

PROYECTO

Diseño acústico de una sala de conferencias

Docentes:

Ing. Nilda Vechiatti

Dr. Ing. Pablo Gómez

Grupo N°	
Integrantes	
Nombres:	E-mail:
JOSE FRANCISCO GONZALEZ	jfgonzalez@fi.uba.ar
FERNANDO TERENCE	ftaudio@gmail.com
RODOLFO OSCAR GONZALEZ	rog@fibertel.com.ar

ETAPA 1

Con los datos de las medidas de largo y ancho de la sala procedemos a realizar el análisis de los modos de resonancia del recinto con el objeto de elegir una altura del mismo que permita cumplir con el Criterio de Densidad de Modos.

Para ello se utilizará el calculador AMROC que es una herramienta que realiza los cálculos y facilita los cambios de las medidas de la sala y su correspondiente resultado en lo que a los modos de resonancia se refiere.

Además, el programa permite conocer la frecuencia de los modos, la amplitud que caracteriza a los distintos tipos (axiales, tangenciales y oblicuos) y la densidad de ellos en los tercios de octava.

Con estos resultados, la elección de la altura de la sala resulta de muchas pruebas con distintos valores hasta encontrar el que permite que la distribución de modos cumpla con el Criterio de Densidad de Modos

Criterio de Densidad de Modos

EL CRITERIO DE BONELLO

En 1981 Bonello publicó un artículo en el que establecía un criterio de evaluación del comportamiento espectral de las resonancias de una sala.

Una de las ventajas del criterio propuesto por Bonello es la simplicidad de los cálculos, que con tan solo una calculadora científica o una planilla de cálculos, permite alcanzar resultados que aseguran la correcta distribución modal de una sala y con ello modificar las dimensiones antes de comenzar la construcción.

El primer paso consiste en calcular los 48 primeros modos propios mediante la ecuación que se describe a continuación:

$$F_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

Donde:

172,5 es la velocidad del sonido en el aire dividida por 2 (25 grados)

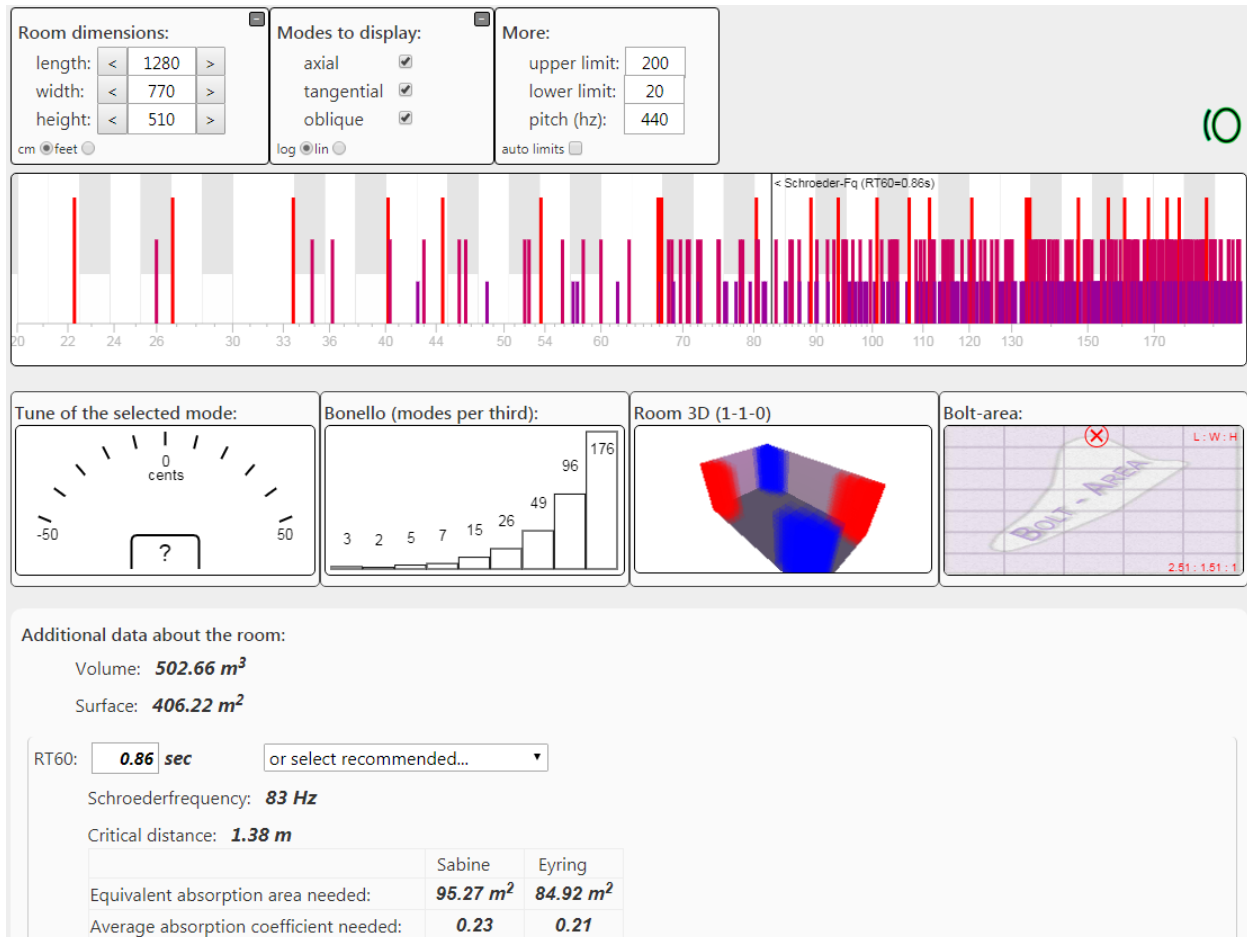
k, m, n son números enteros que van variando en forma de combinatoria

l_x , l_y y l_z son las dimensiones de la sala (m).

