

JUAN C. GIMENEZ DE PAZ  
*Licenciado en Ciencias Físicas.  
 Instituto Tecnológico de Buenos Aires  
 (Rep. Argentina)*

## MATERIALES FONOABSORBENTES POROSOS: MODELO PREDICTIVO

**S** i bien la acústica constituye una especialidad, es habitual que los técnicos y profesionales en higiene y seguridad industrial deban enfrentarse a la tarea de atenuar niveles sonoros que afecten al personal que opera máquinas ruidosas, a otros distantes de las mismas, a áreas administrativas y gerenciales de la misma empresa e incluso, al vecindario. En ocasiones se

les consulta para mejorar las condiciones de esas oficinas que las hagan más privadas o, en general, más confortables, especialidad propia de la acústica arquitectónica.

Es conveniente que ese personal disponga de elementos de fácil manejo que le permitan encarar esas tareas sin necesidad de tener que profundizar en el tema, pudiendo resolver al menos los problemas más fre-

cuentes. Este es el objetivo del presente trabajo y que constituye un capítulo dentro del marco de un proyecto más vasto de modelos acústicos en escala 1:4 que el autor desarrollaba en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial, de Argentina.

El resultado final que se ofrece es una expresión que permite prever una característica acústica a partir de datos elementales no acústicos del

*Los elementos absorbentes son materiales porosos con intersticios intercomunicados, tal como la lana de vidrio o los que por su diseño pueden resonar.*

mismo material. Si bien es sólo válido para lanas de vidrio, la metodología se puede aplicar a otros materiales de estructura porosa.

## ABSORCION SONORA

El nivel sonoro es la medida de la energía sonora encerrada en un ruido, por lo que resulta ser el parámetro que debe atenuarse para protección no sólo de la audición, sino de toda la integridad psicofísica del ser humano. En primer lugar, debe tratarse a la fuente de ruido misma, corrigiendo las causas que pueden ser originadas por un funcionamiento incorrecto o defectuoso. Si no pueden lograrse mejoras ulteriores, tanto por razones técnicas como económicas, se procederá a la aplicación de las técnicas típicas de la acústica.

Se emplean normalmente dos tratamientos complementarios: 1) cortar los canales de transmisión entre las fuentes de ruido y los sitios a proteger, y 2) atenuar la energía sonora ambiental. El primero corresponde a las técnicas de aislamiento sonoro y el segundo a las de absorción sonora. Los materiales y montajes en uno y otro caso son excluyentes: un buen comportamiento aislante no lo es a la absorción y viceversa.

El segundo afecta a los sonidos menos próximos a su fuente productora y permite además controlar el tiempo de reverberación (TR), es decir, a lo que mide el grado de vivacidad en el recinto. Cuando éste es elevado, no se permite la comprensión

clara del mensaje oral, y puede ser causa de accidentes por falta de inteligibilidad en mensajes de prevención o alerta. La forma de vincularse con la absorción del recinto es a través de la conocida fórmula de Sabine que se supone conocida por el lector. (Ver tabla 1).

$$TR = \frac{0,16 V}{A} \text{ en segundos,}$$

en la que TR es el tiempo de reverberación del recinto, V su volumen (en m<sup>3</sup>) y A su capacidad de absorción total (en m<sup>2</sup>).

Esta capacidad viene dada por el llamado coeficiente de absorción sonora  $\alpha$ , que mide la fracción de energía sonora incidente que no refleja. Este valor debe multiplicarse por el área que el material ocupa y añadirse a todas las demás, de manera que el denominador de la fórmula anterior resulta ser:

$$A = (\alpha \cdot S)' + (\alpha \cdot S)'' + \dots,$$

en la que cada sumando se refiere a un material.

