

diante un nuevo sistema circulatorio, los centros antiguos, las plazas y la antigua estructura radial de las calles. En todos estos proyectos se organizarán muy bien las diferentes funciones de la ciudad (negocios, circulación, transportes, reclamos, diversiones, etc.). La ciudad llega a ser un complejo de todas las actividades humanas, una *máquina funcional*, donde todas esas actividades hallarán su expresión adecuada en construcciones elementales y lógicas. En la *Ciudad-viaducto* (uniendo algunas ciudades, por ejemplo: Rotterdam, Amsterdam y La Haya) se levantará mucho la edificación, haciendo posible la circulación de los vehículos por bajo de los edificios. Estos edificios, standorisados, se contruirán e instalarán con todos los medios técnicos modernos. Y la *Ciudad de actividad* se separará de la *ciudad de habitación* y de reposo.

El joven urbanista van Eesteren ha dado en su proyecto de extensión del centro de Berlín (*Unter den Linden*), prueba de una concepción verdaderamente lógica. Su proyecto, laureado con el primer premio, se llevará a cabo probablemente. Aquí se encuentran algunos ejemplos de urbanismo moderno, entre los cuales resalta el edificio de Oficinas de Mies van der Roche.

Para dar una impresión completa de los esfuerzos del movimiento llamado "De Stijl", en Holanda, me resta que hablar en un próximo artículo sobre la arquitectura de interior, la colaboración de las artes que confluyen en ella y la belleza del nuevo estilo.

THEO VAN DOESBURG.

(Continuará.)

## LA ACÚSTICA EN LAS SALAS DE AUDICIÓN

**H**ARÉ un resumen del estado actual de una cuestión interesante para todo arquitecto y que, a pesar de hallarse planteada desde antiguo, puede decirse que no ha sido orientada hacia su solución hasta fecha muy reciente. Me refiero al problema de las condiciones acústicas de las salas de audición, ya estén destinadas a escuchar en ellas la palabra hablada, ya las ejecuciones musicales de cualquier género.

Si hay un problema que, pareciendo sencillo y dependiendo al parecer, de unos pocos principios parecidos, haya sido tratado de un modo desorientado y confuso, es ciertamente éste. Las leyes que describen los fenómenos de producción, transmisión y reflexión de los sonidos son simples y bien conocidas, por lo menos en el grado en que pueden ser útiles para un problema práctico de esta naturaleza; y sin embargo, quizá por exceso de aparato científico no se ha enfocado la solución en una dirección acertada hasta fecha muy moderna.

La cuestión empezó a interesar en el Renacimiento, al construirse los primeros teatros ce-

rrados; y desde aquella fecha, físicos y arquitectos, a porfía, han propuesto las reglas más variadas, siguiendo las cuales la acústica de las salas había de resultar perfecta.

Las formas favorecidas en esas teorías han sido aquellas que se fundaban en figuras geométricas que tuviesen alguna propiedad notable desde el punto de vista de la flexión de rayos luminosos o sonoros; y así vemos la elipse convertida en una verdadera favorita, por la propiedad de que todos los rayos partidos en un foco concurren, después de reflejados, en el otro; propiedad, por cierto, que, como hace observar Semper, proporciona un resultado absolutamente contrario del que se busca, a saber, que el sonido partido de un punto se difunda hasta alcanzar por igual a todos los oyentes distribuidos por la sala.

Del mismo modo y con análoga falta de fundamento se han propuesto el círculo, el rectángulo, la parábola, las curvas compuestas: el uso de toda clase de materiales, etc., y lo más curioso es la seguridad con que los autores de esas teorías afirmaban la exactitud y precisión de las



mismas. El célebre padre *Kircher* afirma en una de sus obras (*"Musurgia Universalis"*, Roma, 1650), dominar tan absolutamente la teoría de los ecos, que se compromete a construir una sala que, al devolver los sonidos, los transforma conforme a ciertas leyes, de tal manera que, preguntando en voz alta *¿Cómo te llamas?*, responda el eco: *Constantino*. No se sabe si el docto jesuita llegó a poner en práctica su invento y en tal caso, qué éxito tuvo.