Un vez que conocemos los 48 primeros modos propios de la sala, hay que dividir el espectro de frecuencias en tercios de octava para luego comprobar cuantos nodos propios se ubican en cada uno de los tercios. Bonello decidió usar divisiones de tercios de octava debido a cuestiones psicoacústicas. Una de las razones fue que los tercios de octava hacen referencia a unos anchos de banda relativos y no anchos absolutos. Esto es indicado, ya que la forma en la que el oído humano percibe los intervalos musicales es de forma logarítmica.

De acuerdo con esto, representamos gráficamente la cantidad de modos propios que entra en cada tercio de octava desde 20 Hz hasta 200 Hz, a cuya curva representada Bonello llamó $D = F(f)$.

Utilizando el programa Amroc con las medidas iniciales del proyecto se obtiene la siguiente distribución de modos:



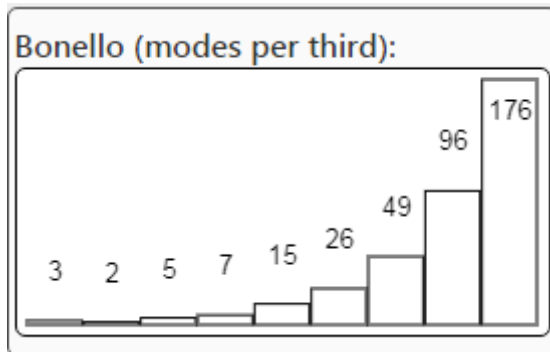
Luego se eligió 30 Hz. como frecuencia de límite inferior, porque eligiendo 20 Hz no se podía cumplir con el Criterio. (densidad de modos no crece en forma monótona).

Las condiciones del criterio de Bonello son las siguientes:

1. La curva $D = F(f)$ debe incrementarse monótonamente, es decir, cada tercio de octava debe tener más modos propios que la que le precede (o por lo menos un número igual si $D = 1$).
2. No deben existir modos dobles, o por lo menos solo pueden existir modos dobles en un tercio de octava cuando $D \geq 5$.

Posteriormente se demostró experimentalmente que dos tercios de banda sucesivos pueden tener el mismo número de modos propios aun cuando $D > 1$, lo cual implica una reducción bastante notable de la complejidad de la exigencia, aunque Bonello indica que las mejores condiciones son las que marcan sus dos condiciones originales.

El criterio de Bonello ha sido muy usado todos estos años en el diseño de muchos estudios y controles de grabación y algunos diseñadores indican que una sala puede considerarse buena aunque un tercio de octava tenga menos densidad de modos que la anterior, siempre y cuando ese tercio de octava cumpla que $D \geq 3$.



Esta es la distribución de modos en tercios de octava que resultó para las medidas iniciales del proyecto.

En la gráfica es claramente visible que el número de modos es monótonamente creciente en los tercios de octava salvo en las más bajas frecuencias. (frecuencia inicial 20 Hz)

Para analizar el segundo requerimiento del Criterio haremos la siguiente observación:

Bonello recomienda el análisis hasta 200 Hz o 48 modos. Esto refiere a salas pequeñas (fueron 35 salas de broadcasting en las que se utilizó el Criterio antes de publicarlo). En todos estos casos, las dimensiones de las salas eran reducidas y por lo tanto la distribución de modos de frecuencias hasta 200 Hz. debía ser tomada en cuenta. Pero en el caso de la sala de conferencias que es objeto, será útil considerar la frecuencia límite de Schroeder para el análisis de modos.

Esta frecuencia señala el límite de interés para el análisis de modos ya que la cantidad de modos crece con el cubo de la frecuencia y puede considerarse que a partir de la frecuencia de Schroeder la densidad de modos es tan alta que no son distinguibles por el oído frecuencias modales que coloreen el sonido.

Esto permite realizar el análisis hasta una frecuencia muy inferior a los 200 Hz. propuestos inicialmente por Bonello.

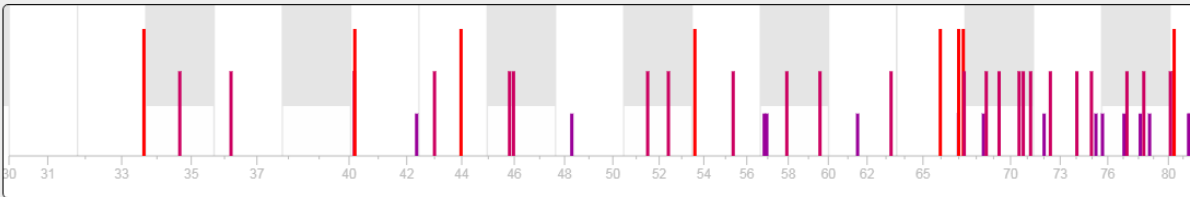
Realizamos nuevamente el análisis con el programa Amroc pero esta vez considerando que el límite superior de frecuencia será la frecuencia de Schroeder, que para las medidas óptimas de la sala (obtenidas después de muchos intentos), resultó de 82 Hz.

Además, teniendo en cuenta que partiendo de la frecuencia de 20 Hz. el resultado no cumple con la condición de crecimiento monótono de modos en tercios de octava que exige Bonello, cambiamos la frecuencia más baja de análisis a 30 Hz.

Room dimensions:
length: < 1280 >
width: < 780 >
height: < 510 >
cm ☒ feet ☐

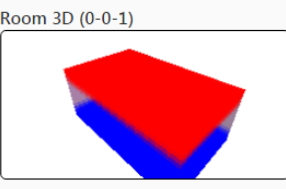
Modes to display:
axial ☒
tangential ☒
oblique ☒
log ☒ lin ☐

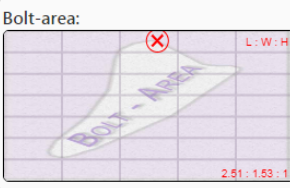
More:
upper limit: 82
lower limit: 30
pitch (hz): 440
auto limits ☐



Tune of the selected mode:
-50 0 cents 50
?

