

25-1-2017

**ESTUDIO DE
ACONDICIONAMIENTO
ACÚSTICO DE LAS AULAS
ESPECIALES I Y II DE LA
ESCUELA UNIVERSITARIA DE
ARQUITECTURA TÉCNICA DE
LA UNIVERSIDAD DE A
CORUÑA**

TRABAJO FIN DE GRADO 2017

AUTORA: MONTSERRAT FIGUERAS GARCÍA

TUTOR: PEDRO FERNANDO NOGUEIRA LÓPEZ



**Escuela Universitaria de
Arquitectura Técnica de la Universidad de
A Coruña**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su paciencia invertida todo este tiempo, a mi hermana Gemma, a Jorge por motivarme a terminar este largo camino, a Ana por su paciencia y apoyo y todas las personas que han influido en mi para realizar este proyecto.

A mi tutor D. Pedro Fernando Nogueira López, por adentrarme en este campo tan amplio y desconocido.

Al profesor de la Universidad Politécnica de Madrid, D. Juanjo José Gómez Alfageme, por su presencia desinteresada en este proyecto.

Y gracias a la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña por acogerme.



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



RESUMEN

En este proyecto de acondicionamiento de las Aulas Especiales I y II de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña, se estudia los parámetros y condiciones acústicas que tienen actualmente estas aulas, ayudándonos de un software de simulación acústica para conocer tales parámetros y poder saber su comportamiento acústico.

Las Aulas Especiales I y II no alcanzan el comportamiento acústico requerido por la norma y además no tienen unas buenas condiciones de inteligibilidad de la palabra, así pues, se propone una mejora en dichas aulas, de ahí el objeto de este proyecto.

Para poder analizar y proponer una solución de mejora, se ha optado por el uso del software EASE “Enhanced acoustic simulator for engineers” y para comparar estos resultados se han realizado cálculos analíticos de los principales parámetros acústicos de la acústica de salas.

Basándonos en estos análisis previos, se ha planteado una posible solución de mejora del comportamiento acústico de las Aulas Especiales I y II, proponiendo unos paneles acústicos absorbentes, su montaje y su repercusión económica.

ABSTRACT

This Project of conditioning the Special Classroom I and II of the *Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña*, is about the study of the current sound parameters and conditions of these classrooms, with the help of an acoustic software simulation that will let us know such parameters and their behaviour.

Special Classroom I and II do not reach the acoustic behaviour required by the normative. In addition to this, they do not have good intelligibility condition.

Due to this situation, it is recommended and improvement in these classroom. That is the aim of this project.

To be able to analyze and suggest an improvement, it has been decided to use the EASE software “Enhanced acoustic simulator for engineers”, and in order to compare these results, it has been performed analytic calculus of the main acoustic parameters of the classrooms.

Taking into account this previous analysis, it has been given a posible solution to improve the acoustic behaviour of the Special Classrooms I and II, by proposing absorbing acoustic panels, their assembly and their economic repercussion.



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



ÍNDICE DEL CONTENIDO

1	CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.3	METODOLOGÍA GENERAL	2
1.4	ESTRUCTURA DEL TRABAJO	3
2	CAPÍTULO II: CONCEPTOS GENERALES PARA EL ESTUDIO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS.	5
2.1	NATURALEZA DEL SONIDO.	5
2.2	GENERACIÓN DE LA ONDA SONORA.	5
2.2.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS SONORAS.	6
2.2.2	CUALIDADES DEL SONIDO	8
2.3	MAGNITUDES ACÚSTICAS DE INTERÉS.	9
2.3.1	POTENCIA SONORA	9
2.3.2	INTENSIDAD SONORA	9
2.3.3	PRESIÓN SONORA	9
2.3.4	RELACIÓN ENTRE PRESIÓN SONORA E INTENSIDAD	9
2.4	PROPIEDADES DE LAS ONDAS SONORAS. PROPAGACIÓN DEL SONIDO.	10
2.4.1	REFLEXIÓN	10
2.4.2	REFRACCIÓN	10
2.4.3	DIFRACCIÓN	11
2.4.4	RESONANCIA	11
2.4.5	ENMASCARAMIENTO	12
2.4.6	ATENUACIÓN	12
2.5	SONIDO DIRECTO Y SONIDO REFLEJADO	12
2.5.1	SONIDO DIRECTO	12
2.5.2	SONIDO REFLEJADO	13
2.6	TEORÍAS PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS.	15
2.6.1	TEORÍA ESTADÍSTICA	15
2.6.2	TEORÍA GEOMÉTRICA	16



2.6.3	TEORÍA ONDULATORIA	17
2.6.4	PSICOACÚSTICA.....	18
2.7	ABSORCIÓN	19
2.8	REVERBERACIÓN	21
2.8.1	TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	22
2.9	ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO	23
3	CAPITULO III: PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA EL DISEÑO DE SALAS.....	25
3.1	TIEMPO DE REVERBERACIÓN	25
3.2	NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO (DIRECT SPL)	25
3.3	NIVEL DE PRESIÓN SONORA REVERBERANTE (SPLr).....	25
3.4	NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL (TOTAL SPL).....	26
3.5	RELACIÓN ENTRE DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO).....	27
3.6	PÉRDIDA DE ARTICULACIÓN DE CONSONANTES (ALCONS).....	27
3.7	STI (ÍNDICE DE INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA)	27
3.8	RASTI (ÍNDICE DE RÁPIDEZ DE TRANSMISIÓN DEL HABLA).....	28
3.9	DISTANCIA CRÍTICA.....	28
3.10	TIEMPO DE LLEGADA	29
3.11	ITD GAP (TIEMPO DE RETARDO INICIAL DEL SONIDO)	29
3.12	ELR (RELACIONES ENERGÉTICAS).....	30
3.12.1	Ct.....	30
3.12.2	C _{t0}	30
3.12.3	C _x	30
3.13	MEDIDAS DE CLARIDAD	31
3.13.1	CLARIDAD DE LA VOZ C7	31
3.13.2	CLARIDAD DE LA VOZ C50	31
3.13.3	CLARIDAD MUSICAL C ₈₀	31
3.14	NIVELES DE PRESIÓN	32
3.14.1	L7.....	32
3.14.2	L50.....	32
3.14.3	L80.....	32



3.14.4	Lsplit	32
3.15	AI - ÍNDICE DE ARTICULACIÓN (ARTICULATION INDEX)	32
4	CAPÍTULO IV: CASO PRÁCTICO: ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II DE LA ESCUELA UNIVERSITARIA DE ARQUITECTURA TÉCNICA DE LA UNIVERSIDAD DE A CORUÑA	33
4.1	SITUACIÓN	33
4.2	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	34
4.2.1	PLANTA.....	35
4.2.2	TECHO	35
4.2.3	PARAMENTOS VERTICALES	36
4.2.4	ASIENTOS	36
4.3	DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	37
4.3.1	LINÓLEO	37
4.3.2	ENFOSCADO DE MORTERO	37
4.3.3	HORMIGÓN VISTO	38
4.3.4	VIDRIO	38
4.3.5	MADERA.....	38
4.4	COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE LOS MATERIALES.....	39
4.4.1	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES.....	39
4.5	APLICACIÓN DEL CTE DB-HR “PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO”	41
4.5.1	FICHAS JUSTIFICATIVAS. CÁLCULO DEL TR SEGÚN EL DB-HR.....	42
4.5.2	SIMULACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTA AVANZADA EASE “ENHANCED ACOUSTIC SIMULATOR FOR ENGINEERS”	47
4.5.3	MODELADO ACÚSTICO MEDIANTE HERRAMIENTA EASE.....	47
4.6	RESULTADOS OBTENIDOS	53
4.6.1	TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	53
4.6.2	NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO (SPLd).	54
4.6.3	NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL (totalSPL)	59
4.6.4	NIVEL DE RELACIÓN ENTRE CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO)	63
4.6.5	PÉRDIDA DE ARTICULACIÓN DE CONSONANTES (ALCONS).	67



4.6.6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	70
5	CAPÍTULO V: CÁLCULO DE PARÁMETROS ANALÍTICAMENTE	72
5.1	NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO.....	72
5.2	NIVEL DE PRESIÓN SONORA REVERBERANTE	73
5.3	NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL	74
5.4	NIVEL RELACIÓN ENTRE DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO)	75
5.5	COMPARACIÓN DE DATOS OBTENIDOS CON EASE Y ANALÍTICAMENTE.....	76
5.6	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	76
5.7	CONDICIONES DE MEDICIÓN.	76
5.8	MÉTODOS DE MEDIDA.	76
5.8.1	MÉTODO DEL RUIDO INTERRUMPIDO.....	77
5.8.2	MÉTODO DE LA RESPUESTA IMPULSIVA INTEGRADA.	77
5.9	EQUIPO UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN.....	77
5.9.1	FUENTE ACÚSTICA.....	77
5.9.2	MICRÓFONOS Y EQUIPOS DE ANÁLISIS.	78
5.10	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	79
6	CAPÍTULO VI: PROPUESTA DE MEJORA.....	81
6.1	SOLUCIÓN PROPUESTA DE MEJORA	81
6.1.1	NUBES ACÚSTICAS	84
6.1.2	SISTEMA DE COLOCACIÓN	85
6.2	CÁLCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA SEGÚN EL CTE DB-HR.....	87
6.3	RESULTADOS DE LA MEJORA PROPUESTA EN EASE.....	92
6.3.1	TIEMPO DE REVERBERACIÓN, RT.....	92
6.3.2	NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO (SPLd).	94
6.3.3	NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL (totalSPL)	98
6.3.4	NIVEL DE RELACIÓN ENTRE CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO)	102
6.3.5	PÉRDIDA DE ARTICULACIÓN DE CONSONANTES (ALCONS).	106
6.4	CUADRO COMPARATIVO DEL ESTADO ACTUAL CON LA PROPUESTA DE MEJORA	110
7	CAPÍTULO VII: MEDICIÓN Y PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA DE MEJORA	111



7.1	PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	111
7.2	MEDICIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA	113
7.3	PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA DE MEJORA	114
8	CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES.....	115
8.1	CONCLUSIONES	115
9	BIBLIOGRAFÍA.....	117
10	FUENTES NORMATIVA.....	117
11	PÁGINAS WEB.....	117
12	ÍNDICE DE FIGURAS	118
13	ANEXOS	122
13.1	PLANOS.....	122



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



Estudio de Acondicionamiento Acústico de las aulas especiales I y II de la
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña

Tutor: Pedro Fernando Nogueira López
Autora: Montserrat Figueras García



1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto tiene como objetivo el estudio acústico de las Aulas Especiales I y II de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de A Coruña con la finalidad de analizar su comportamiento acústico.

Las Aulas Especiales I y II tienen como actividad el desarrollo de actividades formativas de los propios alumnos de la escuela.

Para poder analizar el comportamiento acústico de las Aulas Especiales I y II, se crea un modelo virtual mediante el software “Enhanced Acoustic Simulator for Engineers” (EASE). Gracias a esto podremos estudiar los posibles defectos y así poder facilitar distintas soluciones a las Aulas Especiales I y II.

Los datos obtenidos mediante esta herramienta tecnológica, serán validados realizando mediciones “in situ”, los cuales nos permitirán una información fidedigna de las Aulas Especiales I y II.

En este trabajo se estudiarán una serie de parámetros acústicos, tales como tiempo de reverberación o el nivel de presión sonora total, para una correcta valoración del aula.

En la acústica de las aulas influyen factores tales como la geometría de las aulas o los materiales utilizados.

Además de realizar el propio análisis acústico del recinto, este proyecto puede servir como fuente de información del comportamiento acústico de las Aulas Especiales I y II, para posteriores trabajos o futuras actuaciones sobre ellas.

Para poder analizar los datos, se reflejarán a través de gráficas y tablas, para una mejor comprensión.

1.2 OBJETIVOS

El objeto de este proyecto es conseguir que el alumno tenga un conocimiento más profundo sobre el campo de la acústica, más concretamente en el acondicionamiento acústico de salas. Para cumplir el objetivo final, habrá que abordar:

- Estudiar los parámetros físicos del acondicionamiento que influyen en la acústica de salas y de la normativa aplicable.



- Estudio de la calidad acústica que presentan las Aulas Especiales I y II, como recinto destinado a la docencia.
- Aplicación de la metodología establecida por el CTE DB-HR, para el acondicionamiento acústico de salas.
- Aplicación de herramientas avanzadas y de apoyo para el estudio acústico de las aulas, mediante EASE “Enhanced Acoustic Simulator for Engineers”.
- Modelizar las Aulas Especiales I y II mediante el software EASE “Enhanced Acoustic Simulator for Engineers” y simular el estado actual de las condiciones acústicas.
- Proporcionar el cálculo analítico de los parámetros acústicos y compararlo con los resultados obtenidos en EASE “Enhanced Acoustic Simulator for Engineers”.
- Estudiar los resultados y proponer una posible solución de mejora. Gracias a la simulación se puede dar una respuesta más adecuada a los problemas de estas aulas.
- Estudiar la viabilidad de la propuesta de mejora presentada para las aulas Especiales I y II.
- Posibilidad de futura publicación y comunicación del estudio.

1.3 METODOLOGÍA GENERAL

Para llevar a cabo el estudio de las Aulas Especiales I y II se ha de tener en cuenta una serie de métodos de trabajo necesarios:

- En primera instancia se miden las Aulas Especiales I y II “in situ”, es decir, un metro láser nos proporciona las medidas que apuntaremos en un dibujo hecho a manoalzada de dichas aulas.
- Dibujar en Autocad las Aulas Especiales I y II con las medidas conseguidas “in situ”.
- Aplicar el método de las fichas justificativas establecidas en el CTE DB-HR.
- Aprender a usar EASE” Enhanced Acoustic Simulator for Engineers” para posteriormente modelizar las aulas.
- Simular el estado actual de las aulas indicándoles que materiales contienen y sus características absorbentes.
- Obtener los resultados y mapas de los distintos parámetros acústicos.
- Calcular analíticamente los parámetros acústicos.
- Comparar los resultados de EASE con los resultados analíticos.
- Buscar información de las distintas soluciones que existen en el mercado para los problemas acústicos que presentan las Aulas Especiales I y II y escoger la solución que mejor se adapta.
- Diseñar la solución de paneles acústicos adaptados a las Aulas Especiales I y II.
- Realizar un estudio económico de dicha solución.



1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo se divide de la siguiente manera:

- Conceptos generales.
 - Naturaleza del sonido.
 - Magnitudes acústicas.
 - Propiedades de las ondas sonoras.
 - Sonido directo y sonido reflejado.
 - Teorías para el estudio acústico de espacios arquitectónicos.
 - Absorción.
 - Reverberación.
 - Acondicionamiento acústico.

- Parámetros acústicos para el diseño de salas.
- Estudio de acondicionamiento acústico de las Aulas Especiales I y II.
 - Descripción de la sala.
 - Situación.
 - Características geométricas.
 - Definición y características de los materiales.
 - Comportamiento acústico de los materiales.
 - Aplicación del CTE DB-HR “protección frente al ruido”
 - Resultados obtenidos.
- Cálculo de parámetros analíticamente.
- Propuesta de mejora.
 - Solución propuesta de mejora.
 - Resultados de la mejora propuesta en EASE.
 - Cuadro comparativo del estado actual y la propuesta de mejora.
- Medición y presupuesto de la propuesta de mejora.
- Conclusiones.





2 CAPÍTULO II: CONCEPTOS GENERALES PARA EL ESTUDIO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS.

2.1 NATURALEZA DEL SONIDO.

El sonido es una sensación fisiológica producida en el órgano del oído (tímpano) por un movimiento ondulatorio de una onda mecánica y acústica (onda sonora) en un medio elástico, debido a rapidísimos cambios de presión generados por el movimiento vibratorio de un cuerpo, llamado fuente sonora.

2.2 GENERACIÓN DE LA ONDA SONORA.

La generación de la onda sonora tiene lugar cuando la fuente sonora entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma que, a su vez la transmiten a nuevas partículas contiguas.

La propagación de la perturbación sonora se produce por la compresión y expansión del medio por el que se propaga. La elasticidad de éste permite que cada partícula transmita la perturbación a la partícula adyacente, dando origen a un movimiento en cadena, por lo tanto, para que exista, es necesaria una fuente de vibración mecánica y también un medio elástico (sólido, líquido o gas) a través del cual se propague la perturbación. En realidad, las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio. ⁽¹⁾

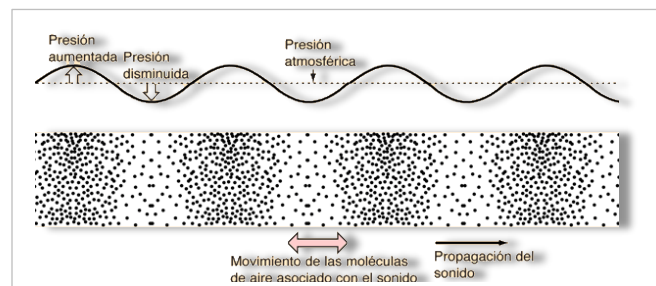


Ilustración 1: HYPERPHYSICS GEORGIA STATE UNIVERSITY [Imagen digital en línea], 2008.
DISPONIBLE EN: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

¹ VALERO GRANADOS, SANTIAGO. *Acústica aplicada al interiorismo*. España: Santiago Valero Granados, 2011. ISBN: 978-84-614-7626-8.



Una onda es la representación del cambio de la presión del aire frente al tiempo o el espacio. La onda más sencilla es la onda sinusoidal que presenta amplitud, frecuencia y longitud de onda definida y que describe los sonidos puros.

El sonido se representa mediante un espectro que da la amplitud (presión) en función de sus componentes en frecuencia.

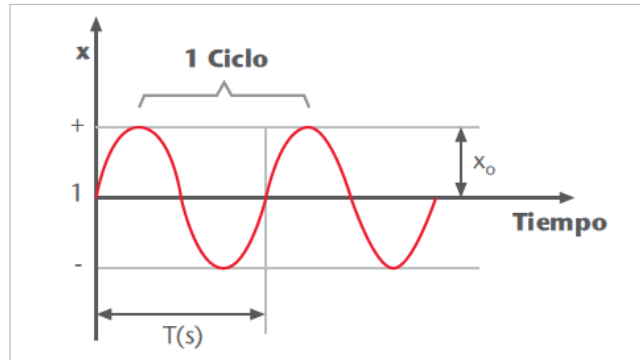


Ilustración 2: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS SONORAS.

2.2.1.1 AMPLITUD (X_0):

Separación máxima de la onda con respecto a su posición de equilibrio. Unidades SI: m.

2.2.1.2 PERÍODO (T):

Es el tiempo que tarda en producirse un ciclo completo de oscilación. Unidades SI: s.

2.2.1.3 LONGITUD DE ONDA (λ):

Distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempo. Unidades SI: m.

2.2.1.4 FRECUENCIA (f):

Nº de ciclos completos de oscilación que suceden en una unidad de tiempo. Así la frecuencia sonora es un parámetro íntimamente relacionado con el movimiento de vibración de las partículas respecto a su posición inicial de equilibrio que indica la rapidez con que se producen las variaciones de presión. Lógicamente la frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado. Unidades SI: Hertzio (Hz).

El oído humano puede percibir ondas sonoras de frecuencias entre los 20 y los 20.000 Hz.



Ilustración 3: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.

Los sonidos graves se caracterizan por una frecuencia baja, mientras los agudos, por una frecuencia alta. La gran mayoría de los sonidos que percibimos no constan únicamente de una sola frecuencia, sino que están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas. Incluso cada uno de los sonidos generados por un instrumento musical están formados por más de una frecuencia. Se puede conocer qué frecuencias componen un sonido observando su espectro frecuencial, entendiendo por tal la representación gráfica de las frecuencias que lo integran junto con su correspondiente nivel de presión sonora.

- El oído humano presenta distinta sensibilidad respecto a las frecuencias:
 - La zona de máxima sensibilidad se encuentra entre los 2000Hz y 5000Hz, alcanzando la máxima sensibilidad a frecuencias próximas a los 3000Hz.
 - Para frecuencias <1000Hz, el umbral asciende regularmente, inversamente proporcional a la frecuencia.
 - Para frecuencias superiores a los 5000Hz, el crecimiento del umbral es más brusco. La pendiente de ese tramo de la curva umbral-frecuencias se incrementa con la edad, indicando la progresiva pérdida de sensibilidad, sobre todo, en altas frecuencias.

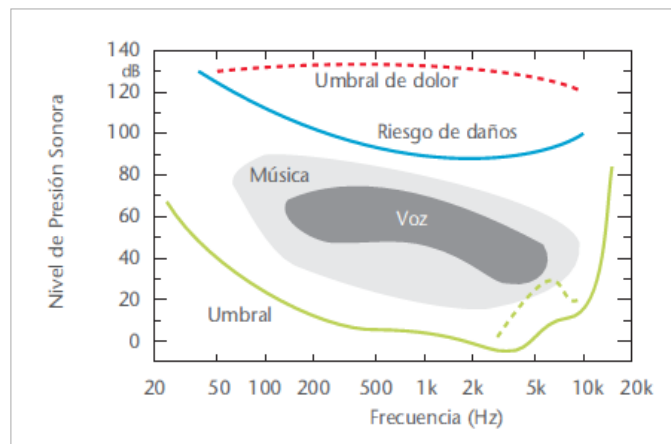


Ilustración 4: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.



Mediante el análisis de frecuencias de un sonido, la energía acústica del mismo se distribuye en bandas, obteniéndose un nivel de presión acústica por cada una. En cada banda de octava, la relación entre las frecuencias superior e inferior están en relación 2:1. Cada una de las bandas de frecuencia se define por la diferencia correspondiente al valor central de la banda, siendo los más comúnmente empleados los correspondientes a 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000Hz.

2.2.1.5 VELOCIDAD DE UN ONDA LONGITUDINAL:

La velocidad de propagación del sonido es función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Debido a que, en el aire, ambas magnitudes dependen de la presión atmosférica estática P_0 y de la temperatura, resulta que, considerando las condiciones normales de 1 atmósfera de presión y 22°C de temperatura, la velocidad de propagación del sonido es de aproximadamente 345 m/s.

Si bien el aire constituye el medio más habitual de propagación de las ondas sonoras, conviene tener presente que el sonido puede propagarse a través de cualquier otro medio elástico y denso. Cuanto más denso y menos elástico sea el medio, mayor será la velocidad del sonido a su través.

2.2.2 CUALIDADES DEL SONIDO

Las ondas armónicas son ondas periódicas producidas por un movimiento armónico simple. La representación de un sonido de una única frecuencia (tono puro), es la onda sonora más sencilla, pero rara vez se genera fuera del laboratorio, ya que en la realidad prácticamente todos los sonidos, y en consecuencia los ruidos, son producidos por movimientos vibratorios complejos, es decir, por la composición de un número indefinido de distintos movimientos vibratorios simples (de distintas amplitudes y frecuencias). Los sonidos reales, procedentes de vibraciones complejas, poseen una frecuencia fundamental que determina su tono y va acompañada de un cierto número de armónicos (otras frecuencias múltiplos de ella variables en intensidad) que dan lugar, en función de su proporción e intensidad, a su timbre (²)

2.2.2.1 TONO:

Es la cualidad del sonido, dependiente de su frecuencia, que permite ordenarlo en graves y agudos; distingue un sonido alto (agudo) de uno bajo (grave).

2.2.2.2 TIMBRE:

Es la cualidad del sonido, que diferencia a los del mismo tono y depende de la forma y naturaleza de los elementos que entran en vibración. Por lo tanto, es aquello que nos hace distinguir el

² FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, JAVIER DE LA PUENTE CRESPO Y CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN. Guía acústica de la construcción. Cap. 1. Potencia, intensidad y presión sonora, pág. 23. Madrid. 2006.



sonido de los diferentes instrumentos, aunque estos sonidos tengan la misma duración, intensidad y altura. Los timbres del sonido están en función de la forma de la onda. A cada forma de onda le corresponde un timbre distinto. Así, a las propiedades del sonido (que son percibidas de forma subjetiva por cada persona), les corresponden ciertas características físicas (objetivas) de la onda sonora. Estas características físicas son la amplitud, frecuencias, forma de onda, siendo las subjetivas: intensidad o matiz, tono y timbre.

2.3 MAGNITUDES ACÚSTICAS DE INTERÉS.

Existen tres magnitudes físicas relacionadas con la energía que posee un sonido.

2.3.1 POTENCIA SONORA

Es la cantidad de energía sonora emitida (o radiada) por una determinada fuente sonora. Su valor no depende del punto del espacio en que se mide ni de las condiciones del recinto en que se localiza el foco sonoro. Es una magnitud intrínseca o característica de la fuente sonora. La potencia sonora se expresa en vatios(W). ⁽³⁾

2.3.2 INTENSIDAD SONORA

Es el valor medio de la energía acústica que fluye en la unidad de tiempo a través de una superficie situada perpendicularmente a la dirección de propagación de las ondas sonoras. Es una magnitud dependiente de la distancia a la fuente y de las condiciones del lugar en que se encuentre (en campo abierto, sin obstáculos o en un recinto cerrado) Se expresa en W/m^2 . ⁽³⁾

2.3.3 PRESIÓN SONORA

Representa el incremento de presión respecto a la presión atmosférica debido a la presencia de la onda acústica; es dependiente de la distancia a la fuente y de las condiciones del lugar en que ésta se encuentre (en campo abierto, sin obstáculos o en un recinto cerrado). La razón de estas variaciones de presión se debe a que se producen áreas donde se concentran estas partículas (zona de concentración) y otras que quedan menos saturadas (zonas de rarefacción). Las zonas con mayor concentración de moléculas tienen mayor densidad.

Cuando estas ondas se encuentran en su camino con el oído, la presión que ejercen sobre el mismo no es igual para toda la longitud de onda. Se expresa en pascales (P_a) o N/m^2 . ⁽³⁾

2.3.4 RELACIÓN ENTRE PRESIÓN SONORA E INTENSIDAD

La presión sonora es la diferencia de presión provocada en la presión del ambiente por una onda sonora. La intensidad acústica es la potencia acústica por unidad de área. Por tanto, la presión

³ FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, JAVIER DE LA PUENTE CRESPO Y CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN. Guía acústica de la construcción. Cap. 1. Potencia, intensidad y presión sonora, pág. 23. Madrid. 2006.



sonora y la intensidad acústica son dos unidades físicas distintas. El oído responde a la presión sonora, que se relaciona con la intensidad acústica que es una cantidad vectorial definida específicamente que no puede medirse con un simple micrófono.

La intensidad acústica instantánea se obtiene multiplicando la presión sonora y la velocidad de partícula acústica. Así es como se relacionan los dos términos.

2.4 PROPIEDADES DE LAS ONDAS SONORAS. PROPAGACIÓN DEL SONIDO.

2.4.1 REFLEXIÓN

Se produce, pues, cuando una onda (rayo incidente) que se propaga por un medio choca contra un obstáculo de propiedades elásticas distintas.

2.4.1.1 REFLEXIÓN ESPECULAR

El choque produce en la onda (rayo reflejado) un cambio de dirección y sentido. Por lo tanto, cumple la ley especular o ley de Descartes, según la cual el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión respecto a la normal trazada en el punto de colisión sobre el plano de reflexión.

2.4.1.2 REFLEXIÓN DIFUSA

El choque de la onda se produce en una superficie áspera, por lo tanto, habrá una descomposición de la onda en diversos rayos reflejados que se propagarán en todas direcciones.

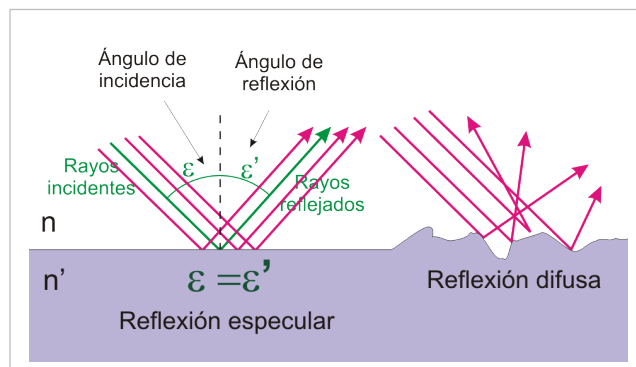


Ilustración 5: arquidesignitaliano.blogspot.com [imagen digital en línea] Año desconocido.

2.4.2 REFRACCIÓN

Es la desviación que experimentan las ondas sonoras en la dirección de su propagación por un medio cuando el sonido pasa a un medio diferente, cambiando la velocidad de su propagación.

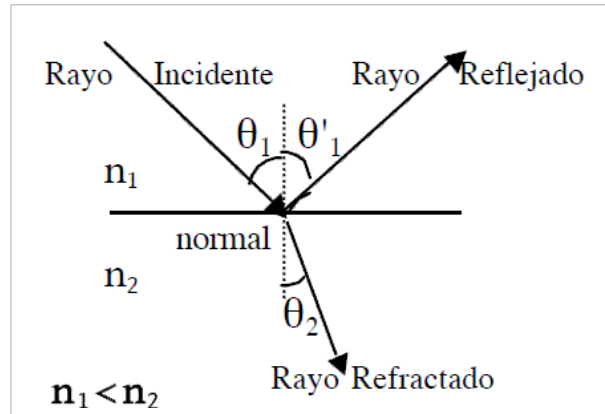


Ilustración 6: física.laguía2000.com.[imagen digital en línea] Año: desconocido.

2.4.3 DIFRACCIÓN

Es el fenómeno de propagación no rectilínea que ocurre cuando una onda se encuentra con un obstáculo de dimensiones menores a su longitud de onda, con lo que es capaz de rodearlo. Otra forma de difracción es la capacidad de las ondas de pasar por orificios cambiando su divergencia a esférica con foco en el centro de éstos. Actúa como un nuevo foco de ondas, tiende a propagarse en todas las direcciones del espacio.

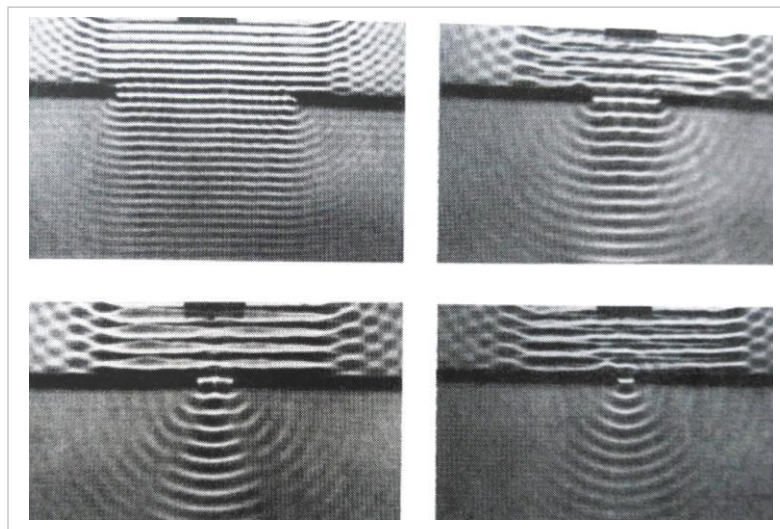


Ilustración 7: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.

2.4.4 RESONANCIA

Ocurre cuando hay un objeto interpuesto en el camino de propagación de una onda, éste se pone a vibrar cuando recibe energía del movimiento ondulatorio.



La energía absorbida se emplea en producir un movimiento de vibración del objeto entero y se dice que dicho cuerpo entra en resonancia con la onda recibida. Se ha de tener en cuenta que todos los cuerpos tienen frecuencias propias de vibración; si esa frecuencia propia coincide con la de la onda "resuenan" al paso de ésta.

2.4.5 ENMASCARAMIENTO

Se produce cuando hay dos sonidos simultáneamente de dos frecuencias distintas, la intensidad de uno de ellos supera a la del otro en cantidad suficiente, el sonido del más débil puede llegar a ser inaudible.

2.4.6 ATENUACIÓN

Es el reparto de energía de la onda entre un volumen de aire cada vez mayor.

2.5 SONIDO DIRECTO Y SONIDO REFLEJADO

Cuando una fuente sonora situada en un recinto cerrado es activada, genera una onda que se propaga en todas las direcciones del espacio. Un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo recibe dos tipos de sonido: el denominado sonido directo y el sonido indirecto o reflejado.

2.5.1 SONIDO DIRECTO

Es aquél que le llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencias.

En campo abierto, se considera la fuente sonora omnidireccional, es decir, una fuente que radia energía de manera uniforme en todas las direcciones. El hecho de esta uniformidad implica que, a una distancia cualquiera de la fuente, el nivel de presión sonora será siempre el mismo, con independencia de la dirección de propagación considerada. Es la llamada propagación esférica. A medida que uno se aleja de la fuente, la energía se reparte sobre una esfera cada vez mayor, por lo que el nivel en cada punto va disminuyendo progresivamente, en concreto, 6db cada vez que se dobla la distancia de la fuente.

En el medio ambiente exterior, donde el sonido se propaga libremente sin que se produzcan reflexiones, sólo existe la componente del campo directo. Por ello, el nivel de presión sonora disminuye rápidamente con la distancia. Así, una persona hablando normalmente a 50m, se escuchará muy débilmente.

En un ambiente cerrado, en cambio, si bien muy cerca de la fuente predomina el campo directo, a cierta distancia predomina el campo reverberante, que es al que se debe que dentro de una sala los sonidos se perciban con mayor sonoridad que en el exterior, ya que, en un volumen cerrado, el sonido se ve reforzado por el campo reverberante, que acumula la energía no absorbida en las reflexiones.



En el exterior, al no existir éstas, la energía sonora simplemente se aleja continuamente de la fuente, sin posibilidad de acumularse. (Valero Granados, Santiago, 2011)

2.5.2 SONIDO REFLEJADO

El sonido indirecto es, pues, el resultado de las múltiples reflexiones, difracciones y absorciones que las paredes, techo, suelo y distintos obstáculos en un recinto le producen al sonido directo. Podemos decir que en él incluimos todo lo que no es sonido directo. El sonido indirecto se clasifica en dos tipos:

- **Sonido temprano:** formado por el primer grupo de reflexiones que experimenta el sonido directo, alcanzando al oyente transcurridos hasta unos 60-100 mseg. desde su producción.
- **Sonido reverberante:** es el que el oyente capta tras las reflexiones tempranas. Proviene de todas direcciones, percibiendo un volumen (amplitud de la onda) y una consistencia mayor. Si la fuente emite un sonido continuo, el sonido reverberante crece hasta que alcanza un nivel de equilibrio. Cuando la fuente se interrumpe, el nivel decrece más o menos constantemente hasta anularse.

Por tanto, al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera de un volumen, se observarán básicamente dos zonas de características diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas y una segunda, formada por reflexiones tardías, que constituyen la denominada cola reverberante. (Valero Granados, Santiago, 2011)

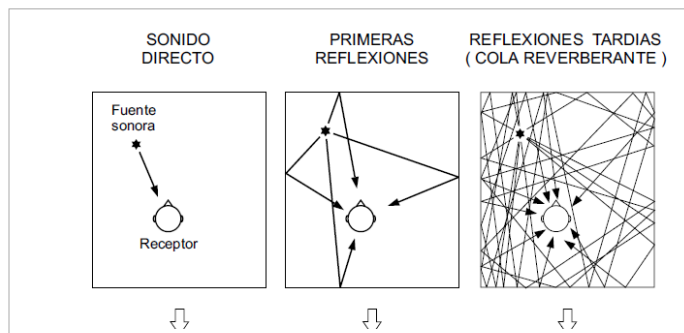


Ilustración 8: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo. En la figura se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor.

La naturaleza del sonido indirecto se explica muy bien a través del modelo de rayos (como los lumínicos); suponiendo que el sonido sale de la fuente a lo largo de rayos divergentes, en cada impacto con los paramentos perimetrales del recinto, los rayos son parcialmente absorbidos y reflejados y, después de un gran número de reflexiones, el sonido se hace difuso; la densidad promedio de energía es la misma en todo el local y todas las direcciones de propagación son igualmente probables.



En un punto cualquiera del espacio cerrado, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como el grado de absorción de los materiales usados como revestimiento de las superficies. Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada a las sucesivas reflexiones. (Valero Granados, Santiago, 2011)

La representación gráfica temporal de la llegada de las reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma.

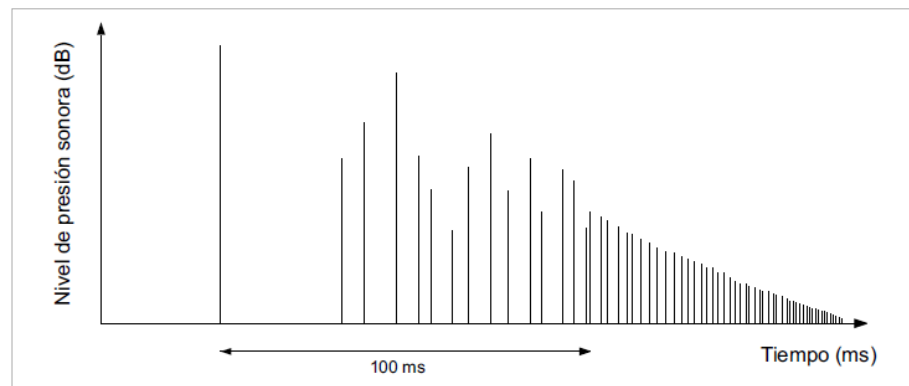


Ilustración 9: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.

Todas aquellas reflexiones que llegan al oyente dentro de los 50 mseg. desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído y, por tanto, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo. Cuando el sonido emitido es un mensaje oral, tales reflexiones contribuyen a mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje y, al mismo tiempo, producen un aumento de sonoridad (o sensación de amplitud del sonido). Por el contrario, la aparición en un punto de escucha de una reflexión de nivel elevado con un retardo superior a este tiempo es contraria a una buena inteligibilidad de la palabra, ya que es percibida como repetición del sonido directo. En tal caso, dicha reflexión se denomina eco. (Valero Granados, Santiago, 2011)

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo, a la que pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en la que el nivel de presión sonora (nivel de campo directo) disminuye 6dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese en campo libre.

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante, donde están los puntos más alejados de la fuente sonora y donde el nivel de presión sonora (nivel de campo reverberante) se mantiene constante. Una característica del campo directo es que es bastante direccional, mientras que el campo reverberante es difuso, es decir, omnidireccional.

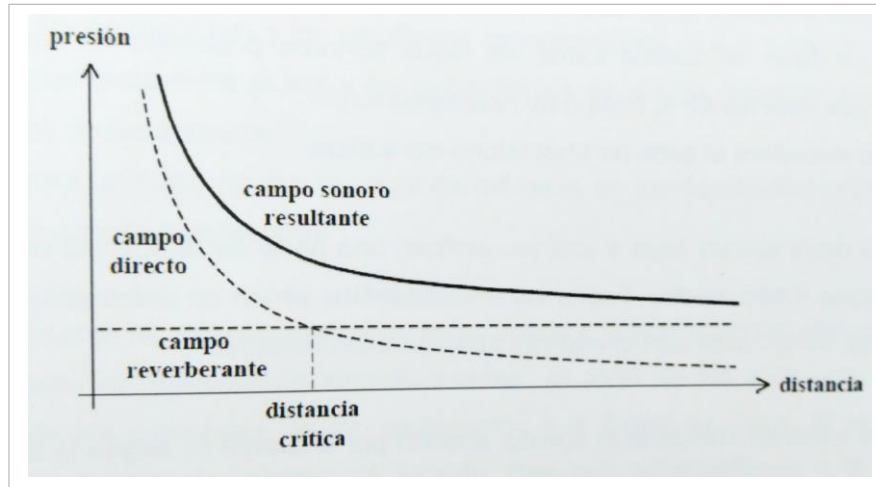


Ilustración 10: Santiago Valero Granados, 2011. *Acústica aplicada al interiorismo*.

Existe una distancia denominada “crítica” que limita las regiones en las que predomina uno u otro campo. Para distancias menores que la distancia crítica, predomina el campo directo, y para mayores, predomina el reverberante. (Valero Granados, Santiago, 2011)

2.6 TEORÍAS PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS.

Existen 4 tipos de estudio de la Acústica:

2.6.1 TEORÍA ESTADÍSTICA

La energía sonora total presente en cualquier punto de una sala se obtiene como suma de una energía de valor variable, que depende de la ubicación del punto y otra de valor constante. Se supone que se parte de una fuente sonora de directividad conocida que radia una potencia constante.

La energía de valor variable corresponde al sonido directo, y disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente, mientras que la energía de valor constante va asociada al sonido indirecto o reflejado.

El hecho de que dicha energía no dependa del punto en consideración proviene de aplicar la teoría estadística a todo el sonido reflejado y, en consecuencia, de tratar por igual todas las reflexiones, sean primeras o tardías (cola reverberante). Esta hipótesis teórica conduce a resultados aproximados, si bien presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo de energía total.

Habitualmente no se trabaja en términos de energía, sino de nivel de presión sonora SPL (apartado...), lo cual es totalmente equivalente. Ello se debe a que, en la práctica el nivel de SPL es fácilmente medible mediante sonómetros (apartado...).



Por lo tanto, según lo que se acaba de exponer, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia a la fuente) y del sonido reflejado (se mantiene constante). (Carrión Isbert, Antoni, 1998)

2.6.2 TEORÍA GEOMÉTRICA

En general, las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante. Además, por depender directamente de las formas geométricas de la sala, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias del mismo, juntamente con el sonido directo.

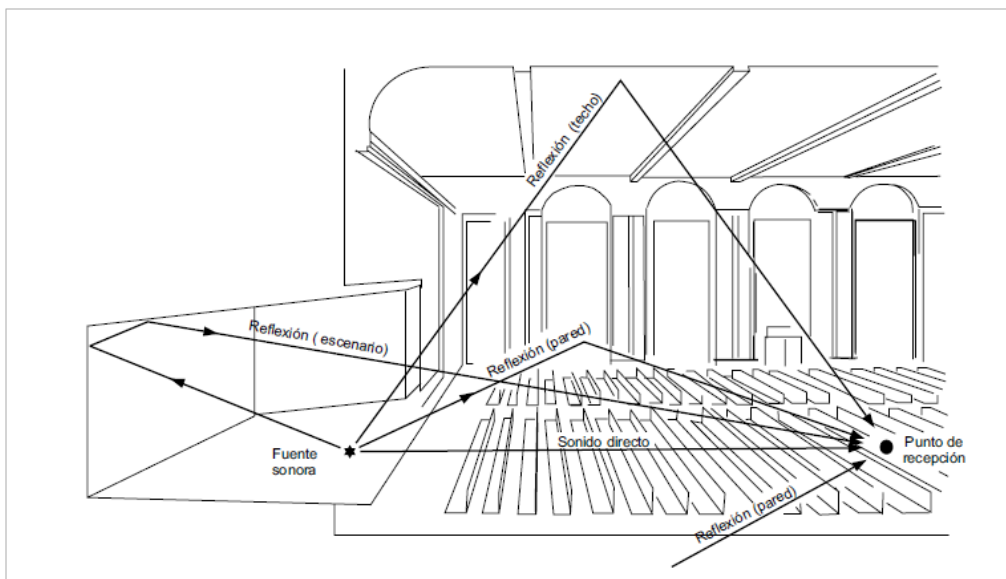
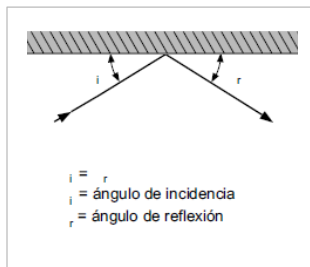


Ilustración 11: Carrión Isbert, Antoni, 1998.
Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor.



La hipótesis elemental de partida para calcular el ecograma asociado a un punto cualquiera consiste en tratar a los rayos sonoros como si se tratase de rayos de luz, es decir, considerando que las reflexiones de los mismos sobre las distintas superficies son totalmente especulares y que, por lo tanto, verifican la ley de la reflexión.

Ilustración 12: Carrión Isbert, Antoni, 1998.
Representación gráfica de la ley de la reflexión.



El análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares constituye la base de la denominada acústica geométrica. Dicho análisis no es más que una aproximación a la realidad, ya que sólo en determinadas circunstancias la hipótesis de reflexión especular es totalmente veraz. (*Carrión Isbert, Antoni, 1998*)

Para que en la práctica se produzca una reflexión marcadamente especular es necesario que se cumplan los siguientes requisitos, por lo que a la superficie de reflexión se refiere:

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido en consideración.
- Superficie lisa y muy reflectante (poco absorbente).

En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existe. Se conoce como difracción (punto 2.4.3 pág. 11 de este documento).

Por otra parte, si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones. Se conoce como reflexión difusa (punto 2.4.1.2 pág. 10 de este documento).

En el caso de que no se cumplan los requisitos anteriores aparecerán fenómenos de propagación del sonido difíciles de estudiar basándose en esta teoría. En tal caso, deberíamos recurrir a programas informáticos avanzados de simulación acústica que permiten el análisis teniendo en cuenta tanto el fenómeno de difracción como el de reflexión difusa. (*Carrión Isbert, Antoni, 1998*)

2.6.3 TEORÍA ONDULATORIA

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado.

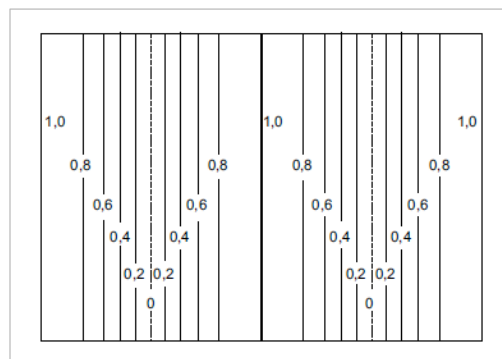


Ilustración 13: Carrión Isbert, Antoni, 1998
Distribución de niveles SPL normalizados asociados a un modo propio de una sala.



Esta teoría realiza un estudio analítico de los modos propios conjuntamente con la acústica geométrica y la estadística. Éstas constituyen las tres teorías clásicas que hacen posible conocer con rigor el comportamiento del sonido en un recinto cualquiera. (*Carrión Isbert, Antoni, 1998*)

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje frecuencial es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Dicho sonido recibe el nombre de “coloración” y normalmente se pone de manifiesto en espacios de dimensiones relativamente reducidas como, por ejemplo, los estudios de grabación.

Los valores de las frecuencias propias asociadas a los diferentes modos propios dependen de la geometría y de las dimensiones del recinto y, en general, su determinación resulta muy compleja.

Únicamente cuando se trata de recintos de forma paralelepípedica con superficies totalmente reflectantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{Lx}\right)^2 + \left(\frac{m}{Ly}\right)^2 + \left(\frac{n}{Lz}\right)^2}$$

- Lx, Ly y Lz representan las dimensiones de la sala (en metros)
- K, m, n pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2, 3, ...)