Para tener una idea de la confusión que ha reinado en esta materia, lo mejor es leer las páginas que Ch. Garnier, el ilustre arquitecto de la Ópera de París, dedica al asunto en su obra *"La Nouvel Opéra de Paris"*, publicada después de terminado el edificio. Empieza el capítulo con estas palabras: "Voy a hacer como la mayor parte de la gente: voy a hablar de lo que no entiendo", y después de explicar sus tentativas para documentarse en este asunto, leyendo cuanto se había escrito y preguntando a los más entendidos, dice: "Después de tanto estudio he llegado a descubrir lo siguiente: una sala para ser sonora y poseer un timbre agradable, tiene que ser alargada o ancha, alta o baja, estar construida en madera o en piedra, ser redonda o cuadrada, tener paredes duras o acolchadas, pasar sobre una corriente de agua o estar sobre terreno firme, tener salientes o ser lisa, bien caldeada o glacial, estar vacía o llena de público; he aprendido además, que algunos quieren que se planten en ella árboles, otros que se haga toda de cristal, los de más allá pretenden que siendo la nieve el mejor conductor del sonido, hay que revestir las paredes de nieve artificial; otros en fin, volviendo a Vitrubio, quieren que se pongan ciertas cacerolas bajo los asientos" (1).

Y al final: "No sabiendo realmente qué hacer, he tirado la moneda pidiendo cara y cara ha salido; pero lo mismo podía haber salido cruz."

Indudablemente Garnier exagera, porque en otro pasaje asegura que lo que ha hecho es visitar las antiguas salas tenidas por buenas, procurando imitarlas, procedimiento siempre bueno, pero inseguro cuando no se sabe a qué se debe la bondad de los ejemplos existentes. Vamos a ver ahora al plantear el problema, que algunas de las condiciones indispensables para una buena acústica se conocían ya mucho tiempo antes de que Garnier escribiese sus escépticas páginas y que, por lo tanto, el problema estaba en uno de sus aspectos resuelto, si bien en el otro no se había planteado todavía científicamente.

\* \* \*

En una sala destinada a que un auditorio escuche, ya sea la palabra humana, ya sonidos mu-

sicales, se requieren, para cualquier lugar que un oyente pueda ocupar, las tres condiciones siguientes:

1.<sup>a</sup> Que los sonidos emitidos, aun los de menor fuerza, se perciban distintamente.

2.<sup>a</sup> Que los sonidos así percibidos, no queden oscurecidos o confusos por otros sonidos secundarios, ya procedan del exterior, ya de ecos o reflexiones del sonido primario en la misma sala.

3.<sup>a</sup> Que los sonidos no queden modificados o *deformados*, como efecto de las interferencias entre el mismo sonido directo y los reflejados.

La primera condición no suele presentar dificultades. Las dimensiones de las salas corrientes destinadas a audiciones, no suelen ser mayores que las distancias a que se percibe distintamente, al aire libre, un sonido de intensidad mediana. Claro es que hay una escala, a menudo olvidada, y que locales excelentes para grandes ejecuciones sinfónicas o corales pueden ser inadecuados para música *da camera* o para la comedia moderna, en que, no sólo se ha de oír bien, sino que se han de apreciar modulaciones de voz emitidas por los actores sin esfuerzo. Contra esta condición, pues, se puede pecar solamente cuando se utilizan temporalmente ciertos locales para usos distintos de aquellos para los que fueron construidos.

La segunda condición comprende casi todos los temas que podríamos decir constituyen la acústica arquitectónica. A evitar la perturbación producida por sonidos o ruidos exteriores, tan importante en las calles concurridas de las ciudades modernas, tienden todos los estudios realizados para fijar el valor de las disposiciones y materiales aisladores. Estos estudios no han llegado todavía a conclusiones decisivas, aunque se haya reunido mucho material y a veces se hayan obtenido resultados en contradicción con los procedimientos corrientes.