Bonello (modes per third):
2 6 7 14

Room 3D (0-0-1)


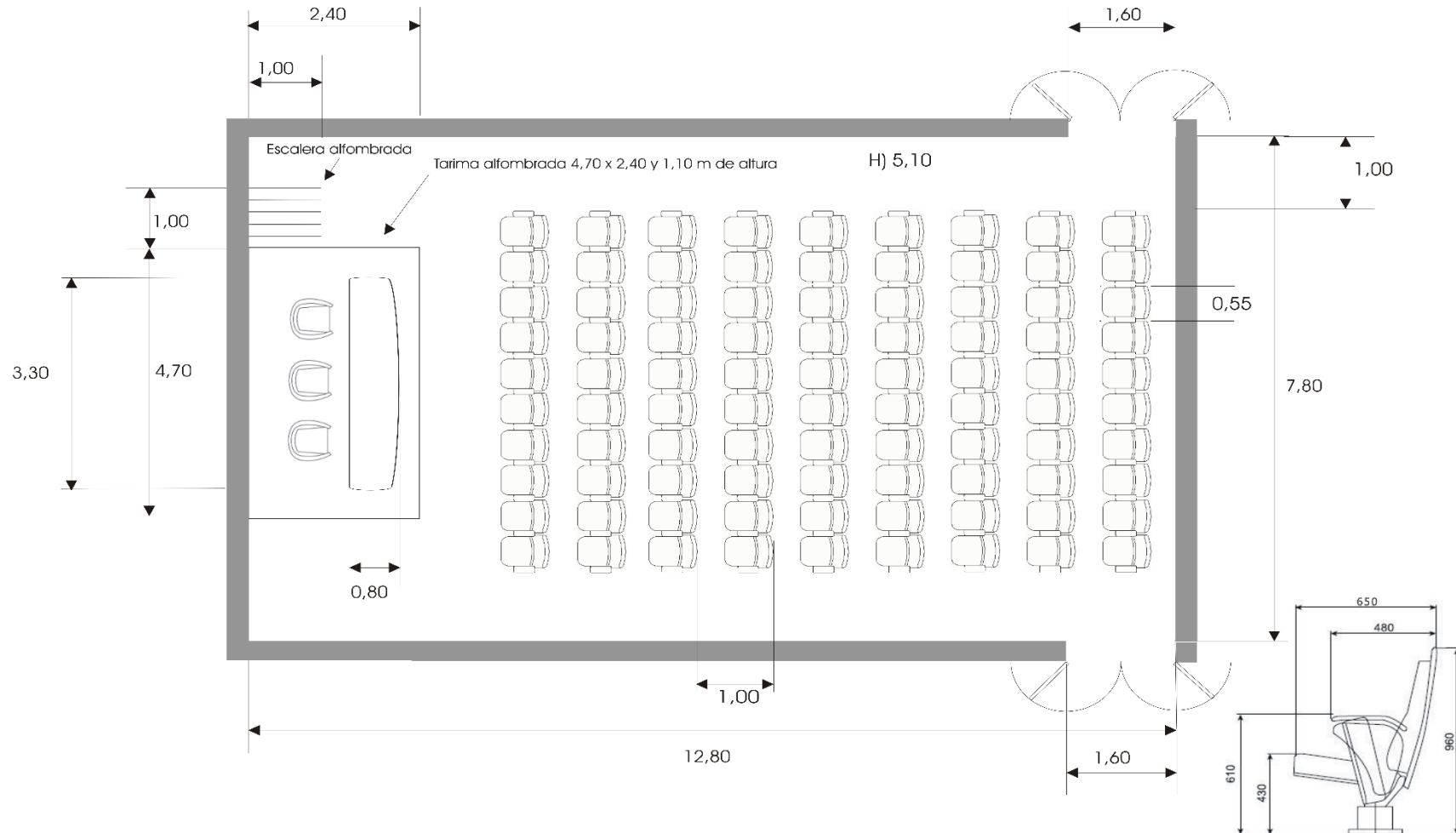
Bolt-area:


Additional data about the room:
Volume: **509.18 m³**
Surface: **409.8 m²**
RT60: **0.86 sec** or select recommended...
Schroederfrequency: **82 Hz**
Critical distance: **1.39 m**

	Sabine	Eyring
Equivalent absorption area needed:	96.51 m²	85.99 m²
Average absorption coefficient needed:	0.24	0.21

Distribución de modos de resonancia				
Número	Frecuencia (Hz.)	Tipo	Tercio de octava	Densidad
1	33,63	Axial	28-35	2
2	34,66	Tangencial		
3	36,2	Tangencial	35-45	6
4	40,18	Tangencial		
5	40,2	Axial		
6	42,35	Oblicuo		
7	43	Tangencial	45-56 Hz	7
8	43,97	Axial		
9	45,82	Tangencial		
10	45,97	Tangencial		
11	48,29	Oblicuo		
12	51,5	Tangencial		
13	52,41	Tangencial	56-71 Hz	16
14	53,59	Axial		
15	55,36	Tangencial		
16	56,83	Oblicuo		
17	56,96	Oblicuo		
18	57,93	Tangencial		
19	59,58	Tangencial		
20	61,5	Oblicuo		
21	63,27	Tangencial		
22	65,96	Axial		
23	66,98	Axial		
24	66,99	Oblicuo		
25	67,25	Axial		
26	67,31	Tangencial		
27	68,41	Oblicuo		
28	68,58	Oblicuo		
29	69,33	Tangencial		
30	70,51	Tangencial	71-90	17
31	70,76	Tangencial		
32	71,2	Tangencial		
33	72,02	Oblicuo		
34	72,4	Tangencial		
35	74,04	Tangencial		
36	74,96	Tangencial		
37	75,24	Oblicuo		
38	75,66	Oblicuo		
39	77,05	Oblicuo		
40	77,24	Tangencial		
41	78,12	Tangencial		
42	78,35	Oblicuo		
43	78,74	Oblicuo		
44	80,14	Tangencial		
45	80,36	Tangencial		
46	80,39	Axial		
47	81,38	Oblicuo		
48	81,46	Oblicuo		