En lo que respecta a la atenuación sonora (At), puede estimarse el efecto que la incorporación de material absorbente tiene sobre esos valores, mediante la expresión:

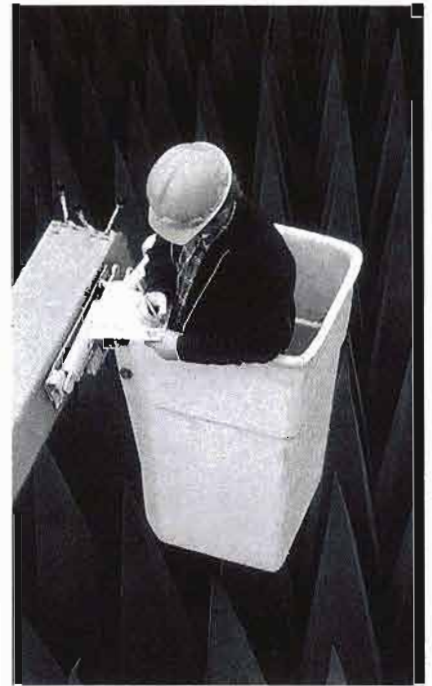
$$At = 10 \log \left( \frac{A'}{A''} \right) \text{ en decibelios,}$$

en la que cada uno de los dos valores de A corresponde a la absorción total antes de la incorporación de material (A') y luego de hacerlo (A''), respectivamente.

De lo anteriormente expuesto surge claramente que para la aplicación de estas técnicas deben conocerse los coeficientes de absorción sonora de los materiales disponibles para lograr resultados predeterminados. Estos coeficientes pueden conocerse a través de mediciones o por cálculos empleando modelos.

## MATERIALES FONOABSORBENTES POROSOS

Si bien deben obtenerse los valores numéricos de alguna manera para cada material específico a fin de calcular su influencia en la atenuación y tiempo de reverberación, existen algunos comportamientos cualitativos comunes que son de esperar según la naturaleza del mecanismo físico que provoca la absorción sonora y que permite clasificarlos en los diseños que resuenan ante el estímulo del sonido incidente y en los materiales porosos que permiten el paso del aire vibrando a través de in-



tersticios comunicados. Los primeros están representados por las membranas resonantes con un comportamiento similar al parche de un tambor (madera terciada, membranas plásticas, etc.) o las placas multiperforadas cuya geometría y dimensiones les permite seleccionar las frecuencias a atenuar. Entre los segundos están las lanas de vidrio y minerales, tejidos, maderas aglomeradas no impermeabilizadas, espumas de uretano, etc.

La diferencia fundamental entre unos y otros está en que los primeros son eficaces en bajas frecuencias o medias y los segundos en las medias y particularmente en las altas (en torno a los 1.000 Hz), con una eficiencia que aumenta con el aumento de la frecuencia. Además, los primeros dependen de parámetros que generalmente el diseñador puede variar, por lo que pueden ser «sintonizados» para actuar sobre rangos de las frecuencias que interesen. Los otros tienen sus coeficientes de absorción dependiendo de características físicas fijadas durante el proceso de fabricación.

Entre los materiales porosos más difundidos están las lanas de vidrio, las cuales se emplean solas o formando parte de algún diseño más complejo.

## MEDICION DEL COEFICIENTE DE ABSORCION SONORA

El coeficiente de absorción se puede obtener mediante técnicas de

medición normalizadas incluso internacionalmente, reconociendo dos procedimientos muy difundidos, el que emplea una cámara reverberante (método de la cámara; unidad: sabine/m<sup>2</sup> (2)) y el que emplea un tubo de Kundt (método del tubo); se expresa así en porcentaje (3), que arrojan resultados cuantitativamente distintos, aunque dentro de su comportamiento cualitativo típico. Los valores obtenidos por uno y otro método son irreconciliables y no pueden convertirse de uno a otro, por ser de naturaleza diferente: el de la cámara se refiere a bandas de sonido que inciden sobre la muestra bajo ensayo desde todas direcciones, mientras que el otro se refiere a tonos puros que sólo inciden frontalmente sobre la muestra, que es de dimensiones mucho más reducidas que en el otro método.

En consecuencia, el primero es más representativo de las situaciones reales de uso de los materiales, aunque al precio de unos mayores costos y tiempo de evaluación relativos. En ambos se requiere la participación de técnicos especializados, y equipamiento e instalaciones propios de un laboratorio de acústica. Debe remarcarse que para el primero existen divergencias notables entre los resultados obtenidos por diferentes laboratorios para un mismo material, aun midiendo la misma muestra de un material. Estos ensayos comparativos constituyen los llamados *round robin test*. Este problema no se presenta en forma notoria con el segundo.