Cada combinación de valores k, m, n da lugar a una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio k, m, n.

Partiendo de que la existencia de modos propios es inevitable, conviene elegir una relación entre las dimensiones de la sala tal que la distribución de los mismos en el eje frecuencial sea lo más uniforme posible. De esta manera se consigue evitar concentraciones de energía en bandas estrechas de frecuencias o, lo que es lo mismo, coloraciones intensas del sonido. (*Carrión Isbert, Antoni, 1998*)

2.6.4 PSICOACÚSTICA

La psicoacústica estudia la percepción del sonido desde la psicología, es decir, entre el estímulo de carácter físico y la respuesta de carácter psicológico, describiendo la forma en que son percibidas las características del sonido, la percepción espacial a través del sonido y fenómenos auditivos.

Los objetivos generales de la psicoacústica son:

- La respuesta de nuestro sistema auditivo, es decir, cómo se relaciona la magnitud de la sensación producida por el estímulo con la magnitud física del estímulo.



- El umbral absoluto de la sensación.
- El umbral diferencial de determinado parámetro del estímulo (mínima variación y mínima diferencia perceptibles).
- La resolución o capacidad de resolución del sistema para separar estímulos simultáneos o la forma en que estímulos simultáneos provocan una sensación compuesta.
- La variación en el tiempo de la sensación del estímulo.

2.7 ABSORCIÓN

Depende de múltiples factores; la temperatura, la presión atmosférica y la humedad, junto a otras condiciones del entorno, pueden afectarla.

La absorción acústica es la disminución de la energía acústica en un recinto, disipada en energía calorífica al ser absorbida por el medio que atraviesa. Ésta pérdida de energía se debe a la absorción del aire, a la de los revestimientos, objetos, mobiliario y a las personas.

La cantidad de energía absorbida por el paramento depende del tipo de material, de su forma, del espesor, del método de montaje, así como del ángulo de incidencia y de la frecuencia de la onda acústica incidente. (Valero Granados, Santiago, 2011)

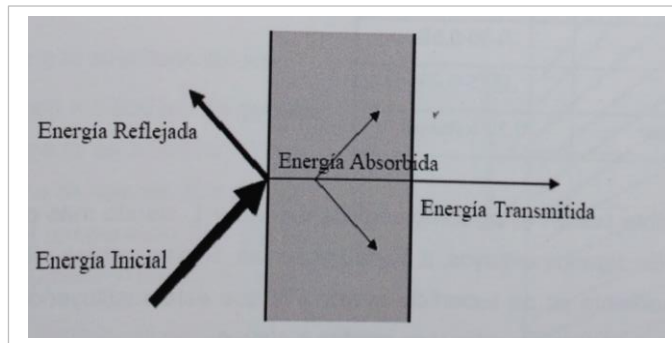


Ilustración 14: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.

$$E_i = E_r + E_a + E_t$$

La energía incidente (E_i) se divide en:

- Energía reflejada (E_r): se produce, pues, cuando una onda encuentra un obstáculo que no puede traspasar, por lo que vuelve al medio del que proviene.
- Energía absorbida (E_a): energía disipada en energía calorífica al ser absorbida por el medio que atraviesa.
- Energía transmitida (E_t): Se produce cuando parte de la energía sonora atraviesa un obstáculo.



La absorción de energía por parte de una superficie u objeto se expresa a través del coeficiente de absorción " α ", que es una magnitud adimensional, definida como el cociente entre la energía absorbida y la energía total incidente.

La dependencia del coeficiente de absorción con la frecuencia obliga a que cada material disponga de una curva de variación de los valores de este coeficiente, obtenidos de ensayos en cámaras normalizadas reverberantes o en tubos de ondas estacionarias o de impedancia. Su variación con el ángulo de incidencia supone una dificultad añadida más, ya que el más común es el normal, pero, en ocasiones, el sonido presenta un carácter totalmente difuso, es decir, la energía acústica incide sobre el material desde todas las direcciones posibles, con la misma intensidad. En estos casos, se debe definir un coeficiente de absorción de tipo estadístico o de incidencia aleatoria. Hay que tener en cuenta que estos coeficientes, publicados en información comercial o técnica, normalmente, se obtienen en cámara reverberante, en la que no se obtiene un campo totalmente difuso, pero con un grado de difusión mucho mayor que el de la mayoría de salas. (*Valero Granados, Santiago, 2011*)

A veces, la curva de variación de los valores del coeficiente de absorción (que suele darse en valores de bandas de octava de 125Hz a 4000Hz) se sustituye por un único valor que hace referencia al valor medio α_m , que se obtiene de la media aritmética de las bandas de las frecuencias de 500, 1000 y 2000Hz.

Todos estos valores globales, productos de medias aritméticas, deben tomarse con precaución, pues no definen exactamente el comportamiento de determinado material.

Los valores de este coeficiente suelen estar comprendidos entre 0 y 1, siendo más cercanos a 0 los de los materiales más reflectantes al sonido.

El valor del coeficiente de absorción de un material depende de los siguientes factores:

- La rugosidad del material y en especial su porosidad.
- La pérdida de energía por procesos viscoelásticos debido al paso del aire a través del material, que se puede caracterizar por la resistencia al paso del flujo del aire.
- La conducción térmica entre el material y el aire.
- La difracción de la onda sonora debido a las irregularidades superficiales del material.

Para calcular la absorción acústica de un recinto se debe sumar la absorción que aporta cada una de las superficies de distinto material, así como objetos o mobiliario que pudiera contener y la absorción del aire.



La absorción de una superficie se obtiene:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^N A_{o,m,j} + 4 \cdot \overline{m} \cdot V$$

Siendo:

- **α_m** : coeficiente de absorción medio de cada paramento, para las bandas de tercio de octava de 500, 1000 y 2000Hz.
- **S_i** : área de paramento cuyo coeficiente de absorción es α_i .
- **A_{om}** : área de absorción acústica equivalente media de cada mueble fijo absorbente diferente.
- **V** : volumen del recinto.
- **M** : coeficiente de absorción medio del aire, para las frecuencias de 500, 1000 y 2000Hz.

(Valero Granados, Santiago, 2011)

2.8 REVERBERACIÓN

La reverberación es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido dentro de un espacio cerrado. Consiste en una ligera prolongación por las diferentes superficies, por lo que, en general, depende del volumen del recinto y de los coeficientes de absorción de sus superficies referidas a cada frecuencia.

Cuando una fuente sonora emite una energía acústica en un recinto, normalmente, las ondas sonoras progresan libremente, pero después de cierto tiempo, que depende de la distancia de la fuente a las superficies del contorno, estas ondas empiezan a reflejarse, superponiéndose con las ondas incidentes. Este proceso se repite continuamente, con lo cual la energía dentro del recinto iría incrementándose continuamente si no fuese por la absorción de parte de esta energía por las superficies del recinto, la absorción del aire y de los objetos situados dentro del mismo.

Análogamente, si la fuente sonora deja de emitir, la energía acústica almacenada en el recinto no desaparece inmediatamente, sino que necesita de un tiempo para que la misma sea absorbida hasta que no sea audible. Esta permanencia de los sonidos en el interior del espacio tiene gran importancia para el comportamiento acústico de la sala. La reverberación es esta persistencia debida a las continuas reflexiones de las ondas sonoras en las superficies cuando la fuente ha dejado de emitir. *(Valero Granados, Santiago, 2011)*



2.8.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Es el tiempo necesario para que la intensidad acústica de un sonido en régimen estacionario se reduzca a una millonésima de su valor inicial, contando a partir del instante en que la fuente deja de emitir. Esto equivale a considerar una reducción de 60dB en el nivel de presión sonora dentro del recinto. Subjetivamente, se entiende como el tiempo de persistencia del sonido en el recinto hasta hacerse inaudible. Es el indicador acústico más representativo del comportamiento de un recinto, al ser más expresivo en términos globales y del que dependen de otros.

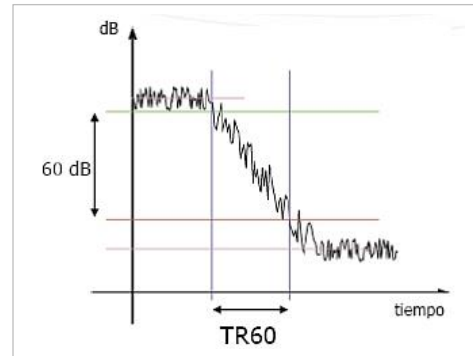


Ilustración 15: Santiago Valero Granados, 2011. *Acústica aplicada al interiorismo*.

Cuanto mayor es el volumen de un recinto, mayores son sus tiempos de reverberación, debido a que las ondas sonoras recorren caminos más largos y tardan más tiempo en reflejarse y volver al punto de partida. En función del volumen de determinado espacio y su uso, se establece el valor del tiempo de reverberación óptimo, para saber las unidades de absorción que se demandan para alcanzarlo. Este valor varía con la frecuencia. (Valero Granados, Santiago, 2011)

La variación del tiempo óptimo de reverberación es aquella que permite a todas las componentes de los sonidos vocales y musicales crecer y disminuir y mantenerse en estado estable a tales ritmos que produzcan una alta inteligibilidad de lo hablado y unas excelentes condiciones para la audición e interpretación de la música.

En ciertos casos, el tiempo de reverberación puede ser muy largo, produciendo dificultad de entendimiento por la superposición de sílabas, pues al oyente le llega, junto al sonido directo de una determinada señal, los sonidos reverberantes de las señales procedentes, originando un enmascaramiento, y, en consecuencia, una audición confusa. Esto es altamente molesto en aquellas salas destinadas a desarrollar en su interior actividades en las que predomina la emisión de la palabra, como es un teatro o un aula.

En las situaciones de tiempos de reverberación cortos, la audición resulta seca, la sala se denomina como “muy sorda”, sobre todo, en actividades musicales, estando limitada la inteligibilidad, que está ligada a la correcta percepción de las consonantes por su importante contenido de altas frecuencias.



Como la reverberación supone una prolongación en el tiempo de los sonidos dentro de una sala, unas veces, este efecto será beneficioso, tal como sucede con los sonidos musicales, pero en cambio, otras no, como sucede con el habla humana, perdiéndose inteligibilidad,

Hay que tener en cuenta también, la cuestión del aforo. Si un recinto está diseñado acústicamente sin tener en cuenta la ocupación de las personas, sucederá que, al llenarse, aumente de manera notable la absorción, disminuyendo la reverberación, con lo cual el recinto variará sus condiciones de audición.

Es habitual calcular su valor mediante ecuaciones basadas en la teoría estadística, siendo la más conocida y empleada la fórmula de w. Sabine:

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

Siendo:

- V: volumen del recinto en m³.
- A: absorción acústica total del recinto en m².

Aplicación de la fórmula de W. Sabine:

- Reparto homogéneo de absorción, con materiales de bajo coeficiente de absorción. ($\alpha_m < 0,25$).
- Valores de coeficientes de absorción que no ofrecen mucha garantía.
- En estudios previos y en general cuando no se requiera mucha exactitud.
- Cámaras reverberantes.

Esta fórmula indica que el tiempo de reverberación es el mismo en todos los puntos de un recinto, siendo independiente de la posición de la fuente dentro de él. Además, la influencia de las soluciones absorbentes sobre el tiempo de reverberación no depende de su localización sino de su superficie de aplicación.

2.9 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Se entiende como corrección acústica o acondicionamiento acústico el control de los parámetros de la propagación del sonido en el interior de determinado espacio cerrado.

La expresión acondicionamiento acústico suele estar asociada a recintos como auditorios o teatros, que tienen una acústica excepcional. Sin embargo, con cierta frecuencia existen recintos de uso cotidiano donde las condiciones acústicas no son las adecuadas. Así, por ejemplo, las aulas son a menudo lugares donde es casi imposible seguir una clase o existen restaurantes y comedores demasiado ruidosos donde es difícil entablar una conversación. Esto se debe a que estos establecimientos suelen tener todas sus superficies reflectantes acústicamente y al ser de



un tamaño considerable y contar con muy poca absorción, el sonido permanece más tiempo en el ambiente, incrementándose paulatinamente los niveles de ruido de fondo. Es a este tipo de recintos, como aulas o salas de conferencias de pequeño tamaño, comedores restaurantes, etc..., a los que normalmente se les da poca importancia, en los que incide el DB HR, para que desde la etapa de diseño se tengan en cuenta las condiciones acústicas, de tal forma que se elijan materiales adecuados para que el tiempo de reverberación se mantenga dentro de un límite que no dificulte la transmisión o la percepción de la palabra.

Cuando las aulas y las salas de conferencias son de cierto tamaño (el DB HR fija el volumen máximo para la aplicación del método de cálculo en 350 m³) es necesario la realización de estudios específicos de mayor complejidad que lo exigido en el DB HR.

En la parte I del CTE se establece que, para cumplirse las exigencias de protección frente al ruido, debe limitarse el ruido reverberante de los recintos. Esta exigencia tiene dos motivos:

1. La disminución de los niveles de ruido en el interior de los edificios.
2. Una mayor inteligibilidad de la palabra, que es especialmente importante en recintos como aulas y salas de conferencias.

Tal y como está planteado en el DB HR, el acondicionamiento acústico es un problema de la elección de los acabados de las superficies de los elementos constructivos.



3 CAPITULO III: PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA EL DISEÑO DE SALAS

3.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Mencionado en el apartado 2.8.1

3.2 NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO (DIRECT SPL)

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en ella el nivel de presión sonora, llamado nivel de presión sonora directo (SPLd). Disminuye 6dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre.

La ecuación utilizada para el cálculo del nivel de presión sonora directo (SPLd) es:

$$SPLd = S + 10 \log PE - 20 \log r + D(dB)$$

S: sensibilidad del altavoz (dB).

PE: Potencia eléctrica aplicada (W).

r: radio, distancia de la fuente al micrófono (m).

D: pérdida por directividad (dB).

3.3 NIVEL DE PRESIÓN SONORA REVERBERANTE (SPLr)

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante. A ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En esta zona, el nivel de presión sonora se denomina nivel de presión sonora reverberante (SPLr).

La ecuación utilizada para el cálculo del nivel de presión sonora reverberante (SPLr) es:

$$SPLr = S + 10 \log PE - 10 \log(Qax * R) + 17dB$$

S: sensibilidad del altavoz (dB).

PE: potencia eléctrica aplicada (W).



Q_{ax} : factor directividad axial ($Q_{ax}=1$ para fuentes omnidireccionales).

R: es la constante de la sala.

$$R = \frac{St * \alpha_m}{1 - \alpha_m}$$

St : superficie total de la sala.

α_m : coeficiente de absorción media.

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha * A}{St}$$

α : coeficiente de absorción de cada material (Hz).

A: superficie de cada paramento (m^2).

St : superficie total de paramentos (m^2).

El término 17 dB corresponde con una radiación esférica del altavoz. Si la radiación del altavoz fuese hemisférica, dicho término debería ser sustituido por 14 dB. Ambas expresiones son aproximaciones estadísticas para el caso en que radie una única fuente omnidireccional en un recinto regular, con superficies absorbentes internas parecidas y un solo volumen constitutivo. En otros casos más complicados no queda más remedio que utilizar programas de predicción y simulación tipo EASE.

3.4 NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL (TOTAL SPL)

Aplicando la teoría de la acústica estadística, resulta que la energía sonora total presente en cualquier punto de una sala se obtiene como suma de una energía de valor variable, que depende de la ubicación del punto, y otra de valor constante. Se supone que se parte de una fuente sonora de directividad conocida que radia una potencia constante.

La energía de valor variable corresponde al sonido directo, y disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente, mientras que la energía de valor constante va asociada al sonido indirecto o reflejado.

El hecho de que dicha energía no dependa del punto en consideración proviene de aplicar la teoría estadística a todo el sonido reflejado y, en consecuencia, de tratar por igual todas las reflexiones, sean primeras o tardías. Esta hipótesis teórica conduce a resultados aproximados, si bien presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo de la energía total.



Habitualmente no se trabaja en términos de energía, sino de nivel de presión sonora SPL, lo cual es totalmente equivalente. Ello se debe a que, en la práctica, en nivel SPL es fácilmente medible.

Por lo tanto, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia) y del sonido reflejado (se mantiene constante).

La ecuación utilizada para el cálculo del nivel de presión sonora total (SPLt) es:

$$SPLt = 10 \log[10^{\frac{SPLd}{10}} + 10^{\frac{SPLr}{10}}]$$

SPLd: nivel de presión sonora directo.

SPLr: nivel de presión sonora reverberante.

(Valero Granados, Santiago, 2011, acústica aplicada al interiorismo)

3.5 RELACIÓN ENTRE DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO)

Muestra la relación entre el sonido directo y el reverberante en dB. Si los sonidos son iguales se representa con 0dB. Números inferiores a 0 significarán que el sonido reverberante es más alto que el directo, así como los valores superiores a 0 indicarán lo contrario.

3.6 PÉRDIDA DE ARTICULACIÓN DE CONSONANTES (ALCONS)

Éste parámetro surge de una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basadas en la emisión de un conjunto preestablecido de “logatomos” (palabras sin significado formadas por: consonante-vocal-consonante). Cada individuo receptor tomaba nota de lo que escuchaba y, posteriormente, se procesaba toda la información recogida y se establecía una estadística de los resultados obtenidos. Si el porcentaje medio de logatomos detectados correctamente en uno de los recintos era de un 85%, entonces se consideraba que la pérdida de información era de un 15%. Como dicha pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, V.M.A Peutz (investigador holandés de principios de la década de los años 70) la denominó: % Pérdida de Articulación de Consonantes, o lo que es lo mismo %ALCons (Articulation Loss of Consonants). Cabe decir que, al tratarse de un parámetro indicativo de una pérdida, cuanto mayor sea, peor será el grado de inteligibilidad existente. *(Antoni Carrión gisbert, 1998, diseño acústico de espacios arquitectónicos)*

3.7 STI (ÍNDICE DE INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA)

STI (Speech transmission index) es un parámetro asociado a la inteligibilidad de la palabra. STI 1 significa que la inteligibilidad es total; STI 0 significa que la inteligibilidad es nula. Se calcula a partir de la reducción de los índices de la modulación de la voz debido a la existencia de



reverberación y ruido de fondo en la sala. Dichas reducciones se asocian a pérdidas de inteligibilidad.

3.8 RASTI (ÍNDICE DE RÁPIDEZ DE TRANSMISIÓN DEL HABLA)

El parámetro RASTI (Rapid Speech transmission index) es un parámetro que surge de la simplificación del STI para reducir así el tiempo de cálculo. Se calcula reduciendo el número de bandas de octava (mide solamente en dos octavas centradas en 500Hz y 2000 Hz) y de frecuencias de modulación.

F ₀ (Hz)	F _m (Hz)			
500	1	2	4	8

Tabla1: Carrión Isbert, Antoni, 1998

F ₀ (Hz)	F _m (Hz)				
2000	0,7	1,4	2,8	5,6	11,2

Tabla2: Carrión Isbert, Antoni, 1998

Por lo tanto, el número de índices de modulación calculados es únicamente de 9, frente a los 98 utilizados en el caso del STI.

Los pasos a seguir para el cálculo del RASTI coinciden con los correspondientes al STI, con la excepción de que se calcula una única relación señal/ruido aparente media, que se toma como global:

$$\overline{(S/N)}_{ap} = \frac{\sum_{F_0, F_m} \left(\frac{S}{N} \right)_{ap} (F_0, F_m)}{9}$$

Existe una correlación entre los valores de %ALCons y de STI/RASTI. Dicha correspondencia se muestra en la tabla X y aparece también la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

%ALCons	STI/RASTI	VALORACIÓN SUBJETIVA
1,4%-0%	0,88-1	Excelente
4,8%-1,6%	0,66-0,86	Buena
11,4%-5,3%	0,50-0,64	Aceptable
24,2%-12%	0,36-0,49	Pobre
46,5%-27%	0,24-0,34	Mala

Tabla3: Carrión Isbert, Antoni, 1998 Relación entre %ALcons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

3.9 DISTANCIA CRÍTICA

Esta distancia limita las regiones en las que predomina el campo directo y el campo reverberante. Para distancias menores que la distancia crítica, predomina el campo directo, y para mayores, predomina el reverberante. Se dice, pues, que la distancia crítica es la distancia a la fuente sonora



en que el nivel de presión sonora directo es igual al nivel de presión sonora reverberante. A partir de ella, el nivel de presión sonora dominante es el del campo reverberado.

Este parámetro tiene especial interés en el cálculo y diseño de sonorización de recintos. Depende del factor de directividad de la fuente sonora (Φ) (que se establece en función de la posición de ésta respecto a parámetros cercanos) y de la cantidad de absorción acústica de la sala (raíz cuadrada del producto de ambos):

$$Rc = 0,14\sqrt{\Phi * A}$$

Siendo “A” las unidades de absorción de la sala.

Normalmente, al aumentar esta absorción, aumenta la distancia en la que domina el sonido directo, y, por consiguiente, el área en el que el sonido se percibe más nítido (más inteligibilidad).

(Valero Granados, Santiago, 2011, acústica aplicada al interiorismo)

3.10 TIEMPO DE LLEGADA

Muestra los tiempos de llegada del sonido directo de los altavoces en ms. Es muy útil para determinar el retardo necesario en la distribución de los sistemas de altavoces.

3.11 ITD GAP (TIEMPO DE RETARDO INICIAL DEL SONIDO)

ITD (initial-time-delay Gap) se corresponde con la impresión subjetiva de “intimidad acústica”. Beranek asocia la valoración de intimidad acústica con la sensación que tiene el oyente de escuchar la música en un espacio de dimensiones más reducidas que las dimensiones reales de la sala.

Barron, en cambio, utiliza el término de intimidad acústica para denominar el grado de conexión o identificación entre el oyente y la orquesta, es decir, si el oyente se siente inmerso o, por el contrario, distante de la música que está escuchando. Para dicho investigador, el grado de intimidad acústica está más relacionado con la sonoridad de la sala que con el ITD.

El ITD correspondiente a un punto cualquiera de una sala se define como el intervalo de tiempo (en milisegundos) existente entre la llegada del sonido directo procedente del escenario y la primera reflexión significativa que llega al mismo.

Según Beranek, el valor recomendado de este parámetro en el centro de la platea debe verificar $ITD < 20ms$.

La obtención de valores superiores a 35ms representa generalmente una reducción significativa de la calidad acústica de una sala. *(Antoni Carrión gisbert, 1998, diseño acústico de espacios arquitectónicos)*



Este parámetro es importante a la hora de determinar la posición apropiada para los altavoces, así como para calcular retardos en sistemas distribuidos.

3.12 ELR (RELACIONES ENERGÉTICAS)

Con el fin de estudiar las características del sonido reflejado en una sala, así como su relación con el sonido directo, se utilizan una serie de parámetros que expresan relaciones energéticas ELR (Early to late Ratios) y que dependen del tiempo.

3.12.1 Ct

Relación entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros “t” segundos desde la llegada del sonido directo y la energía que le llega con posterioridad. El Ct se expresa en escala logarítmica (db), y para música suele utilizarse el valor medio de los correspondientes a las bandas de 500Hz, 1000Hz y 2000Hz.

$$C_t(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t}{\text{Energía a partir del instante } t} \text{ (en dB)}$$

3.12.1.1 C₈₀

El valor del Ct para t=80ms se corresponde con el parámetro C₈₀.

3.12.2 Ct₀

Es el valor Ct una vez excluida la energía correspondiente al sonido directo.

$$C_{t_0}(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t \text{ (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía a partir del instante } t} \text{ (en dB)}$$

La evolución de Ct₀ en función del tiempo permite estudiar de forma exclusiva el comportamiento del sonido reflejado, sin la influencia del sonido directo. La diferencia entre las evoluciones temporales de Ct y Ct₀ da una indicación de la importancia relativa del sonido directo en un punto cualquiera de la sala.

3.12.3 Cx

Es el equivalente teórico del valor Ct₀, y correspondiente al caso de un campo sonoro totalmente difuso.

La curva obtenida como resultado de la diferencia Ct₀-Cx indica el grado de difusión del sonido en cada punto del recinto.

- Si $C_{t_0} - C_x > 0 \text{ dB} \rightarrow$ existencia de primeras reflexiones significativas.



- Si $Ct_0 - Cx = 0 \text{ dB}$ \rightarrow comportamiento del sonido equivalente al caso teórico de decaimiento energético puramente exponencial. Óptima difusión del sonido.
- Si $Ct_0 - Cx < 0 \text{ dB}$ \rightarrow ausencia de primeras reflexiones significativas.

Cabe señalar que, a diferencia de lo que sucede con otros parámetros, no existe valores recomendados de Ct y Ct_0 . Más bien, todas las curvas son útiles para comprobar cómo se comporta el sonido, desde el punto de vista energético, en los distintos puntos de una sala. *(Antoni Carrión gisbert, 1998, diseño acústico de espacios arquitectónicos)*

3.13 MEDIDAS DE CLARIDAD

3.13.1 CLARIDAD DE LA VOZ $C7$

Es una manera de representar la fuerza del campo de sonido directo. Establece en dB la relación del sonido directo y reverberante usando un tiempo parcial de 7ms. Los valores por encima de -15dB muestran una buena localización (un buen D/R Ratio). Cuanto más cerca del valor a 0, mejor es la localización.

3.13.2 CLARIDAD DE LA VOZ $C50$

Es un parámetro relacionado con la inteligibilidad del mensaje oral. Compara la energía que llega del sonido en las primeras reflexiones (50ms) con las que llegan más tarde y muestra el grado de separación entre los diferentes sonidos de mensaje oral.

$$C_{50} = \frac{\text{Energía } t0 - 50ms}{\text{Energía } 50ms - \infty} \text{ (en dB)}$$

Para poder realizar una evaluación y comparación del parámetro C_{50} es suficiente utilizar el denominado “ C_{50} Speech Average”, valor C_{50} con la sala ocupada.

El valor mínimo recomendado es 2dB, lo cual significa que, si el valor es mayor, la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad son correctas.

3.13.3 CLARIDAD MUSICAL C_{80}

Este parámetro indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

Según Cremer, el C_{80} se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 80ms, calculada en cada banda de frecuencia entre 125hz y 4000Hz. El C_{80} se expresa en escala logarítmica (dB):

$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta } 80ms}{\text{Energía a partir de } 80ms} \text{ (en dB)}$$



La elección del intervalo temporal de 80ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por lo tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical. Constituyen, pues, las denominadas primeras reflexiones.

Beranek recomienda para la sala vacía que el valor medio de los C_{80} correspondientes a las bandas de 600Hz, 1000Hz y 2000Hz (denominado “music average”) se sitúe preferentemente entre:

$$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0\text{dB}$$

En todos los casos debe evitarse valores de $C_{80}(3)$ superiores a +1dB. (*Antoni Carrión gisbert, 1998, diseño acústico de espacios arquitectónicos*)

3.14 NIVELES DE PRESIÓN

Las simulaciones L7, L50, L80 permiten determinar la suma de la energía del sonido directo y reverberante en un tiempo especificado.

3.14.1 L7

Determina la suma de la energía del sonido directo y reverberante en los primeros 7ms.

3.14.2 L50

Determina la suma de la energía del sonido directo y reverberante en los primeros 50ms.

3.14.3 L80

Determina la suma de la energía del sonido directo y reverberante en los primeros 80ms.

3.14.4 Lsplit

Determina la suma de la energía del sonido directo y reverberante en un tiempo intermedio establecido de 35ms.

3.15 AI - ÍNDICE DE ARTICULACIÓN (ARTICULATION INDEX)

AI está basado en la idea de que la respuesta de un sistema de comunicación hablada puede ser dividido en veinte bandas de frecuencia, cada una de las cuales aporta una contribución independiente a la inteligibilidad del sistema y que la contribución total de todas las bandas es la suma de las contribuciones de las bandas individuales (AI puede también ser medida usando bandas de un tercio de octava o de una octava). Las relaciones señal/ruido son calculadas para cada banda individual y después ponderadas y combinadas para dar una evaluación de la inteligibilidad. El AI varía de valor desde 0 (completamente ininteligible) hasta 1 (inteligibilidad perfecta). Un AI de 0,3 o menor es considerado insatisfactorio, de 0,3 a 0,5 satisfactorio, de 0,5 a 0,7 bueno y mayor de 0,7 de muy bueno a excelente.



4 CAPÍTULO IV: CASO PRÁCTICO: ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II DE LA ESCUELA UNIVERSITARIA DE ARQUITECTURA TÉCNICA DE LA UNIVERSIDAD DE A CORUÑA

4.1 SITUACIÓN

Las aulas especiales I y II, se encuentran en la primera planta del edificio de la EUAT situado en el campus de A Zapateira de la Universidad de Coruña con dirección Rúa Fraga nº27.

Los planos de ubicación y emplazamiento están en el Anexo.



Ilustración 16: vista aérea de la escuela universitaria de arquitectura técnica de A Coruña. Fuente: google maps. 2016.

Ilustración 17: fotos fachadas principales Universidad de Arquitectura Técnica de A Coruña. Fuente: propia.

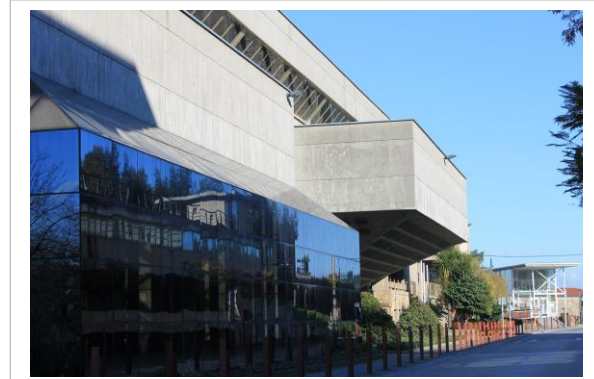




Ilustración 18: fotos fachadas principales Universidad de Arquitectura Técnica de A Coruña. Fuente: propia.

4.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.

El aula especial I tiene una superficie útil de 103,21 m², un volumen aproximado de 432,91m³ y una capacidad de 103 personas sentadas. La audiencia está dispuesta en gradas ocupando un área de 49.08 m².

El aula especial II tiene una superficie útil de 102,98 un volumen aproximado de 431,11 m³ y tiene una capacidad de 97 personas sentadas. La audiencia está dispuesta en gradas ocupando un área de 48,98m².

Para una mayor comprensión de las aulas especiales I y II, están representados los planos en el Anexo adjunto.

Para más información se incluye una sesión fotográfica de las aulas especiales I y II en el Anexo.



Ilustración 19: panorámica aula especial 1. Fuente: propia.



Ilustración 20: panorámica aula especial 2. Fuente: propia.

4.2.1 PLANTA

Las dimensiones de la planta del aula especial I son: 10,51m x 10,48m x 6,90m x 4,78m.

Las dimensiones de la planta del aula especial II son: 10,46m x 10,48m x 6,93m x 4,78m.

La planta de las aulas especiales I y II no son simétricas y además presentan un “chaflán” en una de las esquinas de la sala.

Prácticamente toda la planta se dispone en gradas de una altura aproximada de 0,29m entre ellas. Donde se sitúa el orador se localiza una tarima de una altura de 0,30m.

Todo el suelo, tanto a cota 0 como la tarima y las gradas tienen un acabado de linóleo rojo.



Ilustración 21: suelo aulas especiales. Fuente: propia.

4.2.2 TECHO

El techo de las aulas especiales I y II es un forjado bidireccional con acabado de hormigón visto. Las luminarias están ancladas al mismo techo.



El techo está a una cota de +5,60m (con respecto al suelo del aula).



Ilustración 22: techo aulas especiales. Fuente: propia.

4.2.3 PARAMENTOS VERTICALES

En los paramentos verticales podemos encontrar los siguientes materiales:

- Enfoscado de mortero.
- Vidrio.
- Aluminio.

El acabado predominante es el enfoscado de mortero pintado de color blanco.

Las aulas cuentan con una puerta cada una compuestas de madera y vidrio de dimensiones 1,18m x 3,85m. Cuentan también con una ventana de dimensiones 1,05m x 5,04m compuesta de vidrio y aluminio.

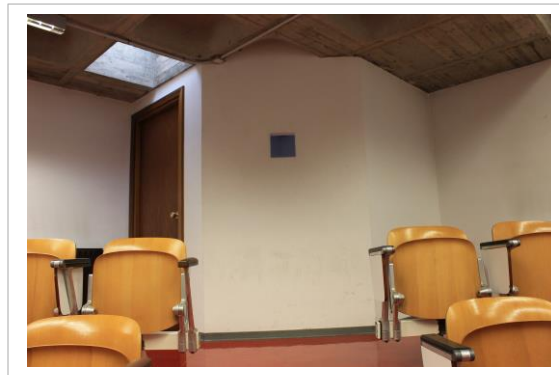


Ilustración 23: paramentos de las aulas especiales. Fuente: propia.

4.2.4 ASIENTOS

En las dos aulas se presentan las mismas sillas. Son dos piezas de madera, una de ellas se pliega para cerrar la silla y poder pasar por las gradas, con estructura metálica atornilladas al suelo.

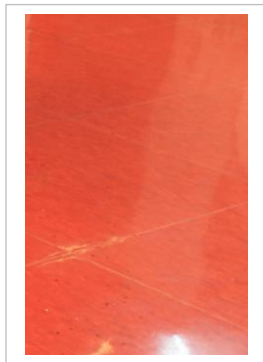


Ilustración 24: butacas de las aulas especiales. Fuente: propia

4.3 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

A continuación, se identifica cada material presente en las aulas y se explica las características que influyen en el acondicionamiento.

4.3.1 LINÓLEO



Es un material utilizado para construir recubrimientos de suelos fabricado a partir de aceite de lino solidificado mezclado con harina de madera o polvo de corcho colocado sobre un soporte de una lona o tela basta. Se le suele agregar pigmentos a la mezcla para darle distintos colores.

El linóleo está presente en todo el suelo y gradas de las aulas. El que se ha utilizado tiene un acabado brillante y de color rojo.

Ilustración 25: linóleo de color rojo usado en las aulas especiales. Fuente: propia.

4.3.2 ENFOSCADO DE MORTERO



Dentro de los revestimientos de mortero, el enfoscado es el más duro y resistente, y también el más duradero. Estas propiedades lo convierten en el revestimiento más usado en paredes y muros. Presenta un aspecto final muy pobre, por lo que la práctica habitual es utilizarlo como soporte para un nuevo revestimiento de acabado, que puede consistir en una simple pintura, o en una nueva capa de un material más fino.

Ilustración 26: pintura blanca sobre enfoscado de mortero. Fuente: propia.



4.3.3 HORMIGÓN VISTO



El forjado se compone de hormigón amado con un acabado visto. Éste sirve tanto de estructura como de cerramiento.

Podemos encontrarlo tanto en el forjado como en los pilares vistos.

Tiene un acabado liso sin pintar.

Ilustración 27: hormigón visto de las aulas especiales. Fuente: propia.

4.3.4 VIDRIO



El vidrio es un material inorgánico duro, frágil, transparente y amorfo.

Está instalado en todas las ventanas y en la puerta.

Para la modelización de las aulas se ha simplificado el cálculo de las ventanas, suponiendo que todas ellas son de vidrio, sin contabilizar el aluminio.

Ilustración 28: vidrio transparente usado en las ventanas de las aulas especiales. Fuente: propia.

4.3.5 MADERA



Podemos encontrar la madera en los asientos de las aulas y en la puerta de acceso. Los asientos son de madera de haya y las puertas de chapa con alma de cartón.

Ilustración 29: chapa de madera en color oscuro de las aulas especiales. Fuente: propia.



4.4 COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE LOS MATERIALES

4.4.1 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES

HR –	DOCUMENTO BÁSICO	PROTECCIÓN	FRENTE	AL	RUIDO
			α		
ELEMENTO	MATERIAL	500Hz	1000Hz	2000Hz	α_m
PAREDES	<i>Enfoscado de mortero</i>	0.06	0.08	0.04	0.06
TECHO	<i>Hormigón visto</i>	0,03	0,04	0,04	0,04
SUELO	<i>Linóleo</i>	0,03	0,03	0,04	0,03
PUERTA	<i>Panel de madera</i>	0,08	0,08	0,08	0,08
VENTANA	<i>Vidrio</i>	0,05	0,04	0,03	0,04

Tabla 4: coeficiente absorción. Catálogo elementos constructivos del CTE.

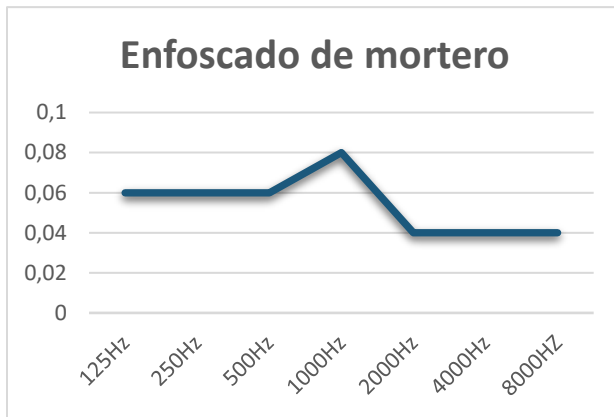
A continuación, se muestran las gráficas de los distintos comportamientos de absorción de los materiales anteriormente nombrados:



FRECUENCIA	ABSORCIÓN
125Hz	0.03
250Hz	0.03
500Hz	0.03
1000Hz	0.04
2000Hz	0.04
4000Hz	0.04
8000Hz	0.04

Tabla 5: coeficiente absorción hormigón visto. Catálogo elementos constructivos del CTE.

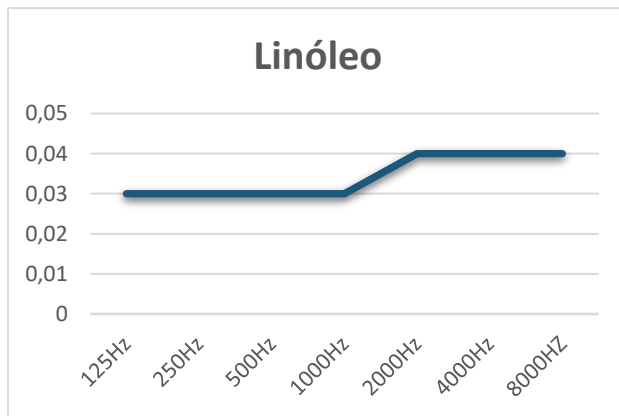
Gráfica 1: coeficiente absorción hormigón visto.



Gráfica 2: coeficiente absorción enfoscado mortero

FRECUENCIA	ABSORCIÓN
125Hz	0.06
250Hz	0.06
500Hz	0.06
1000Hz	0.08
2000Hz	0.04
4000Hz	0.04
8000Hz	0.04

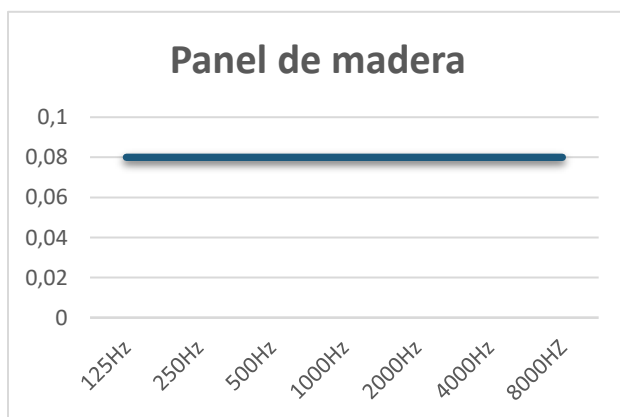
Tabla 6: coeficiente absorción enfoscado mortero. Catálogo elementos constructivos del CTE.



Gráfica 3: coeficiente absorción linóleo

FRECUENCIA	ABSORCIÓN
125Hz	0.03
250Hz	0.03
500Hz	0.03
1000Hz	0.03
2000Hz	0.04
4000Hz	0.04
8000Hz	0.04

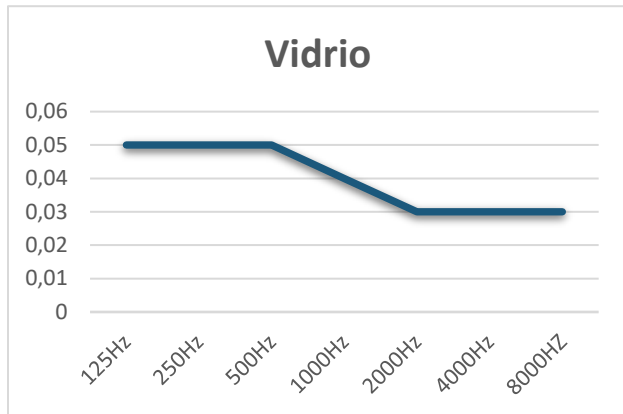
Tabla 7: coeficiente absorción linóleo. Catálogo elementos constructivos del CTE.



Gráfica 4: coeficiente absorción panel de madera

FRECUENCIA	ABSORCIÓN
125Hz	0.08
250Hz	0.08
500Hz	0.08
1000Hz	0.08
2000Hz	0.08
4000Hz	0.08
8000Hz	0.08

Tabla 8: coeficiente absorción panel de madera. Catálogo elementos constructivos del CTE.



Gráfica 5: coeficiente absorción panel de madera

FRECUENCIA	ABSORCIÓN
125Hz	0.05
250Hz	0.05
500Hz	0.05
1000Hz	0.04
2000Hz	0.03
4000Hz	0.03
8000Hz	0.03

Tabla 9: coeficiente absorción vidrio. Catálogo elementos constructivos del CTE.

4.5 APLICACIÓN DEL CTE DB-HR “PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO”

El DB-HR “protección frente al ruido” del Código técnico de la edificación establece la necesidad de adaptar los tiempos de reverberación de aulas, salas de conferencias, restaurantes y comedores, reflejando unos valores límite.

Este valor límite de tiempo de reverberación, en el caso de aulas y salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor que 350m^3 , no será mayor que 0,7s. Las exigencias se aplican a los recintos vacíos, sin ocupación y sin mobiliario, exceptuando el mobiliario fijo, como las butacas fijas en las salas de conferencias.

En este caso, tenemos que adaptarlo a aulas y salas de conferencias cuyo volumen supera los 350m^3 , ya que el aula especial I tiene un volumen de $431,02\text{m}^3$ y el aula especial II tiene un volumen de $430,50\text{m}^3$.

Para esta situación el DB-HR establece que para aulas y salas de conferencias cuyo volumen sea mayor que 350m^3 , para los cuales no son de aplicación las exigencias establecidas y por lo tanto deben ser objeto de estudio especial en cuanto al diseño acústico de la sala.

El DB-HR no regula ni los criterios, ni los procedimientos para el diseño acústico de recintos destinados a espectáculos, ni de aulas y salas de conferencias de volúmenes mayores que 350m^3 . Sin embargo, si uno de estos recintos fuera colindante con un recinto protegido o habitable de una unidad de uso diferente, deben cumplirse los valores límite de aislamiento acústico especificados en el apartado 2.1 del DB-HR.

La norma nos proporciona unas fichas justificativas en las que utiliza la fórmula de Sabine para el cálculo del tiempo de reverberación. Este dato nos servirá como orientación para posteriormente hacer un estudio mediante una simulación con una herramienta avanzada. En este caso, se ha utilizado un programa llamado EASE.



4.5.1 FICHAS JUSTIFICATIVAS. CÁLCULO DEL TR SEGÚN EL DB-HR.

HR - Documento Básico - Protección frente al ruido							
K3: Ficha justificativa del método general del tiempo de reverberación y de la absorción acústica.							
Tipo de Recinto: Aula Especial I vacía.					Volumen, V (m ³):		431,02
Elemento	Acabado	Área (m ²)	α _m Coeficiente de absorción acústica medio				Absorción Acústica (m ²) α _m ·S
			500	1000	2000	α _m	
SUELO							
Tarima	linóleo	5,95	0,03	0,03	0,04	0,03	0,18
Suelo	linóleo	9,52	0,03	0,03	0,04	0,03	0,29
Suelo G1	linóleo	7,50	0,03	0,03	0,04	0,03	0,23
Suelo G2	linóleo	8,57	0,03	0,03	0,04	0,03	0,26
Suelo G3	linóleo	9,64	0,03	0,03	0,04	0,03	0,29
Suelo G4	linóleo	10,30	0,03	0,03	0,04	0,03	0,31
Suelo G5	linóleo	11,76	0,03	0,03	0,04	0,03	0,35
Suelo G6	linóleo	12,85	0,03	0,03	0,04	0,03	0,39
Suelo G7	linóleo	23,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,69
Suelo Sala	linóleo	4,08	0,03	0,03	0,04	0,03	0,12
TECHO							
Forjado bidireccional alto	Hormigón visto	67,65	0,03	0,04	0,04	0,04	2,71
Forjado bidireccional bajo	Hormigón visto	36,03	0,03	0,04	0,04	0,04	1,44
PARAMENTOS							
Alzado 7							
Pared 7	Enfoscado de mortero	24,04	0,06	0,08	0,04	0,06	1,44
Ventana 7	Vidrio	4,32	0,05	0,04	0,03	0,04	0,17
	Aluminio	0,97	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Pared almacén	Enfoscado de mortero	10,20	0,06	0,08	0,04	0,06	0,61
Puerta almacén	Panel madera	2,80	0,08	0,08	0,08	0,08	0,22
Alzado 8							
Pared 8	Enfoscado de mortero	20,76	0,06	0,08	0,04	0,06	1,25
Pared almacén	Enfoscado de mortero	6,32	0,06	0,08	0,04	0,06	0,38



Alzado 9							
Pared 9	Enfoscado de mortero	2,53	0,06	0,08	0,04	0,06	0,15
Ventana 2	Vidrio	6,89	0,05	0,04	0,03	0,04	0,28
	Aluminio	1,46	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Pilar	Hormigón visto	0,43	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02
Forjado	Hormigón visto	4,20	0,03	0,04	0,04	0,04	0,17
Alzado 10							
Pared 10	Enfoscado de mortero	29,27	0,06	0,08	0,04	0,06	1,76
Alzado 11							
Pared 11	Enfoscado de mortero	20,89	0,06	0,08	0,04	0,06	1,25
Pizarra	Hormigón pintado	5,74	0,06	0,07	0,09	0,07	0,40
Alzado 12							
Pared 12	Enfoscado de mortero	26,12	0,06	0,08	0,04	0,06	1,57
Pilar	Hormigón visto	1,90	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08
Forjado	Hormigón visto	2,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08
Puerta	Panel madera	2,91	0,08	0,08	0,08	0,08	0,23
	Vidrio	1,63	0,05	0,04	0,03	0,04	0,07
Grada vertical							
Pared G1	linóleo	3,22	0,03	0,03	0,04	0,03	0,10
Pared G2	linóleo	3,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,09
Pared G3	linóleo	3,41	0,03	0,03	0,04	0,03	0,10
Pared G4	linóleo	3,81	0,03	0,03	0,04	0,03	0,11
Pared G5	linóleo	4,09	0,03	0,03	0,04	0,03	0,12
Pared G6	linóleo	4,61	0,03	0,03	0,04	0,03	0,14
Pared G7	linóleo	5,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,15
Pared tarima	linóleo	1,97	0,03	0,03	0,04	0,03	0,06
Huecos Escaleras	linóleo	2,25	0,03	0,03	0,04	0,03	0,07
Pilar aislado	Hormigón visto	9,11	0,03	0,04	0,04	0,04	0,36
		422,72					18,72
Objetos ⁽¹⁾	Tipo	N número	Área de absorción acústica equivalente media				Ao,m·N
			Ao,m (m ²)		Ao,m		
			500	1000	2000	m	



Absorción del aire ⁽²⁾		Coeficiente de atenuación del aire, \dot{m}_m (m ⁻¹)				4 · \dot{m}_m · V
		500	1000	2000	\dot{m}_m	
		0,003	0,005	0,001	0,006	10,34
A, (m ²) Absorción acústica del recinto resultante		$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^n A_{o,m,j} + 4 \cdot \dot{m}_m \cdot V$				29,06
T, (s) Tiempo de reverberación resultante		$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$				2,37
Absorción acústica resultante de la zona común				Absorción acústica exigida		
A (m ²)=		29,06	≥	86,20	≈ 0,2 · V	
Tiempo de reverberación resultante				Tiempo de reverberación exigido		
T (s)=		2,37	≤	0,7		
NO CUMPLE						

⁽¹⁾ Sólo para salas de conferencias de volumen hasta 350m³.