Auditorio con capacidad para 90 oyentes y 3 oradores



Posteriormente se demostró experimentalmente que dos tercios de banda sucesivos pueden tener el mismo número de modos propios aun cuando $D > 1$, lo cual lo implica una reducción bastante notable de la complejidad de la exigencia, aunque Bonello indica que las mejores condiciones son las que marcan sus dos condiciones originales.

El criterio de Bonello ha sido muy usado todos estos años en el diseño de muchos estudios y controles de grabación y algunos diseñadores indican que una sala puede considerarse buena aunque un tercio de octava tenga menos densidad de modos que la anterior, siempre y cuando ese tercio de octava cumpla que $D \geq 3$.

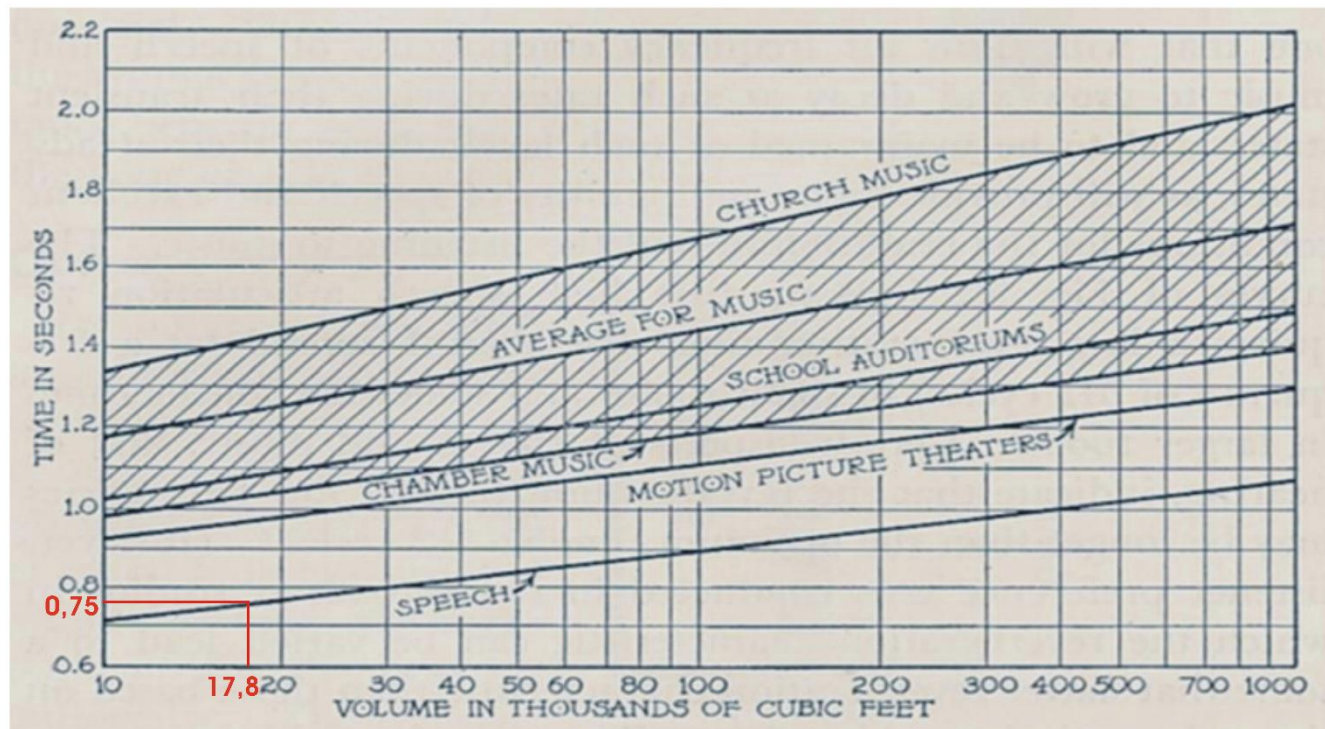
Hay que tener en cuenta también que a medida que ha ido pasando el tiempo, muchos diseñadores realmente solo se fijan en la primera condición de Bonello, sin darle tanta importancia a la existencia de modos dobles en los tercios de octava de más baja frecuencia.