Nuestra atención se dirigirá, sobre todo, a las perturbaciones producidas en el mismo interior de la sala.

Los sonidos emitidos en un punto de la sala se propagan por ondas esféricas de condensación y rarefacción hasta encontrar algún obstáculo. En una sala completamente cerrada, como son los modernos teatros y salas de concierto, esto sucede muy pronto si se tiene en cuenta la velocidad de propagación del sonido en el aire. Al llegar las ondas sonoras a un obstáculo, muro, techo, etc., son en parte absorbidas, empleándose su energía en poner en vibración la materia que forma el obstáculo y transformándose en último término en calor; el resto es reflejado según las leyes conocidas, excepto la parte que sufre *reflexión irregular* o *difusa*, aquí muy importante. El sonido reflejado llega pronto a otra superficie, donde es de nuevo absorbido en parte y reflejado el resto y el proce-

(1) *Le Nouvel Opéra*, tomo I, pág. 200.



so continúa hasta que la intensidad de sonido reflejado desciende por bajo el límite o *mínimo de audibilidad*, y deja por lo tanto, de existir como tal sonido.

Ahora bien; el oyente situado en un punto de la sala, recoge con su aparato auditivo, en primer lugar, el sonido directo que le llega en línea recta y, por consiguiente, en el tiempo mínimo y sucesivamente los otros, mientras son perceptibles. Si estos últimos llegan con un retraso muy pequeño, *caen sobre el directo*, reforzándolo. Suponiendo que un orador de habla corriente pronuncie diez sílabas por segundo, tendríamos como máxima diferencia admisible entre la llegada del sonido directo y del reflejado la de  $1/10$  de segundo, lo que corresponde a una diferencia de camino recorrido de unos 34 m. Para obtener verdadera claridad en la audición, esta diferencia de trayectos tendría que ser de la mitad, o sea de 17 m. como máximo, con lo cual la sílaba reflejada se oye muy unida a la directa y bien distinta de la siguiente. Tenemos, pues, que las superficies reflectoras colocadas muy cerca del punto de emisión, favorecen las condiciones acústicas del local. También son favorables si están muy cerca de los oyentes, siempre que el sonido reflejado por ellas no pueda ser percibido fácilmente por otros agentes más lejanos. En este último caso favorable, se encuentran los techos muy bajos que cubren las galerías de los teatros del tipo tradicional.

Veamos ahora lo que sucede con los sonidos reflejados que llegan al oyente con un retraso de más de  $1/10$  de segundo sobre el directo. Si estos sonidos han perdido una gran parte de su intensidad, llegan muy débiles, y son impotentes, podríamos decir, para oscurecer o confundir los sucesivos sonidos directos que llegan al oyente. En cambio, si conservan al ser percibidos una intensidad comparable a la de los sonidos directos, se produce una confusión completa y el local resulta inútil para los usos a que está destinado. En este caso, es decir, cuando un mismo sonido lo percibe el oyente claramente más de una vez, se dice que hay *eco*.

En su progresión natural, el sonido pierde intensidad en proporción al cuadrado de la distancia recorrida; así es que un sonido reflejado en un plano que haya recorrido doble trayecto que el directo, llegará al oyente con intensidad cuatro veces menor, y sin contar todavía la porción del que haya sido absorbido en la reflexión. Pero esta reducción de intensidad no se verifica del mismo modo si la superficie reflectora es curva. En este caso, si es convexa, la dispersión producida, y por consiguiente, la pérdida de intensidad, es mayor que en el plano; pero si es cóncava, el resultado dependerá, según las leyes co-

nocidas, de la distancia del punto de emisión a la superficie, comparada con el radio de curvatura de la misma. Si dicha distancia es menor que la mitad del radio de curvatura, la superficie cóncava obra como dispersante, aunque con menos eficacia que el plano, y desde luego, que una superficie convexa. Si la emisión se produce a una distancia próxima a la mitad del radio de curvatura, los sonidos reflejados salen formando ondas casi planas, es decir, que apenas si se produce concentración ni dispersión. Finalmente, si la emisión se produce a mayor distancia que la mitad del radio de curvatura, la reflexión concentra los rayos sonoros en una pequeña región, en un punto, podríamos decir aproximadamente; punto que está unido con el de emisión por las leyes de los focos conjugados en los espejos cóncavos.

