,02	0,05	0,1	0,05	0,02	Según B. R. S.
Fibra de vidrio de 100 mm. de espesor.	—	0,75	0,95	0,96	0,90	0,84	0,77	H. H. I. y N. P. L., etc., con variaciones inferiores a 5 por 100, según los laboratorios.
Idem íd. de 50 íd.	—	0,38	0,63	0,78	0,87	0,83	0,77	Idem íd.
Seda de vidrio en 60 mm. de espesor.	—	—	—	0,85	—	—	—	H. Bagenal.
Espectador sin abrigo (por persona).	—	0,15	0,21	0,4	0,54	0,71	—	
Asiento de madera sin forrar (por unidad)	—	—	0,022	0,033	0,055	0,055	—	"American Bureau of Standards".
Idem íd.	—	0,026	0,016	0,024	0,040	0,040	—	Según varios autores.
Butaca completamente forrada (estilo "Pullmann")	—	—	0,33	0,275	0,32	0,34	—	"American Bureau of Standards".

EJEMPLO PRACTICO DE CALCULO DE CORRECCION ACUSTICA DE UNA SALA

Consideremos una sala de forma paralelepípedica de 27 por 15 metros y 11 de altura. Su volumen es de 4.455 m³.

Según el ábaco de la figura 4, el tiempo de reverberación correcto de una sala de este volumen debe estar comprendido aproximadamente entre 1,1 y 1,3 sec. Para nuestros cálculos, partiremos de la base de un tiempo correcto de 1,2 sec.

a) Estudiemos primero cuál será el tiempo de reverberación de la sala tal como suponemos que es en la actualidad; es decir, con las paredes y techos de escayola, parquet de madera y, además, con 20 m² de cortinas de terciopelo bien fruncidas, y otros 30 m² de puertas, zócalos y molduras de madera. Hay en la sala 800 butacas de madera sin forrar, de las cuales 500 están ocupadas por espectadores y 300 vacías.

Calculemos el factor **aS**, considerando una por una las varias superficies que existen en la sala, así como las butacas y los espectadores.

	Superficie	Coef. de absorción	Unidades de absorc.
Paredes y techo de yeso, descontando cortinas y maderas	1.059 m ²	0,02	21,18
Parquet y maderas.	435 —	0,06	26,10
Cortinas terciopelo fruncido.	20 —	0,49	9,80
300 asientos de madera vacíos de 0,4 m ² cada uno.	120 —	0,06	7,20
500 espectadores	500 un.	0,4	200,00

Total **aS** = 264,28

Tenemos $T = \frac{0,161 \times 4.455}{264,28} = 2,7$ sec., aproximadamente.

Se ve que la sala está lejos de tener un tiempo de reverberación correcto. Se puede pronosticar, sin haberla visto jamás, que dicha sala tiene una acústica desastrosa, que es casi imposible comprender las palabras emitidas por el altavoz y que la música más bonita se transforma en ella en una desagradable cacofonía.

b) Veamos ahora la forma de corregir el defecto de reverberación de dicha sala. El tiempo **T** correcto es, como vimos antes, de 1,2 sec. De la fórmula de SABINE sacamos:

$$aS = \frac{0,161 V}{T} = \frac{0,161 \times 4.455}{1,2} = 598 \text{ unidades de absorción (aproximadamente).}$$

Como la sala no tiene más que 264 unidades de absorción, es necesario introducir en ella 598 — 264 = 334 unidades de absorción más.