SEGUNDA ETAPA

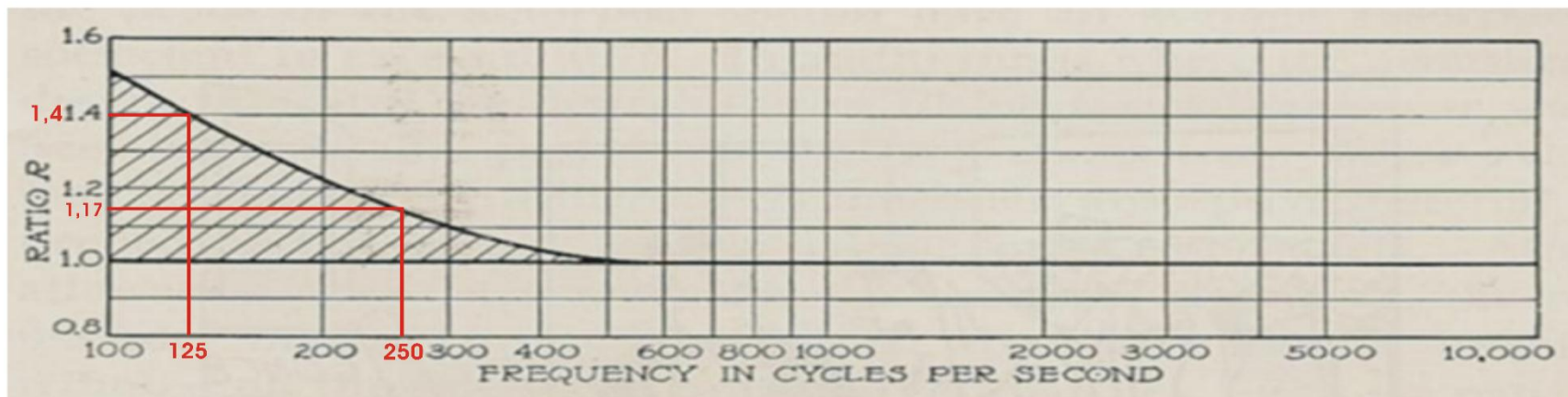
Determinación de los TR_{60} óptimos para el destino de la sala de conferencias

Para ello entramos al gráfico de TR_{60} óptimo para frecuencia de 512 Hz considerando el volumen y el destino de la sala:

$$V (\text{pies}^3) = V (\text{m}^3) \cdot (1/0,305)^3 = 504 \cdot 35,24 = 17763 \text{ pies}^3$$



TR óptimo a 500 Hz para diferentes tipos de salas en función de su volumen (en pie^3)

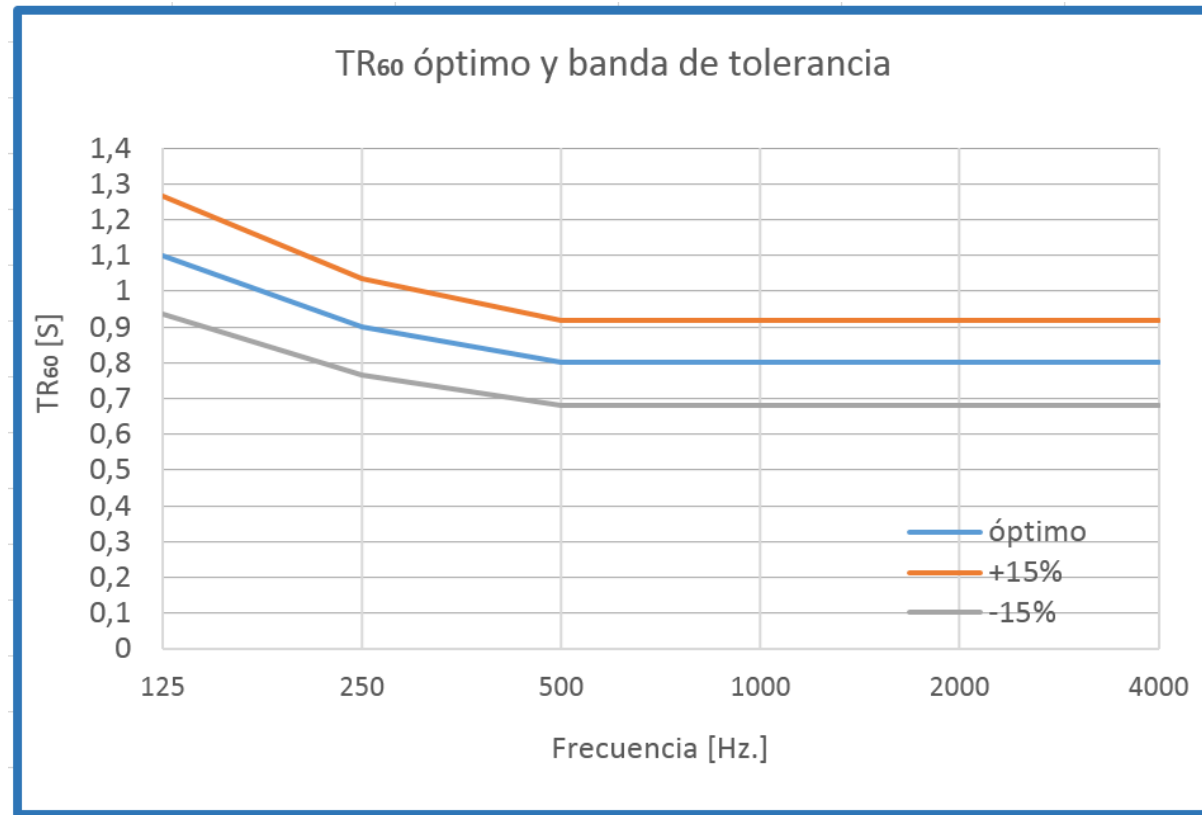


Factor de multiplicación del TR500 Hz para obtener el TR óptimo a frecuencias inferiores a 500 Hz

Tabla 1: Ecuaciones para cálculo de TR _{óptimos}	
Uso de la sala: PALABRA	
Frecuencias [Hz]	TR _{óptimos} [s] (con V en m ³)
125	TR ₁₂₅ = 0,41 + 0,26 log V
250	TR ₂₅₀ = 0,32 + 0,21 log V
≥ 500	TR ₅₀₀ = 0,28 + 0,18 log V

Determinación de los valores de TR ₆₀ óptimos		
Frecuencia [Hz.]	Por gráficos [S]	Por tabla de cálculo [S]
125	1,1	1,1
250	0,9	0,9
500	0,8	0,8
1000	0,8	0,8
2000	0,8	0,8
4000	0,8	0,8