Este último caso es, naturalmente, el más desfavorable. Si en la región de concentración hay oyentes, éstos oirán el sonido reflejado muy claramente, a veces con mayor intensidad que el directo, y como aquél lo oye retardado, la confusión es completa.

Este peligro de los ecos marcados, se evita, por consiguiente, haciendo que todas las superficies que puedan reflejar sonidos en la sala, y especialmente las que están lejos a la vez del punto de emisión y de todos o de algunos oyentes, sean convexas, planas, o cóncavas de radio bastante mayor que el doble de las distancias que las separan del punto emisor y de los oyentes, pero bien entendido que el orden de preferencia es el que hemos citado: 1.º convexas, 2.º planas y 3.º cóncavas de gran radio.

Hay otro medio y es recubrir toda superficie que pueda producir ecos perniciosos, con materiales que absorban una porción grande de las vibraciones sonoras recibidas, reflejando sólo el resto. De estos materiales nos ocuparemos después, al tratar de la reverberación.

También se recomienda decorar las superficies peligrosas por medio de accidentes en relieve, encajonados, molduras salientes, etc., que impidan la reflexión regular; pero este remedio muchas veces es ilusorio. Si los relieves o rehundidos no son anchos y de gran profundidad o saliente, apenas alteran la reflexión del sonido; y la razón es bien sencilla. Los sonidos de altura media, normalmente percibidos por el oído humano, tienen longitudes de onda grandísimas, enormes, si se las compara con las de las vibraciones luminosas; de manera, que una bóveda con un encajonado regular de dimensiones no muy grandes, actúa con respecto a las vibraciones sonoras, del mismo modo que un espejo perfectamente pulido por la luz, es decir, que refleja las vibraciones con gran regularidad. Si el borde de



un estanque está formado por un zig-zag con elementos de pocos centímetros de dimensión, las ondulaciones causadas por la caída de una piedra en el agua se reflejarán casi exactamente como si dicho borde fuese plano.

Lo curioso es que todas estas reglas para evitar los ecos perjudiciales, son muy antiguas, incluso en su enunciación científica. En 1810, el arquitecto alemán C. F. Langhaus, uno de los más ilustres representantes, junto con Schinkel y von Klenze, del movimiento neo-clasicista en Alemania, publicó un librito con el título "Über Theater oder Bemerkungen über Katakustik", en el que resumía metódicamente la experiencia de más de un siglo de construcción de teatros de ópera, experiencia desarrollada principalmente, en Italia y fuera de ella, por constructores italianos, del tipo de los célebres Bibiena, y que culmina, como ejemplo clásico, en el teatro de la Scala de Milán, construido por Piermarini en 1774. Las reglas que da Langhaus tienden a evitar la formación de ecos procedentes de la reflexión en superficies cóncavas y así, prescribe que el techo sea plano, que la bóveda del proscenio tenga perfil longitudinal recto o convexo, que los antepechos de los pisos, que en planta dan una forma cóncava, tengan en sección la silueta clásica panzuda, que a la par que permite el acomodamiento de los pies, es dispersante, etc.

Estas reglas, pues, eran conocidas mucho antes de que Garnier escribiese sus desconsoladoras conclusiones y con ellas el problema del eco se enfoca bien; nuestro profesor de Composición Arquitectónica, el ilustre Doménec y Muntaner, las explicaba cada año con maravillosa claridad a sus alumnos y los procedimientos de comprobación modernos no han hecho más que confirmarlas.