Los valores medidos pueden encontrarse en la literatura especializada, debiendo en todos los casos citarse el método empleado y la fuente de obtención para justificar la seriedad de los valores publicados. Por supuesto que no siempre es posible encontrar los datos de un material o sistema que en forma particular se desee o estudiar su reemplazo. En ese caso, no es sencillo medirlo si no se dispone de las condiciones de laboratorio mencionadas, limitándose enormemente las posibilidades de prever atenuaciones o tiempos de reverberación con un material cuya absorción se desconoce cuantitativamente. En la Tabla 1 se dan algunos valores obtenidos por mediciones, advirtiéndose que los coeficientes varían entre bandas de frecuencias para un mismo material. Obsérvese también que las lanas de vidrio son los únicos de dicha tabla cuyos coeficientes crecen para las frecuencias más altas, pero con valores que dependen de los espesores y densidades.

*El coeficiente de absorción sonora que los caracteriza debe medirse de acuerdo a normas en laboratorios especializados y requiere instalaciones, equipamiento y cierto tiempo de evaluación.*

## PREDICCIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SONORA Y OTROS PARAMETROS

Predicción del coeficiente de absorción sonora y otros parámetros

Dada la necesidad de contar con una infraestructura especializada en metrología acústica, no es posible en la práctica que cada usuario pueda por sí mismo efectuar las mediciones para conocer las características absorbentes de los materiales a emplear para cada tratamiento, ni siempre es viable solicitar ese trabajo a un laboratorio especializado, tanto por los costos que ello implica cuanto por el tiempo que demanda.

Debe consultarse, en consecuencia, las tablas publicadas en la seguridad que se trata de una fuente responsable, pero es posible que los materiales a emplear no sean de fácil adquisición o tengan características propias de otras plazas o que no sea posible encontrar en ellas el material que específicamente se quiera em-

**Tabla 1**  
**COEFICIENTES DE ABSORCIÓN SONORA OBTENIDOS POR EL METODO DE LA CAMARA (SABINE/m<sup>2</sup>)**

Elemento	Banda de frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
1. Mampostería de ladrillo hueco con revoque alisado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
2. Hormigón	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
3. Placa de fibra prensada de 1,2 cm de espesor con agujeros de 5 mm de diámetro y 0,9 cm de profundidad, y un agujero cada 2 cm <sup>2</sup>	0,10	0,20	0,40	0,50	0,45	0,50
4. Idem 3, pero espesor 2,1 cm y profundidad de agujero 1,6 cm	0,10	0,35	0,70	0,75	0,65	0,50
5. Aglomerado de 12,5 mm a 8 mm de la pared sobre bastidor cada 100 y 50 cm de separación (horizontal y vertical)	0,15	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05
6. Idem 5, pero a 2,8 cm de la pared	0,35	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
7. Vidrios comunes de ventanas	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
8. Terciado de 1 cm de espesor	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Lana de vidrio:						
9. Espesor, 12,5 mm; densidad, 32 kg/m <sup>3</sup>	0,08	0,12	0,16	0,17	0,24	0,55
10. Espesor, 24 mm; densidad, 37 kg/m <sup>3</sup>	0,12	0,18	0,26	0,40	0,65	0,85
11. Espesor, 45 mm; densidad, 15 kg/m <sup>3</sup>	0,13	0,20	0,34	0,56	0,85	0,90

**Referencias:**

1, 2, 7 y 8, C. M. Harris: Handbook of noise control, McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1979; de 3 a 6, E. J. Evans y E. N. Bazley: Sound absorbing materials, National Physical Laboratory, Gran Bretaña, 1978; de 9 a 11, J. C. Giménez de Paz: Acústica arquitectónica y aplicaciones al control del ruido (a editar).

plear. Por éstos y otros motivos, se justifica el empleo de un modelo simple que permita prever el comportamiento de los materiales fofoabsorbentes.

Para algunos diseños puede efectuarse ese cálculo a través de fórmulas garantizadas: membranas resonantes, resonadores de Helmholtz, etc., que emparejan el coeficiente de absorción sonora con propiedades dimensionales y otras de fácil acceso. No es el caso de los materiales porosos, que a veces se apartan de aquel parámetro, dependiendo de otros también de uso poco frecuente fuera del ambiente acústico, como, por ejemplo, de la resistencia al flujo de aire ( $W$ ), que define la oposición que ese material ejerce al paso de aire vibrante (es decir, sonido). Afortunadamente, para la lana de vidrio el factor  $W$  está relacionado con otros parámetros: densidad y espesor del material y diámetro de las fibras (4). Si se trata de un mismo tipo de lana de vidrio, se puede prescindir de explicaciones sobre este último valor, tal como se hizo para las muestras representativas en un trabajo anterior (5).