⁽²⁾ Sólo para volúmenes mayores a 250 m³.

HR - Documento Básico - Protección frente al ruido							
K3: Ficha justificativa del método general del tiempo de reverberación y de la absorción acústica.							
Tipo de Recinto: Aula Especial II vacía.						Volumen, V (m ³):	430,50
Elemento	Acabado	Área (m ²)	αm Coeficiente de absorción acústica medio				Absorción Acústica (m ²) α _m · S
			500	1000	2000	α _m	
SUELO							
Tarima	linóleo	5,95	0,03	0,03	0,04	0,03	0,18
Suelo	linóleo	10,70	0,03	0,03	0,04	0,03	0,32
Suelo G1	linóleo	6,69	0,03	0,03	0,04	0,03	0,20
Suelo G2	linóleo	8,21	0,03	0,03	0,04	0,03	0,25
Suelo G3	linóleo	9,56	0,03	0,03	0,04	0,03	0,29



Suelo G4	linóleo	10,37	0,03	0,03	0,04	0,03	0,31
Suelo G5	linóleo	11,63	0,03	0,03	0,04	0,03	0,35
Suelo G6	linóleo	12,82	0,03	0,03	0,04	0,03	0,38
Suelo G7	linóleo	27,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,81
TECHO							
Forjado bidireccional alto	Hormigón visto	67,13	0,03	0,04	0,04	0,04	2,69
Forjado bidireccional bajo	Hormigón visto	35,86	0,03	0,04	0,04	0,04	1,43
PARAMENTOS							
Alzado 1							
Pared 1	Enfoscado de mortero	29,44	0,06	0,08	0,04	0,06	1,77
Ventana 1	Vidrio	4,32	0,05	0,04	0,03	0,04	0,17
	Aluminio	0,97	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Alzado 2							
Pared 2	Enfoscado de mortero	26,25	0,06	0,08	0,04	0,06	1,58
Alzado 3							
Pared 3	Enfoscado de mortero	2,52	0,06	0,08	0,04	0,06	0,15
Ventana 2	Vidrio	6,80	0,05	0,04	0,03	0,04	0,27
	Aluminio	1,46	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Pilar	Hormigón visto	0,43	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02
Forjado	Hormigón visto	4,18	0,03	0,04	0,04	0,04	0,17
Alzado 4							
Pared 4	Enfoscado de mortero	29,27	0,06	0,08	0,04	0,06	1,76
Alzado 5							
Pared 5	Enfoscado de mortero	20,89	0,06	0,08	0,04	0,06	1,25
Pizarra	Hormigón pintado	5,74	0,06	0,07	0,09	0,07	0,40
Alzado 6							
Pared 6	Enfoscado de mortero	25,95	0,06	0,08	0,04	0,06	1,56
Pilar	Hormigón visto	1,91	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08
Forjado	Hormigón visto	2,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08
Puerta	Panel madera	2,91	0,08	0,08	0,08	0,08	0,23
	Vidrio	1,63	0,05	0,04	0,03	0,04	0,07
Grada vertical							



Pared G1	linóleo	2,82	0,03	0,03	0,04	0,03	0,08	
Pared G2	linóleo	2,72	0,03	0,03	0,04	0,03	0,08	
Pared G3	linóleo	3,41	0,03	0,03	0,04	0,03	0,10	
Pared G4	linóleo	3,81	0,03	0,03	0,04	0,03	0,11	
Pared G5	linóleo	4,10	0,03	0,03	0,04	0,03	0,12	
Pared G6	linóleo	4,61	0,03	0,03	0,04	0,03	0,14	
Pared G7	linóleo	5,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,15	
Pared tarima	linóleo	1,97	0,03	0,03	0,04	0,03	0,06	
Hueco gradas	linóleo	1,66	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	
Huecos Escaleras	linóleo	2,25	0,03	0,03	0,04	0,03	0,07	
Pilar aislado	Hormigón visto	9,11	0,03	0,04	0,04	0,04	0,36	
		414,06					0,04	18,14
Objetos ⁽¹⁾	Tipo	N número	Área de absorción acústica equivalente media $A_{o,m}$ (m ²)				Ao,m·N	
			500	1000	2000	Ao, m		
Absorción del aire ⁽²⁾		Coeficiente de atenuación del aire, \dot{m}_m (m ⁻¹)				4· \dot{m}_m ·V		
		500	1000	2000	\dot{m}_m			
			0,003	0,005	0,001	0,00 6	10,33	
A, (m ²) Absorción acústica del recinto resultante		$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^n A_{o,m,j} + 4 \cdot m_m \cdot V$				28,47		
T, (s) Tiempo de reverberación resultante		$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$				2,42		
Absorción acústica resultante de la zona común		Absorción acústica exigida						
A (m ²)=		28,47	≥	86,1	≈	0,2·V		
Tiempo de reverberación resultante		Tiempo de reverberación exigido						
T (s)=		2,42	≤	0,7				
NO CUMPLE								



⁽¹⁾ Sólo para salas de conferencias de volumen hasta 350m³.

⁽²⁾ Sólo para volúmenes mayores a 250 m³.

4.5.2 SIMULACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTA AVANZADA EASE “ENHANCED ACOUSTIC SIMULATOR FOR ENGINEERS”

El software EASE ofrece a los diseñadores y consultores del sistema un valioso conjunto de herramientas para todos los aspectos de la práctica profesional, desde el modelado detallado y realista de la acústica del recinto y el rendimiento del sistema de sonido hasta presentaciones informativas y atractivas para los clientes.

Sacar las conjeturas del diseño del sistema, ayudan a eliminar errores costosos y reducir el tiempo de instalación. Ayudan a los diseñadores en el aprendizaje y el crecimiento mediante la visualización gráfica de predicciones precisas de la acústica del mundo real. Los modelos EASE son una forma de explorar opciones y evaluar lo que funciona y lo que no funciona, antes de que el lugar virtual se convierta en un sitio de trabajo y los cambios consuman mucho tiempo y sean costosos.

- Beneficios de la simulación EASE:
- Convince a los clientes con cálculos realizados por el software de simulación electroacústica estándar.
- Asegurarse de cumplir con los requisitos para SPL, STI y otras demandas con el mínimo esfuerzo.
- Tomar conciencia de los obstáculos que permanecerían ocultos sin simulación.
- Analizar y resolver problemas acústicos antes de que surjan.
- Ahorrar tiempo y dinero evitando múltiples iteraciones en la obra.
- Utilizar la base de datos de altavoces más grande y de mayor calidad para encontrar la solución óptima.

Texto 2: Ahnert Feistel Media Group, Berlín, Alemania. Consulta: 7 diciembre 2016. Disponible en <http://ease.afmg.eu>.

4.5.3 MODELADO ACÚSTICO MEDIANTE HERRAMIENTA EASE

A través de las fichas justificativas del CTE DB-HR obtenemos tiempos de reverberación aproximados, pero con la simulación con EASE se obtienen unos resultados más precisos para poder saber que comportamiento tiene a nivel acústico las aulas actualmente y poder posteriormente trabajar las posibles mejoras de un modo más real.

Se han medido las aulas “in situ” mediante un metro láser para poder introducir los datos en el software EASE que va a ser la base de todo el dibujo. Éste nos proporcionará áreas, volúmenes y mediciones acústicas necesarias para nuestro estudio.



De forma esquemática se han realizado estos pasos:

1. Definir geoméricamente las aulas.
2. Asignar materiales a cada cara de las aulas.
3. Definir las áreas de audiencia y las posiciones de los oyentes.
4. Introducir fuentes sonoras.

Finalizado el modelado de las aulas e introducidas las características con las que trabajamos, obtendremos unos parámetros basados en la teoría estadística, como:

- Tiempo de reverberación.
- Nivel de presión sonora directo.
- Nivel de presión sonora total.
- Relación directo/reverberante, D/R.

Para saber que estamos trabajando con un modelo virtual que se asemeja a la realidad hay que validarlo, es decir, trabajar con una serie de herramientas y aparatos acústicos y comprobar que los resultados que da en sala son prácticamente similares a los resultados que nos proporciona el software EASE.

4.5.3.1 DEFINICIÓN GEOMETRICA DE LAS AULAS

Definir geoméricamente el recinto se puede hacer en EASE mediante las mediciones obtenidas “in situ” o importar el dibujo desde otro programa. En la definición de las aulas, se ha hecho completamente en EASE.

El software EASE permite crear el modelo acústico en 3D. En este caso se ha optado por simplificar el modelo con respecto al original, integrando los pilares y elementos que sobresalen como parte de los paramentos en los que están contenidos, las ventanas se definen mediante un contorno y se prescinde de luminarias y elementos auxiliares.

En el caso de las butacas de madera se ha optado por definir las de manera que, la pared horizontal de las gradas se define como madera y la pared vertical como linóleo (suelo).

Una vez introducidos los vértices mediante coordenadas, se definen las caras que tienen que pasar por cada uno de esos vértices. Cada una de las caras hará que conformen el volumen del aula. Para seguir con el estudio acústico debemos asegurarnos que el volumen está completamente cerrado.

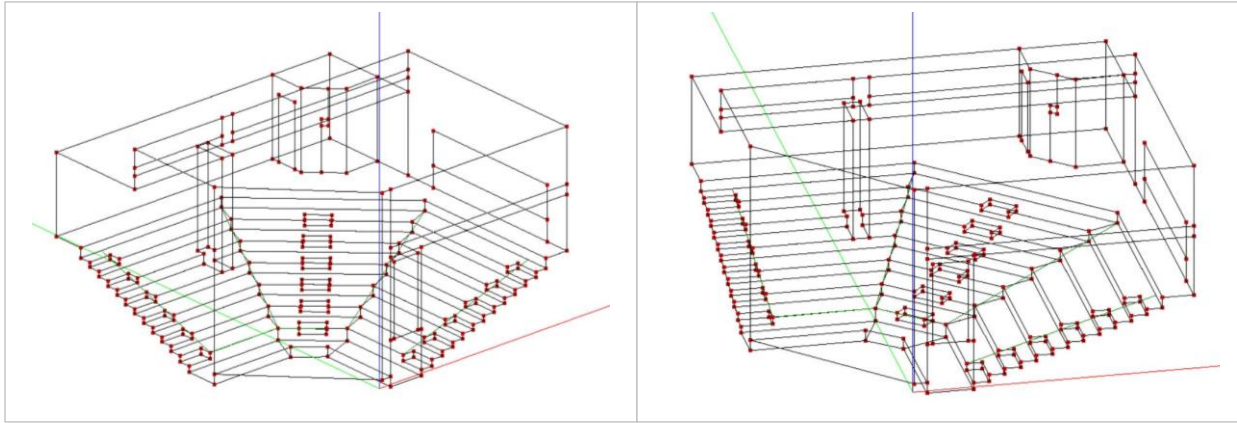


Ilustración 30: Aula especial 1, vértices. Fuente: EASE.

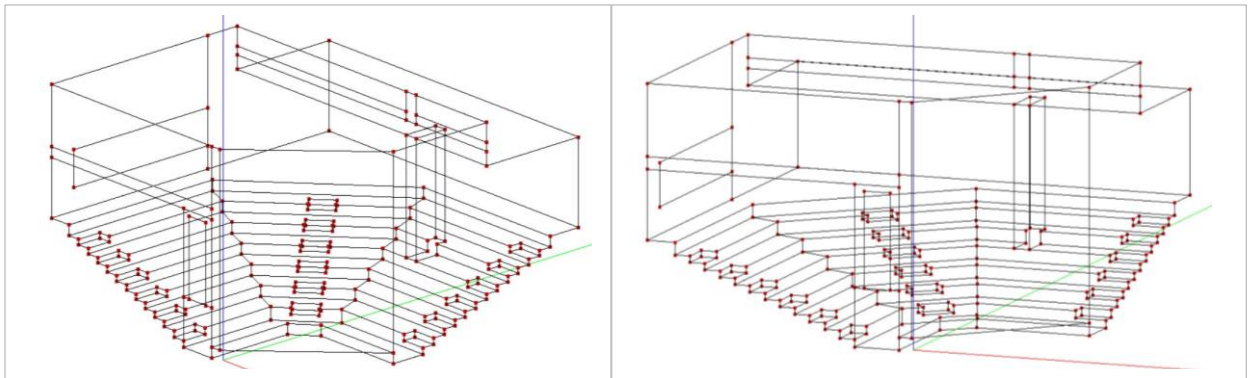


Ilustración 31: Aula especial 2, vértices. Fuente: EASE.

Para el aula especial I se han utilizado 256 vértices para formar 144 caras y para el aula especial II se han utilizado 237 vértices para formar 132 caras.

4.5.3.2 ASIGNACIÓN DE MATERIALES

Una vez hecha la geometría de las aulas especiales, procedemos a asignar materiales a las distintas caras.

EASE dispone de una base de datos de materiales, pero se ha optado por crear los materiales utilizando los valores del coeficiente de absorción que nos proporciona el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE.



HR –	DOCUMENTO BÁSICO	PROTECCIÓN	FRENTE	AL	RUIDO	EI	
			α				
ELEMENTO	MATERIAL	500Hz	1000Hz	2000Hz	α_m	Área (m ²)	%
PAREDES	<i>Enfoscado de mortero</i>	0,06	0,08	0,04	0,06	152,35	35,22
TECHO	<i>Hormigón visto</i>	0,03	0,04	0,04	0,04	122,08	28,22
SUELO	<i>Linóleo</i>	0,03	0,03	0,04	0,03	102,31	23,65
PUERTA	<i>Panel de madera</i>	0,08	0,08	0,08	0,08	42,88	9,91
VENTANA	<i>Vidrio</i>	0,05	0,04	0,03	0,04	12,92	3

Tabla 10: coeficiente de absorción media de los materiales y porcentaje que ocupan dichos materiales en el aula especial I.

HR –	DOCUMENTO BÁSICO	PROTECCIÓN	FRENTE	AL	RUIDO	EII	
			α				
ELEMENTO	MATERIAL	500Hz	1000Hz	2000Hz	α_m	Área (m ²)	%
PAREDES	<i>Enfoscado de mortero</i>	0,06	0,08	0,04	0,06	141,42	34,31
TECHO	<i>Hormigón visto</i>	0,03	0,04	0,04	0,04	121,53	29,48
SUELO	<i>Linóleo</i>	0,03	0,03	0,04	0,03	96,35	23,38
PUERTA	<i>Panel de madera</i>	0,08	0,08	0,08	0,08	40,44	9,81
VENTANA	<i>Vidrio</i>	0,05	0,04	0,03	0,04	12,44	3,02

Tabla 11: coeficiente de absorción media de los materiales y porcentaje que ocupan dichos materiales en el aula especial II.

4.5.3.3 DEFINIR LAS ÁREAS DE AUDIENCIA Y LAS POSICIONES DE LOS OYENTES

Para simular correctamente el comportamiento de las aulas debemos definir unas áreas de audiencia que se sitúan en las gradas. Estas áreas se interpretan a una altura de 1,20m con respecto las gradas, ya que es la altura a la que se sitúan los oyentes cuando están sentados.

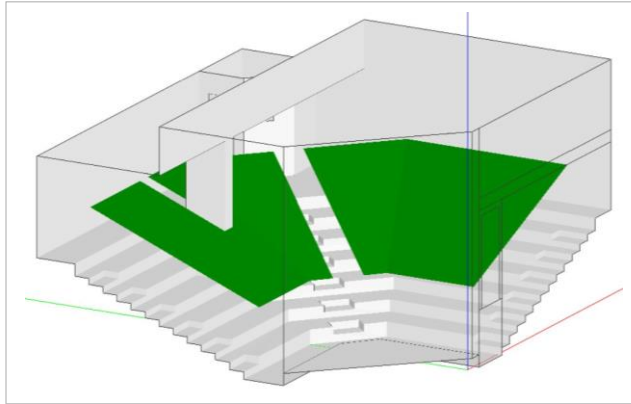


Ilustración 33: Aula especial 1, áreas de audiencia.

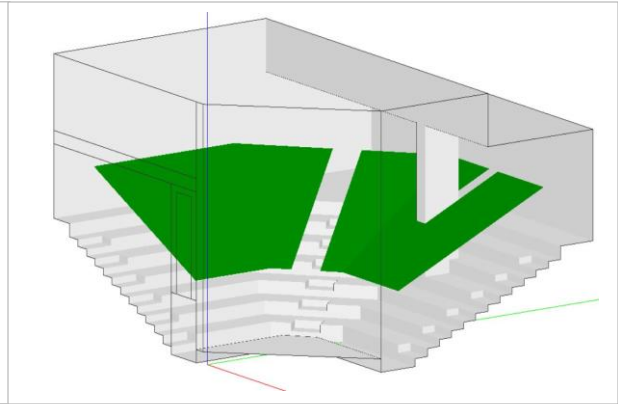


Ilustración 32: Aula especial 2, áreas de audiencia.

Según el tamaño de las aulas, se ha optado por 5 posiciones de los micrófonos (oyentes).

AULA ESPECIAL I - MICROFONOS (OYENTES)				
PUNTO	X	Y	Z	POSICIÓN
M1	2,50	3,17	1,94	Segunda grada
M2	1,19	6,75	2,47	Cuarta grada
M3	-1,61	8,95	3,25	Séptima grada
M4	5,10	5,57	3,16	Sexta grada
M5	4,10	1,57	2,55	Quinta grada

Tabla 12: posición de los micrófonos dentro del aula especial 1. Fuente: EASE.

AULA ESPECIAL II - MICROFONOS (OYENTES)				
PUNTO	X	Y	Z	POSICIÓN
M1	-5,05	1,67	2,90	Quinta grada
M2	-2,75	4,37	2,22	Tercera grada
M3	-3,15	7,27	3,12	Sexta grada
M4	1,71	7,35	2,65	Quinta grada
M5	-0,49	5,47	1,95	Segunda grada

Tabla 13: posición de los micrófonos dentro del aula especial 2. Fuente: EASE.

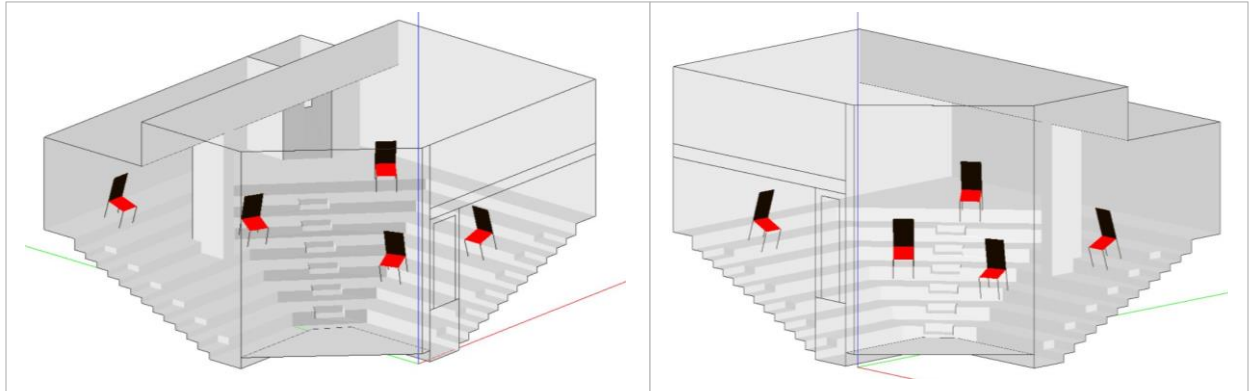


Ilustración 34: Aula especial 1, posiciones oyentes. Fuente: EASE. Ilustración 35: Aula especial 2, posiciones oyentes. Fuente: EASE.

4.5.3.4 INTRODUCCIÓN FUENTES SONORAS

Se ha utilizado una fuente sonora que es un dodecaedro que emite sonido de forma omnidireccional. El software EASE lo nombra como “sphere”. En este caso, en las aulas especiales se ha posicionado dos fuentes sonoras. La simulación se ha realizado primero con una fuente y después con la otra y se recogen los resultados obtenidos.

AULA ESPECIAL I - FUENTES				
PUNTO	X	Y	Z	POSICIÓN
F1	0,80	2,00	1,50	tarima
F2	-1,20	3,00	1,50	pasillo

Tabla 14: coordenadas de las fuentes en el aula especial 1. Fuente: EASE.

AULA ESPECIAL II - FUENTES				
PUNTO	X	Y	Z	POSICIÓN
F1	-0,80	2,00	1,50	pasillo
F2	1,20	3,00	1,50	tarima

Tabla 15: coordenadas de las fuentes en el aula especial 2. Fuente: EASE.

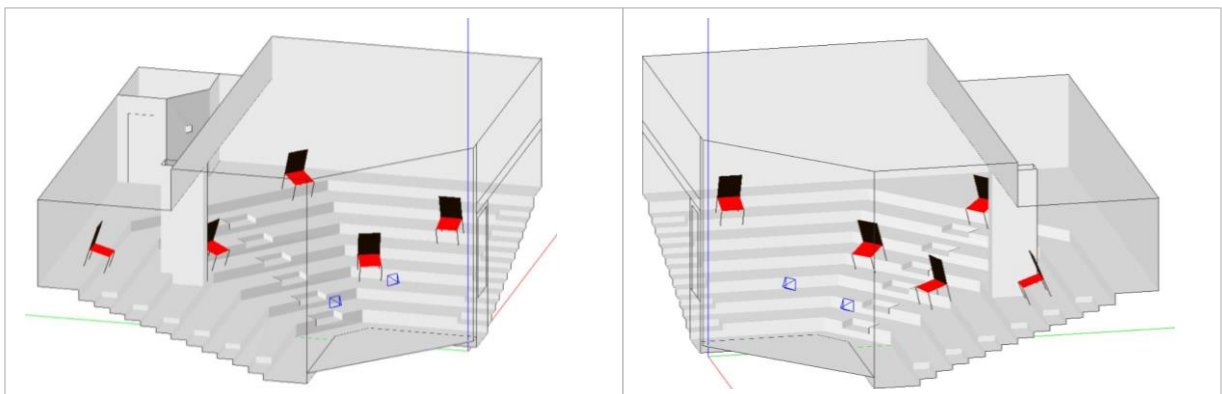


Ilustración 36: Aula especial 1, posiciones fuentes. Fuente: EASE.

Ilustración 37: Aula especial 2, posiciones fuentes. Fuente: EASE.



La fuente seleccionada emite 96,78dB de Presión sonora (SPL), con una potencia de 4,762W a 1m.

FRECUENCIA	POTENCIA	SPL (1m)
125Hz	4,762	96,78
250 Hz	4,762	96,78
500Hz	4,762	96,78
1000HZ	4,762	96,78
2000Hz	4,762	96,78
4000Hz	4,762	96,78
8000HZ	4,762	96,78

Tabla 16: potencia de la fuente en todas las frecuencias. Fuente: EASE.

4.6 RESULTADOS OBTENIDOS

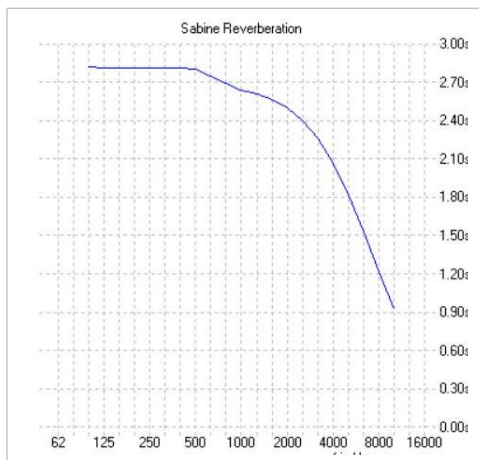
Se muestran los resultados obtenidos con el software informático EASE 4.4. En las tablas se muestran datos obtenidos de los distintos puntos de audiencia en relación a cada fuente sonora. La elección de la posición de las fuentes sonoras y puntos de audiencia viene determinada por la UNE-EN ISO 3382-2:2008.

Se realizaría la validación del modelo a través de estas mediciones “in situ” realizadas en el aula. Se hace una comparación con las obtenidas en EASE y si son semejantes podemos decir que el modelo queda validado. Entonces, los datos obtenidos de la simulación con el software EASE podemos decir que son válidos para la realización de un proyecto real.

4.6.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

AULA ESPECIAL I

El tiempo de reverberación calculado con el software EASE 4.4 utilizando la fórmula de Sabine:



Gráfica6: tiempo reverberación Sabine Aula Especial 1, estado actual. Fuente: EASE.

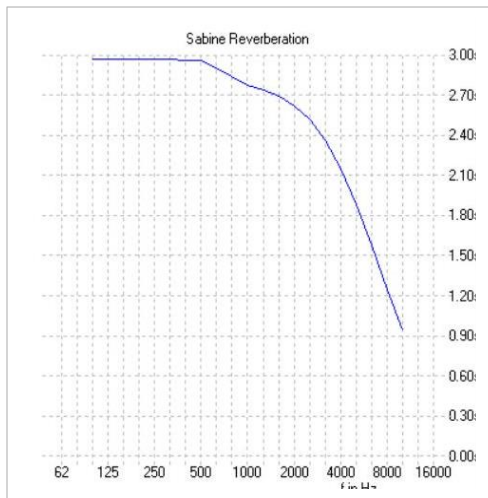
FRECUENCIA	TIEMPO REVERBERACIÓN
125Hz	2,82s
250HZ	2,81s
500HZ	2,80s
1000HZ	2,64s
2000HZ	2,50s
4000Hz	2,07s
8000Hz	1,22s

Tabla 17: tiempo de reverberación aula especial 1, estado actual. Fuente: EASE.



AULA ESPECIAL II

El tiempo de reverberación calculado con el software EASE 4.4 utilizando la fórmula de Sabine:



FRECUENCIA	TIEMPO REVERBERACIÓN
125Hz	2,97s
250HZ	2,97s
500HZ	2,96s
1000HZ	2,77s
2000HZ	2,62s
4000Hz	2,15s
8000Hz	1,25s

Tabla18: tiempos de reverberación del aula especial 2, estado actual. Fuente: EASE.

Gráfica7: tiempo reverberación Sabine Aula Especial 2, estado actual. Fuente: EASE.

De la gráfica se deduce que, los valores del Tiempo de reverberación del aula especial I y II son muy elevados en prácticamente todo el rango de frecuencias.

En las frecuencias bajas (125Hz-250Hz) y medias (500Hz-1KHz) el aula especial I tiene un TR muy elevado, llegando a valores de 2,82s y el aula especial II de 2,97s, por lo tanto, la inteligibilidad de la palabra no es adecuada para un recinto como este. En cambio, en altas frecuencias es mucho menos llegando a 1,22s y 1,25s respectivamente, tiempo que se asemeja al valor que nos pide la DB-HR (0,7s).

El tiempo de reverberación no es una magnitud suficiente para poder considerar adecuada la acústica del aula especial I y II. Ésta nos permite determinar si su comportamiento se adecúa a nuestras necesidades. Por lo tanto, adecuaremos las aulas a unos valores de TR de 1,00s aproximadamente, ya que, con un TR de 1,00s el aula especial I y II mejorarían considerablemente el comportamiento acústico que presenta en la actualidad.

El DB-HR establece como valor máximo de TR en aulas de 0,7s. En nuestro caso, como partimos de valores tan elevados, bajar los valores en torno a 1,00s supone un reto y es una mejora más factible.

4.6.2 NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO (SPLd).

Nos muestra la cantidad de sonido directo que llega a la sala sin ningún tipo de reflexiones.

Se muestra a continuación los valores obtenidos con EASE 4.4 para cada posición fuente-punto de audiencia:



4.6.2.1 AULA ESPECIAL 1

4.6.2.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	90,29	83,04	79,20	81,46	85,92
250Hz	90,29	83,03	79,20	81,46	85,92
500Hz	90,29	83,02	79,18	81,45	85,91
1000Hz	90,28	83,02	79,17	81,44	85,91
2000Hz	90,27	82,99	79,14	81,41	85,89
4000Hz	90,24	82,91	79,01	81,31	85,83
8000Hz	90,10	82,61	78,53	80,95	85,61

Tabla18: nivel de presión sonora directo del aula especial 1-Fuente1. Fuente: EASE.

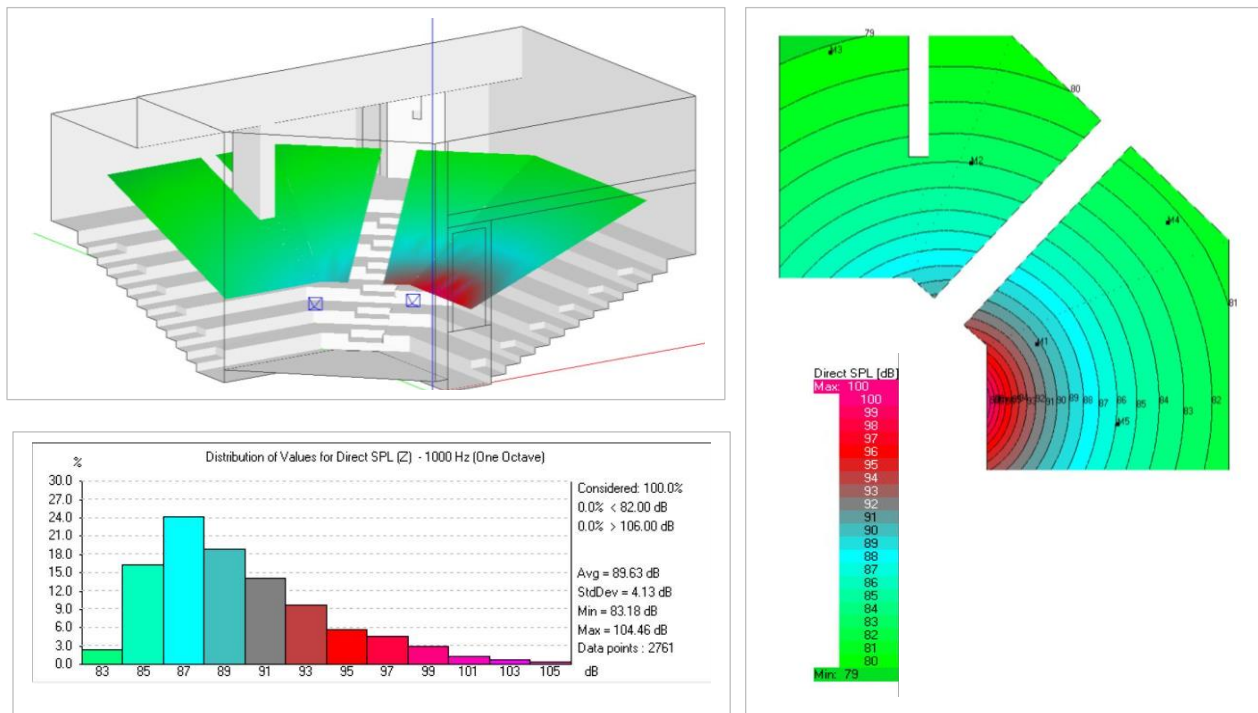


Ilustración 38: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.



4.6.2.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	85,34	83,61	80,91	79,87	81,83
250Hz	85,34	83,61	80,90	79,86	81,82
500Hz	85,33	83,60	80,89	79,85	81,82
1000Hz	85,33	83,59	80,88	79,84	81,80
2000Hz	85,31	83,57	80,85	79,81	81,78
4000Hz	85,25	83,50	80,75	79,69	81,69
8000Hz	85,01	83,21	80,36	79,25	81,33

Tabla19: nivel de presión sonora directo del aula especial 1-fuente 2. Fuente: EASE.

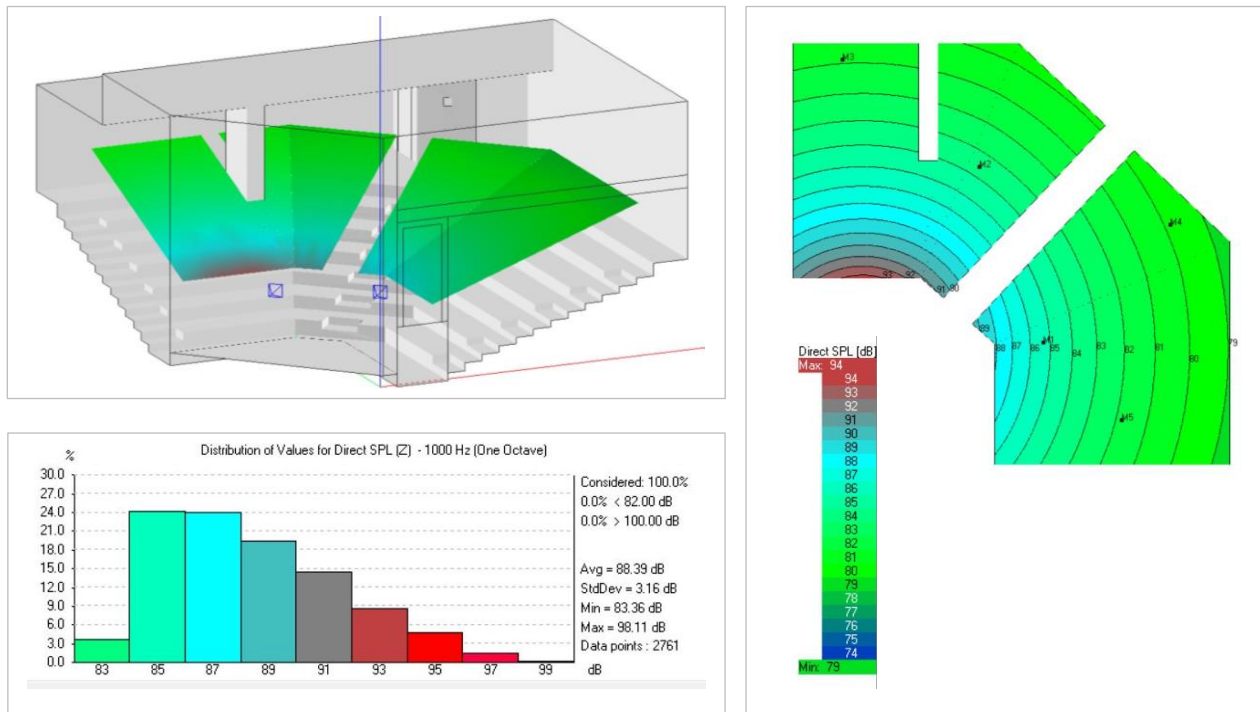


Ilustración 39: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.

Los datos nos muestran que los valores más grandes se encuentran más próximos a la fuente sonora, esto se debe a la simulación basada en la norma UNE-EN ISO 3382-2: Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos.

El valor de este campo depende de la posición del punto en el que se encuentra el oyente y no las características geométricas de la sala.



El estudio de éste parámetro se debe a que conociendo el valor de éste respecto al valor del campo reverberante se puede estimar la inteligibilidad. Para ver el comportamiento de la sala se ha simulado el campo sonoro directo a 1000Hz.

4.6.2.2 AULA ESPECIAL 2

4.6.2.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	83,74	86,80	81,22	81,18	85,86
250Hz	83,73	86,80	81,22	81,18	85,86
500Hz	83,73	86,80	81,21	81,17	85,86
1000Hz	83,72	86,79	81,20	81,16	85,85
2000Hz	83,70	86,78	81,17	81,13	85,83
4000Hz	83,62	86,72	81,07	81,03	85,77
8000Hz	83,34	86,52	80,69	80,65	85,55

Tabla 20: nivel de presión sonora directo del aula especial 2-fuente1. Fuente: EASE.

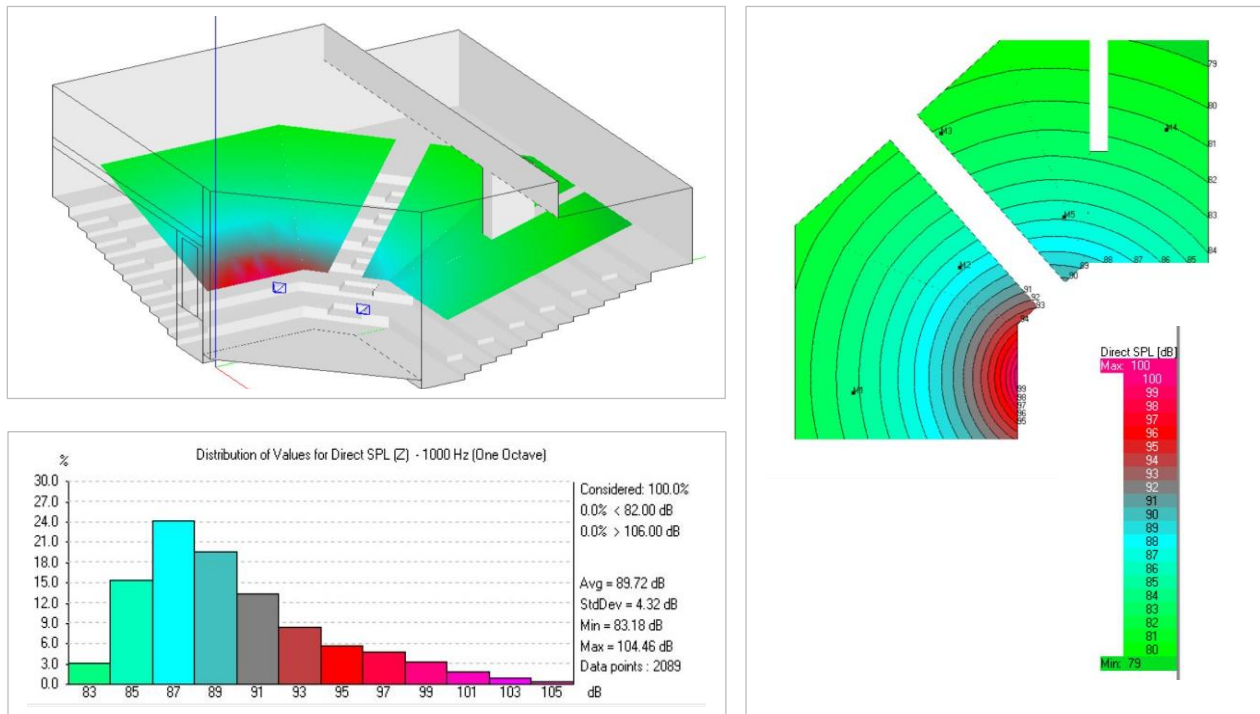


Ilustración 40: Histograma Aula Especial 2-fuente1. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.



4.6.2.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	80,46	84,22	80,78	83,66	87,16
250Hz	80,46	84,22	80,77	83,65	87,16
500Hz	80,45	84,21	80,76	83,65	87,15
1000Hz	80,43	84,21	80,75	83,64	87,14
2000Hz	80,40	84,19	80,72	83,62	87,13
4000Hz	80,30	84,12	80,62	83,54	87,08
8000Hz	79,88	83,65	80,22	83,26	86,89

Tabla21: nivel de presión sonora directo del aula 2-fuente2. Fuente: EASE.

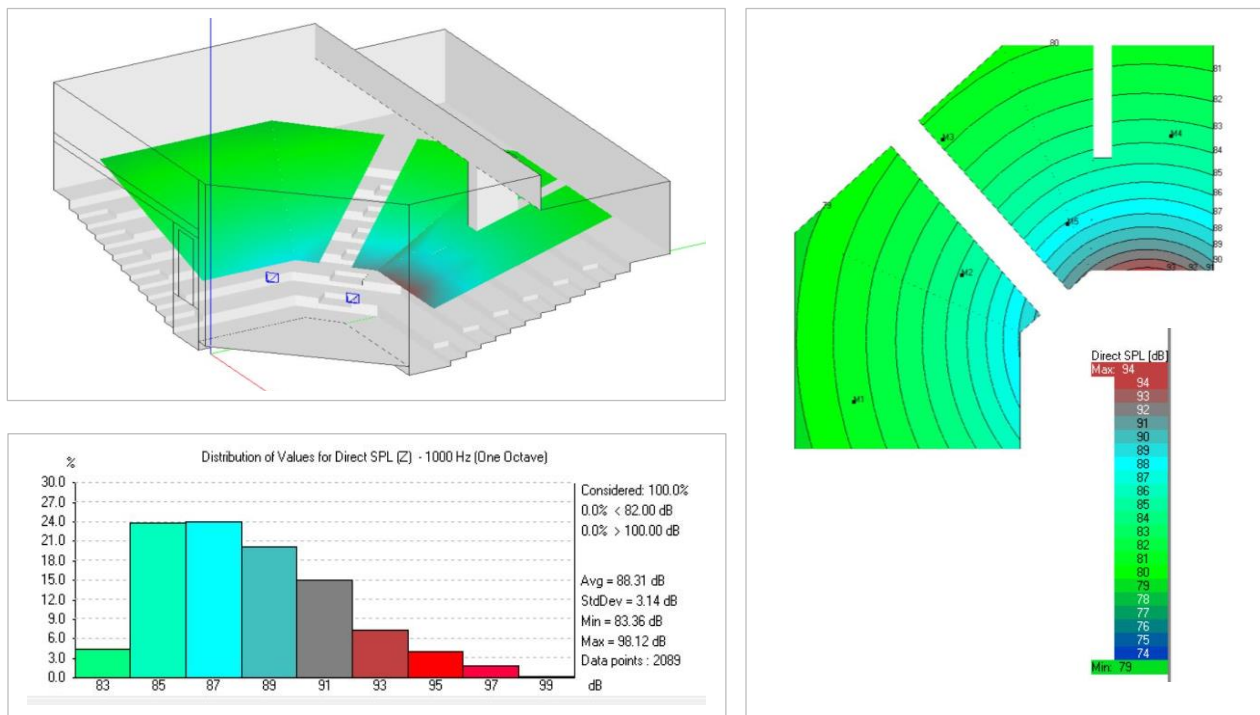


Ilustración 41: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.

En general se tratan de valores elevados, por lo tanto, el sistema es bueno ya que hay buena cobertura de sonido directo. Esto es debido, en parte, a la potencia de la fuente utilizada.



4.6.3 NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL (totalSPL)

Se muestra a continuación los valores obtenidos con EASE 4.4 para cada posición fuente-punto de audiencia:

4.6.3.1 AULA ESPECIAL 1

4.6.3.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	100,01	99,62	99,56	99,59	99,71
250Hz	100,01	99,61	99,56	99,59	99,70
500Hz	99,99	99,60	99,54	99,57	99,69
1000Hz	99,74	99,33	99,27	99,29	99,42
2000Hz	99,54	99,10	99,03	99,07	99,20
4000Hz	98,82	98,29	98,22	98,25	98,41
8000Hz	96,90	96,08	95,96	96,02	96,27

Tabla22: nivel de presión sonora total aula especial 1- fuente1. Fuente: EASE.

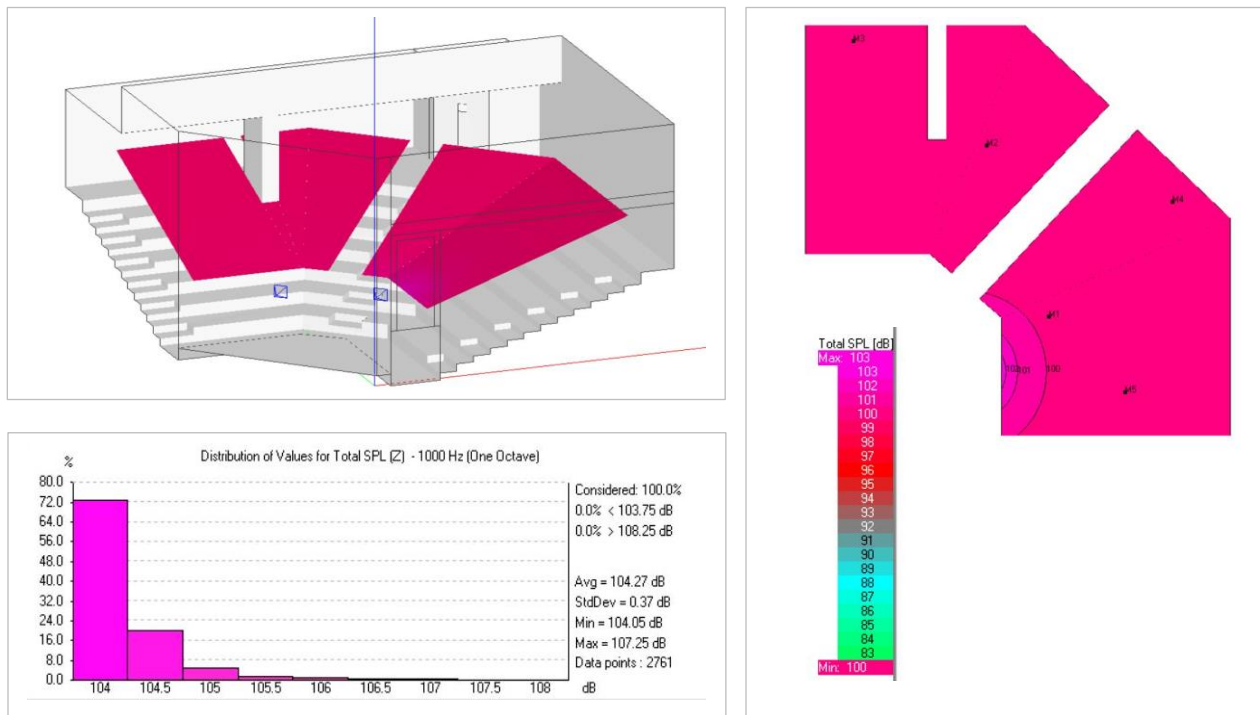


Ilustración 42: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.