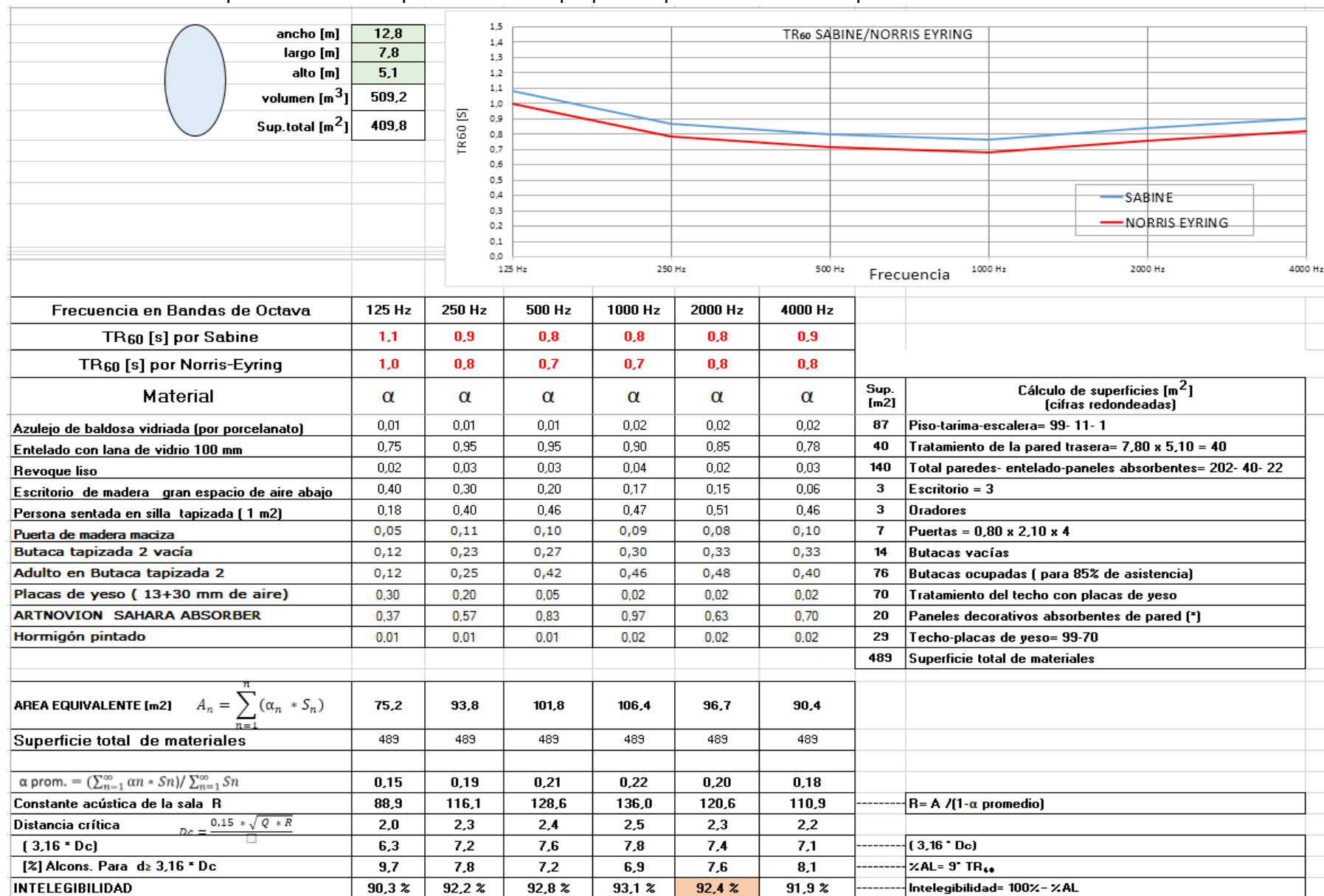
Como se puede observar, Los valores óptimos de TR₆₀ para una sala de conferencias obtenidos por medio de los gráficos y de las ecuaciones de cálculo son iguales (se hizo redondeo de décimos). En consecuencia, procedemos a graficar el TR₆₀ óptimo y las bandas de tolerancia. En este caso se elige una tolerancia del 15%



Selección de los materiales de las paredes, piso, techo, muebles, etc. del recinto

Realizaremos la selección de los materiales de las distintas partes del recinto, incluyendo muebles, tarima, asientos y butacas para los oyentes. En esta selección consideramos los aspectos prácticos y técnicos (terminación, durabilidad, limpieza, seguridad, etc.). Luego consideraremos si es necesario el tratamiento acústico para lograr el TR₆₀ óptimo en cada tercio.

Los cálculos se realizan por medio de una planilla de Excel preparada para esta función específica.



En la columna de la izquierda figuran los materiales utilizados para el tratamiento acústico de la sala. El criterio de selección de los mismos persigue como objetivo el adecuado comportamiento del recinto para la realización de conferencias y la eventual reproducción de sonido como parte complementaria de la tarea de los oradores.

En la selección de los materiales se tuvieron en cuenta los aspectos técnicos, económicos y estéticos.

En lo técnico, la selección incluyó materiales que por su absorción acústica permitieran obtener valores de TR60 para las distintas bandas de octava lo más cercanos posibles a los valores de TR60 óptimos determinados anteriormente.

Lo económico y lo estético están muy vinculados y se optó por soluciones de fácil implementación que resultaran estéticamente acordes con el destino de la sala. El piso de porcelanato es de alto tránsito y de muy elegante terminación y muy fácil limpieza. El techo (hormigón alisado y pintado) es muy simple y se utiliza muy a menudo en desarrollos actuales.