Es fácil advertir entonces el origen de la tendencia actual de poder prever el comportamiento de cada elemento o sistema de uso más o menos generalizado, mediante algún modelo matemático simplificado que reúna las condiciones de sencillez y fiabilidad. Estos modelos pueden ser de origen teórico o empírico y pueden darse en forma de tabla, gráfico o mediante una expresión analítica.

Con este objetivo, y tomando a las lanas de vidrio por su uso muy difundido en ambientes industriales, se correlacionaron (según la metodología que se comenta más adelante) sus coeficientes de absorción sonora obtenidos mediante el método del tubo con la resistencia al flujo de la misma muestra como presunta variable de mayor influencia y otras elementales (densidad, espesor). El resultado inicial se resume en la siguiente expresión logarítmica en base 10:

$$\alpha = A + B \log (W) + C \log (t)$$

en la que  $\alpha$  es el coeficiente de absorción sonora;  $W$ , la resistencia al flujo;  $t$ , su espesor en mm., y  $A$ ,  $B$  y  $C$  son constantes de ajuste que dependen de la frecuencia del sonido.

Dado que a su vez  $W$  depende del espesor y densidad, se tomaron a éstas como nuevas variables independientes quedando una nueva expresión formalmente análoga pero de uso más práctico, con una bondad de