4.6.3.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	99,68	99,63	99,58	99,57	99,59
250Hz	99,68	99,63	99,58	99,56	99,59
500Hz	99,66	99,61	99,56	99,55	99,58
1000Hz	99,40	99,34	99,29	99,27	99,30
2000Hz	99,17	99,11	99,06	99,04	99,07
4000Hz	98,38	98,31	98,24	98,23	98,26
8000Hz	96,23	96,11	96,00	95,98	96,03

Tabla23: nivel de presión sonora tota del aula especial 1-fuente 2. Fuente: EASE.

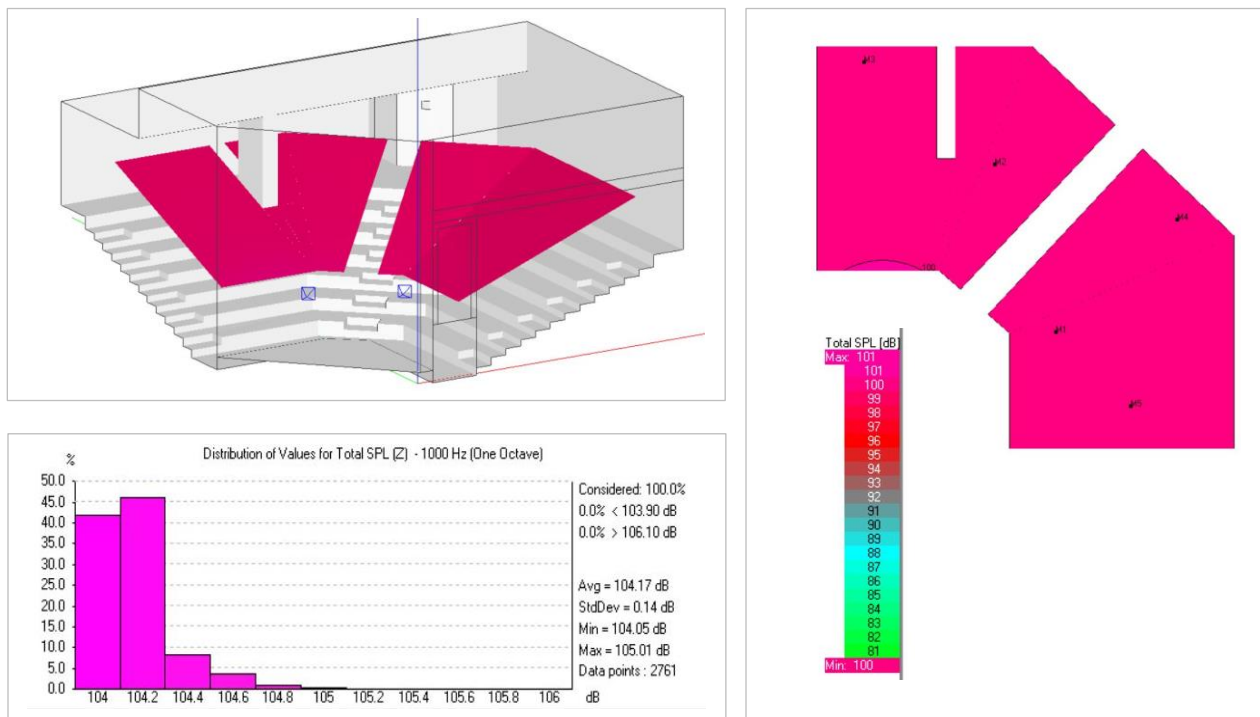


Ilustración 43: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.



4.6.3.2 AULA ESPECIAL 2

4.6.3.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	99,88	99,99	99,84	99,84	99,95
250Hz	99,88	99,99	99,83	99,83	99,95
500Hz	99,86	99,97	99,82	99,82	99,93
1000Hz	99,58	99,69	99,53	99,53	99,65
2000Hz	99,34	99,46	99,28	99,28	99,41
4000Hz	98,50	98,65	98,44	98,44	98,59
8000Hz	96,23	96,47	96,13	96,13	96,38

Tabla 24: nivel de presión sonora total aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.

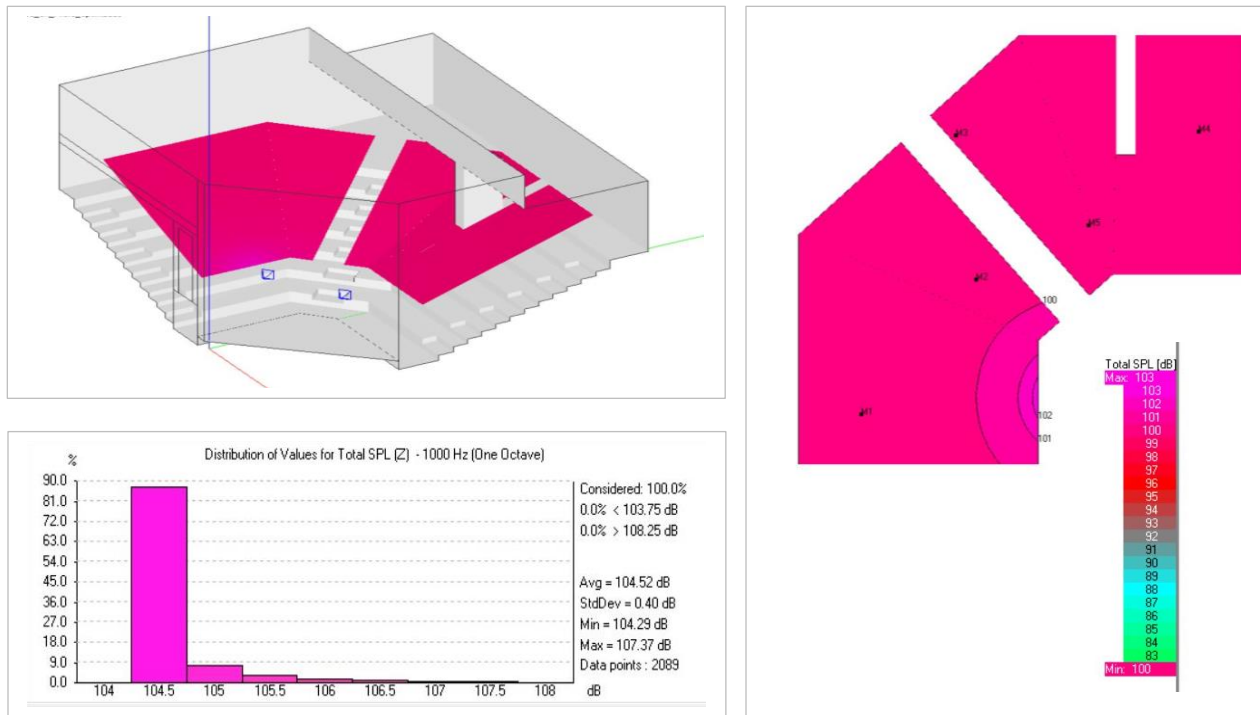


Ilustración 44: Histograma Aula Especial 2-fuente 1. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.



4.6.3.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	99,83	99,90	99,83	99,88	100,01
250Hz	99,82	99,89	99,83	99,88	100,00
500Hz	99,81	99,87	99,81	99,86	99,99
1000Hz	99,52	99,59	99,52	99,57	99,71
2000Hz	99,27	99,35	99,28	99,34	99,48
4000Hz	98,42	98,52	98,43	98,50	98,67
8000Hz	96,11	96,26	96,12	96,23	96,51

Tabla 25: nivel de presión sonora total del aula especial 2-fuente 2. Fuente: EASE.

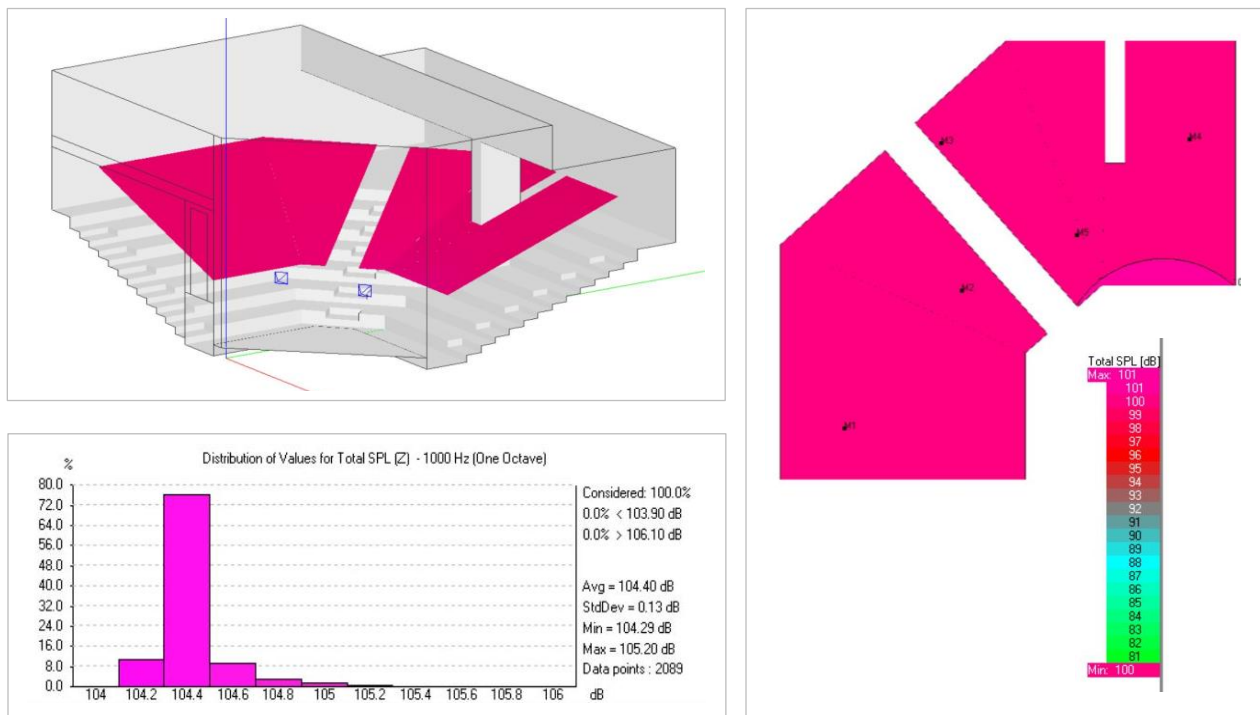


Ilustración 45: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.

Los valores obtenidos del nivel de presión sonora total representan la suma del nivel de presión sonora directo y el nivel de presión sonora reverberante.

Los valores obtenidos en las zonas de audiencia son bastante uniformes ya que están todos en torno a 104 dB.



Los valores obtenidos son elevados, debido a la alta potencia de las fuentes sonoras empleadas en la simulación, tal y como establece la norma UNE-EN ISO 3382-2:2008. Estos valores variarían en función de la potencia de la fuente sonora.

4.6.4 NIVEL DE RELACIÓN ENTRE CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO)

4.6.4.1 AULA ESPECIAL 1

4.6.4.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	-9,23	-16,48	-20,32	-18,06	-13,60
250Hz	-9,23	-16,49	-20,32	-18,06	-13,60
500Hz	-9,21	-16,48	-20,32	-18,05	-13,59
1000Hz	-8,94	-16,20	-20,05	-17,78	-13,31
2000Hz	-8,72	-16,00	-19,85	-17,58	-13,10
4000Hz	-7,93	-15,26	-19,16	-16,86	-12,34
8000Hz	-5,78	-13,27	-17,35	-14,83	-10,27

Tabla 26: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATIO). Aula especial 1-fuente1. Fuente: EASE.

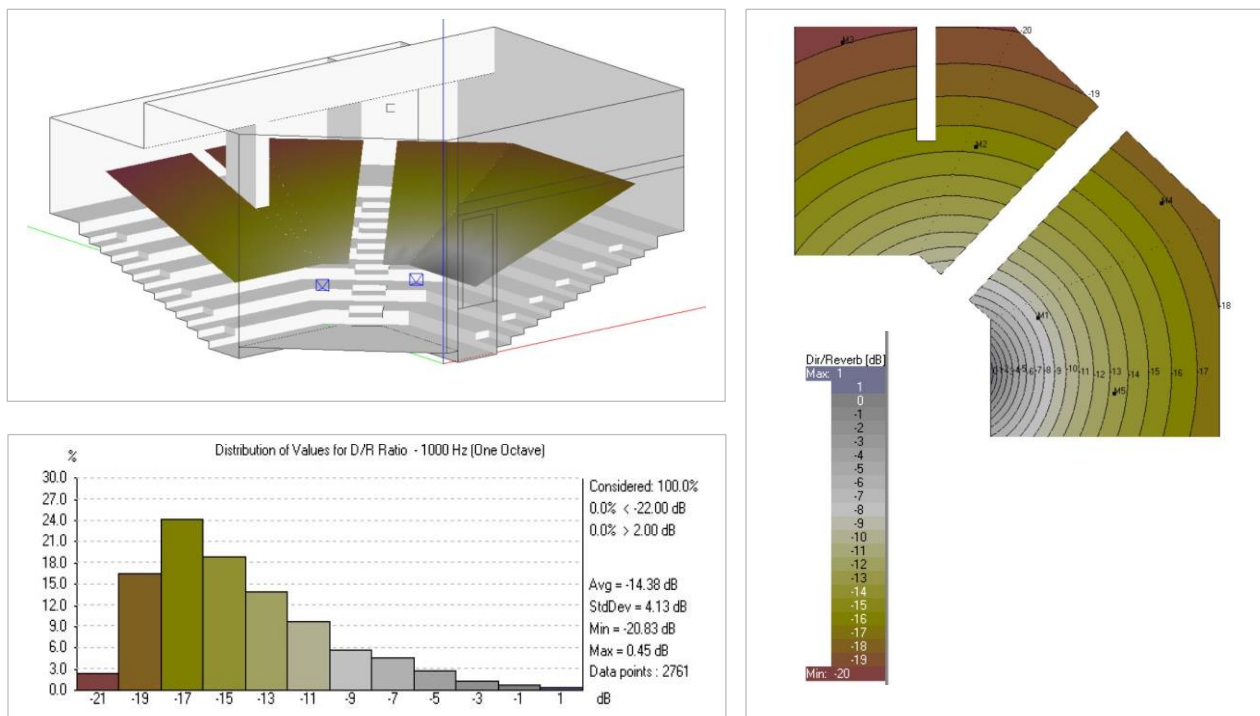


Ilustración 46: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATIO). Fuente: EASE.



4.6.4.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	-14,18	-15,91	-18,61	-19,65	-17,69
250Hz	-14,18	-15,91	-18,62	-19,66	-17,70
500Hz	-14,17	-15,90	-18,62	-19,65	-17,68
1000Hz	-13,89	-15,63	-18,34	-19,38	-17,42
2000Hz	-13,68	-15,42	-18,14	-19,18	-17,21
4000Hz	-12,92	-14,67	-17,42	-18,48	-16,48
8000Hz	-10,87	-12,67	-15,52	-16,63	-14,55

Tabla 27: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATiO). Aula especial 1-fuente 2. Fuente: EASE:

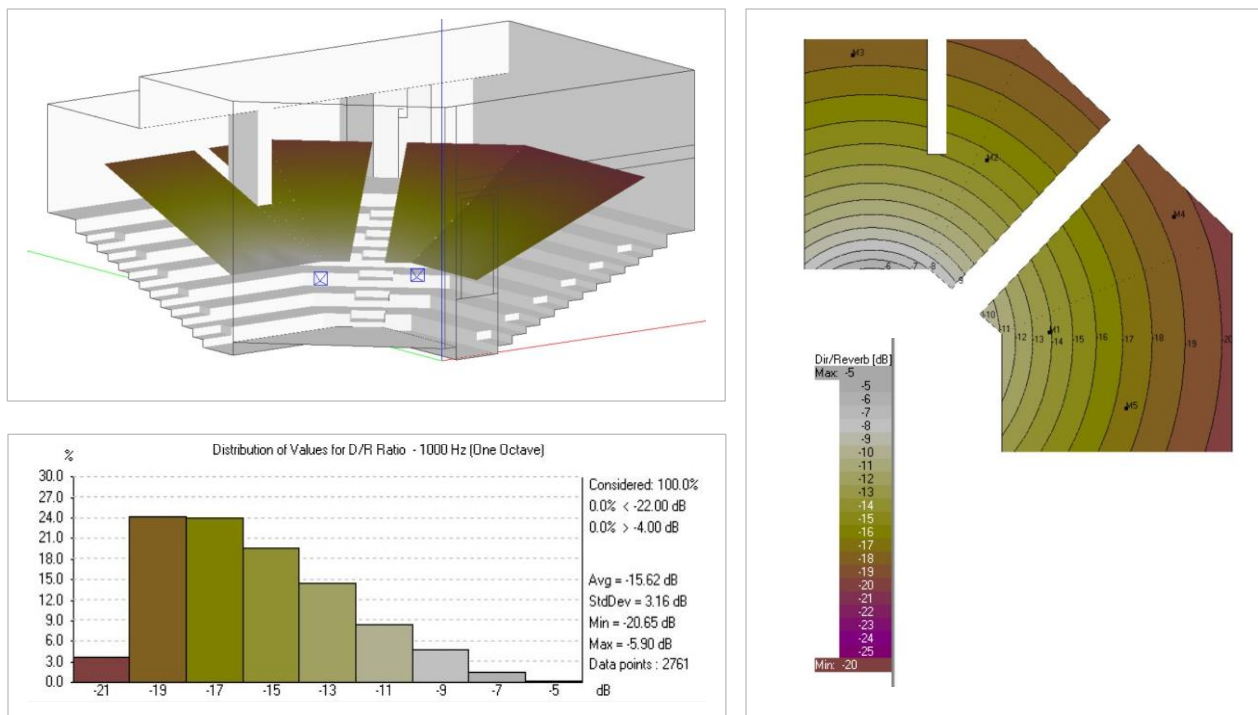


Ilustración 47: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATiO).

Fuente: EASE



4.6.4.2 AULA ESPECIAL 2

4.6.4.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	-16,04	-12,98	-18,56	-18,60	-13,92
250Hz	-16,04	-12,97	-18,55	-18,59	-13,91
500Hz	-16,03	-12,96	-18,55	-18,59	-13,90
1000Hz	-15,74	-12,67	-18,26	-18,30	-13,61
2000Hz	-15,52	-12,44	-18,05	-18,09	-13,39
4000Hz	-14,74	-11,64	-17,29	-17,33	-12,59
8000Hz	-12,67	-9,49	-15,32	-15,36	-10,46

Tabla 28: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATIO). Aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.

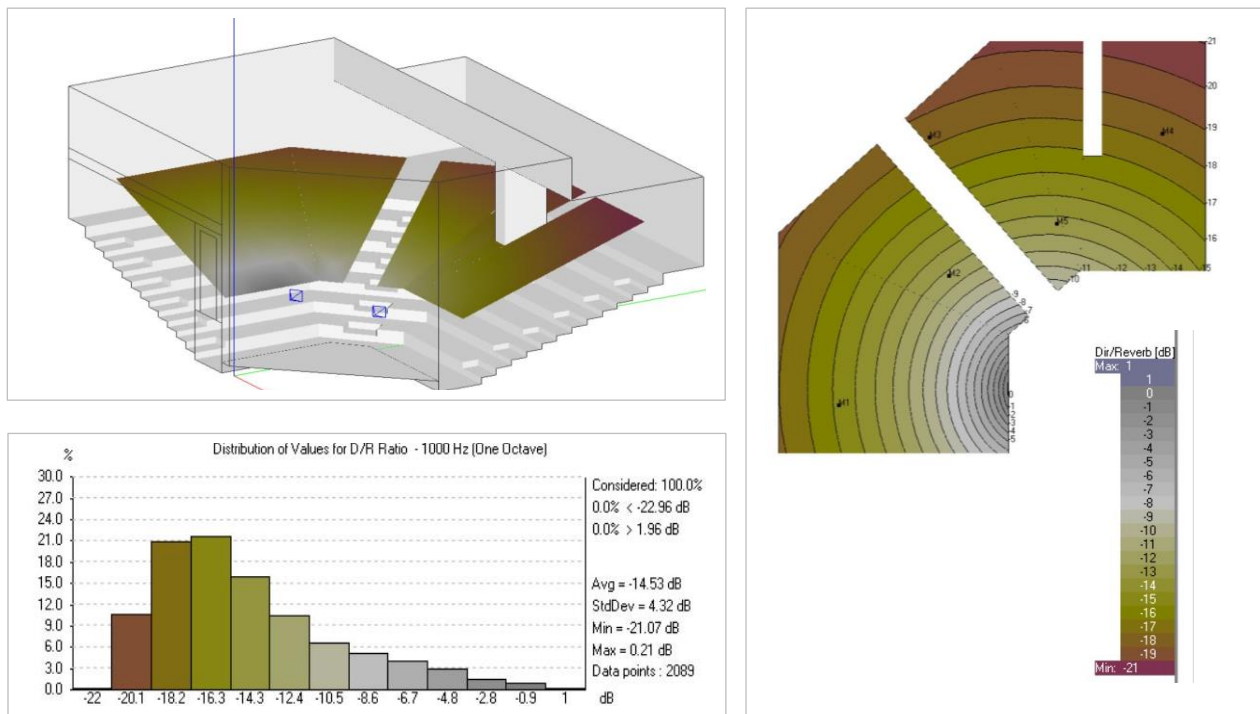


Ilustración 48: Histograma Aula Especial 2- fuente1. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATIO). Fuente: EASE.



4.6.4.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	-19,32	-15,56	-19,00	-16,12	-12,62
250Hz	-19,31	-15,55	-19,00	-16,12	-12,61
500Hz	-19,31	-15,55	-19,00	-16,11	-12,61
1000Hz	-19,03	-15,25	-18,71	-15,82	-12,32
2000Hz	-18,82	-15,03	-18,50	-15,60	-12,09
4000Hz	-18,06	-14,24	-17,74	-14,82	-11,28
8000Hz	-16,13	-12,16	-15,79	-12,75	-9,12

Tabla 29: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATiO). Aula especial 2-fuente 2. Fuente: EASE.

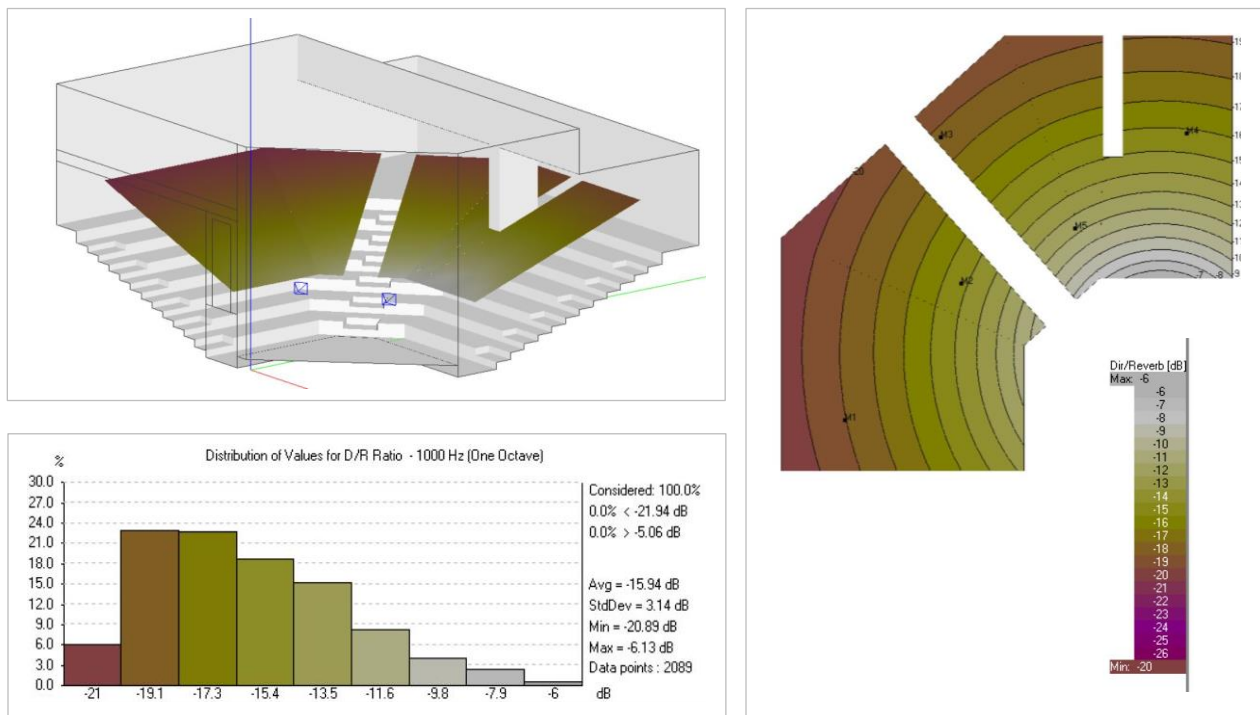


Ilustración 49: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATiO).

Fuente: EASE.

Como dijimos anteriormente, este valor nos indica la relación entre el sonido directo y el reverberante.

En nuestro caso todos los valores obtenidos muestran que el campo reverberante es mucho mayor que el directo. Podemos observar como los valores van desde un mínimo de -21dB hasta un máximo de 0dB.



También observamos que cuanto más nos alejamos de la fuente mayor es el sonido reverberante y menos el sonido directo.

4.6.5 PÉRDIDA DE ARTICULACIÓN DE CONSONANTES (ALCONS).

4.6.5.1 AULA ESPECIAL 1

4.6.5.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
500Hz	14,73	17,58	17,92	17,76	16,95
1000Hz	14,73	17,58	17,92	17,76	16,95
2000Hz	14,73	17,58	17,92	17,76	16,95

Tabla 30: pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Aula especial 1-fuente1. Fuente: EASE.

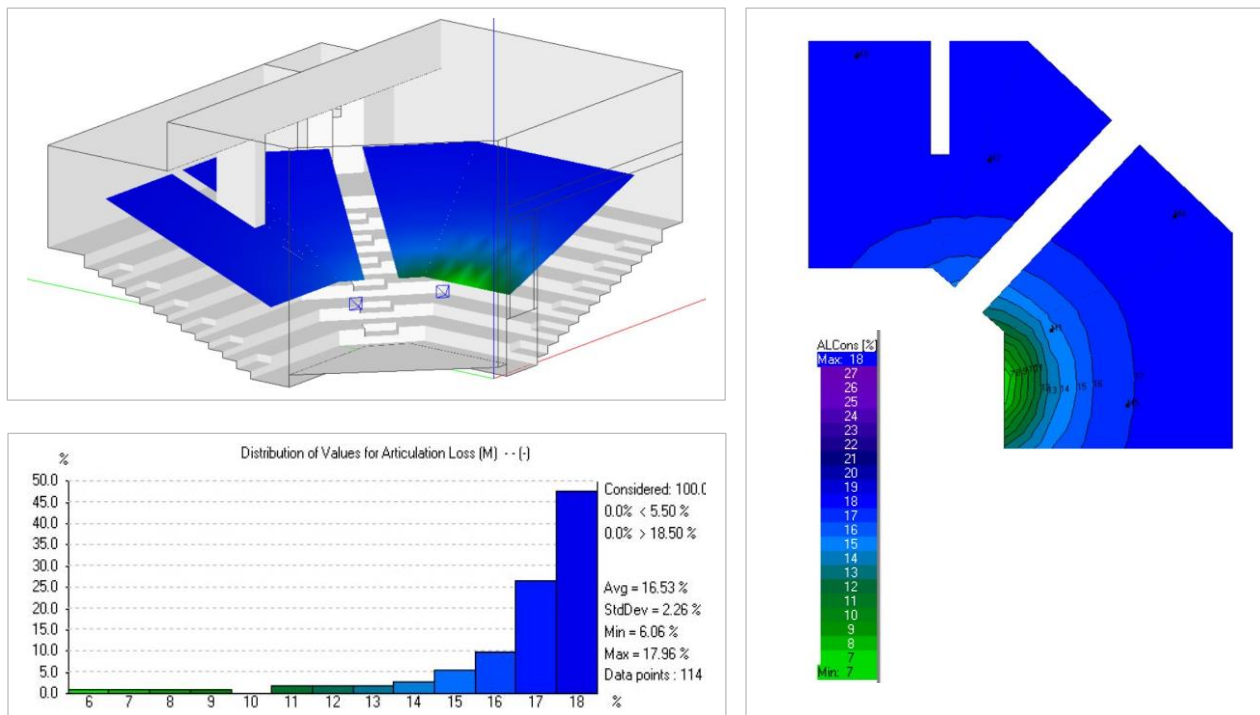


Ilustración 50: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE.



4.6.5.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
500Hz	17,11	17,49	17,81	17,89	17,73
1000Hz	17,11	17,49	17,81	17,89	17,73
2000Hz	17,11	17,49	17,81	17,89	17,73

Tabla 31: Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Aula especial 1-fuente 2. Fuente: EASE:

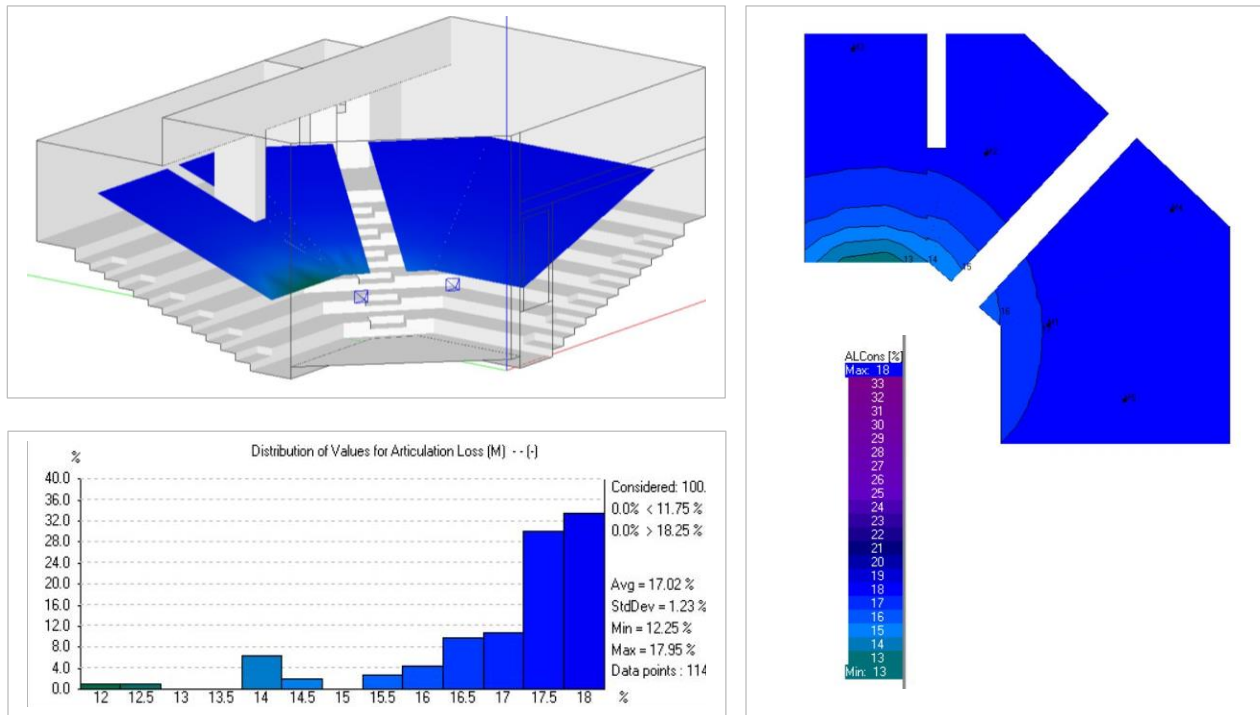


Ilustración 51: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE

4.6.5.2 AULA ESPECIAL 2

4.6.5.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
500Hz	18,33	17,48	18,66	18,66	17,81
1000Hz	18,33	17,48	18,66	18,66	17,81
2000Hz	18,33	17,48	18,66	18,66	17,81

Tabla 32: Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.

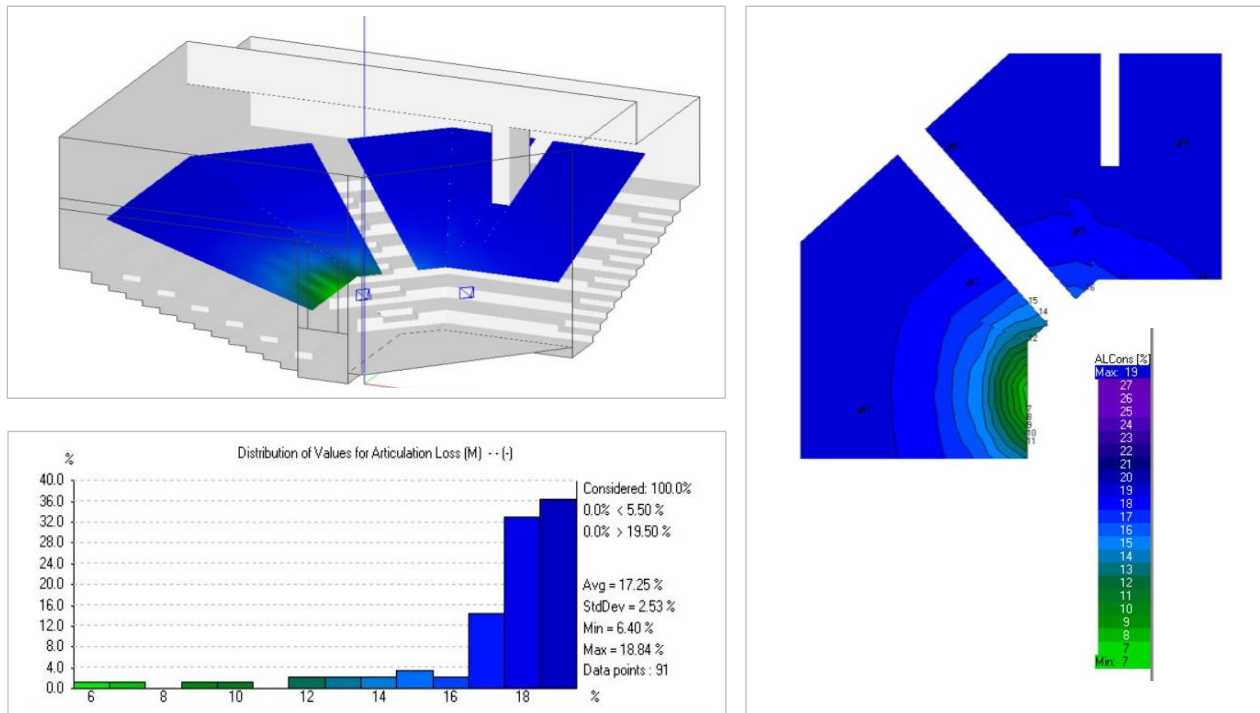


Ilustración 52: Histograma Aula Especial 2- fuente1. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE.

4.6.5.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
500Hz	18,72	18,23	18,70	18,34	17,33
1000Hz	18,72	18,23	18,70	18,34	17,33
2000Hz	18,72	18,23	18,70	18,34	17,33

Tabla 33: Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS)). Aula especial 2-fuente 2. Fuente: EASE.

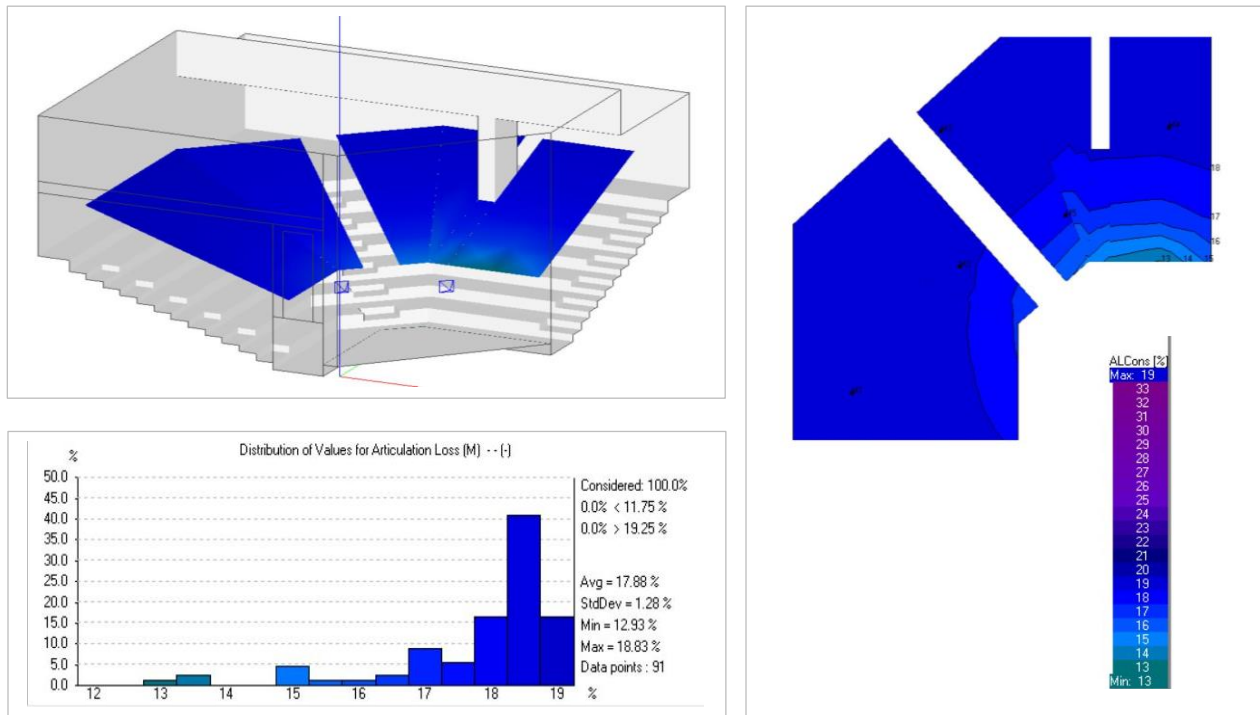


Ilustración 53: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE.

Los resultados nos muestran que la inteligibilidad de la palabra en las aulas especiales I y II es bastante pobre porque oscila entre 12% y 24,2%. Según la teoría este baremo es indicativo de una percepción incorrecta del habla.

4.6.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Una vez recogidos todos los parámetros acústicos y analizados independientemente cada uno de ellos, afrontaremos un análisis global del comportamiento acústicos de la sala.

Observamos que el tiempo de reverberación de las Aulas Especiales I y II presenta unos valores inadecuados para la función a las que están destinada estos recintos.

En cuanto al nivel de presión sonora directo, con la potencia de la fuente sonora dispuestas para la simulación, las aulas especiales I y II presentan valores elevados por lo que hay una buena cobertura del sonido directo.

Los valores obtenidos del nivel de presión sonora total adoptan valores en EASE en torno a 104dB. Como observamos en los histogramas, el nivel de presión sonora total presenta uniformidad en sus valores.



Como se observa en la relación entre campo directo y reverberante, este último es mucho mayor, ya que el máximo es 0dB y el mínimo es -20dB.

Ante los resultados obtenidos y el análisis realizado, corroboraremos estos datos obtenidos con la herramienta tecnológica EASE, con los valores calculados analíticamente a continuación.

Posteriormente, una vez realizadas las comprobaciones pertinentes de los datos, adoptaremos una propuesta de mejora de la calidad acústica de las Aulas Especiales I y II.



5 CAPÍTULO V: CÁLCULO DE PARÁMETROS ANALÍTICAMENTE

5.1 NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO

Cálculo del nivel de presión sonora directo (SPLd).

$$SPLd = S + 10 \log Pe - 20 \log r + D(dB)$$

Siendo:

- SPLd: nivel de presión sonora directo.
- S: sensibilidad. Unidades dB.

$SPLd(1w,1m,eje) = 96,78dB$, entonces $96,78dB = S + 10 \log PL - 0 + 0 \rightarrow S = 96,78dB - 10 \log 4,762 = 90dB$

- Pe: potencia del altavoz.

En este caso la potencia del altavoz (sphere) es de **4,762W**.

- R: radio. Unidades m.

Las distancias varían según el punto del oyente a analizar.

D: pérdidas por directividad. Unidades dB. $D = 0$ dB, en nuestro caso.

Los niveles de presión sonora obtenidos analíticamente son los siguientes:

AULA ESPECIAL 1

Fuente	Micrófono	r=radio	$SPLd = S + 10 \log Pe - 20 \log r + DLdB$
F1	M1	2,11	90,29
F1	M2	4,86	83,05
F1	M3	7,56	79,21
F1	M4	5,83	81,46
F1	M5	3,49	85,92
F2	M1	3,73	85,34
F2	M2	4,55	83,62
F2	M3	6,22	80,90
F3	M4	7,00	79,88
F4	M5	5,59	81,83

Tabla 34: nivel presión sonora directo aula especial 1.



AULA ESPECIAL 2

Fuente	Micrófono	r=radio	SPLd=S+10logPe-20logr+DLdB
F1	M1	4,49	83,73
F1	M2	3,15	86,81
F1	M3	5,99	81,23
F1	M4	6,02	81,19
F1	M5	3,51	85,87
F2	M1	6,54	80,47
F2	M2	4,24	84,23
F2	M3	6,31	80,78
F3	M4	4,53	83,66
F4	M5	3,03	87,15

Tabla 35: nivel de presión sonora directo aula especial 2.

5.2 NIVEL DE PRESIÓN SONORA REVERBERANTE

Cálculo del nivel de presión sonora reverberante (SPLr).

$$SPLr = S + 10 \log Pe - 10 \log Qax * R + 17dB$$

Siendo:

- SPLr: nivel de presión sonora reverberante.
- S: sensibilidad del altavoz. Unidades dB.
- Pe: potencia del altavoz. Unidades W.
- Qax: factor de directividad axial. En nuestro caso Qax=1, ya que las fuentes son omnidireccionales.
- R: constante de la sala.

$$R = \frac{St * \alpha m}{1 - \alpha m} \rightarrow \alpha m = \frac{\sum \alpha * A}{St}$$

Los niveles de presión sonora reverberante obtenidos analíticamente de cada una de las fuentes sonoras con respecto a cualquier punto de audiencia son iguales ya que estamos trabajando con la teoría estadística.

SPLr=S+10logPe-10logQax*R+17dB	99,84 dB
---------------------------------------	-----------------

Tabla 36: nivel de presión sonora reverberante.



5.3 NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL

Cálculo del nivel de presión sonora total (SPLt).

$$SPLt = 10 \log\left(10^{\frac{SPLd}{10}} + 10^{\frac{SPLr}{10}}\right)$$

Siendo:

- SPLt: nivel de presión sonora total. Unidades decibelio (dB).
- SPLd: nivel de presión sonora directo. Unidades decibelio (dB).
- SPLr: nivel de presión sonora reverberante. Unidades decibelio (dB).

Los niveles de presión sonora total de las Aulas Especiales I y II son los siguientes:

AULA ESPECIAL 1

Fuente	Micrófono	SPLt= $10\log[10^{SPLd/10}+10^{SPLr/10}]$
F1	M1	100,29
F1	M2	99,93
F1	M3	99,87
F1	M4	99,90
F1	M5	100,01
F2	M1	99,99
F2	M2	99,94
F2	M3	99,89
F3	M4	99,88
F4	M5	99,90

Tabla 37: nivel de presión sonora total aula especial 1.

AULA ESPECIAL 2

Fuente	Micrófono	SPLt= $10\log[10^{SPLd/10}+10^{SPLr/10}]$
F1	M1	99,94
F1	M2	100,05
F1	M3	99,90
F1	M4	99,90
F1	M5	100,01
F2	M1	99,89
F2	M2	99,95
F2	M3	99,89
F3	M4	99,94
F4	M5	100,06

Tabla 38: nivel de presión sonora total aula especial 2.



5.4 NIVEL RELACIÓN ENTRE DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO)

$$\frac{D}{R} \text{ RATIO} = \log\left(\frac{10^{SPLd}}{10^{SPLr}}\right)$$

Siendo:

- D/R Ratio: relación entre campo directo y reverberante. Sin unidades.
- SPLd: nivel de presión sonora directo. Unidades decibelio (dB).
- SPLr: nivel de presión sonora reverberante. Unidades decibelio (dB).

Los resultados del D/R Ratio obtenidos son los siguientes:

AULA ESPECIAL 1

Fuente	Micrófono	D/R Ratio=log((10^SPLd)/(10^SPLr))
F1	M1	-9,54
F1	M2	-16,79
F1	M3	-20,63
F1	M4	-18,37
F1	M5	-13,91
F2	M1	-14,49
F2	M2	-16,22
F2	M3	-18,93
F3	M4	-19,96
F4	M5	-18,01

Tabla 39: nivel de relación entre directo y reverberante aula especial 1.

AULA ESPECIAL 2

Fuente	Micrófono	D/R Ratio=log((10^SPLd)/(10^SPLr))
F1	M1	-16,10
F1	M2	-13,02
F1	M3	-18,61
F1	M4	-18,65
F1	M5	-13,96
F2	M1	-19,37
F2	M2	-15,61
F2	M3	-19,06
F3	M4	-16,18
F4	M5	-12,69

Tabla 40: nivel de relación entre directo y reverberante aula especial 2.



5.5 COMPARACIÓN DE DATOS OBTENIDOS CON EASE Y ANALÍTICAMENTE.

Una vez tenemos los parámetros calculados analíticamente y EASE “Enhanced Acoustic Simulator for Engineers”, podemos decir que las desviaciones en los resultados son asumibles.

La comparación de los resultados obtenidos nos servirá para proponer una mejora lo más adecuada posible.

5.6 VALIDACIÓN DEL MODELO.

En este apartado se explica el proceso a seguir para validar un modelo, según la norma UNE-EN ISO 3382-2, Medición de Parámetros Acústicos en recintos, parte 2: Tiempo de Reverberación en recintos ordinarios, tal y como realizaron los alumnos en colaboración del Máster Universitario en Ingeniería Acústica de Edificación y Medio Ambiente de la UPM, para comunicaciones en el próximo Congreso Ibérico Tecniacústica 2017 que tendrá sede en la EUAT de la UDC.

Esta norma establece distintas metodologías a seguir para medir el tiempo de reverberación y diversos parámetros acústicos, así como la descripción del equipo utilizado para la realización de las medidas.

Esta medición “in situ” nos permitirá valorar de forma fidedigna el comportamiento acústico de la sala, así como la validación del modelo creado con EASE.

5.7 CONDICIONES DE MEDICIÓN.

Siguiendo la UNE-EN ISO 3382-2, las mediciones del tiempo de reverberación se deberán realizar en un recinto sin personas. Sin embargo, se puede permitir que en un recinto se hallen hasta dos personas.