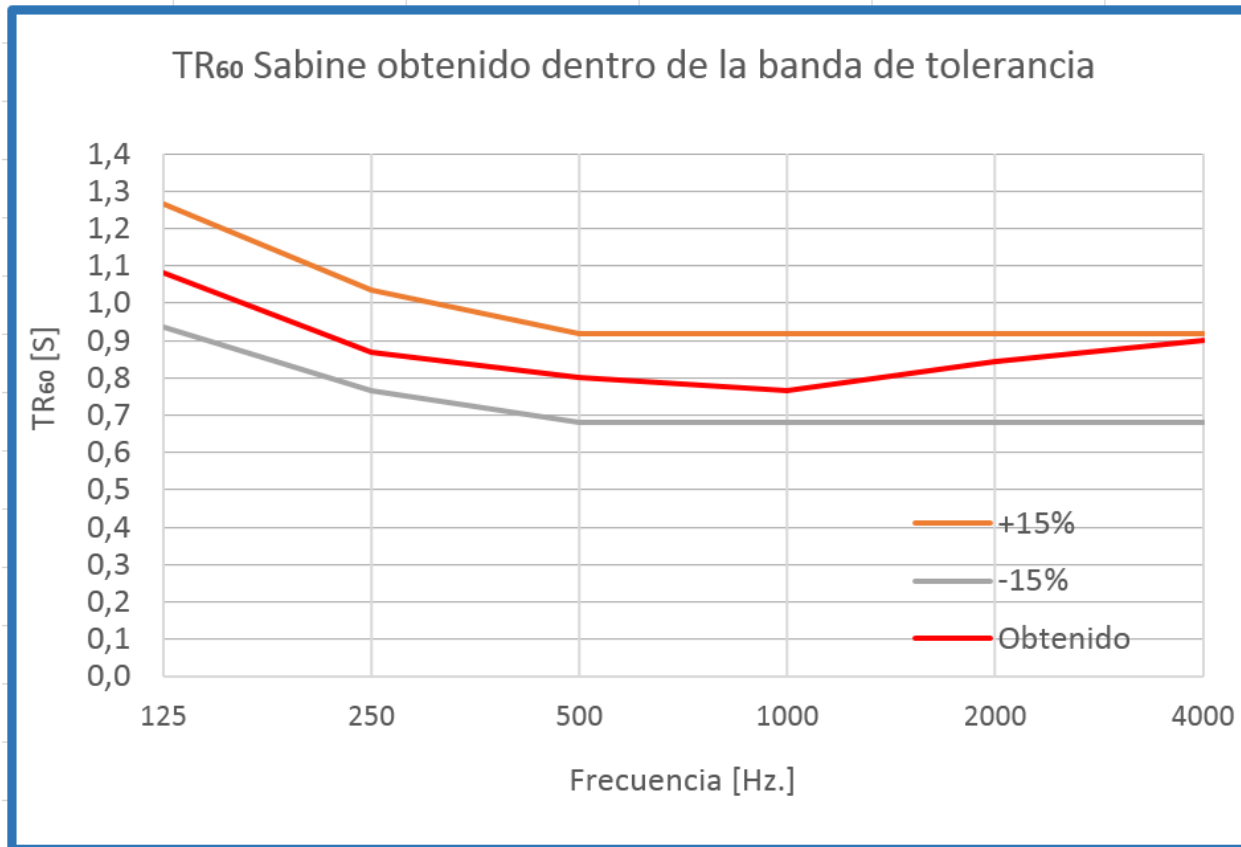
Tanto, el entelado en la pared del fondo, como las placas de yeso con cámara de aire en un parcial del techo y el absorbente Artnovion de excelente comportamiento acústico e impactante diseño estético, permiten lograr un ambiente adecuado para la finalidad objetivo.

Las butacas elegidas (para sala de conferencias) permiten una capacidad de 90 oyentes cómodamente sentados junto con la tarima (alfombrada de 1,10 de altura) de los oradores facilitan una línea óptica entre los oradores y el público oyente. Esto evita la necesidad de realizar un desplazamiento lateral de las filas de butacas (zig-zag) para evitar la interferencia visual que provocan las cabezas de los oyentes de la fila de adelante a los oyentes de la fila de atrás.

Se dispone de dos pasillos laterales de generoso ancho (1,20 m) para el desplazamiento de los ocupantes de la sala. Las puertas se encuentran en los laterales y ubicadas al fondo del recinto con lo que la entrada o salida de oyentes durante la conferencia no interfiere con la tarea de los conferencistas distantes en el frente de la sala. Un escritorio amplio sobre la tarima es de gran utilidad para el desempeño de los oradores (hasta 3) y la disposición de sus elementos.

Ubicación de los materiales absorbentes y otros rubros relacionados

- Las placas de yeso con cámara de aire se ubican cubriendo el sector de techo hacia el final de la sala
- El entelado se realiza sobre la pared trasera de la sala (completa toda la superficie)
- La distribución de butacas aparece en el plano de planta expuesto anteriormente
- La ubicación y medidas de la tarima aparece descripta en el citado plano
- La ubicación y distribución de los absorbentes Artnovion se realizará ponderando una mayor absorción sobre la parte trasera de la sala. Al respecto su ubicación definitiva se realizará con la asistencia profesional de los arquitectos intervinientes combinando colores y distribución de forma de lograr impacto visual y el objetivo acústico.
- Se deberá trabajar en conjunto con el estudio de arquitectura a cargo de la obra para la selección de los equipos y distribución de salidas de aire acondicionado para garantizar un bajo nivel de presión sonora de ruido para no reducir la inteligibilidad (ruido al menos 12 dB debajo de la señal).
- Idéntica colaboración se deberá realizar para los requisitos de distribución de energía eléctrica para equipamiento de los oradores, tomas de corriente para limpieza, iluminación y control de la misma, tendido de cañerías para el transporte de señales analógicas y digitales, instalación de pantallas y proyectores, refuerzo acústico con amplificadores y altoparlantes y demás tareas necesarias para la puesta a punto del proyecto.



Los valores de TR₆₀ obtenidos luego del cálculo se muestran en el gráfico de la izquierda. Se ha omitido la gráfica de los valores ideales, pero se describe la banda de tolerancia de los valores óptimos y se grafican los valores obtenidos con el tratamiento acústico.