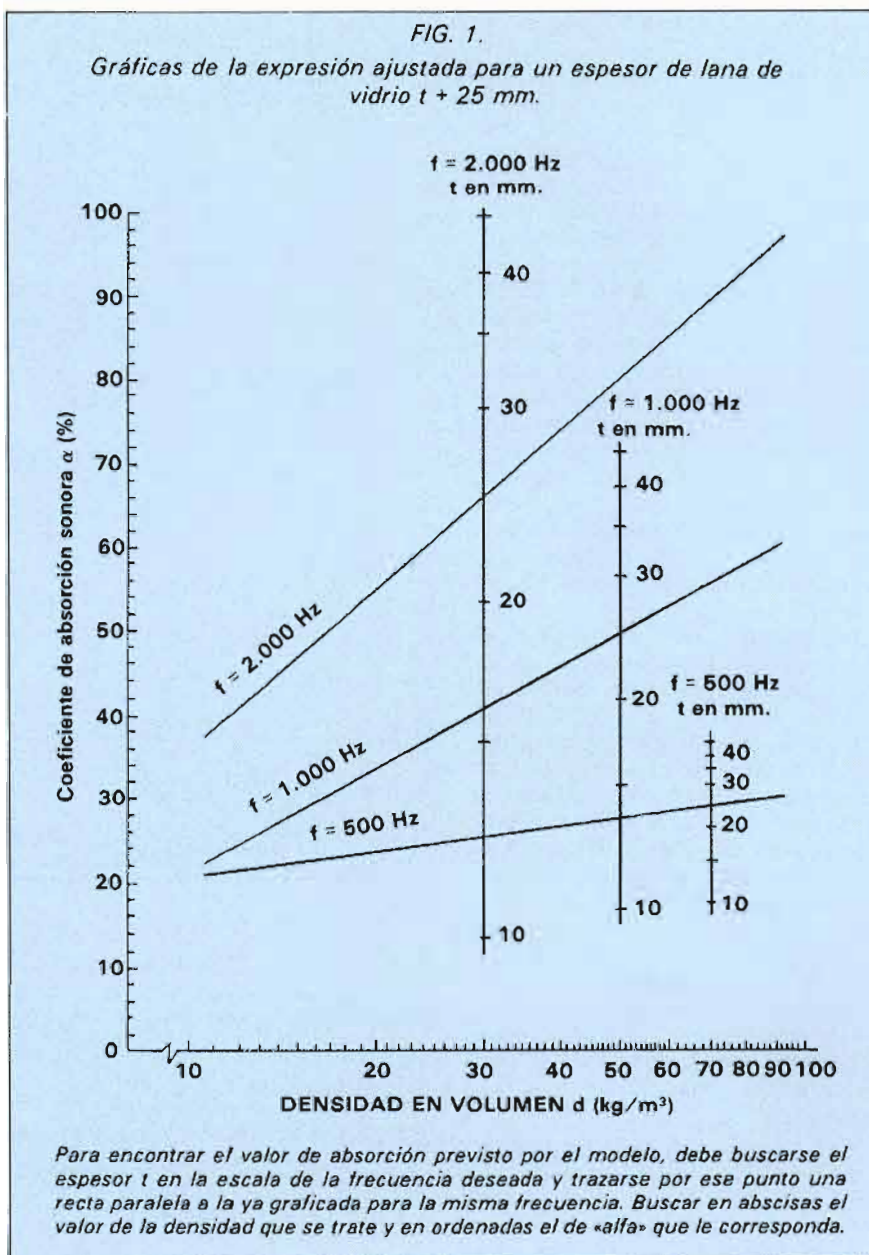


Tabla 2 CONSTANTES A, B Y C DE AJUSTE				
Frecuencia (Hz.)	Constante			
	a	b	c	r <sup>2</sup>
500	29,4	28,9	9,8	0,89
1.000	-138,2	84,4	41,3	0,92
2.000	-211,9	131,4	63,8	0,96

ajuste elevada, aunque algo menor que la anterior. En la figura 1 se muestran en forma de gráfico las fórmulas para las tres frecuencias consideradas, destacándose los rangos de validez que las acotan. Fuera de esos intervalos, no se puede asegurar la validez del modelo por no haberse empleado lana de vidrio con valores más allá de ellos.

$$\alpha = a + b \log (t) + c \log (d)$$

en la que  $\alpha$  es el coeficiente de absorción sonora en porcentaje;  $t$ , el espesor en mm.;  $d$ , su densidad en kg/m<sup>3</sup>, y  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes de ajuste que dependen de la frecuencia del sonido, cuyos valores se dan en la Tabla 2, en la que se incluye el coeficiente de correlación  $r^2$  recor-

**Tabla 3**  
**VALORES PROMEDIOS POR MUESTRA**

Muestra núm.	Resistencia al flujo W (N.s/m <sup>2</sup> )	Densidad de volumen (kg/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de absorción					
			500 Hz.		1.000 Hz.		2.000 Hz.	
			med.	cal.	med.	cal.	med.	cal.
1	189,3	27,2	23	24	33	35	56	67
2	334,0	40,7	26	28	42	45	68	72
3	69,7	8,3	21	23	24	27	40	45
4	93,3	9,9	22	23	25	29	41	47
5	670,1	62,5	25	28	52	53	84	86
6	102,3	29,9	17	17	15	15	22	26
7	437,0	149,8	11	10	6	4	10	8
8	84,9	18,8	16	15	14	8	20	16
9	160,0	14,2	27	26	40	37	65	60
10	259,0	16,1	34	30	59	51	87	82
11	156,0	15,4	27	26	37	38	65	62
12	132,0	13,0	25	24	31	31	55	51
13	208,6	34,7	19	21	24	27	43	45

dando que la unidad es la correlación perfecta.

De acuerdo con los valores promedios para cada muestra que se ofrecen en la Tabla 3, se observa una buena aproximación entre los medidos y los calculados. Es importante tener presente que las variaciones entre probetas de una misma muestra (valores individuales no incluidos en la tabla) tanto en densidad, coeficiente de absorción como resistencia al flujo son mayores que las que median entre los coeficientes medidos y calculados para cada muestra. Se detectaron, por ejemplo, variaciones de hasta un 45 por 100 en el peso entre probetas de una misma muestra (5).

**TECNICA EMPLEADA PARA EL AJUSTE EMPIRICO**

Los resultados anteriores corres-

ponden a un análisis estadístico sobre 13 muestras de lana de vidrio de producción nacional y que abarcan un espectro amplio del existente en el mercado local. El diámetro de la fibra es constante en términos relativos a otras características del material y es del orden de las 5 a 6 milésimas de milímetro, según mediciones con microfotografías de 500 aumentos como la que se ilustra en la figura 2.