Estos procedimientos consisten en substituir los trazados geométricos representando la marcha de los rayos sonoros en el interior de la sala, por la observación directa o la fotografía de un movimiento ondulario análogo a la de las ondas sonoras, o de éste mismo.

Así, el profesor Watson (1), de la Universidad de Illinois, emplea sencillamente una vasija plana de cristal, una especie de bandeja, en la que se introduce un contorno que a escala reproduce la planta o la sección de la sala en estudio. Este contorno está formado por una tira delgada de metal doblado siguiendo la forma dada, y cuyo ancho es poco superior a la altura de agua que hay en la bandeja. De esta manera se forma en realidad una vasija plana cuyo contorno es la forma de la sala estudiada. En el punto que corresponde al de emisión del sonido, con pequeños so-

plos de aire, se inician ondas circulares, que se propagan por la superficie del agua del mismo modo que lo harían las de aire en la sala real. Cuando estas ondas llegan a los bordes se reflejan dando una imagen de las concentraciones y dispersiones en la sala real. Iluminando el fondo de cristal por debajo por medio de chispas eléctricas se pueden obtener fotografías, o, si se quiere, películas cinematográficas que reproduzcan el movimiento de las ondas. Proyectando estas películas en una pantalla, con movimiento más lento, el estudio de la marcha de las ondulaciones puede hacerse con toda comodidad. Este procedimiento es sugestivo por su sencillez y por lo económico de los medios empleados. Experiencias análogas empleando también el agua o el mercurio han sido hechas por Weber, Grimsehl y otros. Hay que advertir que, siendo la longitud de onda una constante para cada líquido, las experiencias sólo *representan* el comportamiento de las ondas sonoras de cierto *tono*, que depende de la relación entre la longitud de onda del líquido empleado y la escala del modelo estudiado. Para convencerse de la diferencia de comportamiento en una misma sala de dos sonidos de distinta altura, basta experimentar sobre el mismo modelo, utilizando primero el agua y luego el mercurio que tiene la longitud de onda mucho menor.

Otro físico, Foley (1), emplea el procedimiento fotográfico directo, obteniendo imágenes de las propias ondas de condensación y rarefacción del aire que transmiten el sonido. Las ondas se producen por la explosión de un fulminante en el punto adecuado del modelo representando a escala la sección o la planta de la sala. Este modelo está en el interior y en la parte media de un tubo oscuro, uno de cuyos extremos tiene una placa fotográfica y el otro un dispositivo para hacer saltar una chispa eléctrica. El punto en que estalla el fulminante está tapado por la parte de la placa por un pequeño disco para que la luz de la explosión no la impresione. Haciendo que la chispa eléctrica salte un determinado tiempo, muy corto siempre, después de la explosión, en la placa queda fotografiada la *sombra* de las ondulaciones sonoras; las fases de condensación dan como sombra fajas oscuras bien netas y recordadas. Repitiendo la operación para diversos intervalos de tiempo, previamente calculados, se estudia en las fotografías la marcha de las ondas directas y de las reflejadas.

Esos métodos son muy útiles porque evitan los errores del procedimiento gráfico, que dibuja las trayectorias de los rayos sonoros rectilíneos y que

(1) Watson: *Acoustics of Buildings*, 1923, pág. 12.

(1) Arthur L. Foley: *Sound wave photography in the study of Architectural Acoustics*, THE AMERICAN ARCHITECT, 8 noviembre 1922.



muchas veces da lugar a prever resultados favorables o perniciosos que luego no se producen con el sonido.

El mismo Watson, antes citado, empleó en los estudios previos a la corrección acústica del "Auditorium" de la Universidad de Illinois (2), el método directo enviando a las diversas regiones del techo y paredes de la sala, los rayos sonoros de un reloj primero, y de un metrónomo, después, proyectados por medio de un reflector parabólico, en cuyo foco se colocaba el productor del sonido, y buscando después por observación auditiva directa, los focos de concentración de los ecos. También usaron la luz de un arco voltaico, igualmente dirigida con el reflector: de esta manera localizaban rápidamente las zonas peligrosas comprobándolas después con el metrónomo. Como no podían hacerse desaparecer las bóvedas que causaban las concentraciones, el remedio tuvo que consistir en recubrir las, en parte, de un material absorbente, fieltro muy poroso que, disminuyendo mucho la proporción de sonido reflejado, permitió usar la sala con éxito.