En todas las bandas de octava los valores obtenidos se encuentran dentro de la banda de tolerancia por lo que comprobamos que los mismos son aceptables al no apartarse más de un 15 % de los valores óptimos.

Para el cálculo, en la planilla de Excel se completan las celdas de los distintos materiales, sus coeficientes de absorción para las distintas bandas de octava (entre 125 y 4000 Hz.) y las superficies de los mismos. Aquí deben estar involucrados todos los materiales que integran la sala y solo sus superficies expuestas al sonido.

Luego por medio de una subrutina macro (Visual Basic) se realizan las operaciones de sumatoria de los productos de los correspondientes coeficientes de absorción para una banda de octava de todos los

materiales intervinientes por sus correspondientes superficies expuestas

$A_i = \sum_{n=1}^p (\alpha_{ni} * S_{ni})$. Esta es el área equivalente de absorción para la cantidad de p materiales en la banda por octavas i (indicada en Excel)

Utilizando la fórmula de Sabine podemos determinar el TR₆₀ para cada banda de octava i :

$$TR_{60i} = \frac{0,163 * V}{A_i}$$

Si ahora dividimos la expresión anterior por la suma de superficies intervinientes:

$$\alpha_{prom i} = \sum_{n=1}^p (\alpha_{ni} * S_{ni}) / \sum_{n=1}^p (S_{ni}) \quad \text{obtenemos el coeficiente de absorción promedio para la banda } i \quad (\text{Excel})$$

Ahora estamos en condiciones de calcular la constante acústica de la sala R_i [m²]:

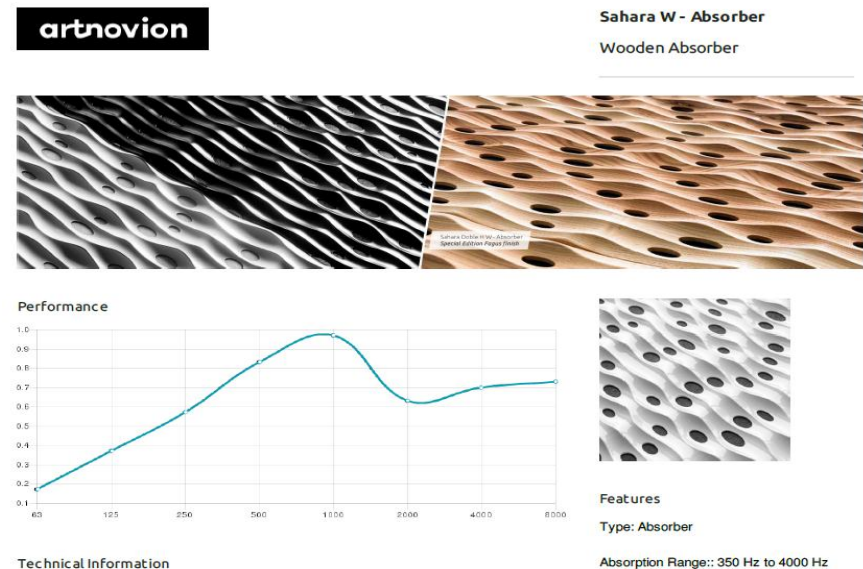
$$R_i = \frac{A_i}{(1 - \alpha_{prom i})} \quad \text{y con este dato podemos determinar la distancia crítica } D_{ci} \text{ [m] con la siguiente fórmula:}$$

$$D_{ci} = 0.15 * \sqrt{Q * R_i} \quad \text{finalmente teniendo en cuenta que la distancia entre el orador y la última fila de butacas supera al producto } D_{ci} * 3,16:$$

$$\%AL_i = 9 * TR_{60i} \quad \text{obtenemos el porcentaje de pérdida de articulación de consonantes [\%]}$$

Entonces: $\text{Intelegibilidad}_{2\text{KHz}} [\%] = 100\% - \%AL_{2\text{KHz}} = 92,4\%$ (la banda de octava de 2 KHz es la que más contribuye a la inteligibilidad)

El material que se muestra a la derecha es el elegido para realizar el último ajuste de los tiempos de reverberación previamente logrados con el entelado, las placas de yeso y los demás materiales que se utilizan en la sala. Se incluyen en el cálculo los oyentes cuya cantidad ajustamos para un 85% de asistencia.



Acerca de la distancia crítica y su implicancia

En teoría, cuando la distancia entre el oyente (receptor) y el orador (fuente) supera la distancia crítica, la presión sonora del campo reverberante predomina largamente por sobre la del campo directo y puede decirse entonces que la presión sonora se mantendrá pareja.

Esta afirmación tiene algunos condicionamientos:

-El campo debería ser definitivamente difuso. Esto obliga a evitar las reflexiones concentradas y especulares

-A medida que nos alejamos de la fuente el nivel de presión sonora va disminuyendo y entonces podremos hablar de constancia del nivel de presión sonora en franjas o zonas del auditorio. El oyente que está ubicado en la última fila de butacas recibirá un nivel de presión sonora más bajo que el de las primeras filas. Esto a su vez se verá acentuado por el grado de absorción acústica del proyecto. Si se tratara de un recinto con muy baja absorción acústica (muy alto TR60) el nivel sonoro (una vez superada la distancia crítica) prácticamente no cambiaría.

Cuanto más alta sea la absorción acústica (muy bajo TR60) la reducción de la presión sonora recibida se hará evidente y en el límite ($\alpha=1$), la sala se comportaría como si se tratara de un lugar abierto sin elementos o superficies reflectantes. Entonces la presión sonora se reduciría en 6 dB cada duplicación de la distancia entre la fuente y el receptor.



JOSE FRANCISCO GONZALEZ



FERNANDO TERENCEO



RODOLFO OSCAR GONZALEZ