De cada muestra se tomaron tres probetas circulares de 10 cm de diámetro, midiéndose su peso con una balanza de precisión y su espesor de acuerdo con la norma interna del fabricante. Las mediciones de resistencia al flujo y absorción se efectuaron con las mismas probetas y repitiendo varias veces el proceso a fin de disminuir los posibles errores, tomando el promedio como repre-

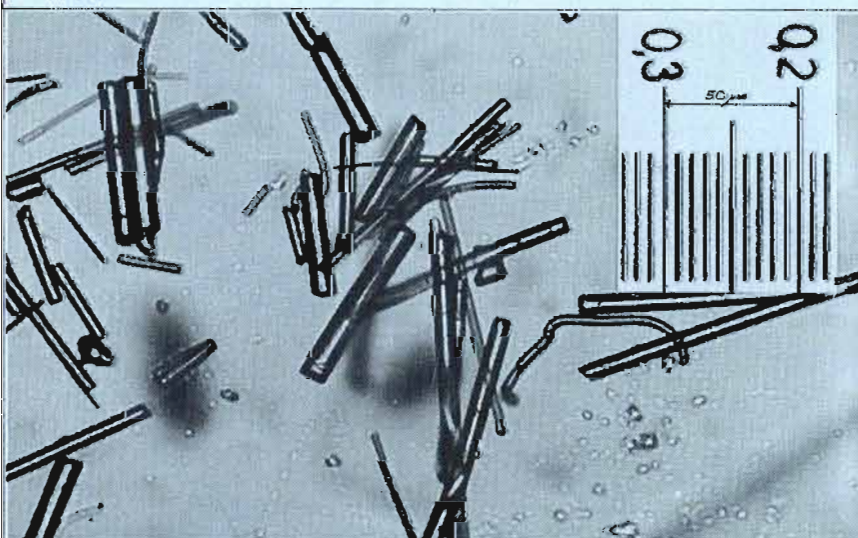
sentante para cada probeta. El promedio de las tres probetas se tomó como el representativo de la muestra y son los que se incluyen en la Tabla 3.

Para la resistencia al flujo se empleó el método dinámico de acuerdo con la norma DIN 52 213 (ensayo tipificado como 52 213-80-83) empujando el equipo construido por el autor en el Physikalisch-Technische Bundesanstalt de la R. F. de Alemania y entregado como donación al Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina.

La correlación entre resistencia al flujo con la densidad y espesor consistió simplemente en un ajuste para una relación probada de larga

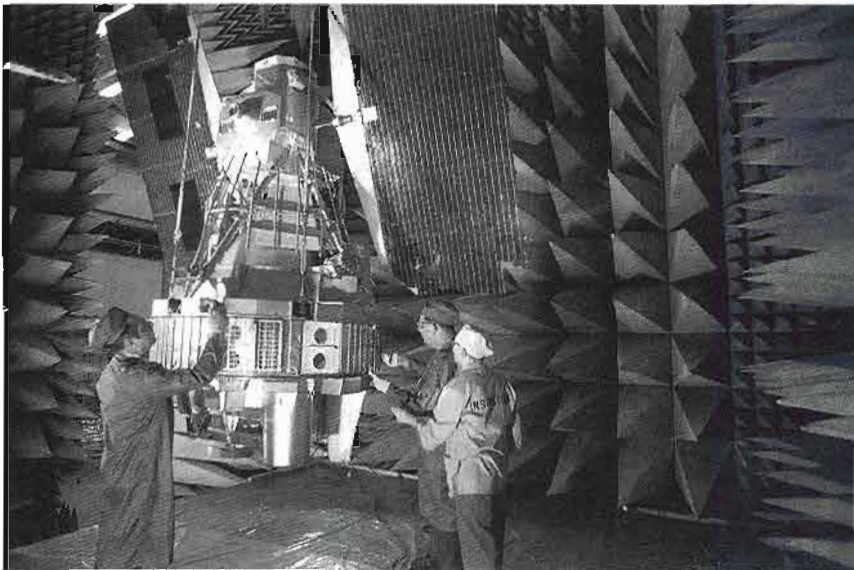


*FIG. 2.—Microfotografía de fibras de lana de vidrio con aumento de 500x.*



*El diámetro de las fibras es del orden de las 6 micrómetros. Debe observarse que las sombras hacen suponer variaciones mayores que las reales.*

*Los materiales fonoabsorbentes permiten controlar el tiempo de reverberación y atenuar los niveles sonoros en recintos industriales.*



La metodología aplicada para hallar la fórmula que mejor se ajuste puede extenderse para otros materiales porosos: telas, lana mineral, alfombras, etcétera.