En recintos grandes, la atenuación por el aire puede contribuir de manera significativa a la absorción acústica a frecuencias elevadas. Para las mediciones de precisión, se debe medir la temperatura y la humedad relativa del aire en el recinto. La importancia de la contribución de la absorción del aire es baja si el tiempo reverberación es inferior a 1,5s a 2kHz e inferior a 0,8s a 4kHz. En este caso, no es necesario medir la temperatura y la humedad relativa.

Estas condiciones han sido seguidas en el proceso de medición de las Aulas Especiales I y II.

5.8 MÉTODOS DE MEDIDA.

La norma ISO 3382 se describen dos métodos para medir el tiempo de reverberación: el método del ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada.



5.8.1 MÉTODO DEL RUIDO INTERRUMPIDO.

Este método nos permite obtener curvas de decrecimiento mediante registro directo del decrecimiento del nivel de presión acústica tras la excitación de un recinto con ruido de banda ancha o ruido de banda limitado.

Se debe utilizar un altavoz y la señal que recibe debe proceder de un ruido eléctrico de banda ancha o aleatorio o pseudoaleatorio.

Para los métodos de ingeniería y de precisión, la duración de excitación del recinto debe ser suficiente para que el campo acústico alcance un estado estacionario antes de apagar la fuente. Por lo tanto, es esencial emitir el ruido durante al menos $T/2$ s. En recintos grandes, la duración de la excitación debe ser de al menos unos segundos.

El proceso que se sigue con este método es el siguiente:

Se excita la sala y una vez que ha cesado de emitir la fuente, se registra la caída de presión sonora, en bandas de octava o de tercio de octava. El tiempo de reverberación será el tiempo que tarda la energía en decaer 60 dB.

Para este método no es necesaria una instrumentación sofisticada, únicamente es necesario un micrófono con filtros que capte la señal y un registrador de la caída.

Este método nos permite obtener el Tiempo de Reverberación.

5.8.2 MÉTODO DE LA RESPUESTA IMPULSIVA INTEGRADA.

Este método obtiene curvas de decrecimiento mediante la integración inversa del tiempo de respuesta impulsiva al cuadrado.

Para evaluar las características acústicas de un recinto es crucial el conocimiento de su respuesta impulsiva. La respuesta impulsiva caracteriza al recinto para una ubicación dada de fuente y receptor y varía según la geometría y materiales, entre otros factores. En la actualidad el conocimiento de la respuesta impulsiva del recinto resulta imprescindible para el análisis y diseño de diversos recintos.

Una de las ventajas que presenta este método, precisamente, es que a partir de la RIR (respuesta impulsiva del recinto) se pueden calcular múltiples parámetros además del tiempo de reverberación.

5.9 EQUIPO UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN.

5.9.1 FUENTE ACÚSTICA.

La fuente debería ser lo más omnidireccional posible. Para mediciones de precisión, la directividad de la fuente acústica debe cumplir los requisitos de la Norma ISO 3382-1.



Para las mediciones de control y de ingeniería, no existen requisitos específicos para la directividad. Debe producir un nivel de precisión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.



Ilustración 54: fuente omnidireccional. Fuente: UPM.



Ilustración 55: fuente omnidireccional. Fuente: propia.

Ilustración 56: situación fuente omnidireccional. Fuente: propia.

5.9.2 MICRÓFONOS Y EQUIPOS DE ANÁLISIS.

Se deben utilizar micrófonos omnidireccionales para detectar la presión acústica y la salida se puede conectar directamente a un amplificador, un conjunto de filtros y un sistema donde se muestran las curvas de decrecimiento o aun equipo de análisis que permita calcular las respuestas impulsivas o a un registrador de señal para un análisis posterior.



Ilustración 57: micrófono omnidireccional. Fuente: UPM.

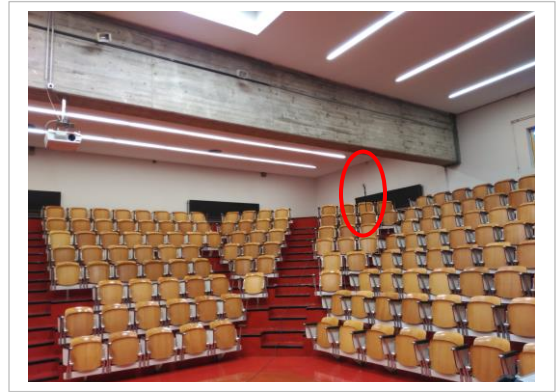


Ilustración 58: situación micrófono omnidireccional. Fuente: propia.

El micrófono debería ser lo más pequeño posible y tener preferiblemente un diámetro de diafragma máximo de 14mm. Se permiten micrófonos con diámetros de hasta 27mm si son del tipo respuesta en presión o del tipo respuesta en campo libre, siempre y cuando se suministren con un corrector de incidencia aleatoria. Los filtros de banda de octava o de un tercio de octava deben cumplir la Norma IEC 61260.

5.9.2.1 EQUIPODE CONFORMACIÓN DEL REGISTRO DE DECRECIMIENTO DEL NIVEL.

El equipo para conformar (y mostrar y/o evaluar) el registro de decrecimiento debe utilizar alguno de los siguientes elementos:

- a) Promediado exponencial, con curva continua como salida.
- b) Promedio exponencial, con puntos de muestreo discretos sucesivos, a partir del promedio continuo como salida.
- c) Promedio lineal, con promedios lineales discretos como salida.

El tiempo de promediado, es decir, la constante de tiempo de un dispositivo promediador exponencial, debe ser inferior, pero lo más cercano a $T/30$. De forma similar, el tiempo de promedio de un dispositivo promediador lineal debe ser inferior a $T/12$. Aquí, "T" es el tiempo de reverberación que se está midiendo.

5.9.2.2 SOBRESATURACIÓN

No se debe admitir ninguna sobresaturación en ninguna fase del equipo de medición. Cuando se utilizan fuentes acústicas impulsivas, se deben utilizar dispositivos indicadores de niveles de pico para detectar las sobresaturaciones.

5.10 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.

Junto con el ordenador y un software se genera la señal de excitación que es emitida por la fuente. El micrófono se encarga de recoger la señal de excitación.



Esta señal es recogida por el ordenador a través de la tarjeta de sonido. La señal es procesada para su posterior análisis y obtención de los parámetros acústicos.

Antes de analizar las medidas hay que comprobar que la relación señal – ruido sea la correcta. Si no se tiene suficiente nivel hay que aumentar el nivel de la señal mediante un amplificador, teniendo cuidado de que no se produzca saturación del sistema.

A continuación, se muestra un esquema básico del instrumental para realizar las mediciones:

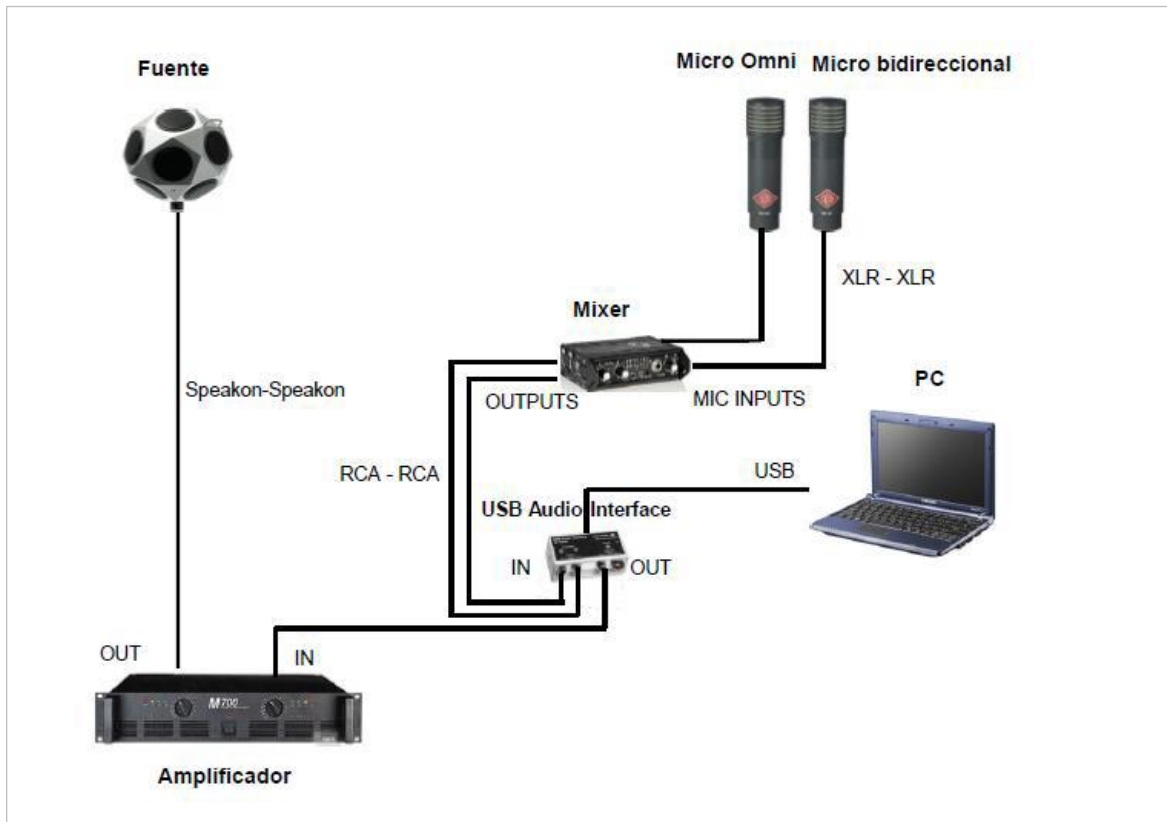


Ilustración 59:: esquema del montaje para realizar las medidas con Dirac. Fuente: UPM.



6 CAPÍTULO VI: PROPUESTA DE MEJORA

Una vez obtenidos y analizados los parámetros acústicos de la sala, determinamos la necesidad de realizar una serie de intervenciones con la intención de mejorar la calidad acústica de las Aulas Especiales I y II.

La elección de la solución se realizará atendiendo a criterios tales como la simplicidad técnica de montaje o económicos.

El objetivo principal de la propuesta es mejorar los parámetros acústicos de la sala, prestando especial atención al Tiempo de Reverberación. Atendiendo a este parámetro conseguiremos una mejora generalizada de los demás parámetros acústicos de las Aulas Especiales I y II.

Para valorar el grado de mejora que experimentarán las Aulas Especiales I y II nos apoyaremos de nuevo en la herramienta tecnológica EASE.

El proceso a seguir con EASE, ahora que ya tenemos el modelo geométrico introducido, consistirá básicamente en cambiar los materiales y analizar la mejora que experimenta con cada cambio realizado. EASE nos permitirá conocer exactamente la mejora que experimentan las aulas con cada elemento introducido.

Además, con este programa sabremos, como vimos con anterioridad, el porcentaje que ocupa cada material utilizado en el recinto. Esto nos facilitará el proceso de sustitución de unos materiales por otros con un coeficiente de absorción más favorable.

Una vez cambiados e introducidos los nuevos elementos en el modelo, procederemos de una forma muy semejante a la realizada con el estado actual de las aulas, es decir, analizaremos y valoraremos la mejora acústica que experimentan las Aulas Especiales I y II.

Para completar la propuesta de mejora se procederá a realizar una valoración económica de ésta. De esta manera podremos determinar si resulta viable la inversión a realizar.

6.1 SOLUCIÓN PROPUESTA DE MEJORA

Por las razones indicadas con anterioridad, adoptamos como propuesta de mejora la instalación de nubes acústicas suspendidas del techo en forma de panel.

A continuación, se muestra una imagen de EASE donde se puede ver cómo quedaría la solución propuesta:



AULA ESPECIAL 1

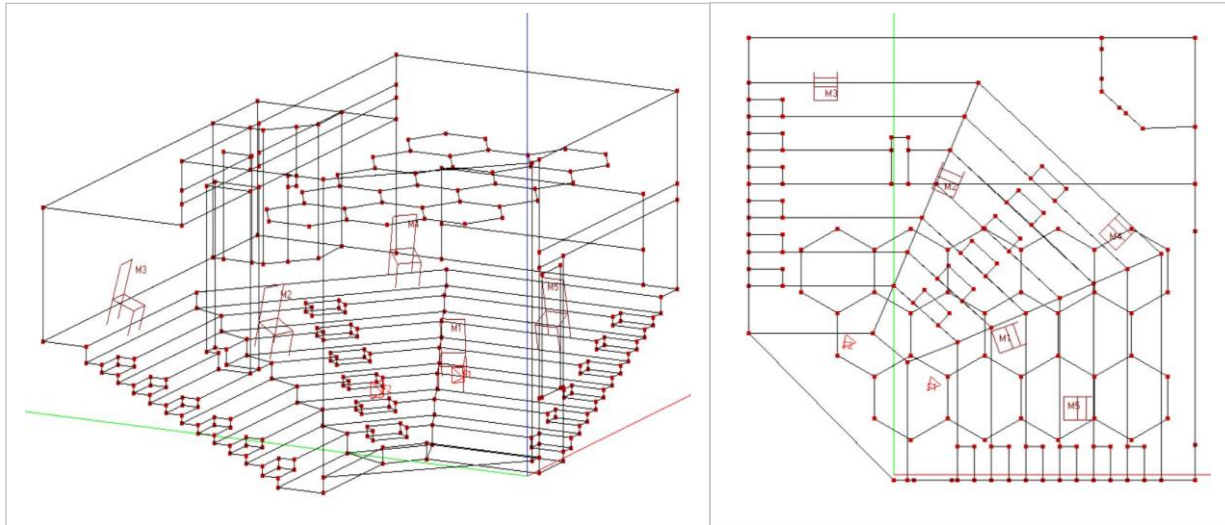


Ilustración 60: aula especial 1. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.

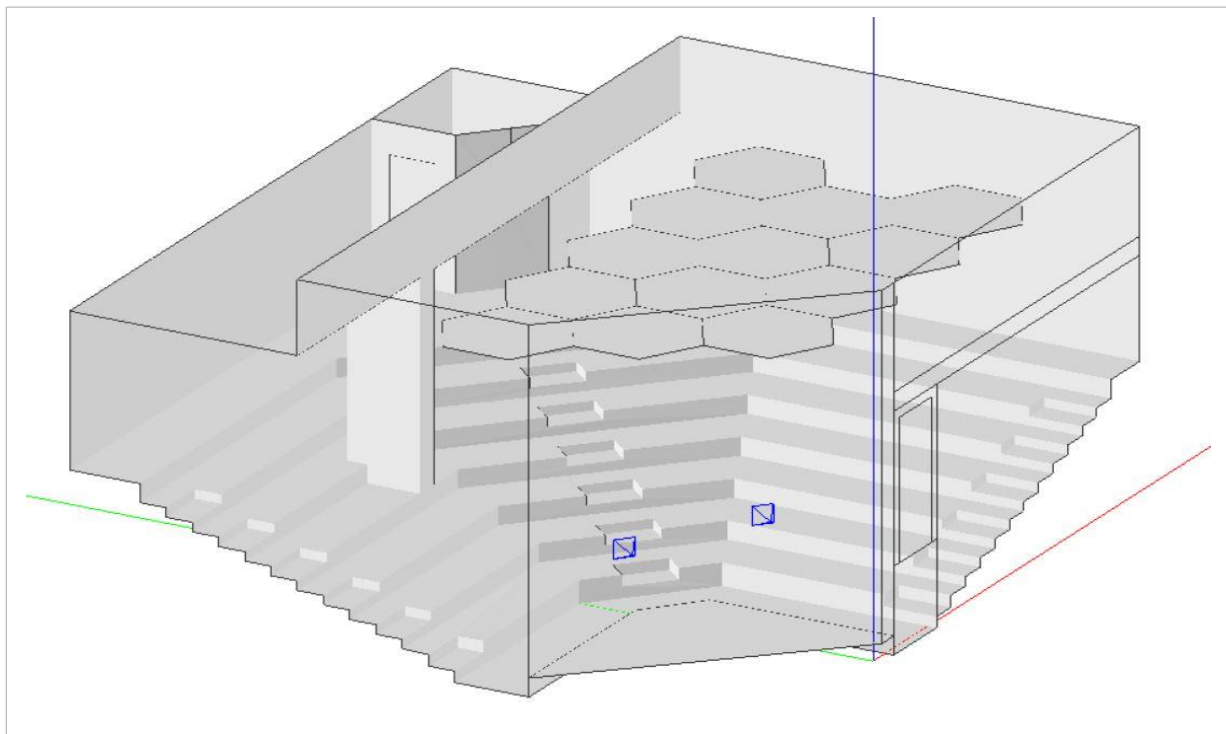


Ilustración 61: aula especial 1. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.



AULA ESPECIAL 2

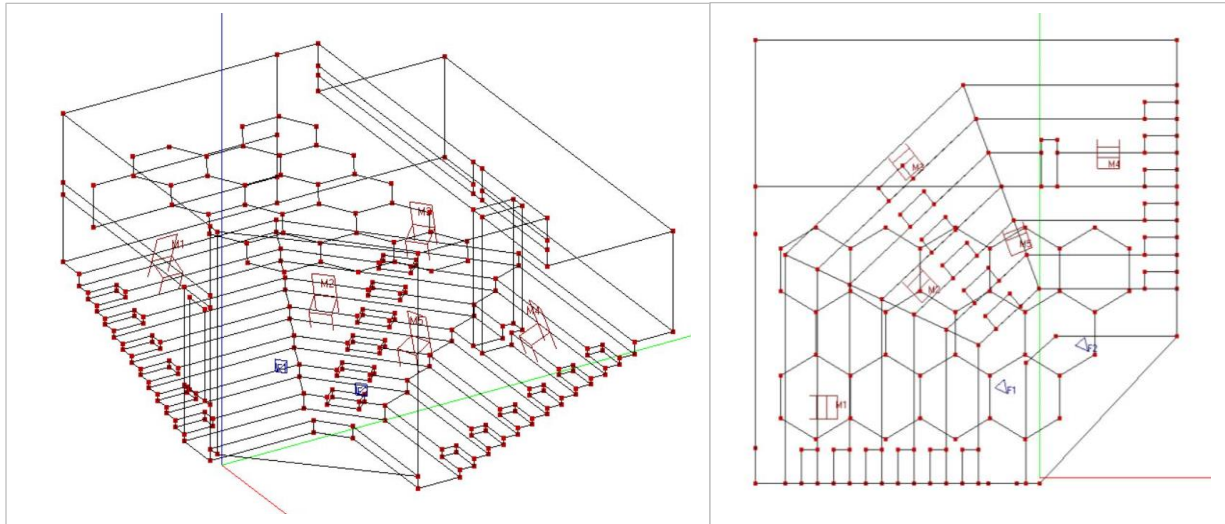


Ilustración 62: aula especial 2. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.

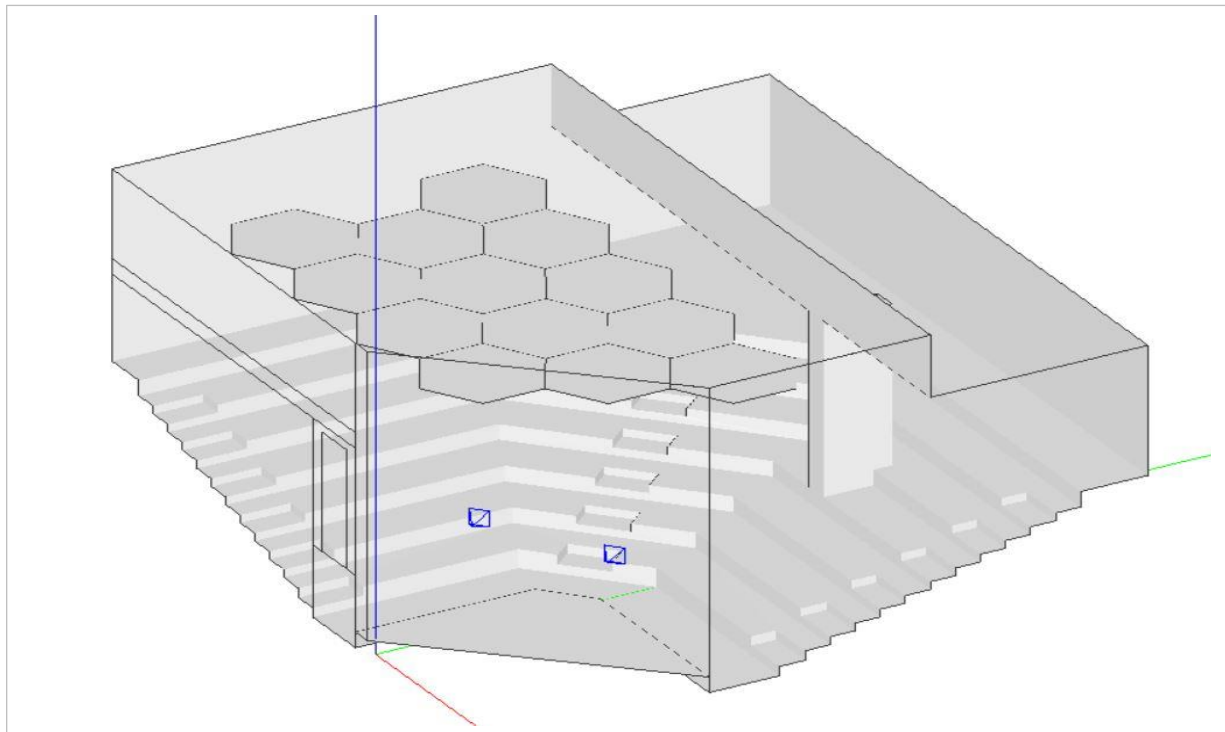


Ilustración 63: aula especial 2. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.



6.1.1 NUBES ACÚSTICAS

Las nubes acústicas se suspenderán a una distancia de 1,20m del techo en la zona que está por encima de las gradas, la zona que actualmente ocupan las butacas de los alumnos y tendrán un grosor de 100mm. El peso oscila entre unos 6Kg/m² y su emisión de partículas (COV) está clasificada como A+.

Se dispondrán de forma simétrica a lo largo del techo, sin distancia entre cada una de las nubes. Para conseguir la composición deseada, pediremos las medidas de los paneles diseñados y utilizaremos las prestaciones que nos ofrece el fabricante para estos productos, es decir, el fabricante tiene unos paneles estipulados en su ficha técnica, pero bajo pedido, se pueden pedir distintas formas según las necesidades.

El elemento suspendido elegido para la mejora de este proyecto pertenece a la casa comercial "Acústica Integral" dentro de la gama para la mejora del tiempo de reverberación llamado "Acustiart"

Las características que hacen que este producto se ajuste a nuestras necesidades son las siguientes:

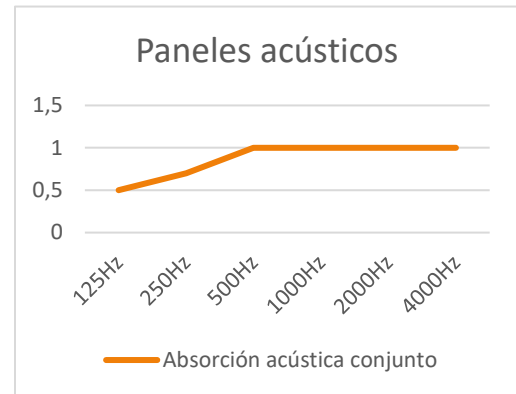
- La estructura que la sustenta está formada por un sistema de raíles de acero galvanizado, cables y soporte con freno de acero galvanizado y multitacos.
- El elemento absorbente se trata de un material absorbente acústico compuesto de fibra de poliéster de color gris de densidad 30Kg/m³, no putrescible, libre de sustancias nocivas y con certificado de salubridad, seguridad y medio ambiente Oeko-Tex nº 044701.O. Este absorbente acústico tiene un potencial energético creciente, es decir, puede contribuir en alguna fase del incendio, los humos producen una opacidad media y no produce gotas incandescentes.
Clasificación reacción al fuego: B s2 d0.
- El elemento absorbente cuenta con un acabado exterior textil en la cara inferior del panel, encarado a las butacas de los oyentes. El textil tiene un comportamiento frente al fuego de clasificación B s2 d0, es decir, puede contribuir en alguna fase del incendio, el grado de opacidad de los humos es media y no produce gotas inflamadas. El textil se puede elegir en una gran variedad de colores, en este caso se escoge el color vainilla (4051) que le da luminosidad al aula, ya que, por su ubicación dentro de la escuela, es un tanto oscura.
- En cuanto a su eficacia acústica, la absorción es importante en todos los espectros de frecuencias.



6.1.1.1 CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LOS PANELES

Frecuencia	α Absorción acústica material absorbente	α Absorción acústica textil	α Absorción acústica conjunto
125 Hz	0,10	0,30	0,50
250 Hz	0,25	0,30	0,70
500 Hz	0,45	0,43	1,00
1000 Hz	0,60	0,53	1,00
2000 Hz	0,65	0,53	1,00
4000 Hz	0,70	0,53	1,00

Tabla 41: absorción acústica del conjunto. Fuente: acústica integral.



Gráfica 8: absorción acústica panel acústico.

Los ensayos de producto están realizados según la UNE-EN ISO 354:2004, Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

6.1.2 SISTEMA DE COLOCACIÓN

La instalación se realizará suspendiendo cada panel desde el techo horizontalmente, usando 4 cables verticales de acero inoxidable (1,5mm de diámetro y 1200mm de longitud), provistos de piezas de enroscado y ganchos ajustables.

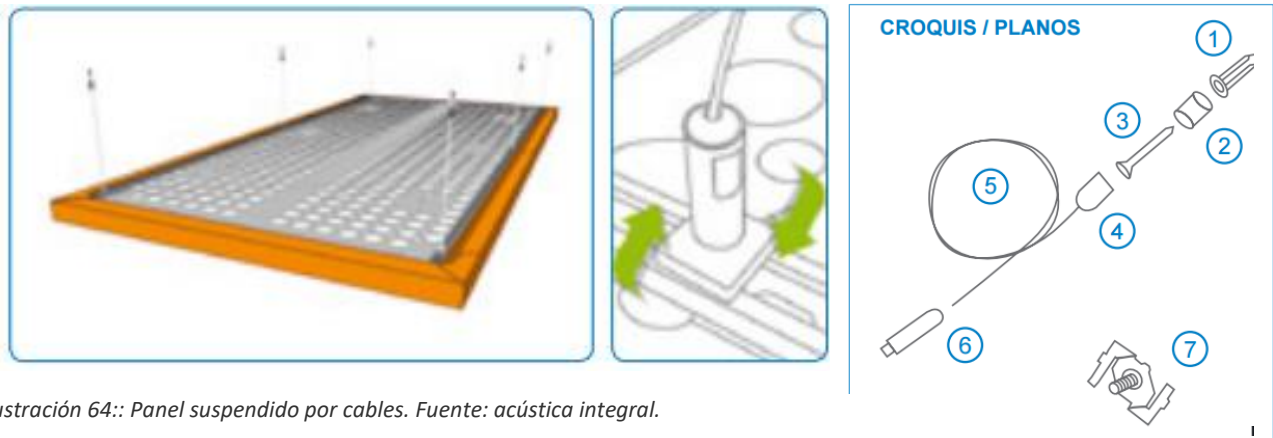


Ilustración 64:: Panel suspendido por cables. Fuente: acústica integral.

- 1: multitaco.
- 2 y 4: 4 piezas de soporte de cable de acero.
- 3: 4 tirafondos.
- 5: 4 cables de acero.
- 6: 4ud soporte roscado con freno para cable de acero.

Ilustración 65: elementos necesarios para suspensión de los paneles. Fuente: acústica integral.

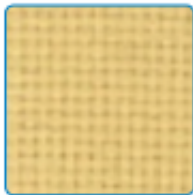


Ilustración 66: Panel suspendido por cables. Fuente: acústica integral.

6.1.2.1 MODO DE COLOCACIÓN EN TECHO:

Se perfora el techo y se introducen los tacos (1). Se atornilla el tirafondo (3) haciéndolo pasar por la pieza de fijación (2). Ya bien apretado, se rosca la pieza de fijación (4) por la que previamente se habrá introducido el cable de acero (5). Éste se introducirá y atravesará la pieza de fijación (6). Se pulsa el botón para liberar el paso del cable y soltamos la longitud deseada.

6.1.2.2 ACABADO:



4051-Vanilla

Ilustración 67: código de color del tejido.
Fuente: acústica integral.



Ilustración 68: ejemplo de paneles suspendidos de techo. Fuente: acústica integral.



6.2 CÁLCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA SEGÚN EL CTE DB-HR

HR - Documento Básico - Protección frente al ruido							
K3: Ficha justificativa del método general del tiempo de reverberación y de la absorción acústica.							
Tipo de Recinto: Aula Especial I vacía.					Volumen, V (m ³):		431,02
Elemento	Acabado	Área (m ²)	α _m Coeficiente de absorción acústica medio				Absorción Acústica (m ²) α _m ·S
			500	1000	2000	α _m	
SUELO							
Tarima	linóleo	5,95	0,03	0,03	0,04	0,03	0,18
Suelo	linóleo	9,52	0,03	0,03	0,04	0,03	0,29
Suelo G1	linóleo	7,50	0,03	0,03	0,04	0,03	0,23
Suelo G2	linóleo	8,57	0,03	0,03	0,04	0,03	0,26
Suelo G3	linóleo	9,64	0,03	0,03	0,04	0,03	0,29
Suelo G4	linóleo	10,30	0,03	0,03	0,04	0,03	0,31
Suelo G5	linóleo	11,76	0,03	0,03	0,04	0,03	0,35
Suelo G6	linóleo	12,85	0,03	0,03	0,04	0,03	0,39
Suelo G7	linóleo	23,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,69
Suelo Sala	linóleo	4,08	0,03	0,03	0,04	0,03	0,12
TECHO							
Panel acústico	fibras poliéster	33,80	1,00	1,00	1,00	1,00	33,80
Panel acústico	tejido	33,80	0,43	0,53	0,53	0,50	16,79
Forjado bidireccional alto	Hormigón visto	67,65	0,03	0,04	0,04	0,04	2,71
Forjado bidireccional bajo	Hormigón visto	36,03	0,03	0,04	0,04	0,04	1,44
PARAMENTOS							
Alzado 7							
Pared 7	Enfoscado de mortero	24,04	0,06	0,08	0,04	0,06	1,44
Ventana 7	Vidrio	4,32	0,05	0,04	0,03	0,04	0,17
	Aluminio	0,97	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Pared almacén	Enfoscado de mortero	10,20	0,06	0,08	0,04	0,06	0,61
Puerta almacén	Panel madera	2,80	0,08	0,08	0,08	0,08	0,22
Alzado 8							



Pared 8	Enfoscado de mortero	20,76	0,06	0,08	0,04	0,06	1,25
Pared almacén	Enfoscado de mortero	6,32	0,06	0,08	0,04	0,06	0,38
Alzado 9							
Pared 9	Enfoscado de mortero	2,53	0,06	0,08	0,04	0,06	0,15
Ventana 2	Vidrio	6,89	0,05	0,04	0,03	0,04	0,28
	Aluminio	1,46	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Pilar	Hormigón visto	0,43	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02
Forjado	Hormigón visto	4,20	0,03	0,04	0,04	0,04	0,17
Alzado 10							
Pared 10	Enfoscado de mortero	29,27	0,06	0,08	0,04	0,06	1,76
Alzado 11							
Pared 11	Enfoscado de mortero	20,89	0,06	0,08	0,04	0,06	1,25
Pizarra	Hormigón pintado	5,74	0,06	0,07	0,09	0,07	0,40
Alzado 12							
Pared 12	Enfoscado de mortero	26,12	0,06	0,08	0,04	0,06	1,57
Pilar	Hormigón visto	1,90	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08
Forjado	Hormigón visto	2,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08
Puerta	Panel madera	2,91	0,08	0,08	0,08	0,08	0,23
	Vidrio	1,63	0,05	0,04	0,03	0,04	0,07
Grada vertical							
Pared G1	linóleo	3,22	0,03	0,03	0,04	0,03	0,10
Pared G2	linóleo	3,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,09
Pared G3	linóleo	3,41	0,03	0,03	0,04	0,03	0,10
Pared G4	linóleo	3,81	0,03	0,03	0,04	0,03	0,11
Pared G5	linóleo	4,09	0,03	0,03	0,04	0,03	0,12
Pared G6	linóleo	4,61	0,03	0,03	0,04	0,03	0,14
Pared G7	linóleo	5,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,15
Pared tarima	linóleo	1,97	0,03	0,03	0,04	0,03	0,06
Huecos Escaleras	linóleo	2,25	0,03	0,03	0,04	0,03	0,07
Pilar aislado	Hormigón visto	9,11	0,03	0,04	0,04	0,04	0,36
		490,32					69,31
Área de absorción acústica equivalente media							



Objetos ⁽¹⁾	Tipo	N número	A _{o,m} (m ²)				A _{o,m} · N
			500	1000	2000	A _{o,m}	
Absorción del aire ⁽²⁾			Coeficiente de atenuación del aire, \dot{m}_m (m ⁻¹)				4· $\dot{m}_m \cdot V$
			500	1000	2000	\dot{m}_m	
			0,003	0,005	0,001	0,006	10,34
A, (m ²) Absorción acústica del recinto resultante			$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^n A_{o,m,j} + 4 \cdot m_m \cdot V$				79,65
T, (s) Tiempo de reverberación resultante			$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$				0,87
Absorción acústica resultante de la zona común			Absorción acústica exigida				
A (m ²)=			79,65	≥	86,20	≈ 0,2·V	
Tiempo de reverberación resultante			Tiempo de reverberación exigido				
T (s)=			0,87	≤	0,7		
							CUMPLE

⁽¹⁾ Sólo para salas de conferencias de volumen hasta 350m³.

⁽²⁾ Sólo para volúmenes mayores a 250 m³.

HR - Documento Básico - Protección frente al ruido							
K3: Ficha justificativa del método general del tiempo de reverberación y de la absorción acústica.							
Tipo de Recinto: Aula Especial II vacía.					Volumen, V (m ³):		430,50
Elemento	Acabado	Área (m ²)	α _m Coeficiente de absorción acústica medio				Absorción Acústica (m ²) α _m ·S
			500	1000	2000	α _m	
SUELO							
Tarima	linóleo	5,95	0,03	0,03	0,04	0,03	0,18
Suelo	linóleo	10,70	0,03	0,03	0,04	0,03	0,32
Suelo G1	linóleo	6,69	0,03	0,03	0,04	0,03	0,20



Suelo G2	linóleo	8,21	0,03	0,03	0,04	0,03	0,25
Suelo G3	linóleo	9,56	0,03	0,03	0,04	0,03	0,29
Suelo G4	linóleo	10,37	0,03	0,03	0,04	0,03	0,31
Suelo G5	linóleo	11,63	0,03	0,03	0,04	0,03	0,35
Suelo G6	linóleo	12,82	0,03	0,03	0,04	0,03	0,38
Suelo G7	linóleo	27,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,81
TECHO							
Panel acústico	fibras de poliéster	33,80	1,00	1,00	1,00	1,00	33,80
Panel acústico	tejido	33,80	0,43	0,53	0,53	0,50	16,79
Forjado bidireccional alto	Hormigón visto	67,13	0,03	0,04	0,04	0,04	2,69
Forjado bidireccional bajo	Hormigón visto	35,86	0,03	0,04	0,04	0,04	1,43
PARAMENTOS							
Alzado 1							
Pared 1	Enfoscado de mortero	29,44	0,06	0,08	0,04	0,06	1,77
Ventana 1	Vidrio	4,32	0,05	0,04	0,03	0,04	0,17
	Aluminio	0,97	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Alzado 2							
Pared 2	Enfoscado de mortero	26,25	0,06	0,08	0,04	0,06	1,58
Alzado 3							
Pared 3	Enfoscado de mortero	2,52	0,06	0,08	0,04	0,06	0,15
Ventana 2	Vidrio	6,80	0,05	0,04	0,03	0,04	0,27
	Aluminio	1,46	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Pilar	Hormigón visto	0,43	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02
Forjado	Hormigón visto	4,18	0,03	0,04	0,04	0,04	0,17
Alzado 4							
Pared 4	Enfoscado de mortero	29,27	0,06	0,08	0,04	0,06	1,76
Alzado 5							
Pared 5	Enfoscado de mortero	20,89	0,06	0,08	0,04	0,06	1,25
Pizarra	Hormigón pintado	5,74	0,06	0,07	0,09	0,07	0,40
Alzado 6							
Pared 6	Enfoscado de mortero	25,95	0,06	0,08	0,04	0,06	1,56
Pilar	Hormigón visto	1,91	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08



Forjado	Hormigón visto	2,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08
Puerta	Panel madera	2,91	0,08	0,08	0,08	0,08	0,23
	Vidrio	1,63	0,05	0,04	0,03	0,04	0,07
Grada vertical							
Pared G1	linóleo	2,82	0,03	0,03	0,04	0,03	0,08
Pared G2	linóleo	2,72	0,03	0,03	0,04	0,03	0,08
Pared G3	linóleo	3,41	0,03	0,03	0,04	0,03	0,10
Pared G4	linóleo	3,81	0,03	0,03	0,04	0,03	0,11
Pared G5	linóleo	4,10	0,03	0,03	0,04	0,03	0,12
Pared G6	linóleo	4,61	0,03	0,03	0,04	0,03	0,14
Pared G7	linóleo	5,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,15
Pared tarima	linóleo	1,97	0,03	0,03	0,04	0,03	0,06
Hueco gradas	linóleo	1,66	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05
Huecos Escaleras	linóleo	2,25	0,03	0,03	0,04	0,03	0,07
Pilar aislado	Hormigón visto	9,11	0,03	0,04	0,04	0,04	0,36
		481,66					68,72
Objetos ⁽¹⁾	Tipo	N númer o	Área de absorción acústica equivalente media				A _{o,m} · N
			A _{o,m} (m ²)		A _{o,m}		
			500	1000	2000	A _{o,m}	
Absorción del aire ⁽²⁾		Coeficiente de atenuación del aire, \dot{m}_m (m ⁻¹)				4· \dot{m}_m ·V	
		500	1000	2000	\dot{m}_m		
		0,003	0,005	0,001	0,006	10,33	
A, (m ²) Absorción acústica del recinto resultante		$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^n A_{o,m,j} + 4 \cdot m_m \cdot V$				79,06	
T, (s) Tiempo de reverberación resultante		$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$				0,87	
Absorción acústica resultante de la zona común		A (m ²)=		Absorción acústica exigida			
		79,06	≥	86,1	≈ 0,2·V		
Tiempo de reverberación resultante		T (s)=		Tiempo de reverberación exigido			
		0,87	≤	0,7			
CUMPLE							



⁽¹⁾ Sólo para salas de conferencias de volumen hasta 350m³.

⁽²⁾ Sólo para volúmenes mayores a 250 m³.

Aunque el resultado excede el TR máximo establecido por el CTE DB-HR en 0,17s, estos valores son más que adecuados para un recinto de estas características y con los valores de TR tan elevados que tienen las aulas especiales I y II. Con valores inferiores a 1s, el tiempo de reverberación se ajusta a lo deseado.

6.3 RESULTADOS DE LA MEJORA PROPUESTA EN EASE

En este apartado se facilitan los parámetros acústicos obtenidos en las aulas especiales I y II una vez introducidas las respectivas mejoras.

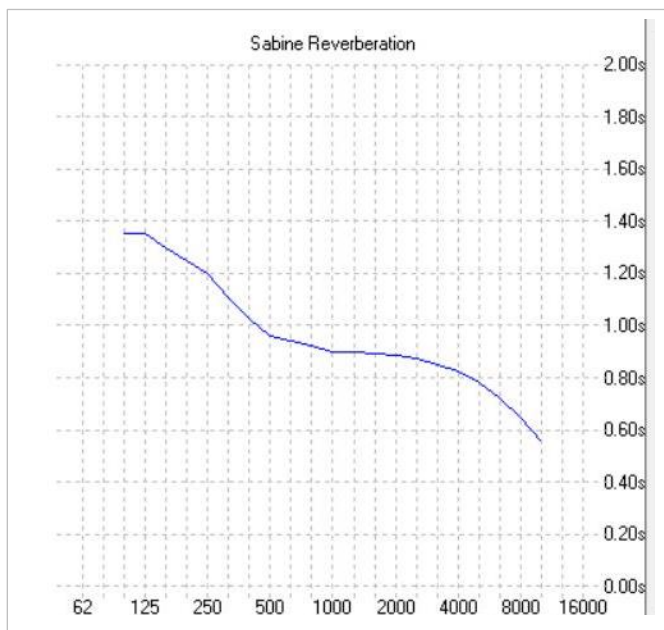
Para obtener estos datos, se ha utilizado de nuevo el software EASE 4.4, manteniendo los puntos de las fuentes sonoras, los puntos de audiencia y las áreas de audiencia. La colocación de los elementos sigue como indicamos anteriormente la UNE-EN ISO 3382-2:2008.

A continuación, se aportan los datos de la mejora que experimenta el tiempo de reverberación y los histogramas y la distribución en frecuencias del nivel de presión sonora directo, nivel de presión sonora total y la relación entre el campo directo y el reverberante.

6.3.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN, RT.

AULA ESPECIAL 1

El tiempo de reverberación calculado con el software EASE 4.4 utilizando la fórmula de Sabine:



FRECUENCIA	T.REVERBERACIÓN
125Hz	1,36s
250Hz	1,20s
500Hz	0,96s
1000Hz	0,90s
2000Hz	0,88s
4000Hz	0,82s
8000Hz	0,65s

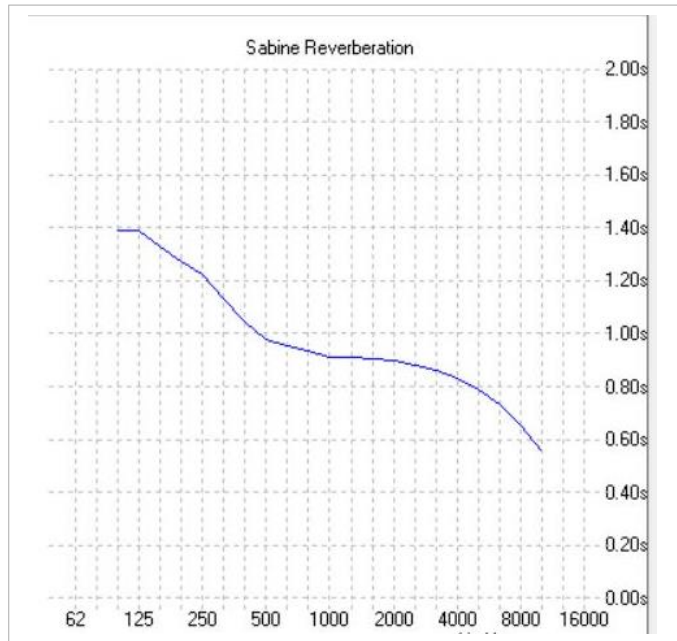
Tabla 42: tiempos de reverberación aula especial 1, solución mejorada. Fuente: EASE

Gráfica 9: tiempo de reverberación aula especial 1, solución mejorada. Fuente: EASE.



AULA ESPECIAL 2

El tiempo de reverberación calculado con el software EASE 4.4 utilizando la fórmula de Sabine:



FRECUENCIA	T.REVERBERACIÓN
125Hz	1,39s
250Hz	1,22s
500Hz	0,98s
1000Hz	0,91s
2000Hz	0,90s
4000Hz	0,83s
8000Hz	0,65s

Tabla 43: tiempos de reverberación aula especial 2, solución mejorada. Fuente: EASE

Gráfica 10: tiempo de reverberación aula especial 2, solución mejorada. Fuente: EASE.

Después de la propuesta de mejora realizada se observa que:

El tiempo de reverberación disminuye significativamente en todas las bandas de frecuencia, acercándose así a los valores exigidos por el CTE DB-HR. El valor del tiempo de reverberación máximo permitido por la normativa para aulas con estas características es de 0,7s. Observamos que en frecuencias medias (500hz-1000HZ), los valores se mueven entre 0,96s y 0,90s (aula especial I) y entre 0,98s y 0,91s (aula especial II). Con valores de TR inferiores a 1,00s en frecuencias medias, podemos afirmar que, en relación con este parámetro, las aulas presentan unos valores muy adecuados.

En bajas frecuencias, como ocurría antes de la propuesta de mejora, los valores de TR son más elevados que en bajas frecuencias. Aun así, la mejora del TR en estas bandas de frecuencia experimentadas son muy importantes, pasamos en 125Hz de 2,82s a 1,36s (aula especial I) y de 2,97s a 1,39s (aula especial II). En general los materiales de construcción se comportan mejor acústicamente en altas frecuencias que en bajas.

En las frecuencias más altas el TR desciende en relación con el mejor comportamiento que presentan los materiales en estas bandas.



Con la mejora experimentada en este parámetro, no será suficiente para considerar adecuado el comportamiento acústico de la sala, aunque si se puede afirmar que experimenta una mejora sustancial, (este parámetro es el que tiene en cuenta el CTE DB-HR para el acondicionamiento acústico).

6.3.2 NIVEL DE PRESIÓN SONORA DIRECTO (SPLd).

Nos muestra la cantidad de sonido directo que llega a la sala sin ningún tipo de reflexiones.

6.3.2.1 AULA ESPECIAL 1

6.3.2.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	90,29	83,04	79,20	81,46	85,92
250Hz	90,29	83,03	79,20	81,46	85,92
500Hz	90,29	83,02	79,18	81,45	85,91
1000Hz	90,28	83,02	79,17	81,44	85,91
2000Hz	90,27	82,99	79,14	81,41	85,89
4000Hz	90,24	82,91	79,01	81,31	85,83
8000Hz	90,10	82,61	78,53	80,95	85,61

Tabla 44: nivel de presión sonora directo del aula especial 1-fuente 1. Fuente: EASE.