Antes de terminar lo referente al eco haremos observar que, en general, sólo se da importancia a las concentraciones de sonido que pueden molestar al oyente, sin tener en cuenta las que pueden producirse próximas al orador, actor o músico, y sin embargo, éstas pueden ser tan inconvenientes como las otras.

Es muy corriente disponer en las salas de conferencias o de conciertos individuales o de escaso número de instrumentos, una hornacina semicircular, a manera de ábside o *exedra* de las antiguas basílicas (que son el primer ejemplo de la disposición), para situar al orador o músico. Generalmente este podium en ábside está cubierto con una bóveda en cuarto de esfera. Supongamos que el orador, o alguno de los músicos, está situado próximamente a una distancia del fondo del ábside, que sea la mitad del radio. Los sonidos emitidos en todas direcciones se reflejarán y saldrán hacia la sala aproximadamente paralelos. Como la diferencia de recorridos entre los sonidos directos y los reflejados es pequeña, se producirá refuerzo sin eco ni confusión. La disposición parece, pues, perfecta y quizá por esto, o por su valor arquitectónico, es empleada muy frecuentemente. Pero en cambio, cualquier ruido producido en el fondo de la sala, un estornudo, la caída de una silla, produce rayos casi paralelos, porque son lejanos que se irán a concentrar en los oídos del orador o ejecutante, el cual los percibirá con una intensidad muy superior a la ordinaria. Esto no le molestará demasiado si se trata de aplausos; pero cualquier

otro sonido, o el eco de su misma voz o instrumento, reflejado en las paredes lejanas, vuelve a la escena débil, pero por la reflexión en la superficie curva adquiere un vigor inesperado. Así, los mismos sonidos reflejados que no molestarán a los oyentes, podrán estorbar al ejecutante hasta imposibilitar su labor. Una cosa curiosa es que en salas de esa forma las primeras quejas han venido de los radio-oyentes cuando el micrófono ha estado colocado en un punto cercano al foco; pues los pequeños ruidos de la sala, que apenas incomodan a los espectadores presentes, eran transmitidos por radio con una intensidad desproporcionada.

Esta propiedad de las bóvedas semicirculares puede representar un obstáculo serio para la adopción general del nuevo sistema de construcción de escenarios, en que se suprimen las bambalinas y bastidores, sustituyéndolos con objetos corpóreos que se destacan sobre una decoración de fondo fija y rígida, llamada "horizonte", de forma semicircular o semielíptica en la planta, y que termina por arriba en una semicúpula.

\* \* \*

Hasta ahora nos hemos ocupado de los *ecos*, es decir, del fenómeno que se produce cuando algún espectador puede oír claramente más de una vez los sonidos emitidos. Pero ésta no es la enfermedad acústica más común en las salas, y cuando se dice de un local que tiene *mala acústica*, el defecto es, el noventa por ciento de las veces, otro. Se trata generalmente de locales que, en cuanto se empieza a hablar o a ejecutar música, se llenan de un rumor, de una resonancia difusa, que recubre de un modo uniforme la voz del orador impidiendo entenderle; si él se da cuenta y levanta la voz, el mal se agrava. Este fenómeno se suele llamar *resonancia*; en realidad esta palabra tiene en Física un significado tan claro y tan distinto del que ahora nos ocupa, que es mejor escoger otra; el profesor Sabine, de cuyos interesantes trabajos nos ocuparemos luego, propuso llamar a este fenómeno *reverberación*, y este nombre emplearemos. La reverberación tiene por causa la absorción demasiado lenta de la energía de las ondulaciones sonoras, por las paredes, techos y objetos de la sala. Hemos dicho que, cuando el sonido choca con una pared, es en parte absorbido y en parte reflejado. Ahora bien; si la pared o el techo está revestido de yeso, la parte absorbida es de un 3 a un 4 por 100: el 96 por 100 restante es reflejado hasta otra superficie, que lo reflejará de nuevo, absorbiendo también una parte y así seguirá el proceso, hasta que la intensidad del sonido se haga