El coeficiente de absorción depende de parámetros físicos propios del material, por lo que se puede inferir su valor conociendo el de éstos, muchos de los cuales son de obtención más sencilla.

Cada una de estas 24 variables tomadas como independientes fueron siendo incorporadas en pasos sucesivos como una combinación lineal de acuerdo con el criterio F del coeficiente de regresión ( $r^2$ ). Este criterio prueba el coeficiente para cada variable como si fuera incorporada independientemente en la ecuación en el paso siguiente (valor F1). También permite eliminar alguna variable cuando su incidencia relativa fuera de escasa relevancia (valor F2).

Estos valores se definen, respectivamente, a partir de las expresiones:

$$F1 = \frac{\sum D(n) - \sum D(n+1)}{\sum D(n+1)/(N-p-1)}$$

$$F2 = \frac{\sum D(n-1) - \sum D(n)}{\sum D(n)/(N-p)}$$

donde es:

$\sum D(n)$ , la sumatoria de los residuos en el paso n;

$\sum D(n+1)$ , la sumatoria de los residuos luego de incorporada la nueva variable.

$\sum D(n-1)$ , la sumatoria de los residuos si la variable fuera eliminada de la ecuación;

N, la cantidad de datos; y

p, la cantidad de variables independientes.

Los valores adoptados para F1 y F2 son:

F1 (para incorporar una variable) = 4 (mínimo)

F2 (para eliminar una variable) = 3,9 (máximo).

Las variables más significativas resultaron ser:  $\log(t)$  y  $\log(W)$ , en ese orden. Cuando correspondió, se eliminó algún valor experimental por encontrarse muy apartado del previsto y siempre que se justificara de acuerdo con los obtenidos para t y/o

W. Por la dependencia de W con t y d (ajustada previamente) se obtuvo finalmente la relación práctica dada más arriba. ■

## BIBLIOGRAFIA

1. AMIL, GIMENEZ DE PAZ, LAVALLE y RODRIGUEZ SAIACH: *Ruidos y vibraciones. Hipocausia*; Circulo Carpetas, Ramos Mejía, 1988.

C. M. HARRIS: *Handbook of Noise Control*; McGraw-Hill Book Co Nueva York, 1979.

G KURTZE *Física y técnica de la lucha contra el ruido*; Ed. Urmo, Bilbao, 1972

J. PEREZ MIÑANA: *Compendio práctico de la acústica*; Ed Labor, Barcelona, 1969.

2. NORMA IRAM 4065: *Medición del coeficiente de absorción sonora.*

NORMA ISO R-354: *Measurement of absorption coefficient in a reverberation room.*

NORMA DIN 52212: *Bestimmung des Schallabsorptionsgrades im Hallraum.*

NORMA ASTM C423. *Standard test method for sound absorption of acoustical materials in reverberation rooms.*

3. NORMA DIN 52215 *Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz im Rohr.*

NORMA ASTM C384: *Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials by the tube method.*

4. D. A. BIES y C. H. HANSEN: «Flow resistance information for acoustical design», *Applied Acoustics*, 13, 1980, 357-391.

5. J. C. GIMENEZ DE PAZ. *Resistencia al flujo de materiales porosos*; Carta Metalógica, núm. 6, 1984, 84-96

data (4), de manera que sólo se debió encontrar los parámetros ajustables (5).

Para la determinación del coeficiente de absorción sonora se empleó un tubo de Kundt de sección circular de 9,5 cm. de diámetro y 1 m de longitud para las mediciones en condiciones de norma (3) de tres tonos puros como representantes del rango de frecuencias posibles con este equipo y de interés para el control del ruido: 500, 1.000 y 2.000 Hz.

Para las tres frecuencias de trabajo se procedió con la misma metodología en cuanto a los ajustes del coeficiente de absorción sonora. En primer lugar se presentaron como variables independientes: el espesor t de la muestra, su densidad de volumen d y la resistencia al flujo W en varias formas simples, como X, 1/X, X<sup>2</sup> y log (X), representando con la X a cada una de las tres variables, t, d y W. También en formas combinadas como t.d, d/t, log (t d) y log (d/t).