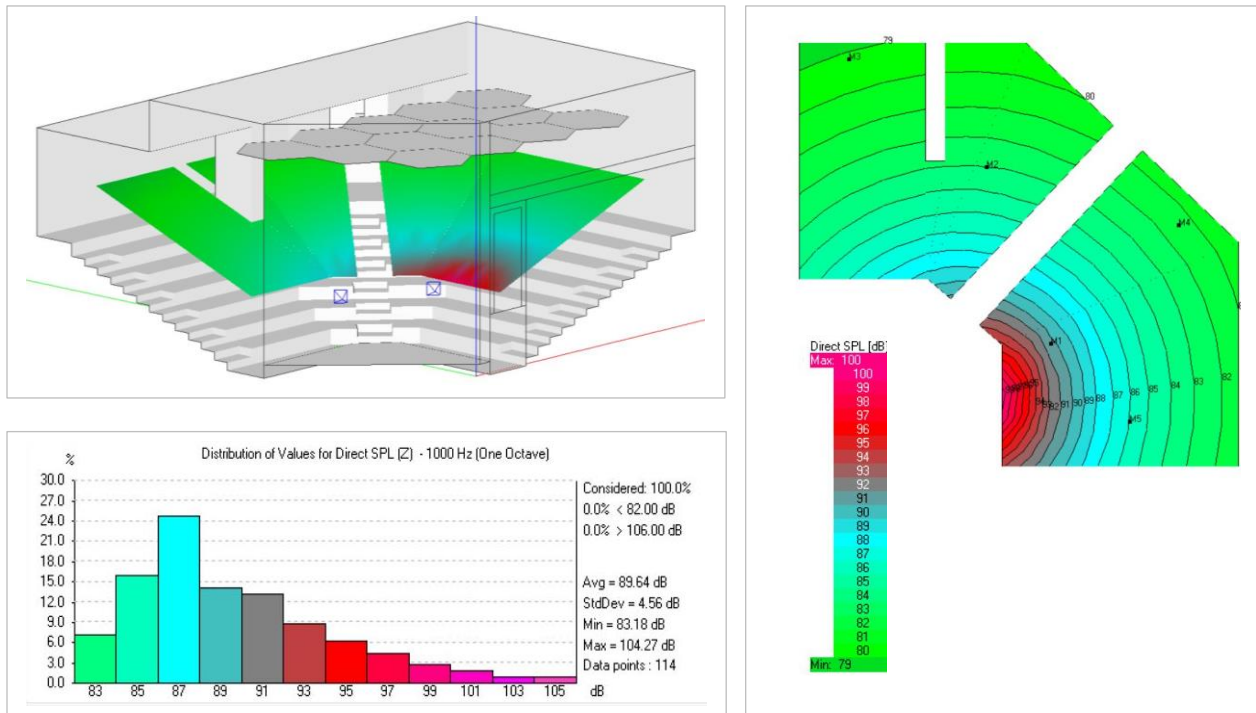


Ilustración 69: Histograma nivel de presión sonora directo mejorada del aula especial 1-fuente 1. Fuente: EASE.



6.3.2.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	85,34	83,61	80,91	79,87	81,83
250Hz	85,34	83,61	80,90	79,86	81,82
500Hz	85,33	83,60	80,89	79,85	81,82
1000Hz	85,33	83,59	80,88	79,84	81,80
2000Hz	85,31	83,57	80,85	79,81	81,78
4000Hz	85,25	83,50	80,75	79,69	81,69
8000Hz	85,01	83,21	80,36	79,25	81,33

Tabla 45: nivel de presión sonora directo del aula especial 1-fuente 2. Fuente: EASE

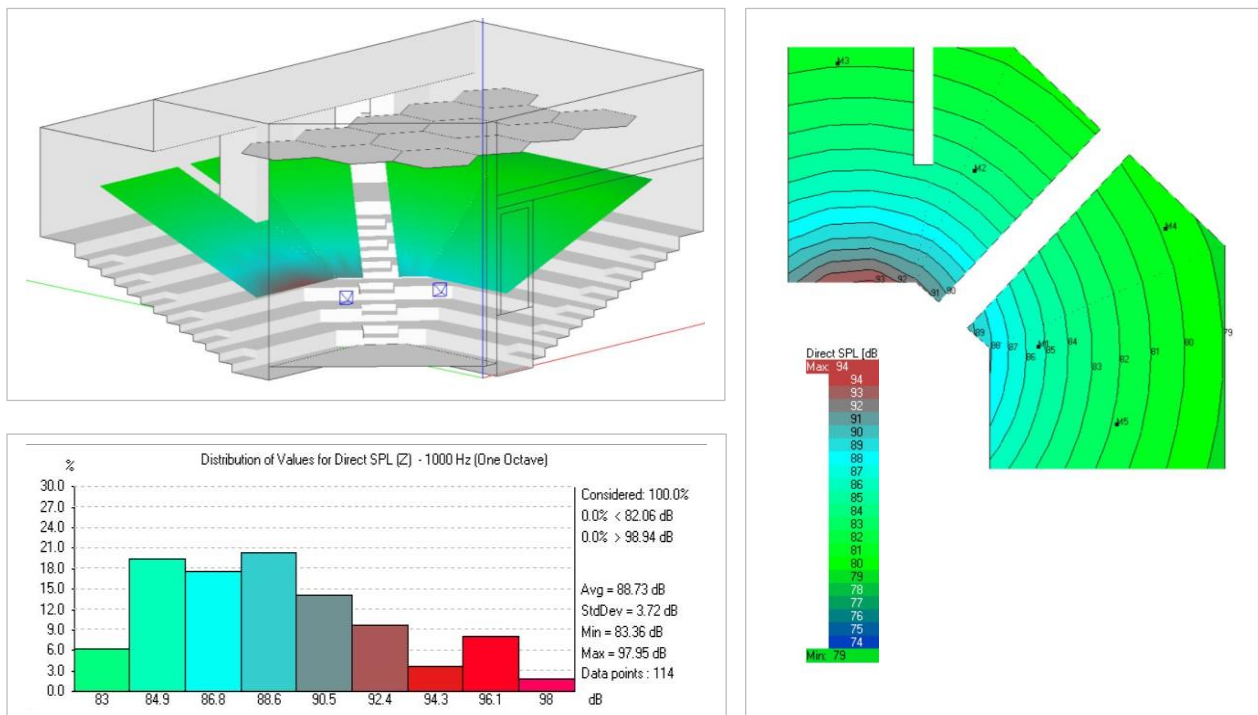


Ilustración 70: Histograma nivel de presión sonora directa mejorada del aula especial 1- fuente 2. Fuente: EASE.



6.3.2.2 AULA ESPECIAL 2

6.3.2.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	83,74	86,80	81,22	81,18	85,86
250Hz	83,73	86,80	81,22	81,18	85,86
500Hz	83,73	86,80	81,21	81,17	85,86
1000Hz	83,72	86,79	81,20	81,16	85,85
2000Hz	83,70	86,78	81,17	81,13	85,83
4000Hz	83,62	86,72	81,07	81,03	85,77
8000Hz	83,34	86,52	80,69	80,65	85,55

Tabla 46: nivel de presión sonora directo del aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.

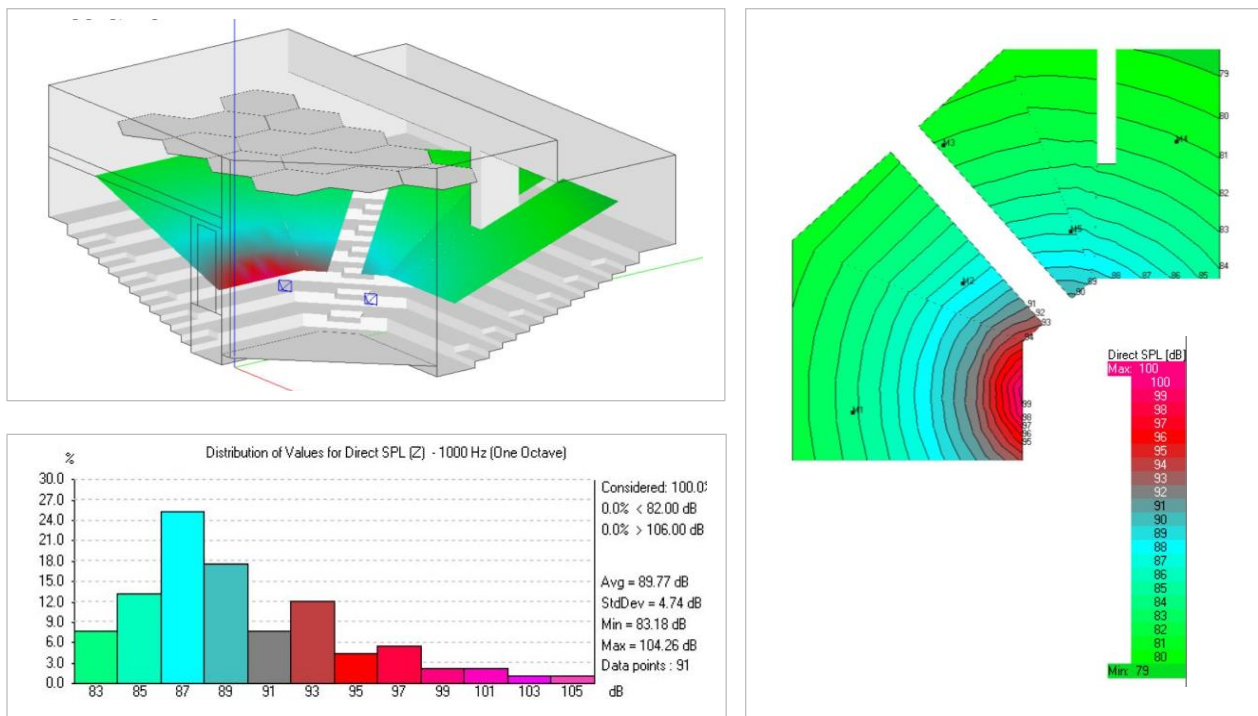


Ilustración 71: Histograma nivel de presión sonora directa mejorada del aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.



6.3.2.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	80,46	84,22	80,78	83,66	87,16
250Hz	80,46	84,22	80,77	83,65	87,16
500Hz	80,45	84,21	80,76	83,65	87,15
1000Hz	80,43	84,21	80,75	83,64	87,14
2000Hz	80,40	84,19	80,72	83,62	87,13
4000Hz	80,30	84,12	80,62	83,54	87,08
8000Hz	79,88	83,85	80,22	83,26	86,89

Tabla 47: nivel de presión sonora directo del aula especial 2-fuente 2. Fuente: EASE:

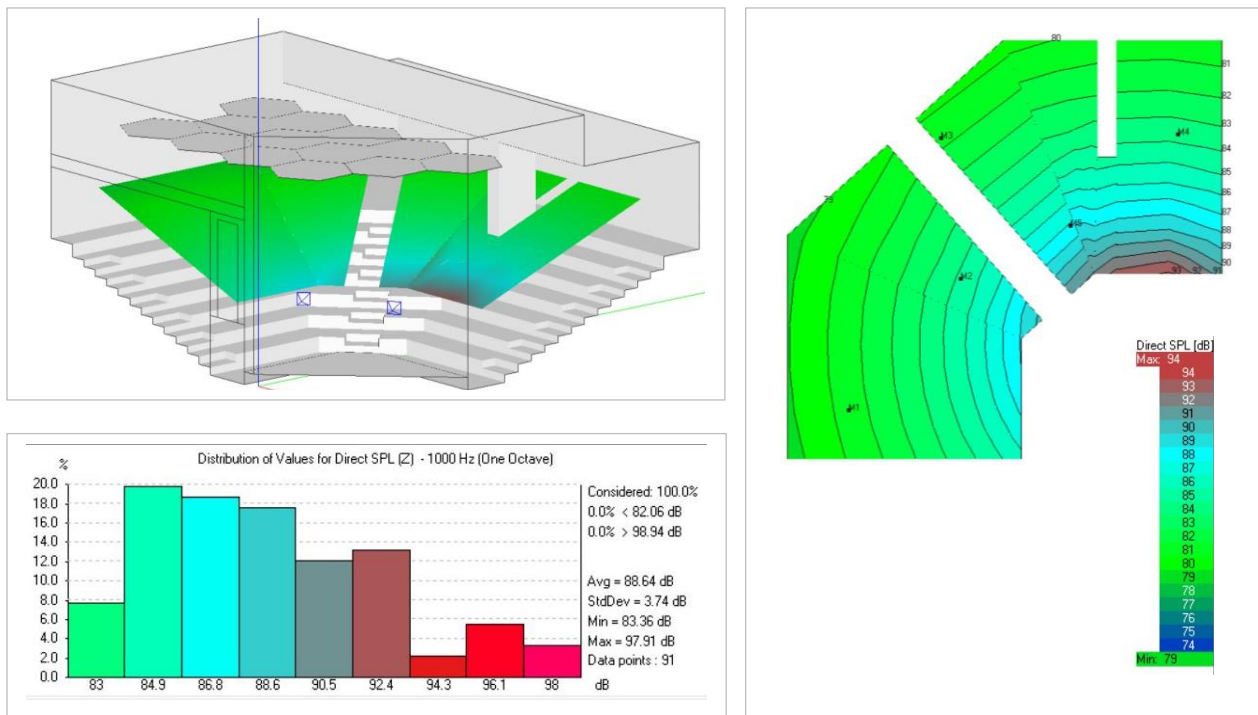


Ilustración 72: Histograma nivel de presión sonora directa mejorada del aula especial 2- fuente 2. Fuente: EASE.

Como indicamos con anterioridad, el nivel de presión sonora directo indica el nivel de sonido que llega al área de audiencia sin ningún tipo de reflexión.



6.3.3 NIVEL DE PRESIÓN SONORA TOTAL (totalSPL)

Se muestra a continuación los valores obtenidos con EASE 4.4 para cada posición fuente-punto de audiencia:

6.3.3.1 AULA ESPECIAL 1

6.3.3.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	97,13	96,34	96,22	96,27	96,52
250Hz	96,67	95,77	95,63	95,70	95,98
500Hz	95,84	94,73	94,55	94,64	95,00
1000Hz	95,60	94,42	94,23	94,32	94,71
2000Hz	95,54	94,34	94,15	94,24	94,63
4000Hz	95,32	94,05	93,85	93,95	94,36
8000Hz	94,57	93,06	92,81	92,93	93,43

Tabla 48: nivel de presión sonora total del aula especial 1-fuente 1. Fuente: EASE.

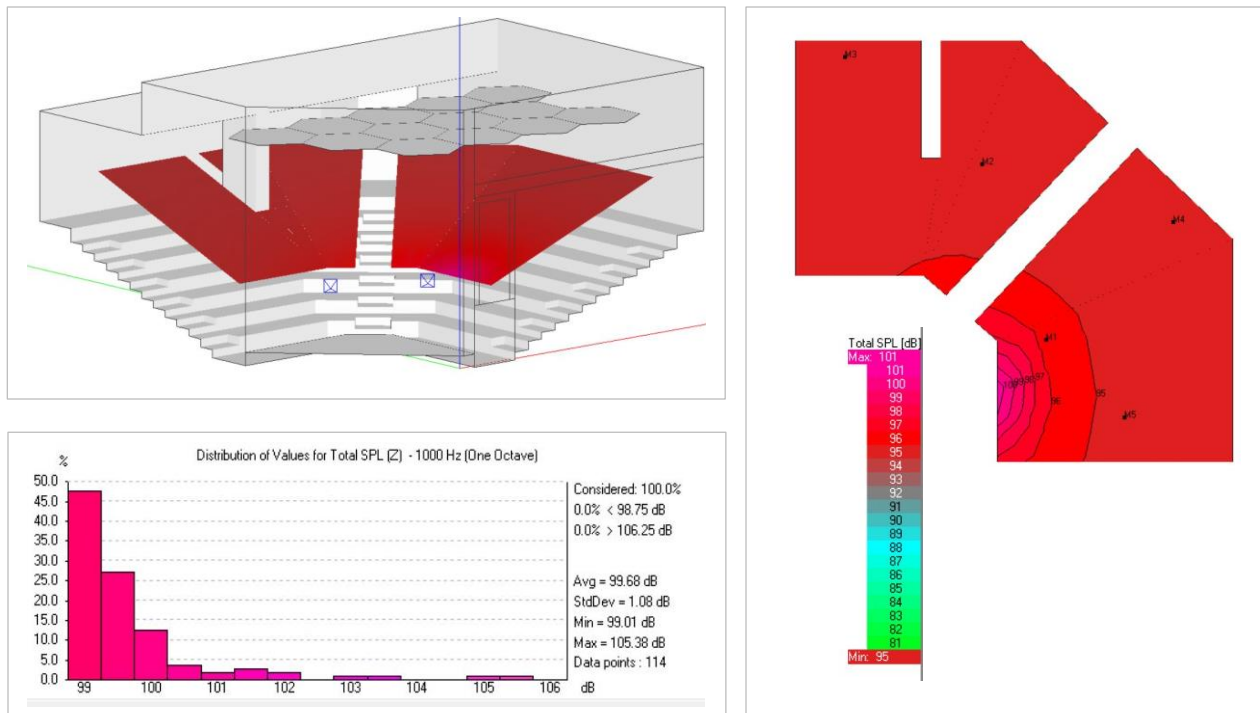


Ilustración 73: Histograma nivel de presión sonora total mejorada del aula Especial 1- fuente 1. Fuente: EASE.



6.3.3.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	96,48	96,37	96,26	96,23	96,29
250Hz	95,93	95,80	95,68	95,65	95,71
500Hz	94,93	94,77	94,61	94,57	94,66
1000Hz	94,63	94,46	94,30	94,25	94,34
2000Hz	94,56	94,39	94,22	94,17	94,26
4000Hz	94,28	94,10	93,92	93,87	93,97
8000Hz	93,34	93,12	92,90	92,84	92,96

Tabla 48: nivel de presión sonora total del aula especial 1-fuente2. Fuente: EASE.

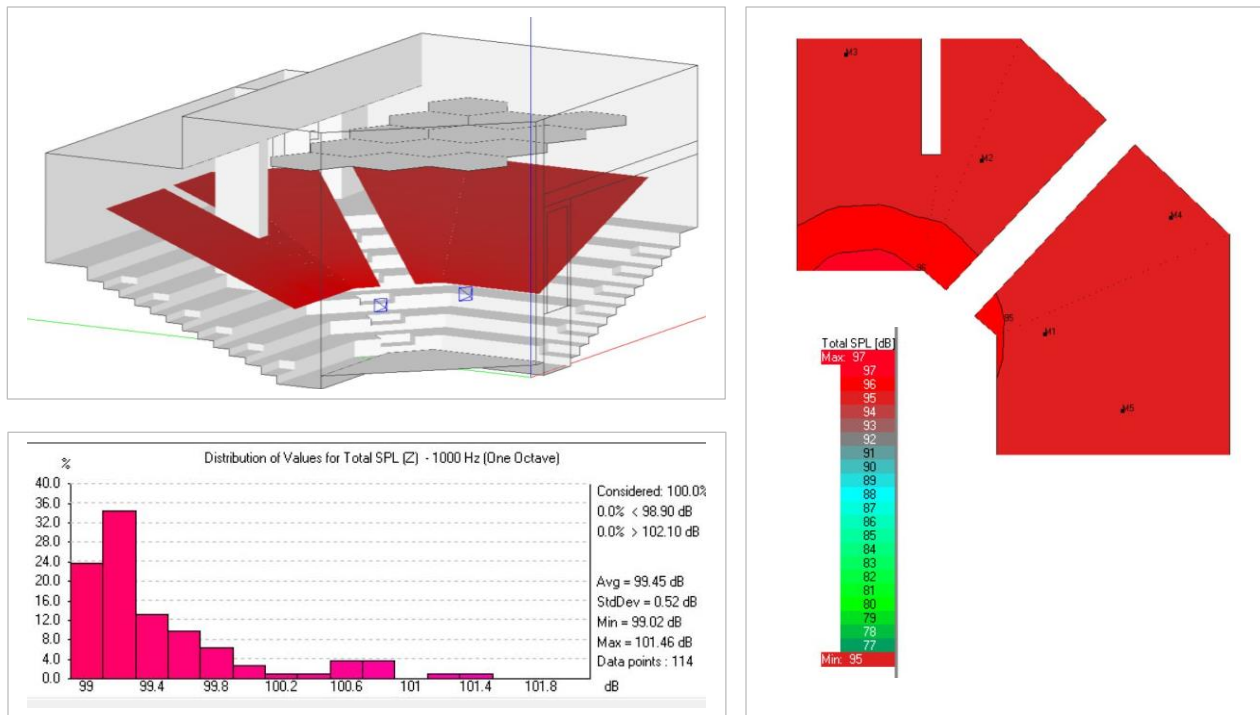


Ilustración 74:: Histograma nivel de presión sonora total mejorada del aula Especial 1- fuente 2. Fuente: EASE.



6.3.3.2 AULA ESPECIAL 2

6.3.3.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	96,48	96,71	96,38	96,37	96,62
250Hz	95,90	96,16	95,78	95,78	96,06
500Hz	94,84	95,17	94,69	94,69	95,05
1000Hz	94,53	94,89	94,37	94,37	94,75
2000Hz	94,45	94,81	94,29	94,29	94,68
4000Hz	94,16	94,54	93,99	93,98	94,40
8000Hz	93,17	93,63	92,96	92,95	93,46

Tabla 48: nivel de presión sonora total del aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.

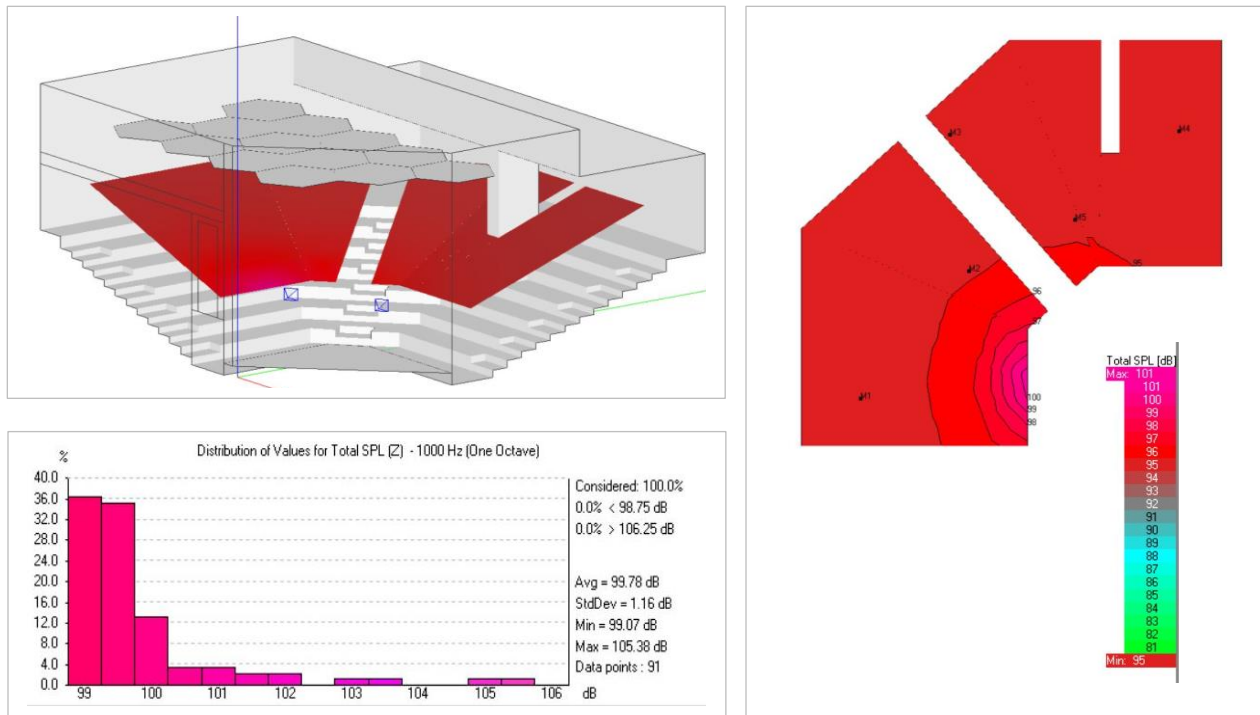


Ilustración 75: Histograma nivel de presión sonora total del aula Especial 2- fuente 1. Fuente: EASE



6.3.3.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	96,35	96,51	96,36	96,47	96,75
250Hz	95,76	95,93	95,77	95,89	96,21
500Hz	94,66	94,88	94,67	94,84	95,23
1000Hz	94,33	94,57	94,35	94,52	94,94
2000Hz	94,25	94,50	94,27	94,45	94,87
4000Hz	93,95	94,21	93,96	94,15	94,60
8000Hz	92,91	93,22	92,93	93,16	93,70

Tabla 49: nivel de presión sonora total del aula especial 2-fuente 2. Fuente: EASE:

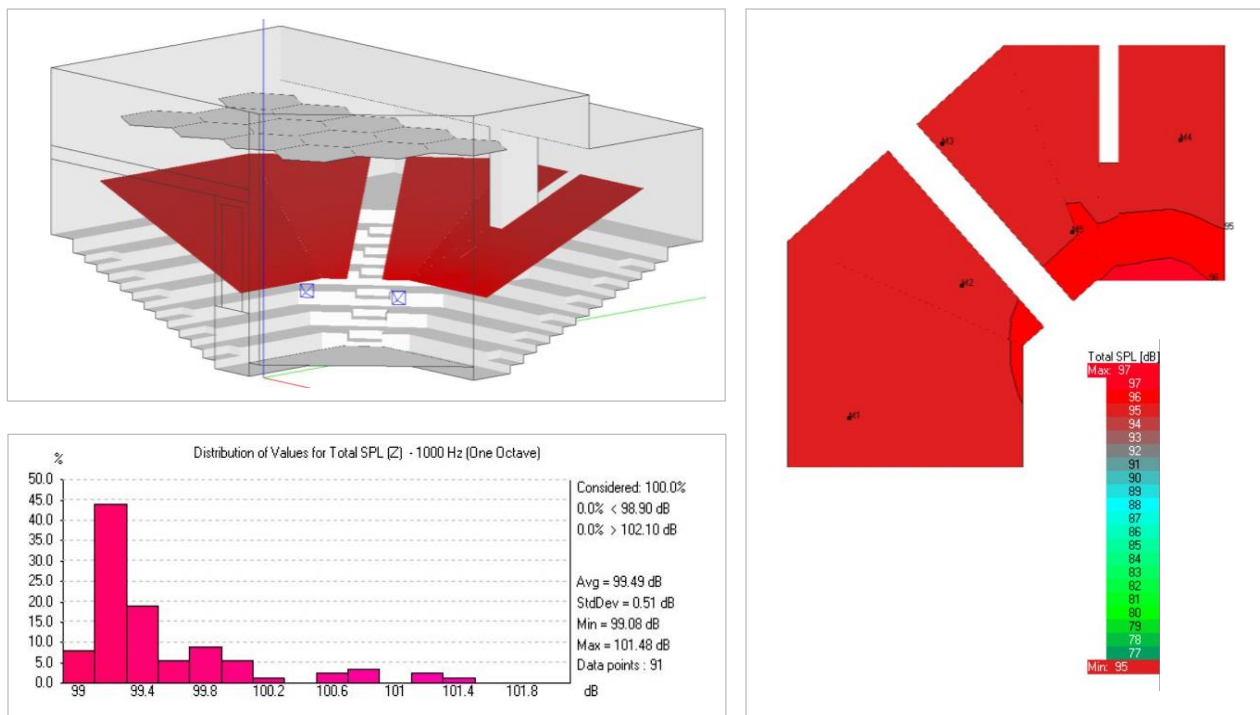


Ilustración 76:: Histograma nivel de presión sonora total del aula Especial 2, fuente 2. Fuente: EASE

Los valores obtenidos del nivel de presión sonora total representan la suma del nivel de presión sonora directo y el nivel de presión sonora reverberante.

Después de la mejora realizada, se observa que el principal cambio que experimentan las aulas especiales I y II es que el intervalo entre el valor máximo y el mínimo se ve reducido.

Si analizamos la distribución de los valores del nivel de presión sonora total, observamos que los valores se concentran en un intervalo pequeño.



6.3.4 NIVEL DE RELACIÓN ENTRE CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE (D/R RATIO)

6.3.4.1 AULA ESPECIAL 1

6.3.4.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	-5,84	-13,09	-16,93	-14,67	-10,21
250Hz	-5,24	-12,50	-16,33	-14,07	-9,61
500Hz	-4,13	-11,40	-15,24	-12,97	-8,51
1000Hz	-3,81	-11,07	-14,92	-12,65	-8,18
2000Hz	-3,74	-11,02	-14,87	-12,60	-8,12
4000Hz	-3,46	-10,79	-14,69	-12,39	-7,87
8000Hz	-2,55	-10,04	-14,12	-11,70	-7,04

Tabla 50: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATIO). Aula especial 1-fuente 1. Fuente: EASE.

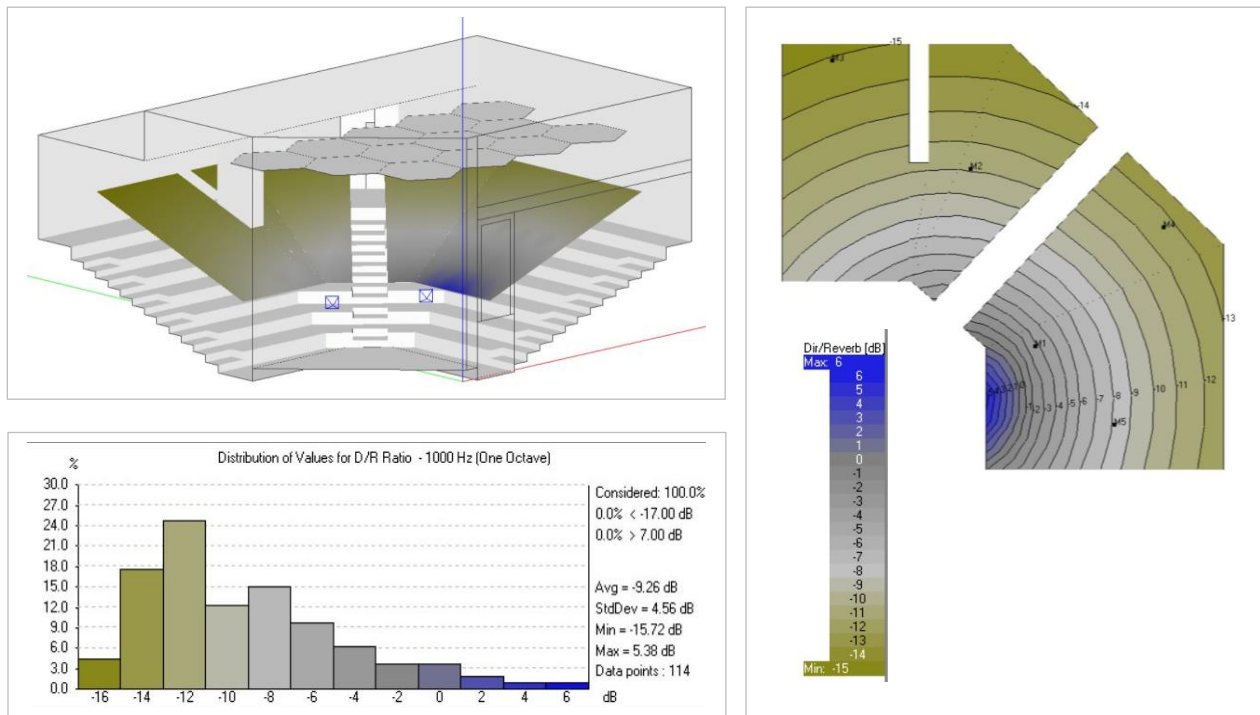


Ilustración 77: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 1- fuente 1.

Fuente: EASE



6.3.4.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	-10,79	-12,52	-15,22	-16,26	-14,30
250Hz	-10,19	-11,92	-14,63	-15,67	-13,71
500Hz	-9,09	-10,82	-13,53	-14,57	-12,60
1000Hz	-8,76	-10,50	-13,21	-14,25	-12,29
2000Hz	-8,70	-10,44	-13,16	-14,20	-12,23
4000Hz	-8,45	-10,20	-12,95	-14,01	-12,01
8000Hz	-7,64	-9,44	-12,29	-13,40	-11,32

Tabla 51: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATIO). Aula especial 1-fuente 2. Fuente: EASE:

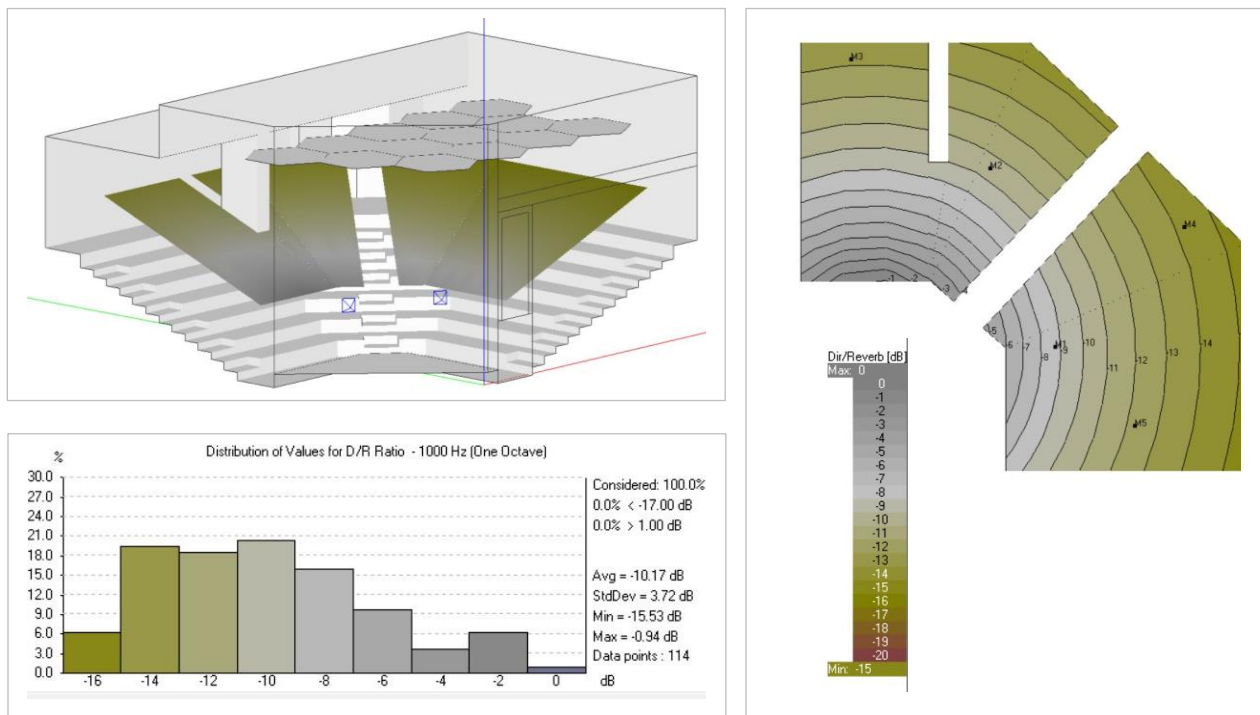


Ilustración 78: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 1- fuente 2.

Fuente: EASE



6.3.4.2 AULA ESPECIAL 2

6.3.4.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
125Hz	-12,50	-9,44	-15,02	-15,06	-10,38
250Hz	-11,90	-8,83	-14,41	-14,45	-9,77
500Hz	-10,76	-7,69	-13,28	-13,32	-8,63
1000Hz	-10,43	-7,36	-12,95	-12,99	-8,30
2000Hz	-10,37	-7,29	-12,90	-12,94	-8,24
4000Hz	-10,14	-7,04	-12,69	-12,73	-7,99
8000Hz	-9,35	-6,17	-12,00	-12,04	-7,14

Tabla 52: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATIO). Aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.

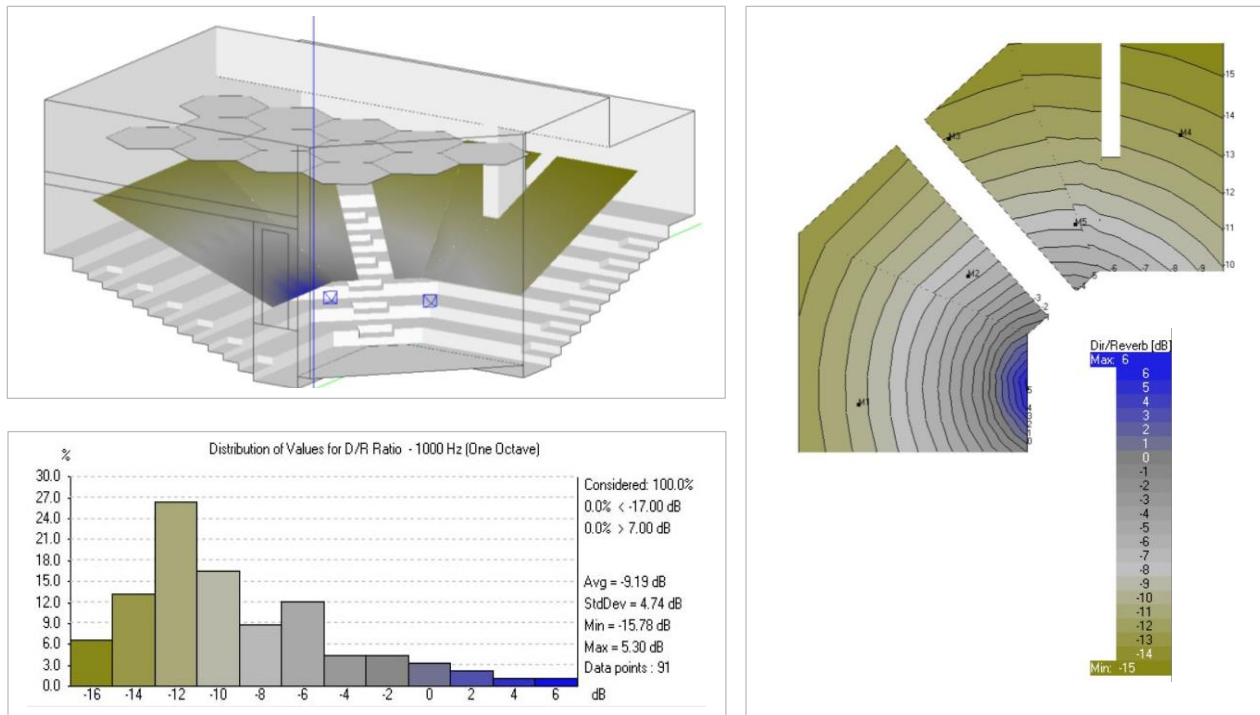


Ilustración 79: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 2-fuente 1.

Fuente: EASE



6.3.4.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes (unidades en dB):

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
125Hz	-15,78	-12,02	-15,46	-12,58	-9,08
250Hz	-15,17	-11,41	-14,86	-11,98	-8,47
500Hz	-14,04	-10,28	-13,73	-10,84	-7,34
1000Hz	-13,72	-9,94	-13,40	-10,51	-7,01
2000Hz	-13,67	-9,88	-13,35	-10,45	-6,94
4000Hz	-13,46	-9,64	-13,14	-10,22	-6,68
8000Hz	-12,81	-8,84	-12,47	-9,43	-5,80

Tabla 53: nivel de relación entre campo directo y reverberante (D/R RATIO). Aula Especial2-fuente 2. Fuente: EASE.

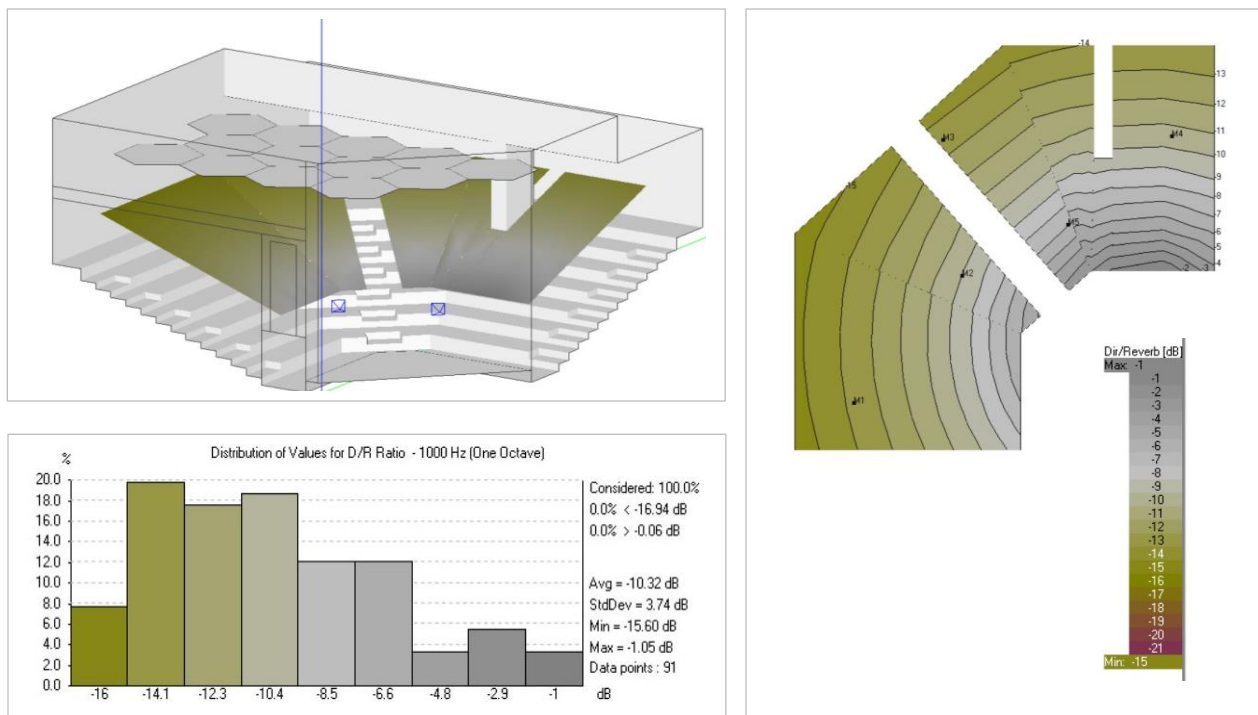


Ilustración 80: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 2-fuente 2.

Fuente: EASE

El campo reverberante de las aulas especiales I y II, previa a la mejora, contaba con un campo reverberante mucho mayor que el directo. Con esta propuesta se consigue reducir el campo reverberante.

Después de la propuesta de mejora, se obtienen valores mucho menores, es decir, en el que el campo directo prevalece sobre el reverberante. Aun así, sigue predominando el campo reverberante, pero con valores más próximos a 0 dB.



Los valores de la relación directo/reverberante no llegan a ser los deseables para una sala de estas características, a pesar de esto, la mejoría que experimenta la sala es muy importante.

6.3.5 PÉRDIDA DE ARTICULACIÓN DE CONSONANTES (ALCONS).

6.3.5.1 AULA ESPECIAL 1

6.3.5.1.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
500Hz,	4,56	5,72	5,88	5,80	5,44
1000Hz	4,56	5,72	5,88	5,80	5,44
2000Hz	4,56	5,72	5,88	5,80	5,44

Tabla 54: pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Aula especial 1-fuente 1. Fuente: EASE.

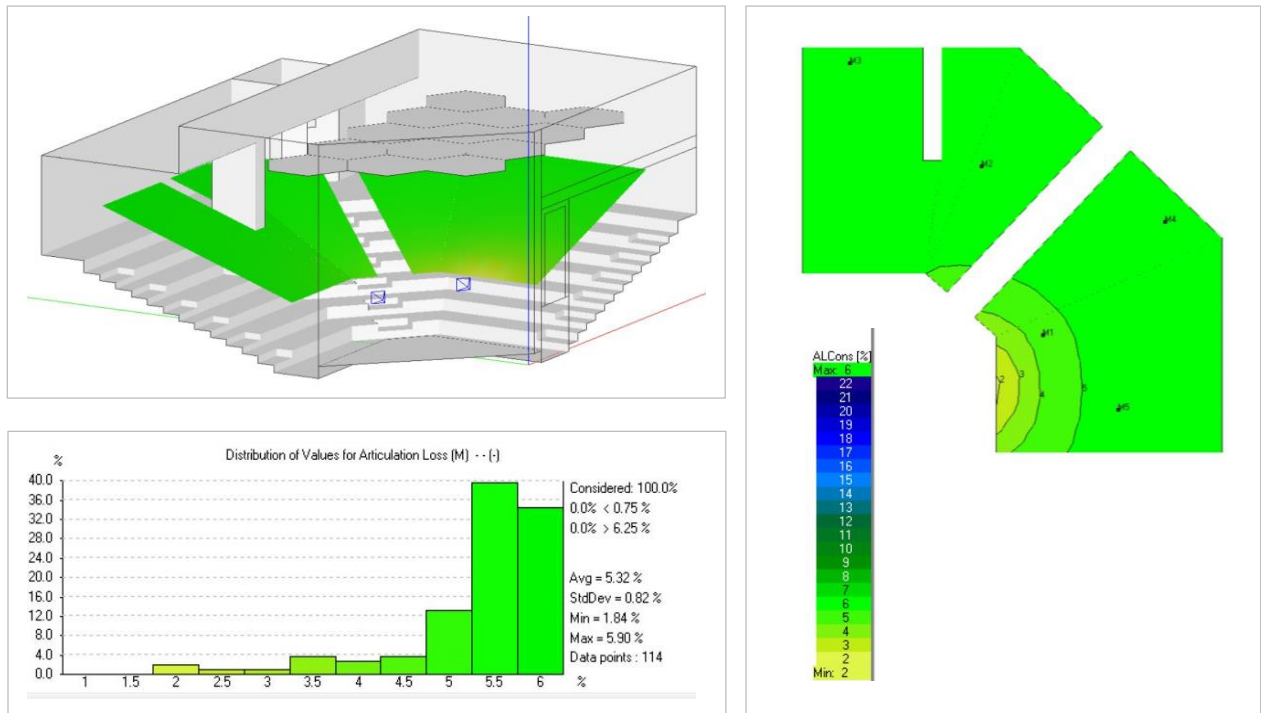


Ilustración 81: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 1- fuente 1. Fuente: EASE



6.3.5.1.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
500Hz	5,51	5,68	5,83	5,86	5,79
1000Hz	5,51	5,68	5,83	5,86	5,79
2000Hz	5,51	5,68	5,83	5,86	5,79

Tabla 55: pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Aula especial 1-fuente 2. Fuente: EASE:

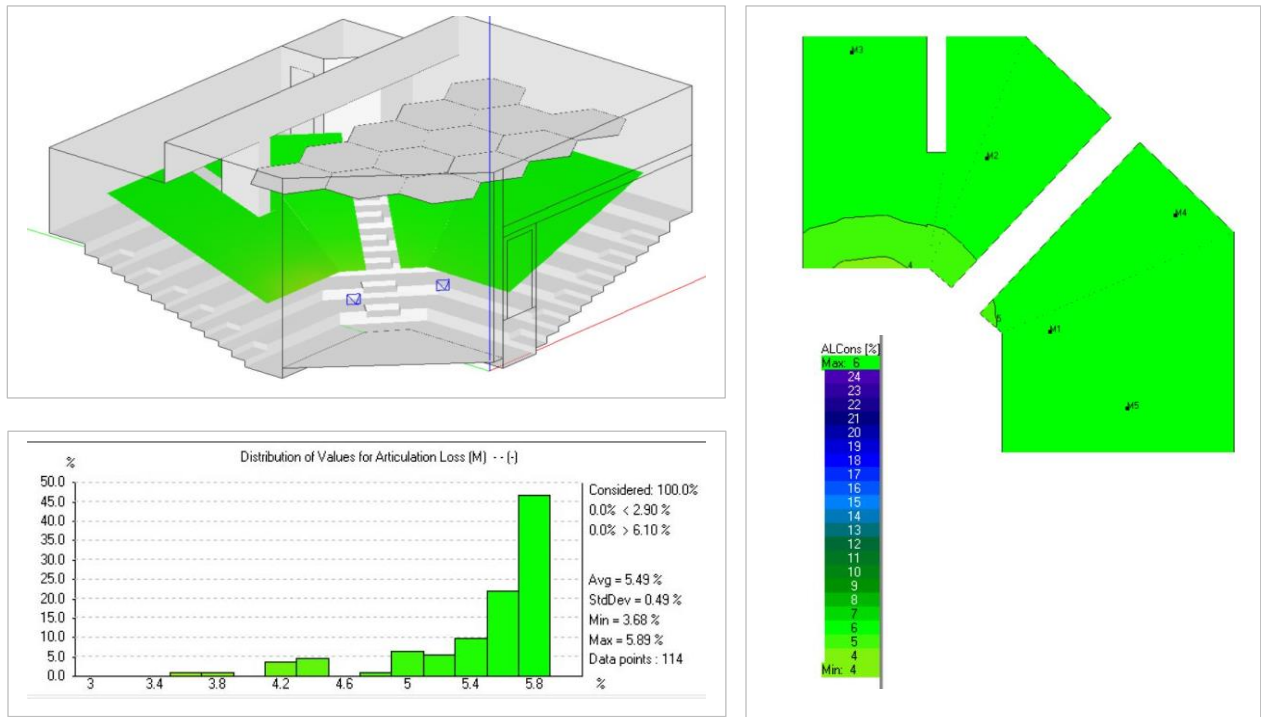


Ilustración 82: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 1- fuente 2. Fuente: EASE



6.3.5.2 AULA ESPECIAL 2

6.3.5.2.1 FUENTE 1

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5
500Hz	5,77	5,41	5,92	5,92	5,55
1000Hz	5,77	5,41	5,92	5,92	5,55
2000Hz	5,77	5,41	5,92	5,92	5,55

Tabla 56: pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.