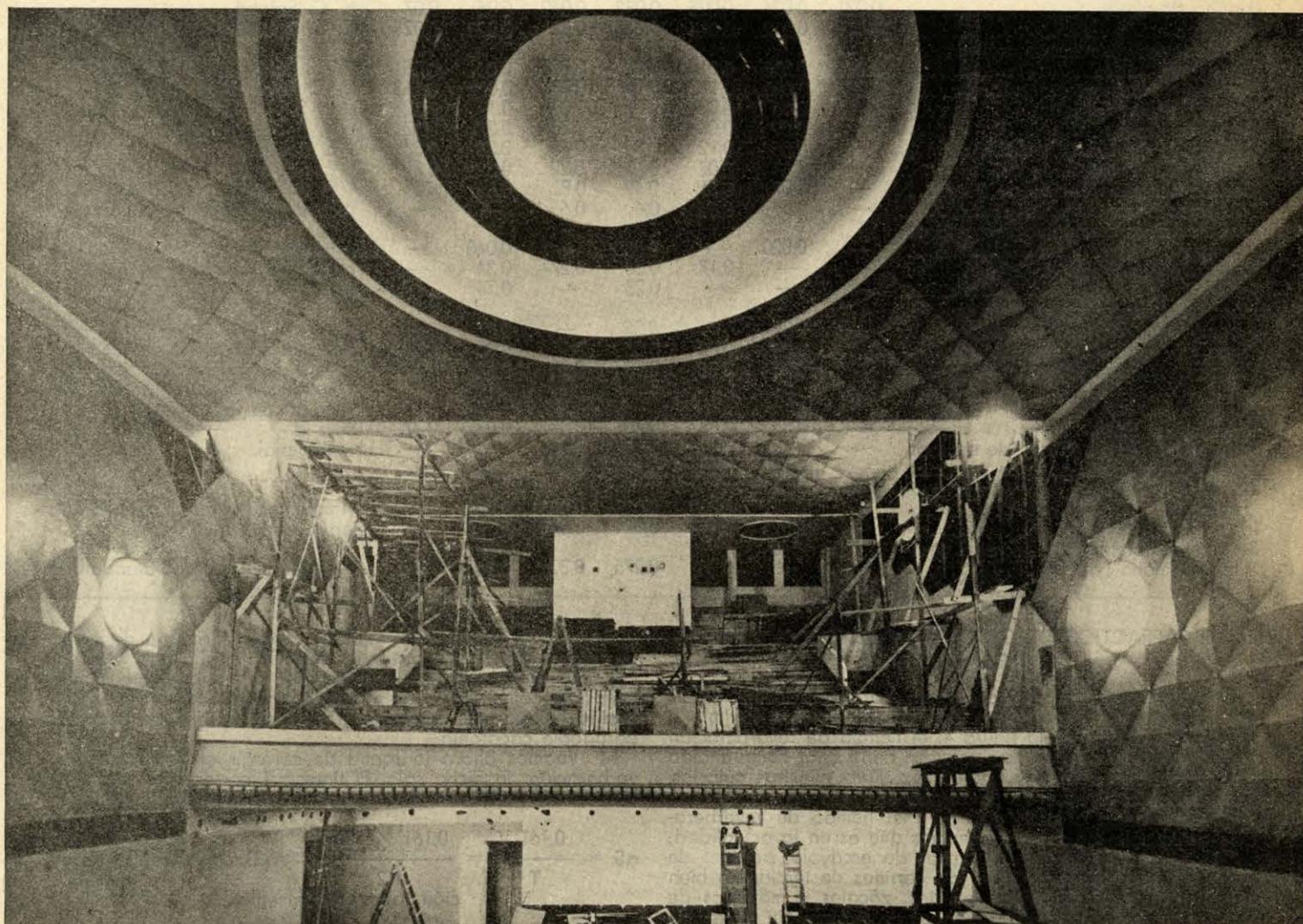
Si el material absorbente empleado es corcho aglomerado en placas de 2" de espesor, hará falta emplear $\frac{334}{0,35} = 954$ m²

de dicho material. Si se emplease fibra de vidrio en 50 mm. de espesor, la superficie a revestir con dicho material sería $\frac{334}{0,78} = 428$ m².

c) Comprémos si el problema de la reverberación estaría también resuelto con estos dos materiales, para las altas y para las bajas frecuencias, digamos para las frecuencias de 256 y 2.048 c./seg. Es lo que hemos resumido en el cuadro II.

CUADRO II

Superficies absorbentes	Frecuencia de 256 c/seg. (Tiempo T correcto de KNUDSEN = 1,4 sec.)			Frecuencia de 2.048 c/seg. (Tiempo correcto de KNUDSEN = 1,4 sec.)		
	Superficie	Coficiente	Unidades abs.	Superficie	Coficiente	Unidades abs.
Paredes y techos	1.059	0,015	15,9	1.059	0,023	24,3
Parquet y maderas	435	0,03	13	435	0,1	43,5
Cortinas	20	0,31	6,2	20	0,66	13,2
Asientos (300)	120	0,03	3,6	120	0,1	12
Espectadores	500	0,21	105	500	0,71	355
Corcho 2" (954 m ²)	954	0,17	162,2	954	0,34	324,4
Fibra de vidrio 50 mm. (428 m ²)	428	0,63	269,6	428	0,83	355,2
Total de unidades de absorción con corcho			305,9	—	—	772,4
Total de unidades con fibra de vidrio			413,3	—	—	803,2
Tiempo de reverberación de la sala:						
Con corcho			2,4 sec.	—	—	0,9 sec.
Con fibra de vidrio			1,7 sec.	—	—	0,9 sec.



Acondicionamiento acústico con fibra de vidrio de una sala de cine, en Vigo.

En la práctica, lo que más importa son las bajas frecuencias; su predominio en la palabra y la música es muy dañino para la audición. Vemos que ninguno de los dos materiales da una solución perfecta, pero que la fibra de vidrio da en todo caso una solución aproximada aceptable, lo que no ocurre con el corcho, para las bajas frecuencias.

NOTA SOBRE LOS MATERIALES ABSORBENTES

No existe ningún material absorbente perfecto. Pero existen materiales, como el "asbestos spray" y la "fibra de vidrio", que, sin llegar a la perfección, dan al problema del acondi-

cionamiento fónico de los locales una solución aceptable. Otros, como el corcho, dan una solución bastante inferior; pero de todas formas se trata de un material conocido, y, dentro de cierta mediocridad, es un material serio y probado.

En ningún caso se deben emplear materiales desconocidos, o mejor dicho, que no hayan sido ensayados por laboratorios oficiales bien instalados, y que, por consiguiente, no presentan ninguna garantía técnica.

También se debe dar la preferencia sobre los demás materiales a los que presentan la ventaja de ser incombustibles, ya que los incendios en las salas de espectáculos pueden tener consecuencias trágicas.

(Continuará)