(2) Watson: *Acoustics of Buildings*, pág. 68 y siguientes.



inferior al límite mínimo de audibilidad. Si en la construcción de la sala abundan los materiales poco absorbentes, cada sonido ha de sufrir un gran número de reflexiones, cincuenta, sesenta o cien, antes de desaparecer; resultando que al poco de empezar a hablar el orador la sala está de tal modo llena de las prolongaciones sonoras de gran parte de las sílabas pronunciadas, que los oyentes, ni aun forzando la atención del modo más penoso, pueden entenderle.

La reverberación es, por consiguiente, otra cosa completamente distinta del eco, y puede existir, muy marcada, en locales que no tengan falta ninguna contra las leyes de Langhaus, que no tengan cúpulas, ni muros corvos, ni nada, en fin, que pueda producir concentración de sonidos reflejados. Un buen ejemplo de sala sin ecos, pero con una reverberación tan intensa que la inutiliza para todo uso musical, lo tenemos en nuestro Palacio de Bellas Artes. Todo el que haya asistido a un concierto o haya intentado oír discursos en su gran salón, habrá observado, bien a pesar suyo, el hecho.

El fenómeno de la reverberación, con el nombre de resonancia, se ha conocido siempre, como se han conocido sus remedios: las habitaciones de un piso desalquilado *resuenan*: en cuanto se entran muebles, cortinajes y alfombras, el molesto fenómeno desaparece. Pero la solución de un problema, para llamarse científica, ha de ser cuantitativa; hemos de saber qué materiales, y en qué cantidad hay que introducirlos en una sala para corregir su reverberación y, sobre todo, a los arquitectos nos interesa que con el solo estudio de los planos de una sala podamos predecir con suficiente seguridad sus cualidades acústicas y corregir sus defectos.

Esta solución, completa y científica, es la que hoy poseemos, gracias principalmente a la labor de un sabio americano, Wallace Clement Sabine, profesor que fué, hasta su muerte, de Matemáticas y Filosofía natural en la Universidad de Harvard.

Hace treinta años aproximadamente, se acabó de construir como anexo a dicha Universidad el Fogg Art Museum, y en él una sala de conferencias. Esta sala resultó absolutamente inútil para su destino. Una sílaba pronunciada en voz natural se oía prolongada por espacio de más de cinco segundos; y en este tiempo el orador pronunciaba por lo menos veinte o treinta sílabas más, que del mismo modo se prolongaban, llenando el ámbito del molesto sonido difuso que impedía entender nada. En vista de ello el profesor Sabine fué consultado y es una verdadera delicia seguir en los artículos que dedicó a referir

sus trabajos (1) el planteo, magistral por su sencillez, del problema.

Desde luego no se trataba de la forma de la sala: precisamente se había reproducido la que tenía un teatro vecino, el Sanders Theater, muy apreciado por sus condiciones acústicas. Tampoco se notaban ecos perceptibles en ningún lugar de la sala. Como consecuencia, el profesor Sabine abandona todo el aparato de rayos incidentes y reflejados, concentraciones, focos conjugados y demás terminología óptica, y dice, simplemente: Produciendo un sonido introducimos en la sala una cantidad de energía que estará en ella hasta que salga por sus puertas o ventanas, o hasta que se haya empleado en poner en vibración las paredes y objetos del local, convirtiéndose en calor en su mayor parte. La cuestión es medir exactamente el tiempo que transcurre desde que el sonido *cese de producirse* hasta que *cesa de oírse*. Esta será la duración o *tiempo de reverberación*. Al sonido que se percibe después de cesar la producción del mismo, le llama *sonido residual*.