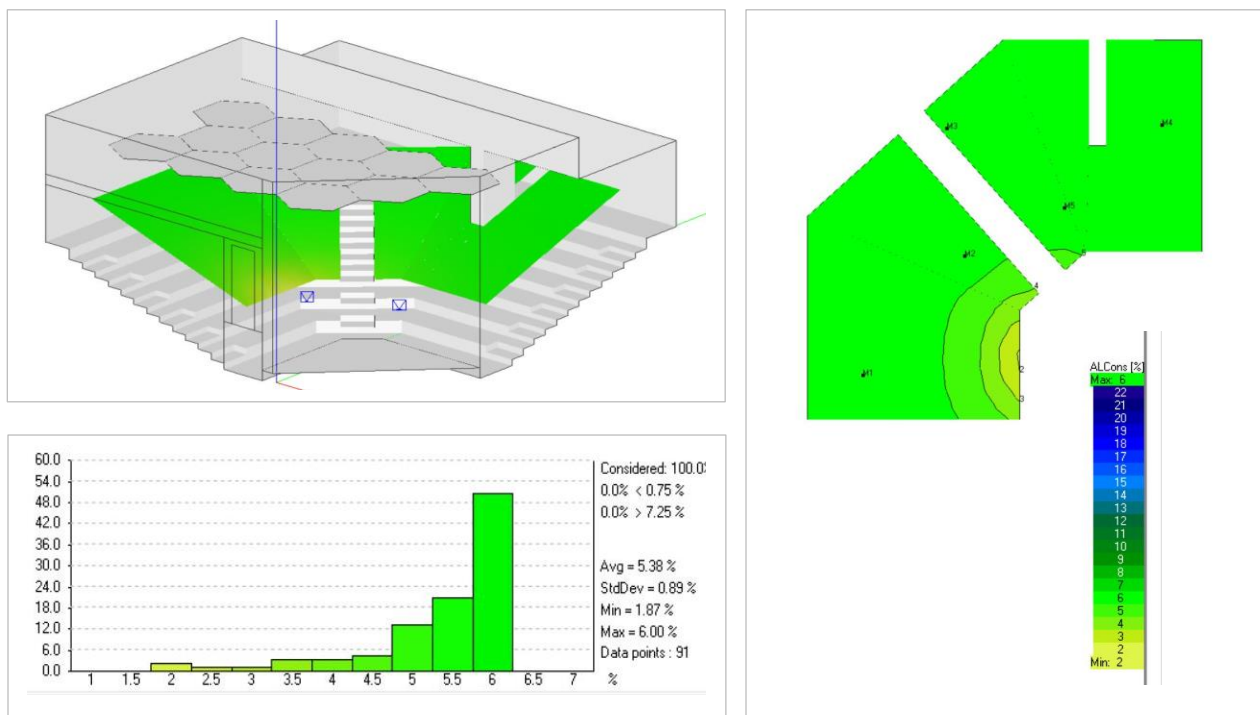


Ilustración 83: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 2-fuente 1. Fuente: EASE

6.3.5.2.2 FUENTE 2

Los resultados para cada banda de frecuencia son los siguientes:

FRECUENCIA	F2M1	F2M2	F2M3	F2M4	F2M5
500Hz	5,95	5,73	5,93	5,77	5,35
1000Hz	5,95	5,73	5,93	5,77	5,35
2000Hz	5,95	5,73	5,93	5,77	5,35

Tabla 57: pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Aula Especial2-fuente 2. Fuente: EASE.

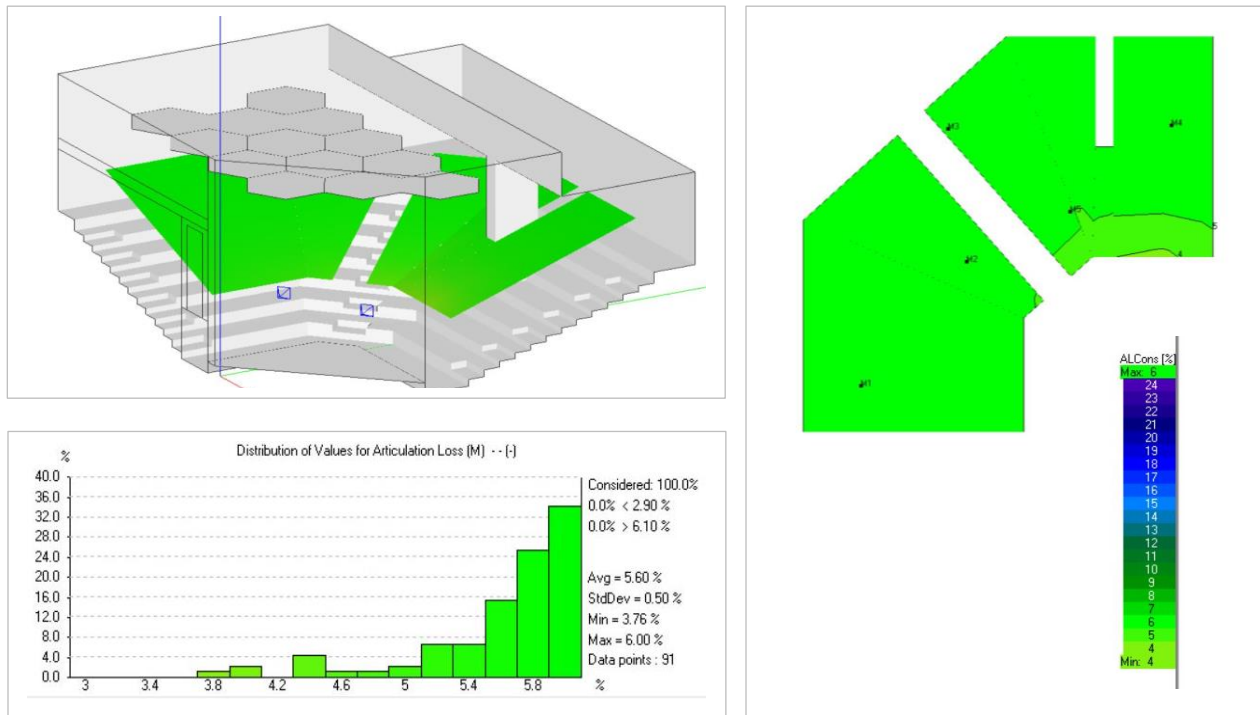


Ilustración 84: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 2-fuente 2. Fuente: EASE

Como podemos observar, después de la mejora, los resultados han mejorado considerablemente estando entre el 1,6% y 11,4% que nos indica que la inteligibilidad de la palabra es entre aceptable y buena.

Este parámetro es el más significativo en la propuesta de mejora, ya que es el que nos ha aportado más información sobre la calidad acústica de las aulas especiales I y II.



6.4 CUADRO COMPARATIVO DEL ESTADO ACTUAL CON LA PROPUESTA DE MEJORA

Con el siguiente cuadro compararemos los datos obtenidos antes y después de la mejora:

PARÁMETROS				ESTADO ACTUAL	ESTADO MEJORADO
Tiempo reverberación (1000Hz)		Aula Especial I		2,64s	0,90s
		Aula Especial II		2,77s	0,91s
SPL Directo	Aula especial I	Fuente 1	Máximo	90,28dB	90,28dB
			Mínimo	79,17dB	79,17dB
		Fuente 2	Máximo	85,33dB	85,33dB
			Mínimo	79,84dB	79,84dB
	Aula Especial II	Fuente 1	Máximo	86,79dB	86,79dB
			Mínimo	81,16dB	81,16dB
		Fuente 2	Máximo	87,14dB	87,14dB
			Mínimo	80,43dB	80,43dB
Total SPL	Aula Especial I	Fuente 1	Máximo	99,74dB	95,60dB
			Mínimo	99,27dB	94,23dB
		Fuente 2	Máximo	99,40dB	94,63db
			Mínimo	99,27dB	94,25dB
	Aula Especial II	Fuente 1	Máximo	99,69dB	94,89dB
			Mínimo	99,53dB	94,37dB
		Fuente 2	Máximo	99,71dB	94,94dB
			Mínimo	99,52dB	94,33dB
D/R Ratio	Aula Especial I	Fuente 1	Máximo	-20,05dB	-14,92dB
			Mínimo	-8,94dB	-3,81dB
		Fuente 2	Máximo	-19,38dB	-14,25dB
			Mínimo	-13,89dB	-8,76dB
	Aula Especial II	Fuente 1	Máximo	-18,30dB	-12,99db
			Mínimo	-12,67dB	-7,36db
		Fuente 2	Máximo	-19,03dB	-13,72dB
			Mínimo	-12,32dB	-7,01db
Alcons%	Aula Especial I	Fuente 1	Máximo	17,92	5,88
			Mínimo	14,73	4,56
		Fuente 2	Máximo	17,89	5,86
			Mínimo	17,11	5,51
	Aula Especial II	Fuente 1	Máximo	18,66	5,92
			Mínimo	17,48	5,41
		Fuente 2	Máximo	18,72	5,95
			Mínimo	17,33	5,35

Tabla 58: comparativa entre el estado actual y el estado mejorado de las aulas especiales I y II. Fuente: propia.



7 CAPÍTULO VII: MEDICIÓN Y PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA DE MEJORA

7.1 PRECIOS DESCOMPUESTOS

u. suministro y colocación de sistema de panel acústico ACUSTIART de dimensiones altura 1,73m y lado 2,00m con cuadro de aluminio, 2 raíles de acero galvanizado, absorbente de fibras de poliéster y tejido absorbente. Suspendida de 4 cables de acero inox Ø 1,5mm longitud 1200mm, fijado a techo con 4 ud. multitacos y 4 ud. piezas de acero y en la parte inferior 4 ud. tirafondos y 4 ud. soporte roscado con freno para cable de acero. Acabado color vainilla código 4051. Incluso p/p taladros, cables, elementos de fijación y medios auxiliares. Según CTE DB-HR. Todos los productos contarán con el marcado CE.

PRODUCTOS DE CONSTRUCCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
Sistema panel acústico ACUSTIART de dimensiones altura 1,73 m y lado 2,00m.	1 u/uuo	300,00€/u	300,00€/u
4% pérdidas	0,04s/	300,00€/uuo	12€/uuo
TOTAL PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN			312,00€/uuo

MANO DE OBRA	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
Colocación de sistema de panel acústico (1OF1 ^a +1PO)	1,000h/uuo	33,47€/h	33,47€/uuo
TOTAL MANO DE OBRA			33,47€/uuo



MEDIOS AUXILIARES	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
	TOTAL MEDIOS AUXILIARES		0,00€/uuo

MANO DE OBRA	TOTAL
TOTAL COSTES SECO DE PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN, MANO DE OBRA Y MEDIOS AUXILIARES:	345,47€/uuo
COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIO (CDC):	20,40€/uuo
TOTAL COSTES DIRECTOS (CD):	365,87€/uuo
COSTES INDIRECTOS DE EJECUCIÓN (CI):	59,55€/uuo
TOTAL PRECIO UNITARIO:	425,42€/uuo



7.2 MEDICIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA

Nº de orden	Descripción	Nº de partes iguales	Dimensiones			Mediciones	
			Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Totales
1.1	CAPÍTULO 01. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO						
	u. Suministro y colocación de sistema de panel acústico ACUSTIART de dimensiones alto 1,73m y lado 2,00m.						
	u. suministro y colocación de sistema de panel acústico ACUSTIART de dimensiones altura 1,73m y lado 2,00m con cuadro de aluminio, 2 raíles de acero galvanizado, absorbente de fibras de poliéster y tejido absorbente. Suspendida de 4 cables de acero inox Ø 1,5mm longitud 1200mm, fijado a techo con 4 ud. multitacos y 4 ud. piezas de acero y en la parte inferior 4 ud. tirafondos y 4 ud. soporte roscado con freno para cable de acero. Acabado color vainilla código 4051. Incluso p/p taladros, cables, elementos de fijación y medios auxiliares. Según CTE DB-HR. Todos los productos contarán con el marcado CE.	13				13	
							13



7.3 PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA DE MEJORA

Nº de orden	Nº de unidad	DESCRIPCIÓN	PRECIO €	IMPORTE €
1.1	13	<p>CAPÍTULO 01. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO</p> <p>u. Suministro y colocación de sistema de panel acústico ACUSTIART de dimensiones alto 1,73m y lado 2,00m.</p> <p>u. suministro y colocación de sistema de panel acústico ACUSTIART de dimensiones altura 1,73m y lado 2,00m con cuadro de aluminio, 2 raíles de acero galvanizado, absorbente de fibras de poliéster y tejido absorbente. Suspendida de 4 cables de acero inox Ø 1,5mm longitud 1200mm, fijado a techo con 4 ud. multitacos y 4 ud. piezas de acero y en la parte inferior 4 ud. tirafondos y 4 ud. soporte roscado con freno para cable de acero. Acabado color vainilla código 4051. Incluso p/p taladros, cables, elementos de fijación y medios auxiliares. Según CTE DB-HR. Todos los productos contarán con el marcado CE.</p>	425,42	5530,46
TOTAL PEM:				5530,46

GGE	13%	718,95
BI	7%	387,13
TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA		6636,54
IVA	21%	1393,67
PRESUPUESTO TOTAL		8030,21

Asciende el presupuesto total a la expresada cantidad de OCHO MIL TREINTA CON VEINTIÚN CÉNTIMOS DE EURO cada aula.



8 CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

8.1 CONCLUSIONES

Finalizado el proyecto se puede afirmar que se ha alcanzado los objetivos.

A partir de la recogida de medidas “in situ” se realizó un modelo virtual para simular las condiciones acústicas de las Aulas Especiales I y II con el software EASE. Se hizo la recopilación de datos del estado actual y se consiguió analizar el estado acústico de las aulas.

Además, se pudo realizar unas mediciones “in situ” con un equipo de medición acústico con la colaboración de la Escuela técnica superior de ingeniería y sistemas de telecomunicación.

A la vez que la modelización, se efectuó un estudio de la teoría de la acústica de salas, que sirvió de base para entender los posteriores análisis de los resultados acústicos de las aulas. En la parte teórica se trataron los parámetros más importantes en el comportamiento acústico de salas, para después aplicarlo al caso práctico.

Los resultados obtenidos con EASE, tales como nivel de presión sonora directo, nivel de presión sonora total, relación entre campo directo y campo reverberante y pérdida de la articulación de consonantes. Estos valores fueron comprobados analíticamente y se corroboraron con los obtenidos en EASE.

El trabajo más laborioso es introducir los vértices en EASE y los materiales de las aulas especiales I y II, que es lo que permite que posteriormente obtengamos los resultados a analizar para proponer una mejora en los recintos.

En lo referido a la calidad acústica de las aulas especiales I y II, observamos que en el estado actual no cumplen los objetivos de la normativa y tampoco de los parámetros estudiados teóricos.

Con los resultados obtenidos y su posterior análisis, nos permitió proponer una solución de mejora más ajustada a los problemas acústicos y arquitectónicos presentes.

Con la propuesta de mejora se consiguió mejorar notablemente los parámetros para la calidad acústica de las aulas especiales I y II. Estos valores están dentro de los varemos aceptables para inteligibilidad de la palabra y se consiguió reducir notablemente el tiempo de reverberación.

Esta solución de mejora, consistió en el diseño de unos paneles acústicos en forma hexagonal que van suspendidos del forjado superior de las aulas. Se tuvo en cuenta los coeficientes de absorción proporcionados por la casa comercial “acústica integral” y su sistema de suspensión por raíles con cables.

Con toda esta información se aporta un presupuesto de la mejora propuesta.



Con todo el trabajo realizado en este proyecto se han ampliado los conocimientos de la acústica aplicada a recintos. Además de conocer un campo novedoso y mucho más amplio de lo esperado. También me ha permitido conocer las limitaciones del CTE DB-HR en lo referente a acústica de salas.

La propuesta de mejora me permitió acercarme a nuevos materiales adecuados para el acondicionamiento y poder entender su comportamiento dentro de las aulas.

Después de todo lo realizado, el proceso de aprendizaje ha sido considerablemente importante y considero que es un campo poco explorado en el Grado de Arquitectura Técnica. Es un tema con un futuro potencial para la profesión y abre una nueva línea de estudio a tener en cuenta.



9 BIBLIOGRAFÍA

- ARAU HIGINI, 1999. ABC de la acústica arquitectónica. S.l.: Ediciones CEAC. ISBN 84-329-2017-7.
- CARRIÓN ANTONI, 1998. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. ISBN 84-8301-252-9.
- COBO PARRA, PEDRO, 2015. Absorción del sonido. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. ISBN 9788400099527.
- VALERO GRANADOS SANTIAGO, 2011. Acústica aplicada al interiorismo. S.l.;Arquifon, diseños contra el ruido, s.l. ISBN 978-84-614-7626-8.
- Francisco Javier Rodríguez Rodríguez, Javier de la Puente Crespo, César Díaz Sanchidrián, 2008. Guía acústica de la construcción. Madrid: inversiones editoriales Dossat 2000, S.L., ISBN: 978-84-96437-81-4.
- Sociedad Española de Acústica. Julio 2012. Glosario de términos acústicos. Editorial: Sociedad Española de Acústica. ISBN: 978-84-87985-22-5.
- Manuel Recuerdo López. Madrid 1999. Acústica arquitectónica aplicada. Editorial paraninfo. ISBN: 84-283-2571-5.

10 FUENTES NORMATIVA

- MINISTERIO DE VIVIENDA, MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN, septiembre 2009. Documento Básico HR. Protección frente al ruido. CTE.Madrid.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN, marzo 2016. Catálogo de Elementos Constructivos. CTE. Madrid.
- AENOR, 2008. UNE-EN-ISO 3382-2: 2008. Medición de Parámetros Acústicos en recintos, parte 2: Tiempo de Reverberación en recintos ordinarios. Madrid: Aenor.
- MINISTERIO DE HACIENDA Y FUNCIÓN PÚBLICA, Sede electrónica del catastro. Madrid.

11 PÁGINAS WEB

- ACÚSTICA INTEGRAL [sitio web] 2013. Madrid. Empresa Acústica integral [consulta 13 enero 2017]. Disponible en www.acusticaintegral.com.
- AENOR [sitio web] Madrid. 2016. Normas AENOR [consulta varias fechas]. Disponible en www.aenor.es.



12 ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: HYPERPHYSICS GEORGIA STATE UNIVERSITY [Imagen digital en línea], 2008.	5
Ilustración 2: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo	6
Ilustración 3: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.	7
Ilustración 4: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.	7
Ilustración 5: arquidesignitaliano.blogspot.com [imagen digital en línea] Año desconocido.	10
Ilustración 6: física.laguía2000.com.[imagen digital en línea] Año: desconocido.....	11
Ilustración 7: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.	11
Ilustración 8: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo. En la figura se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor.....	13
Ilustración 9: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.	14
Ilustración 10: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.	15
Ilustración 11: Carrión Isbert, Antoni, 1998.	16
Ilustración 12: Carrión Isbert, Antoni, 1998.	16
Ilustración 13: Carrión Isbert, Antoni, 1998	17
Ilustración 14: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.	19
Ilustración 15: Santiago Valero Granados, 2011. Acústica aplicada al interiorismo.	22
Ilustración 16: vista aérea de la escuela universitaria de arquitectura técnica de A Coruña. Fuente: google maps. 2016.....	33
Ilustración 17: fotos fachadas principales Universidad de Arquitectura Técnica de A Coruña. Fuente: propia.....	33
Ilustración 18: fotos fachadas principales Universidad de Arquitectura Técnica de A Coruña. Fuente: propia.....	34
Ilustración 19: panorámica aula especial 1. Fuente: propia.....	34
Ilustración 20: panorámica aula especial 2. Fuente: propia.....	35
Ilustración 21: suelo aulas especiales. Fuente: propia.	35
Ilustración 22: techo aulas especiales. Fuente: propia.....	36
Ilustración 23: paramentos de las aulas especiales. Fuente: propia.....	36
Ilustración 24: butacas de las aulas especiales. Fuente: propia	37
Ilustración 25: linóleo de color rojo usado en las aulas especiales. Fuente: propia.	37
Ilustración 26: pintura blanca sobre enfoscado de mortero. Fuente: propia.	37
Ilustración 27: hormigón visto de las aulas especiales. Fuente: propia.	38
Ilustración 28: vidrio transparente usado en las ventanas de las aulas especiales. Fuente: propia.	38
Ilustración 29: chapa de madera en color oscuro de las aulas especiales. Fuente: propia.	38
Ilustración 30: Aula especial 1, vértices. Fuente: EASE.	49
Ilustración 31: Aula especial 2, vértices. Fuente: EASE.	49
Ilustración 32: Aula especial 2, áreas de audiencia.	51
	118



Ilustración 33: Aula especial 1, áreas de audiencia.	51
Ilustración 34: Aula especial 1, posiciones oyentes. Fuente: EASE.	52
Ilustración 35: Aula especial 2, posiciones oyentes. Fuente: EASE.	52
Ilustración 36: Aula especial 1, posiciones fuentes. Fuente: EASE.	52
Ilustración 37: Aula especial 2, posiciones fuentes. Fuente: EASE.	52
Ilustración 38: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.	55
Ilustración 39: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.	56
Ilustración 40: Histograma Aula Especial 2-fuente1. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.	57
Ilustración 41: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Nivel de presión sonora directo. Fuente: EASE.	58
Ilustración 42: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.	59
Ilustración 43: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.	60
Ilustración 44: Histograma Aula Especial 2-fuente 1. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.	61
Ilustración 45: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Nivel de presión sonora total. Fuente: EASE.	62
Ilustración 46: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATIO). Fuente: EASE.	63
Ilustración 47: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATIO). Fuente: EASE.	64
Ilustración 48: Histograma Aula Especial 2- fuente1. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATIO). Fuente: EASE.	65
Ilustración 49: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Nivel de relación entre campo directo y reverberante (A/R RATIO). Fuente: EASE.	66
Ilustración 50: Histograma Aula Especial 1-fuente 1. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE.	67
Ilustración 51: Histograma Aula Especial 1-fuente 2. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE.	68
Ilustración 52: Histograma Aula Especial 2- fuente1. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE.	69
Ilustración 53: Histograma Aula Especial 2-fuente 2. Pérdida de articulación de consonantes (ALCONS). Fuente: EASE.	70
Ilustración 54: fuente omnidireccional. Fuente: UPM.	78
Ilustración 55: fuente omnidireccional. Fuente: propia.	78



Ilustración 56: situación fuente omnidireccional. Fuente: propia.	78
Ilustración 57: micrófono omnidireccional. Fuente: UPM.	79
Ilustración 58: situación micrófono omnidireccional. Fuente: propia.	79
Ilustración 59:: esquema del montaje para realizar las medidas con Dirac. Fuente: UPM.....	80
Ilustración 60: aula especial 1. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.	82
Ilustración 61: aula especial 1. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.	82
Ilustración 62: aula especial 2. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.	83
Ilustración 63: aula especial 2. Propuesta de mejora. Fuente: EASE.	83
Ilustración 64:: Panel suspendido por cables. Fuente: acústica integral.....	85
Ilustración 65: elementos necesarios para suspensión de los paneles. Fuente: acústica integral.	85
Ilustración 66: Panel suspendido por cables. Fuente: acústica integral.....	86
Ilustración 67: código de color del tejido. Fuente: acústica integral.....	86
Ilustración 68:: ejemplo de paneles suspendidos de techo. Fuente: acústica integral.....	86
Ilustración 69: Histograma nivel de presión sonora directo mejorada del aula especial 1-fuente 1. Fuente: EASE.	94
Ilustración 70: Histograma nivel de presión sonora directo mejorada del aula especial 1- fuente 2. Fuente: EASE.	95
Ilustración 71: Histograma nivel de presión sonora directo mejorada del aula especial 2-fuente 1. Fuente: EASE.	96
Ilustración 72: Histograma nivel de presión sonora directo mejorada del aula especial 2- fuente 2. Fuente: EASE.	97
Ilustración 73: Histograma nivel de presión sonora total mejorada del aula Especial 1- fuente 1. Fuente: EASE.	98
Ilustración 74:: Histograma nivel de presión sonora total mejorada del aula Especial 1- fuente 2. Fuente: EASE.	99
Ilustración 75: Histograma nivel de presión sonora total del aula Especial 2- fuente 1. Fuente: EASE	100
Ilustración 76:: Histograma nivel de presión sonora total del aula Especial 2, fuente 2. Fuente: EASE	101
Ilustración 77: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 1- fuente 1. Fuente: EASE	102
Ilustración 78: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 1- fuente 2. Fuente: EASE	103
Ilustración 79: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 2-fuente 1. Fuente: EASE	104
Ilustración 80: Histograma nivel de relación entre campo directo y campo reverberante del aula Especial 2-fuente 2. Fuente: EASE	105

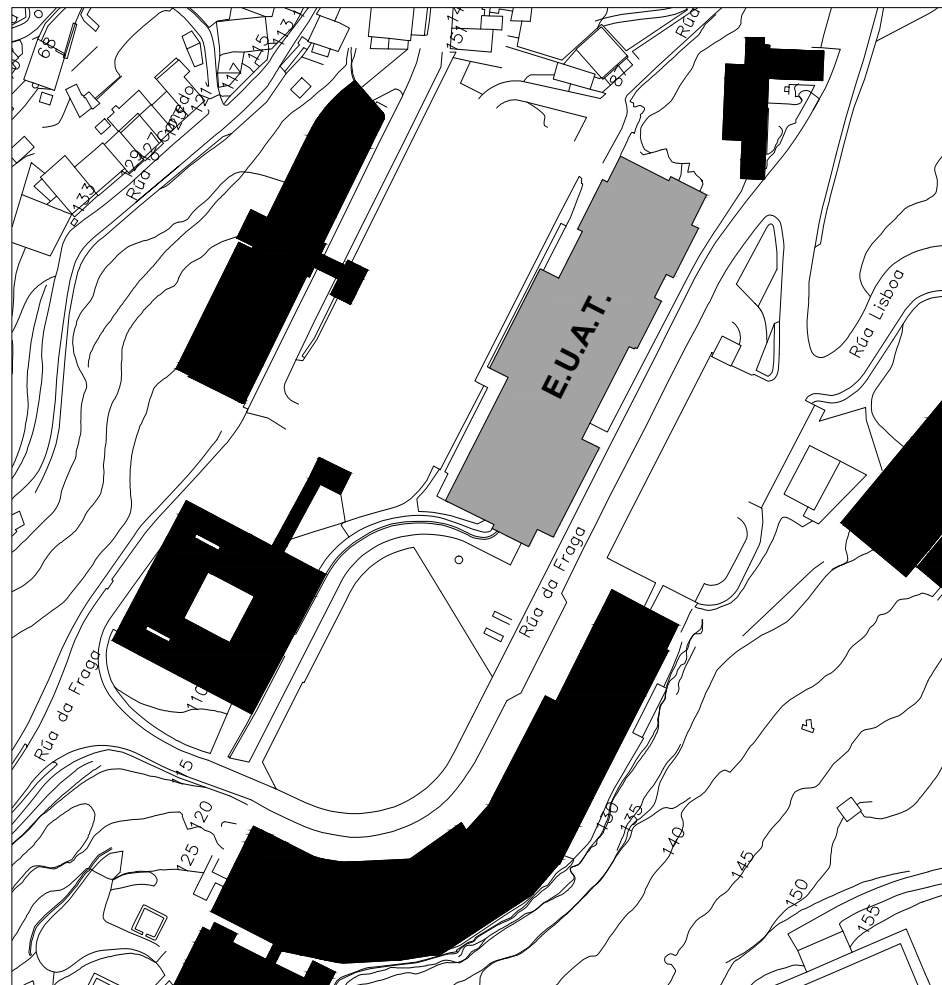


Ilustración 81: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 1- fuente 1. Fuente: EASE.....	106
Ilustración 82: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 1- fuente 2. Fuente: EASE.....	107
Ilustración 83: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 2- fuente 1. Fuente: EASE.....	108
Ilustración 84: Histograma pérdida de articulación de consonantes (ALCONS) del aula Especial 2- fuente 2. Fuente: EASE.....	109



13 ANEXOS

13.1 PLANOS



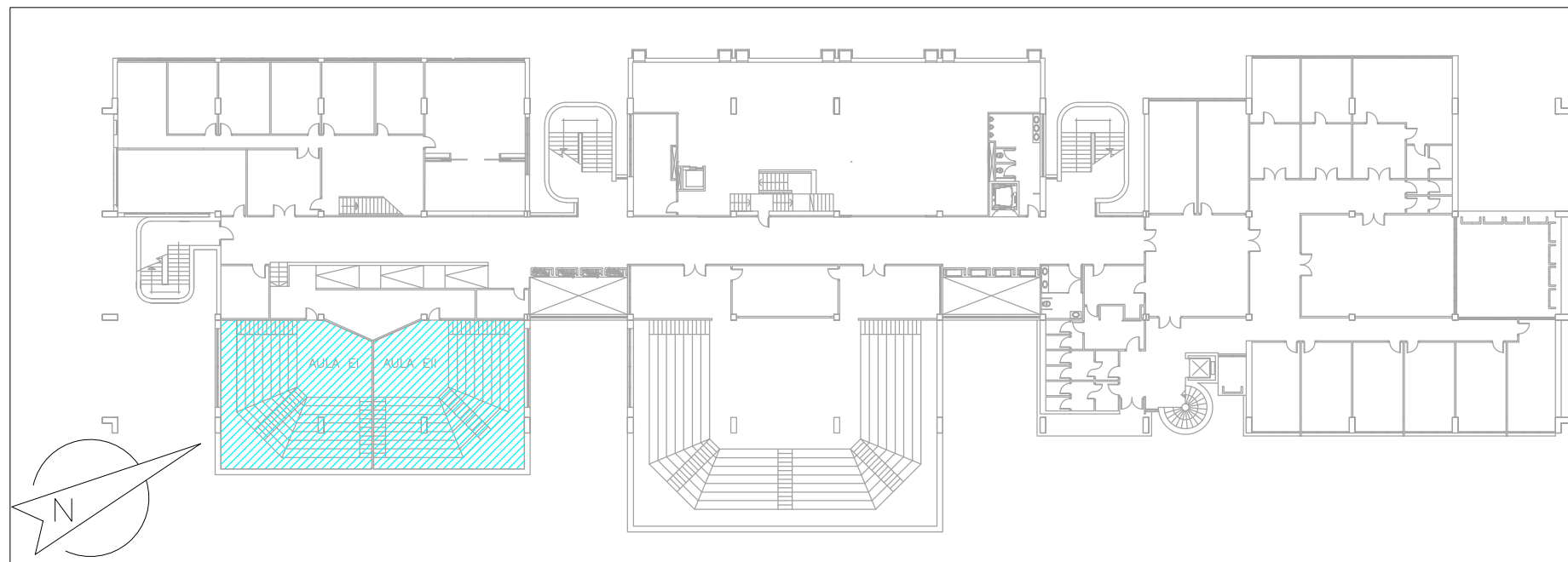
EMPLAZAMIENTO: CAMPUS ZAPATEIRA

ESCALA: 1/2500



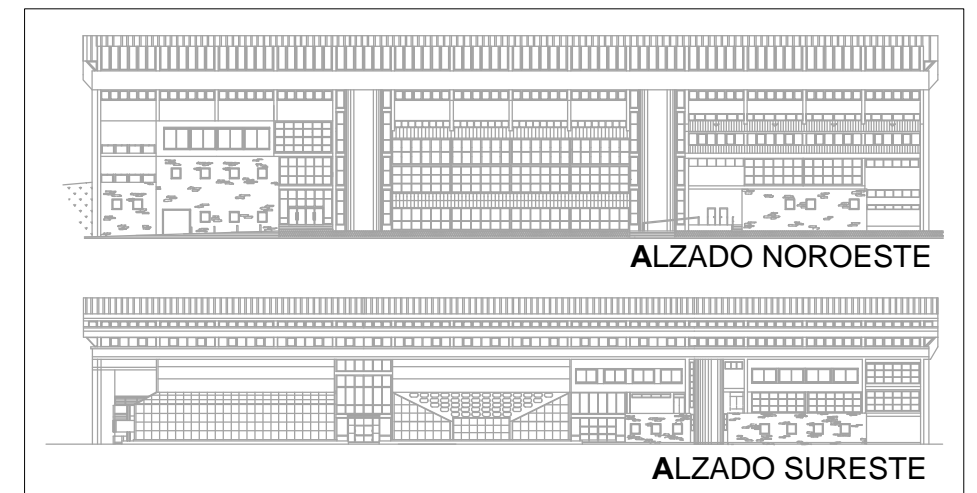
EMPLAZAMIENTO: CAMPUS ZAPATEIRA

ESCALA: 1/2500



PLANTA PRIMERA EUAT

ESCALA: 1/450



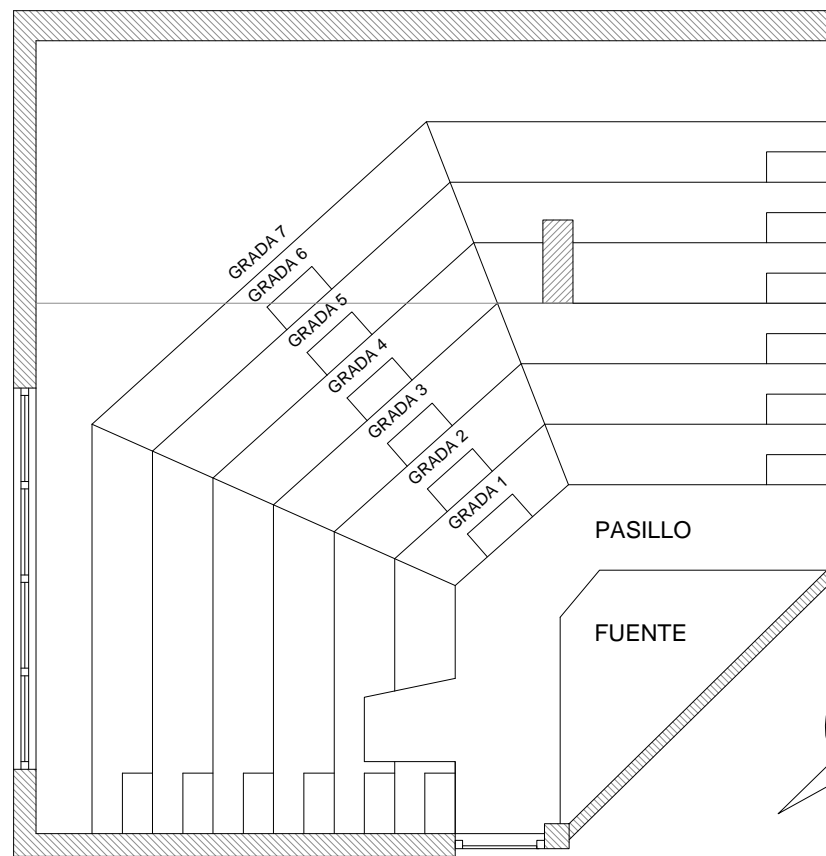
REFERENCIA CATASTRAL: 8075503NH498750001IF

SUPERFICIE CONSTRUIDA: 10.663M²

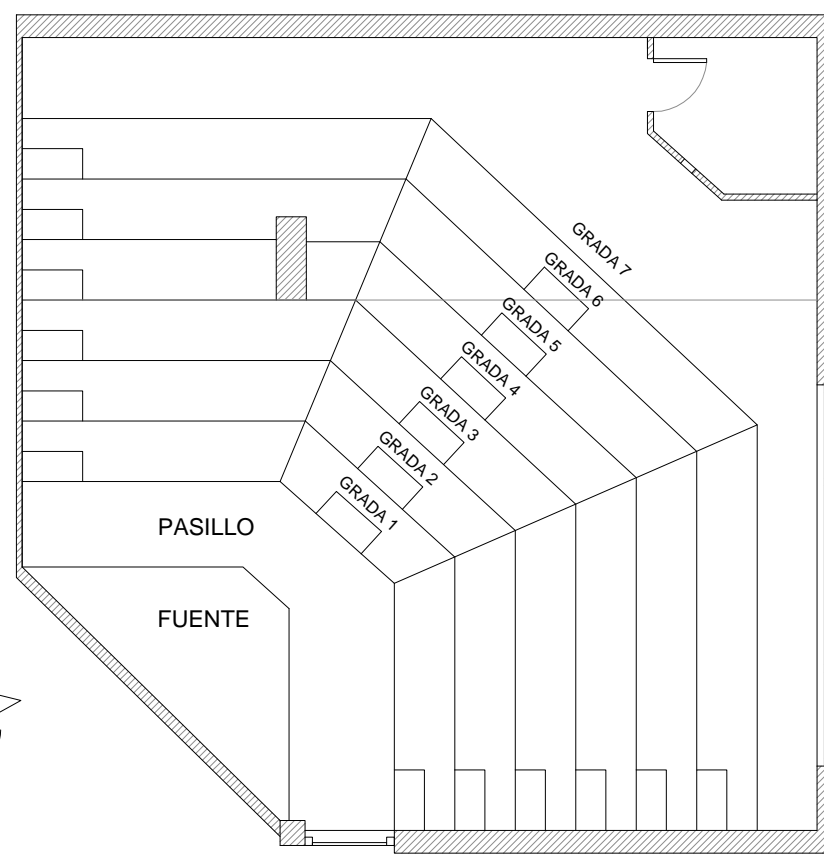
AÑO DE CONSTRUCCIÓN: 1975

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

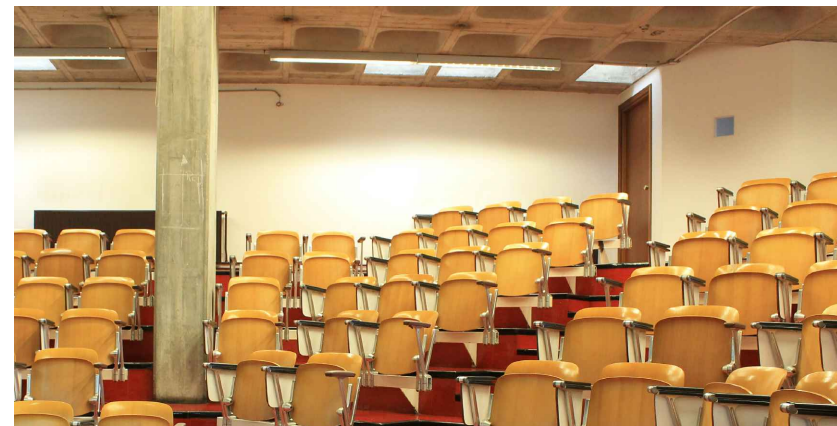




PLANTA ACTUAL AULA ESPECIAL II

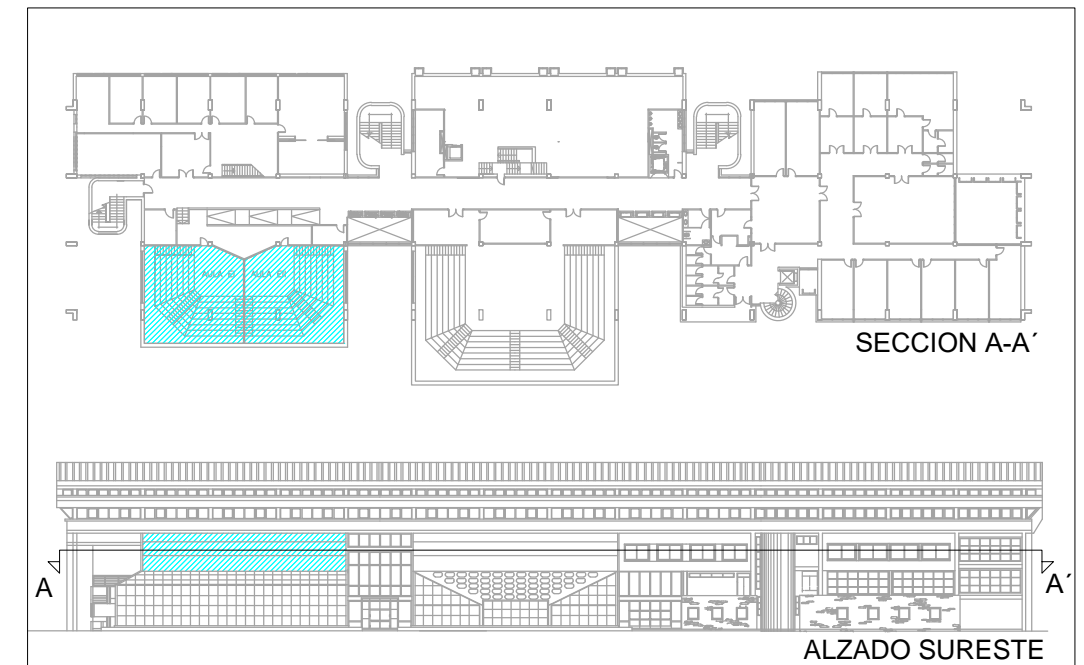


PLANTA ACTUAL AULA ESPECIAL I



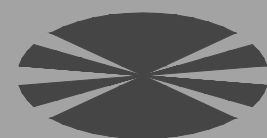
COTAS PLANTA			
PASILLO	⊕ +3,00m	GRADA 4	⊕ +4,27m
FUENTE	⊕ +3,30m	GRADA 5	⊕ +4,56m
GRADA 1	⊕ +3,37m	GRADA 6	⊕ +4,86m
GRADA 2	⊕ +3,66m	GRADA 7	⊕ +5,16m
GRADA 3	⊕ +3,97m		

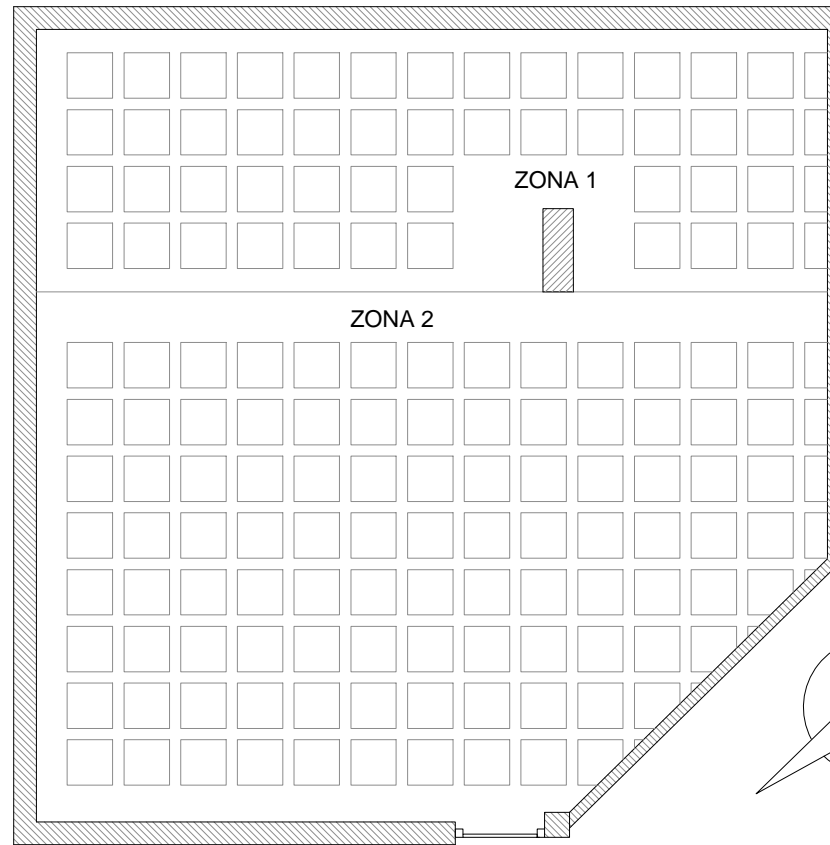
	SUP. ÚTIL (m2)	SUP. CONSTRUIDA (m2)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02