Después de varias pruebas, se valió simplemente del oído humano para medir la duración del sonido residual. Por medio de un tubo de órgano que daba el *do* de 512 vibraciones por segundo, producía un sonido constante durante algunos segundos. Desde un punto cualquiera de la sala, el observador, por medio de un interruptor eléctrico, paraba la emisión del sonido: automáticamente se ponía en marcha un cronógrafo. Cuando el observador dejaba de oír el sonido residual, detenía con el mismo interruptor el cronógrafo y examinaba el tiempo registrado. Las diferencias debidas a la actuación de distintos observadores fueron mínimas (2).

La primera observación fué que la duración de la reverberación era sensiblemente la misma en todos los puntos de la sala. Su valor era de 5,62 segundos. Llevando a la sala unas cuantas almohadillas de las que cubrían los asientos del Sanders Theater, con una longitud total de 8'20 m. el

(1) Sabine: *Collected Papers on Acoustics*. Cambridge, 1923.

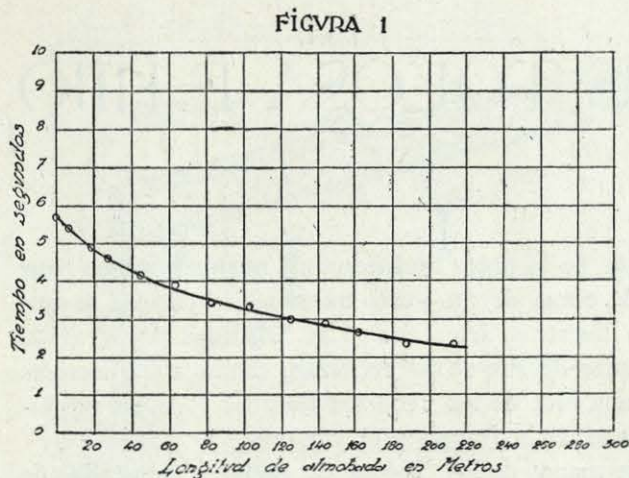
(2) Petzold ha hecho observar recientemente que con el método de Sabine se obtienen tiempos de reverberación siempre *más largos* que los reales. En efecto, cuando el operador detiene el sonido con su interruptor, el cronógrafo empieza a contar *automáticamente*, es decir, instantáneamente; en cambio, cuando dicho operador deja de oír el sonido y para el cronógrafo, desde que deja de oír hasta que su mano actúa, pasa cierto tiempo (el llamado *tiempo de reacción*) que experimentalmente se ha evaluado como valor medio, en 0,11 segundos. En esta cantidad habría, pues, que disminuir los tiempos encontrados por el físico americano. Petzold: *Elementar Raumakustik*. Zittau, 1927.



tiempo bajó a 5,33 segundos. Con 17 metros de almohadilla fué de 4,94 segundos.

Así se siguió, cubriendo todos los asientos con almohadillas, con lo que la reverberación descen-

gitudes de almohadilla colocadas en la sala, con los correspondientes tiempos de reverberación, es la siguiente (1):



0.....	5,61
8.....	5,33
17.....	4,94
28.....	4,56
44.....	4,21
63.....	3,94
83.....	3,49
104.....	3,33
128.....	3,00
145.....	2,85
162.....	2,64
189.....	2,36
213.....	2,33
242.....	2,22

dió a 2,03 segundos. Como aún había más almohadillas, se fueron repartiendo por el suelo y paredes, hasta que, cuando todas se habían distribuido, la duración del sonido residual era de 1,44 segundos. La tabla completa de las lon-

En posesión de esta tabla, lo primero que se le ocurre a uno es coger un papel cuadrulado, tomar los metros de almohada como abscisas y los tiempos resultantes como ordenadas y ver a qué se parece la curva obtenida. Esto hizo Sabine, obteniendo la figura adjunta. (Fig. 1.)

(1) *Collected Papers on Acoustics*, pág. 20.

(Concluirá.)