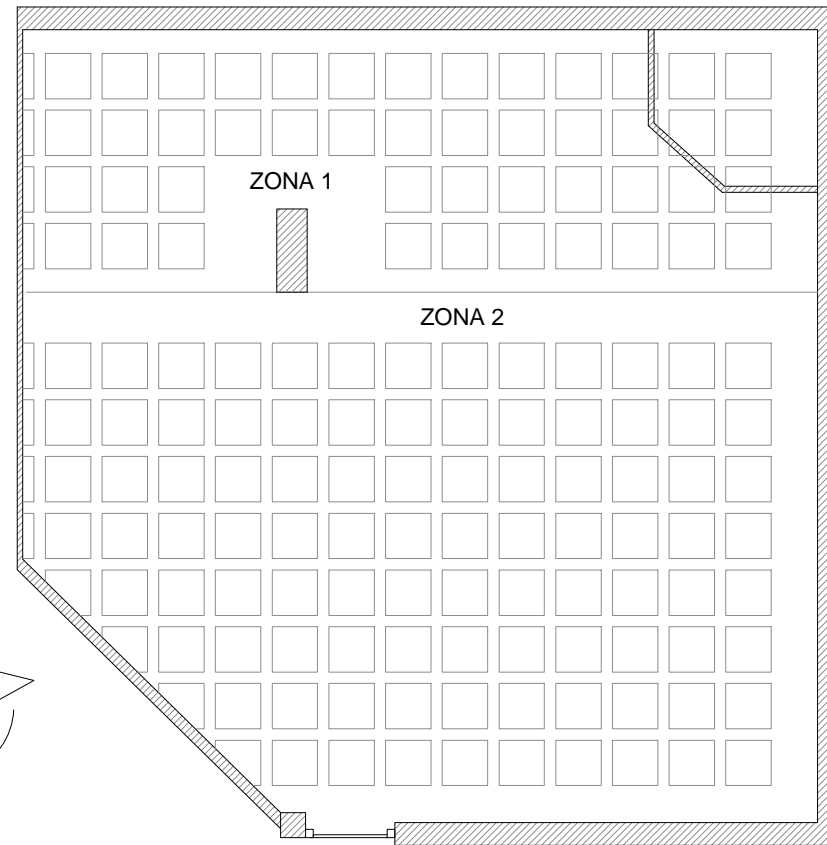
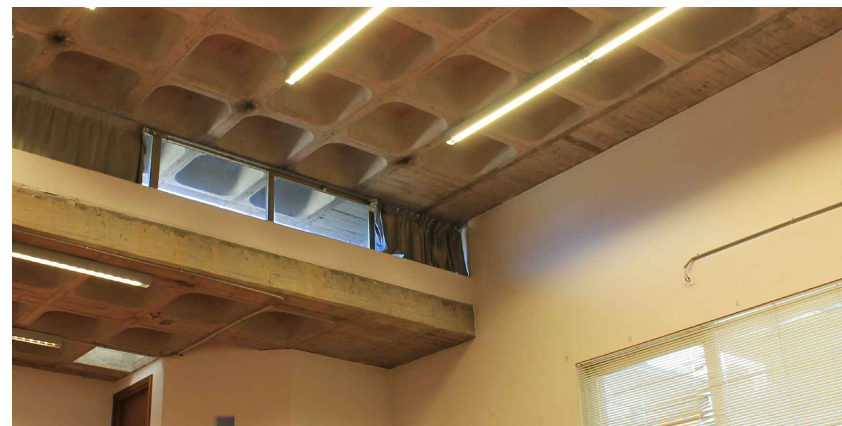
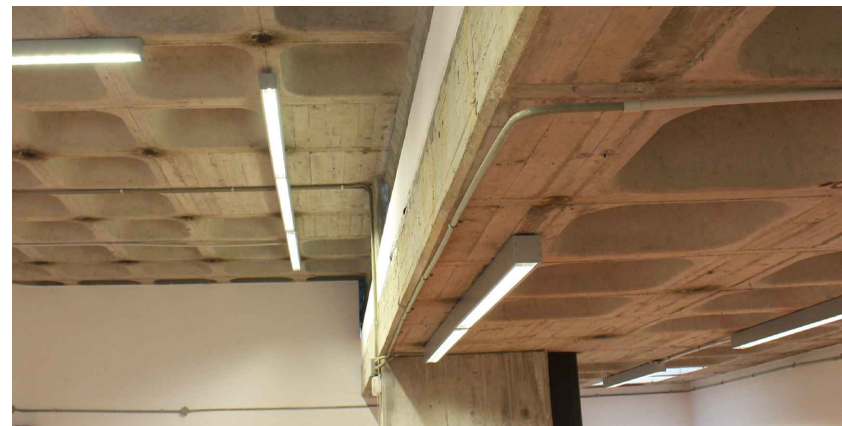
UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

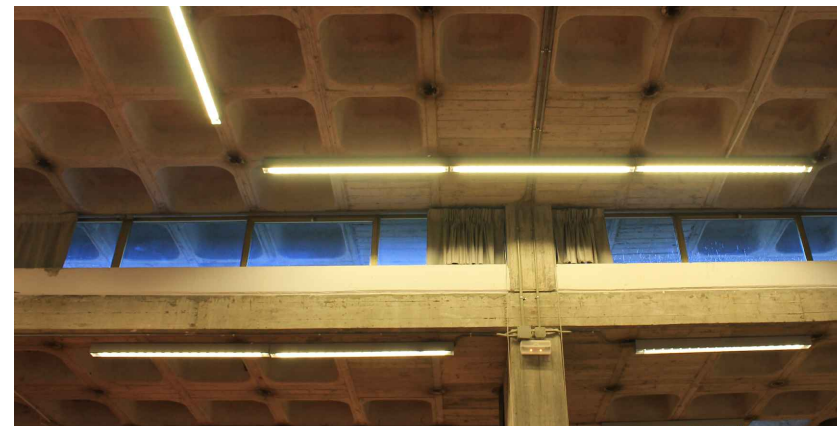




PLANTA TECHO ACTUAL AULA ESPECIAL II



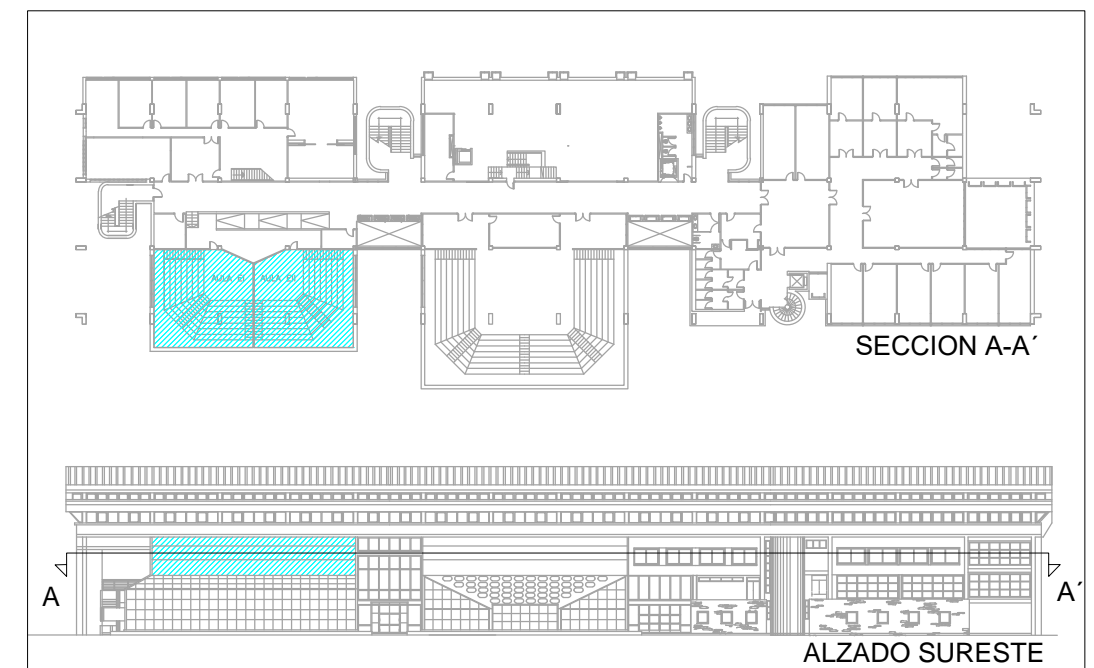
PLANTA TECHO ACTUAL AULA ESPECIAL I



COTAS PLANTA TECHO	
ZONA 1	⊕ +7,4m
ZONA 2	⊕ +8,6m

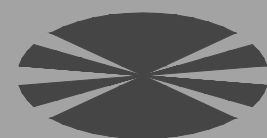
TIPOS DE TECHO	
ZONA 1	BIDIRECCIONAL
ZONA 2	BIDIRECCIONAL

	SUP. ÚTIL (m2)	SUP. CONSTRUIDA (m2)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02

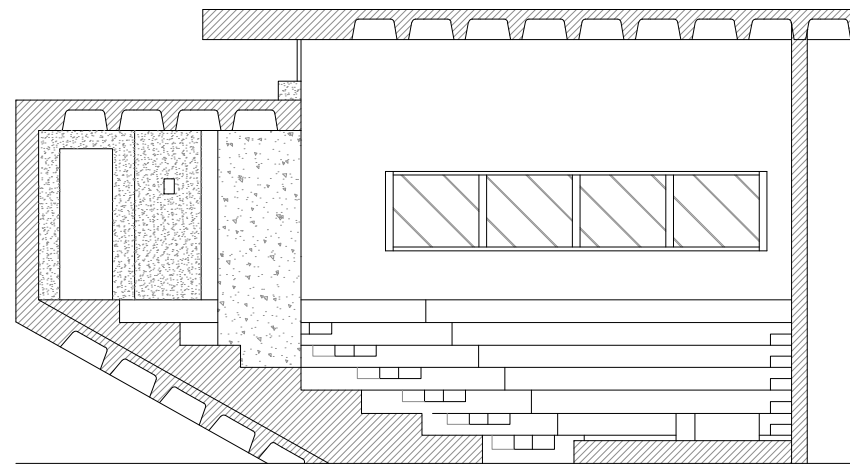


UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT

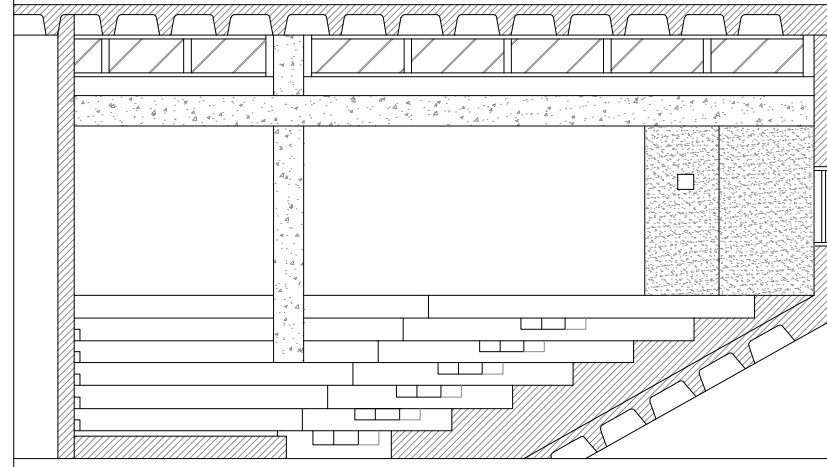
0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros



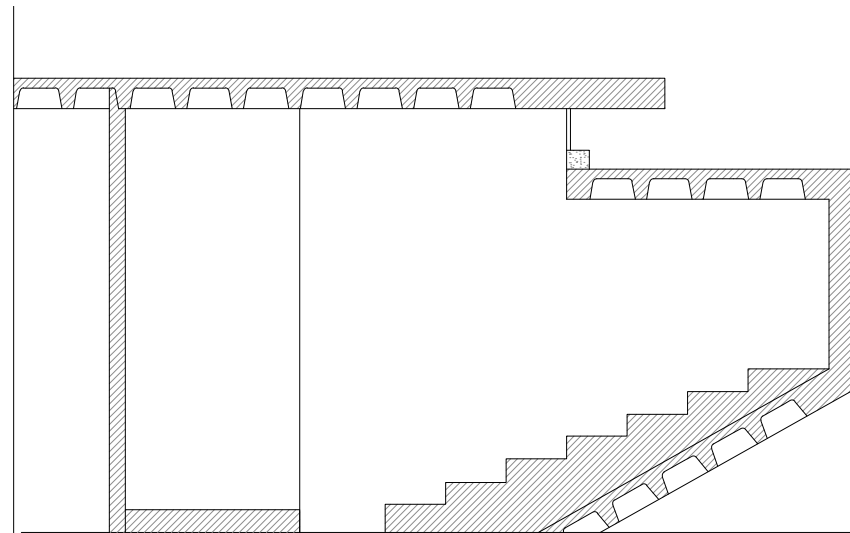
SECCIONES ESTADO ACTUAL AULA ESPECIAL I



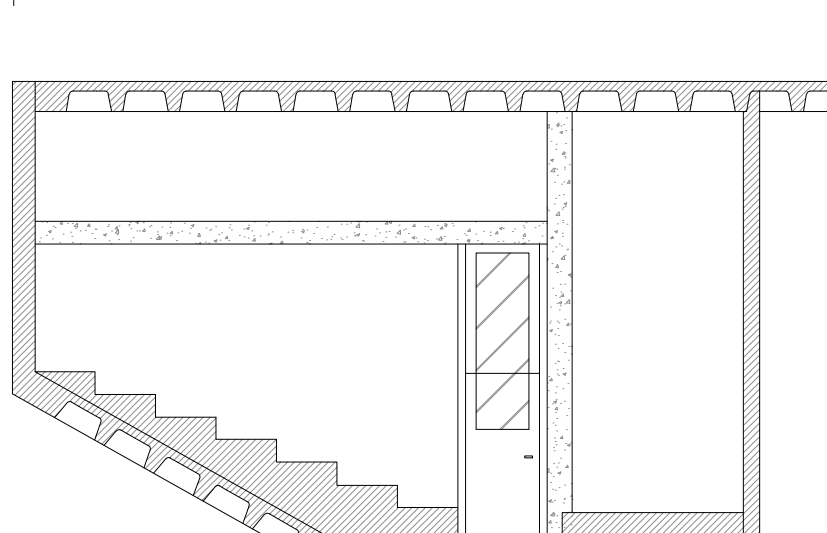
SECCIÓN A-A'



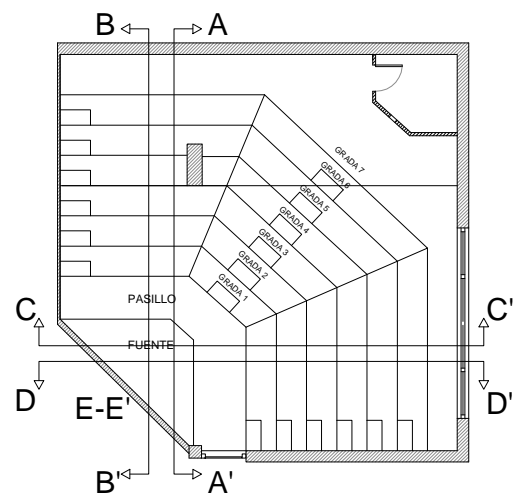
SECCIÓN C-C'



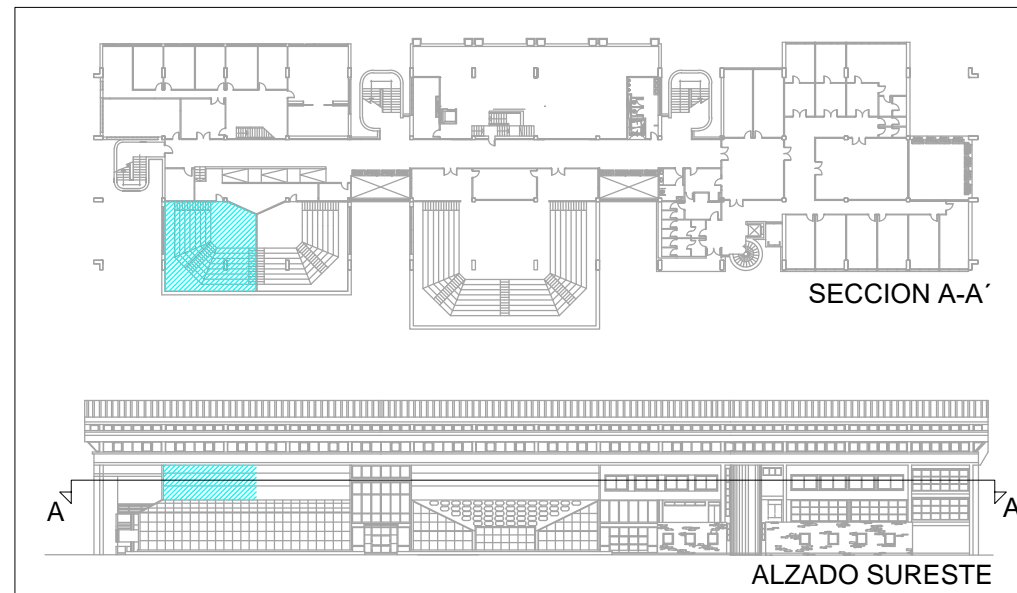
SECCIÓN B-B'



SECCIÓN D-D'



PLANTA AULA ESPECIAL I
ESCALA 1/200



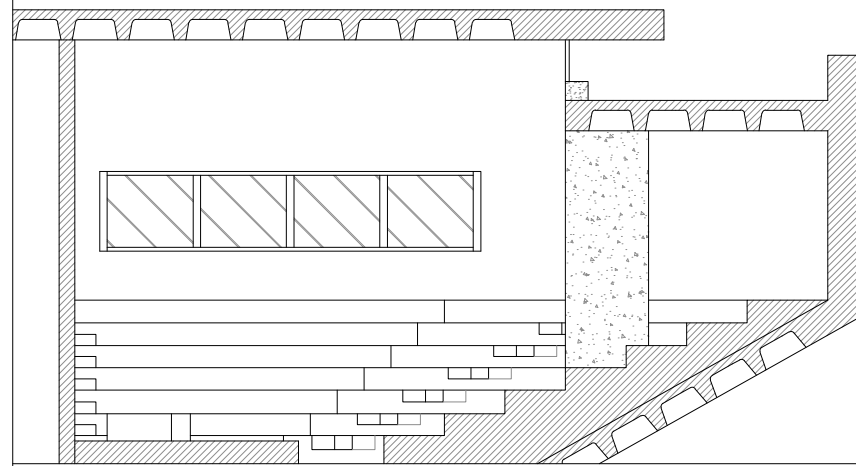
ALZADO SURESTE

SUPERFÍCIES AULA ESPECIAL I (m ²)			
ELEMENTOS HORIZONTALES			
Tarima	5,95	Pared almacén	6,32
Suelo	9,52	Ventana	8,35
Suelo G1	7,50	Pilar	0,43
Suelo G2	8,57	Forjado	4,20
Suelo G3	9,64	Alzado D-D'	
Suelo G4	10,30	Pared	26,12
Suelo G5	11,76	Pilar	1,90
Suelo G6	12,85	Forjado	2,03
Suelo G7	23,00	Puerta	4,54
Suelo sala	4,08	Grada Vertical	
Forjado Zona 1	36,03	Pared G1	3,22
Forjado zona 2	67,65	Pared G2	3,00
ELEMENTOS VERTICALES		Pared G3	3,41
Alzado A-A'		Pared G4	3,81
Pared	24,04	Pared G5	4,09
Ventana	5,29	Pared G6	4,61
Pared almacén	10,20	Pared G7	5,00
Puerta almacén	2,80	Pared tarima	1,97
Alzado B-B'		Huecos escaleras	2,25
Pared	29,27	Pilar aislado	9,11
Alzado C-C'		Alzado E-E'	
Pared	23,29	Pared	26,63

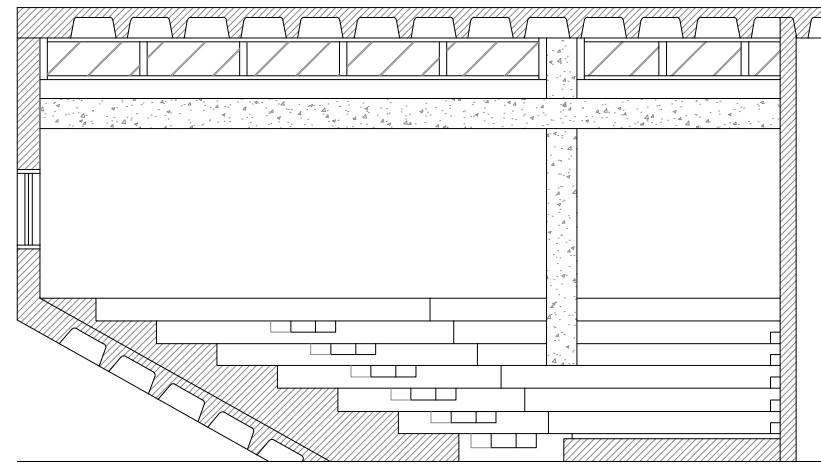
0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros



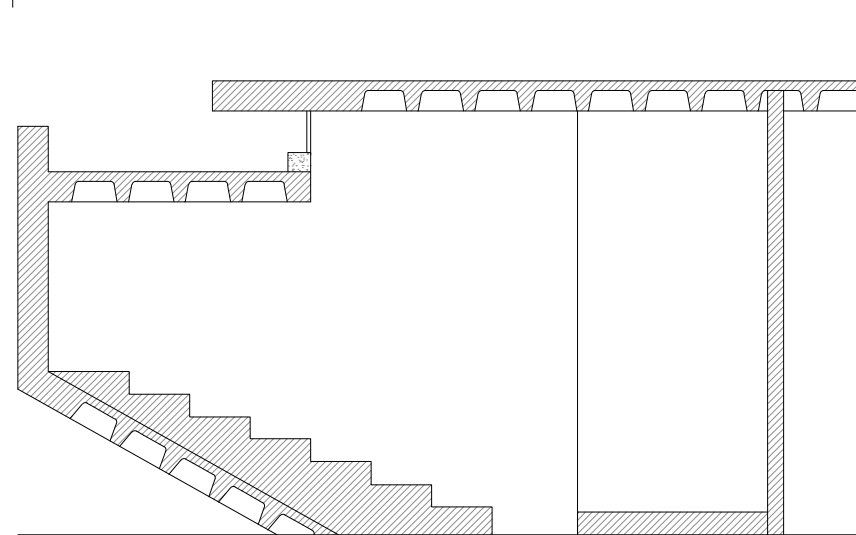
SECCIONES ESTADO ACTUAL AULA ESPECIAL II



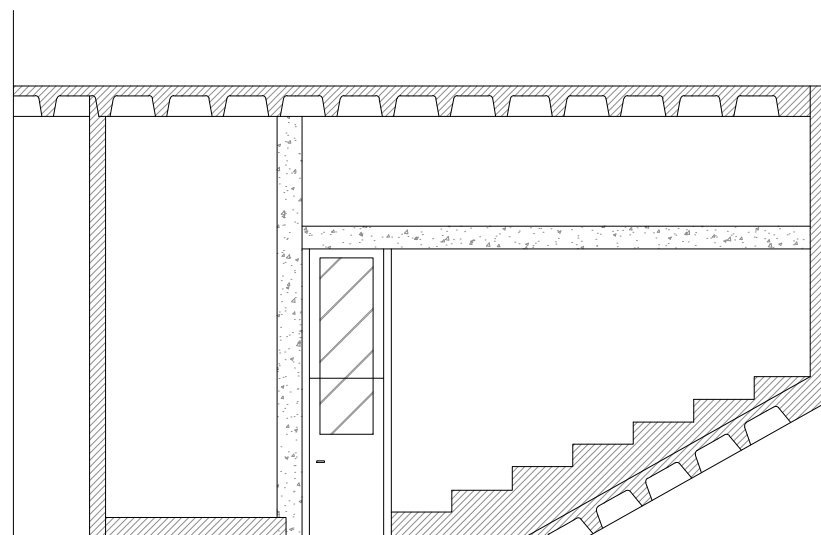
SECCIÓN F-F'



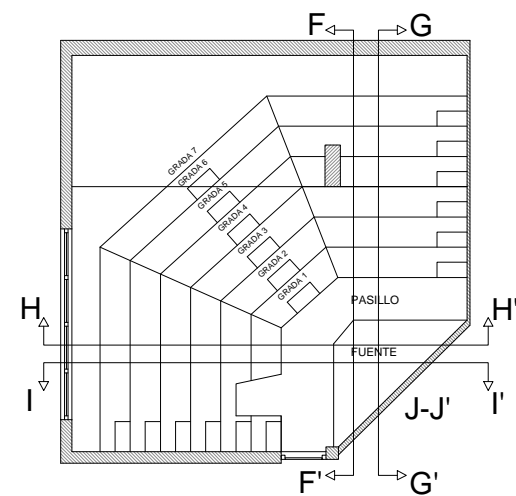
SECCIÓN H-H'



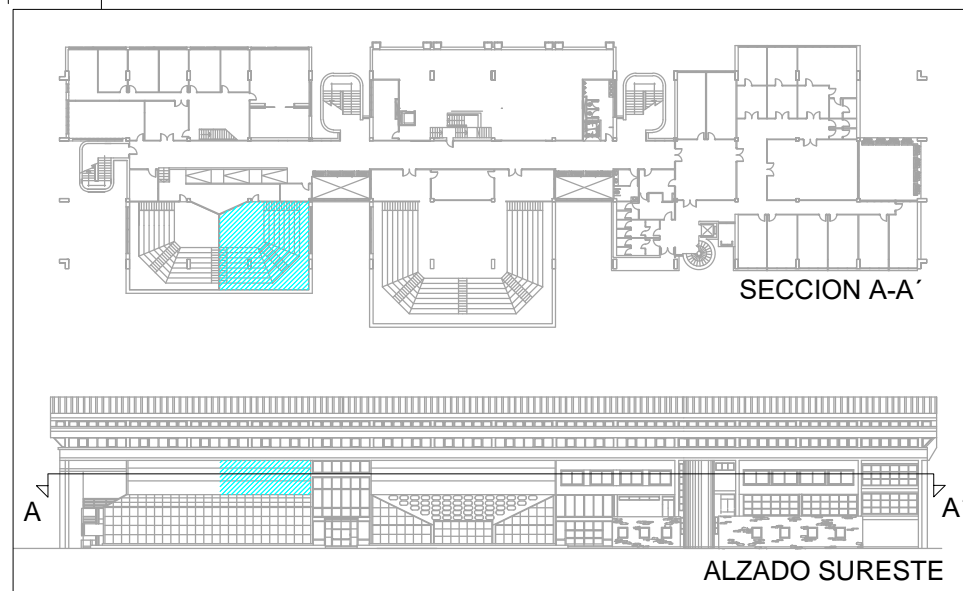
SECCIÓN G-G'



SECCIÓN I-I'

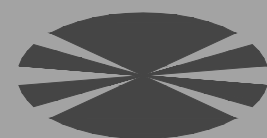


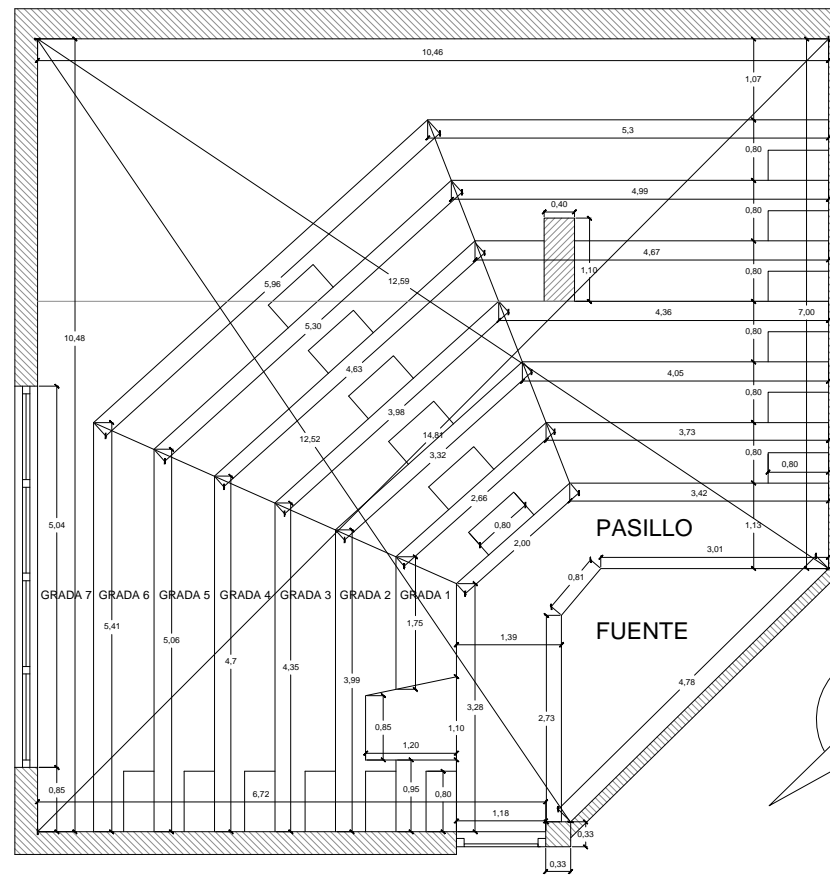
PLANTA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/200



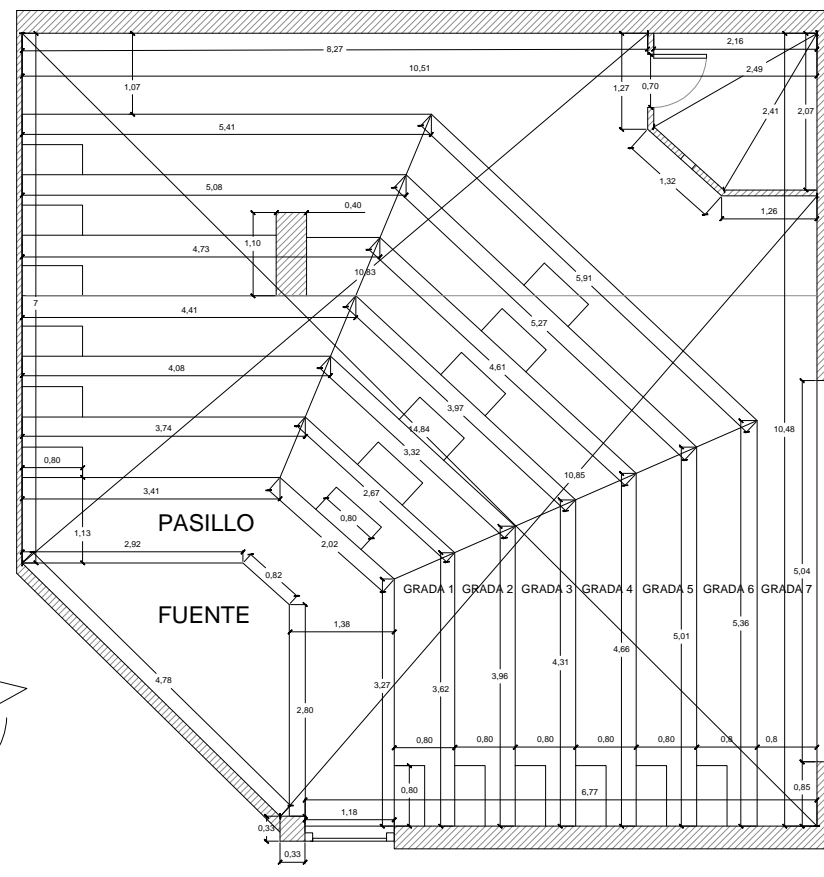
SUPERFÍCIES AULA ESPECIAL II (m ²)			
ELEMENTOS HORIZONTALES			
Tarima	5,95	Forjado	4,18
Suelo	10,70	Alzado I-I'	
Suelo G1	6,69	Pared	25,95
Suelo G2	8,21	Pilar	1,91
Suelo G3	9,56	Forjado	2,02
Suelo G4	10,37	Puerta	4,54
Suelo G5	11,63	Grada Vertical	
Suelo G6	12,82	Pared G1	2,82
Suelo G7	27,00	Pared G2	2,72
Forjado Zona 1	35,86	Pared G3	3,41
Forjado zona 2	67,13	Pared G4	3,81
ELEMENTOS VERTICALES		Pared G5	4,10
Alzado F-F'		Pared G6	4,61
Pared	29,44	Pared G7	5,00
Ventana	5,29	Pared tarima	1,97
Alzado G-G'		Hueco gradas	1,66
Pared	29,27	Huecos escaleras	2,25
Alzado H-H'		Pilar aislado	9,11
Pared	28,77	Alzado J-J'	
Ventana	8,26	Pared	26,63
Pilar	0,43		

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros





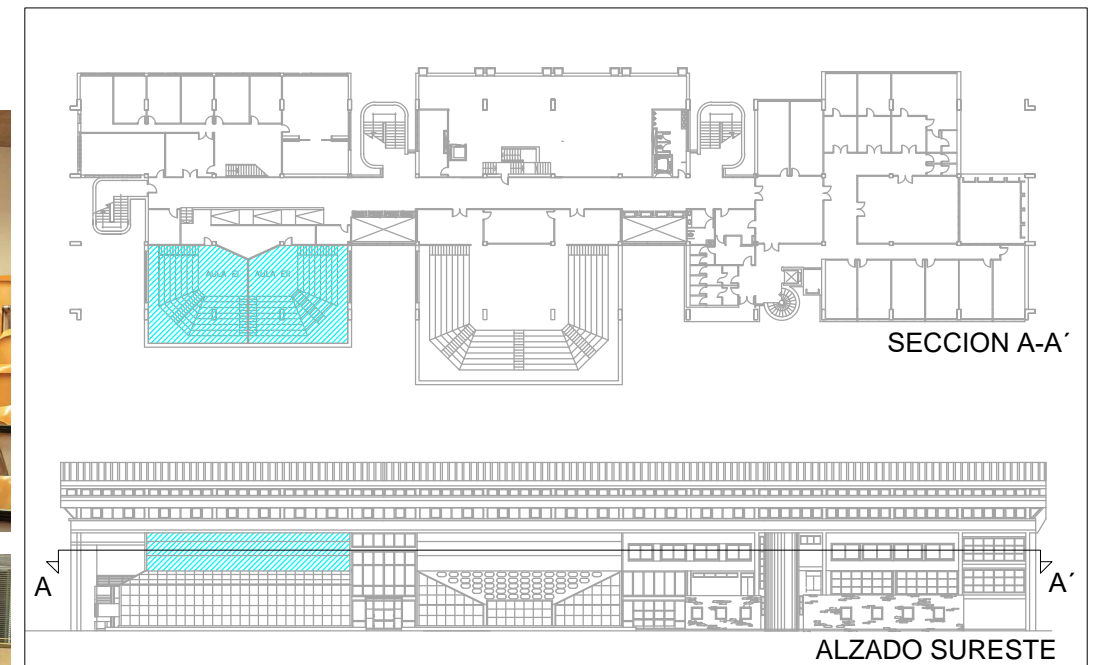
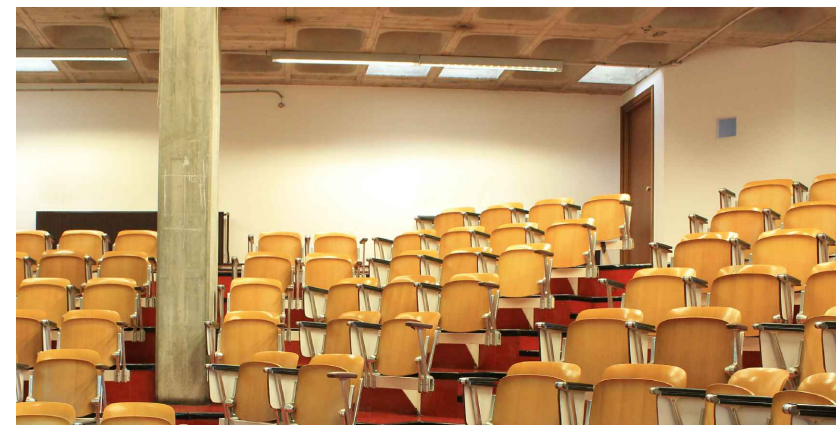
PLANTA ACTUAL ACOTADA AULA ESPECIAL II



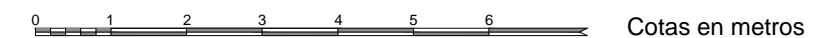
PLANTA ACTUAL ACOTADA AULA ESPECIAL I

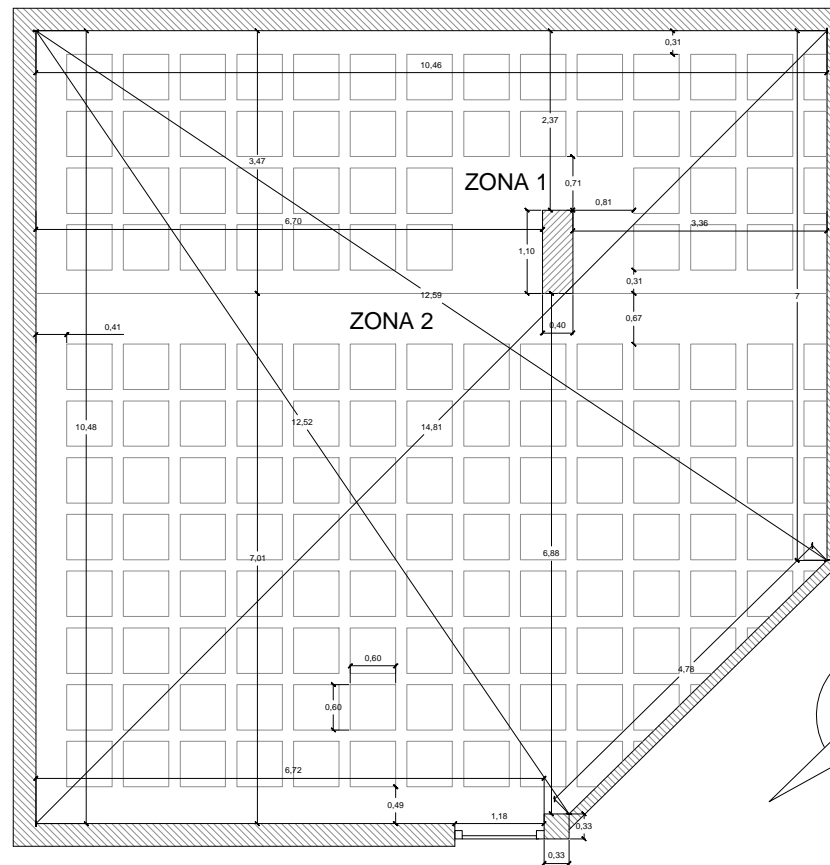
COTAS PLANTA			
PASILLO	⊕ +3,00m	GRADA 4	⊕ +4,27m
FUENTE	⊕ +3,30m	GRADA 5	⊕ +4,56m
GRADA 1	⊕ +3,37m	GRADA 6	⊕ +4,86m
GRADA 2	⊕ +3,66m	GRADA 7	⊕ +5,16m
GRADA 3	⊕ +3,97m		

	SUP. ÚTIL (m2)	SUP. CONSTRUIDA (m2)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02

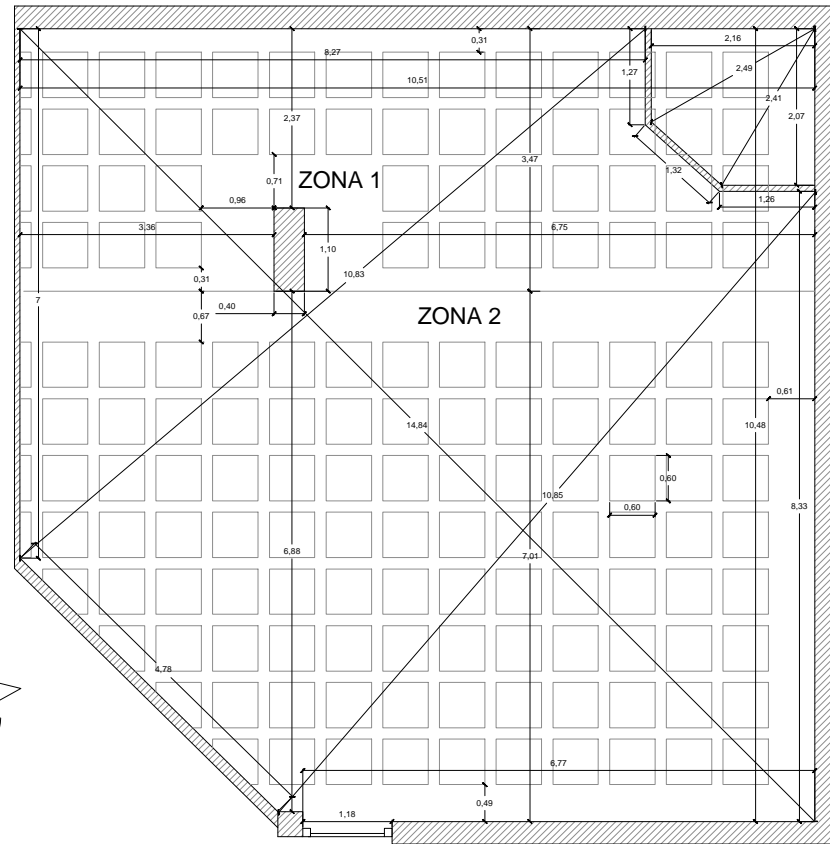


UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT





PLANTA TECHO ACTUAL AULA ESPECIAL II

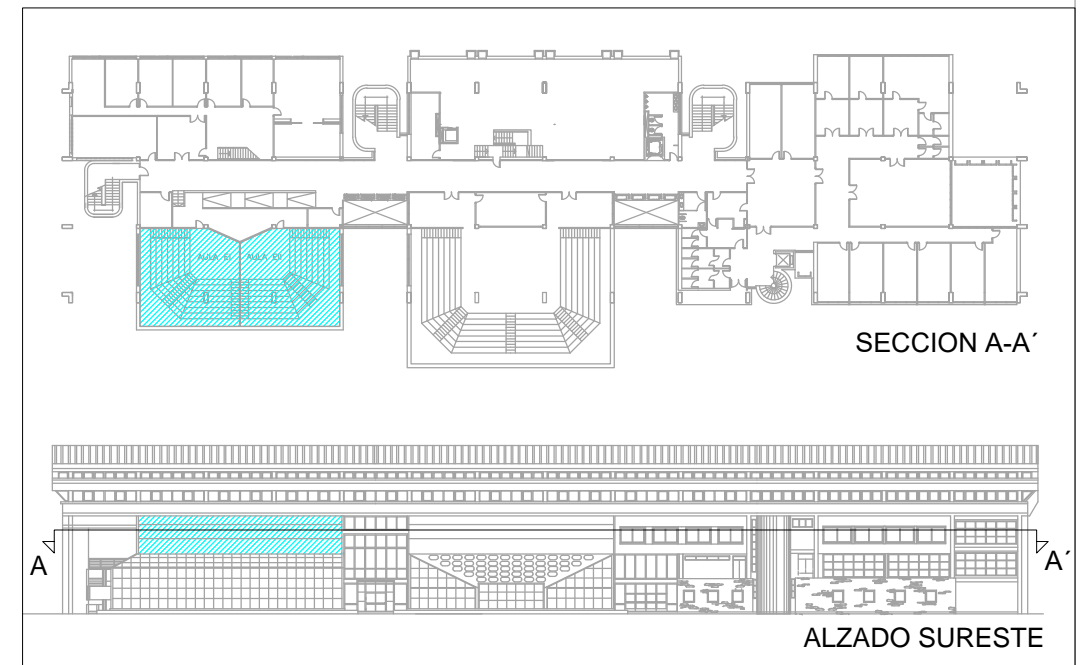
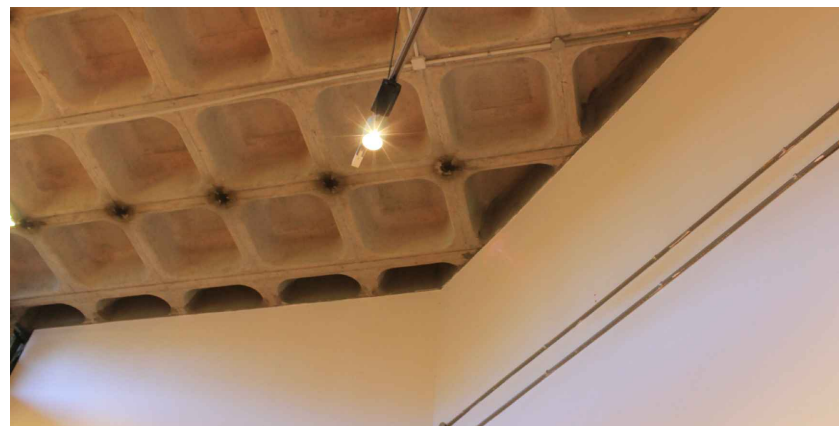
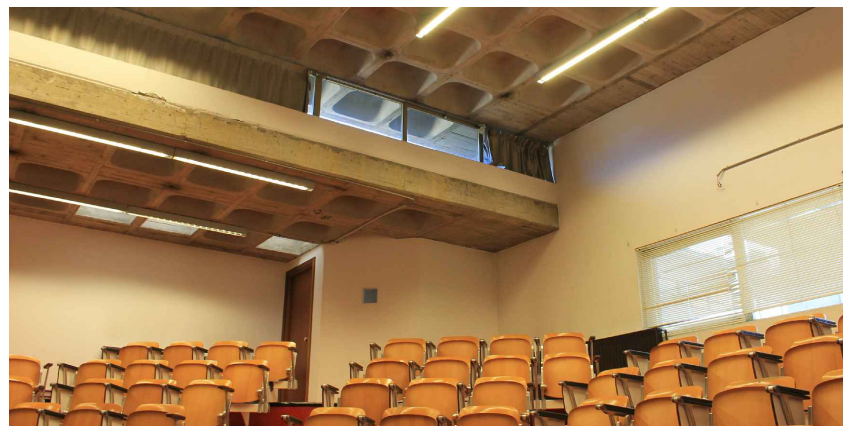
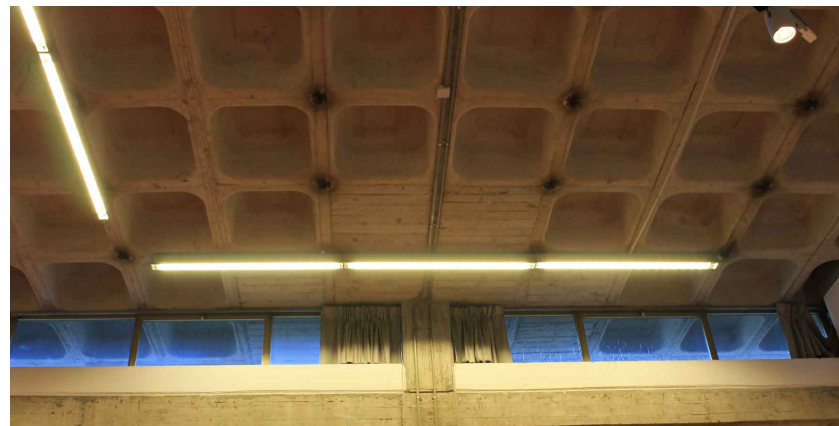


PLANTA TECHO ACTUAL AULA ESPECIAL I

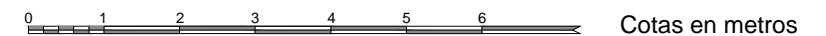
COTAS PLANTA TECHO	
ZONA 1	⊕ +7,4m
ZONA 2	⊕ +8,6m

TIPOS DE TECHO	
ZONA 1	BIDIRECCIONAL
ZONA 2	BIDIRECCIONAL

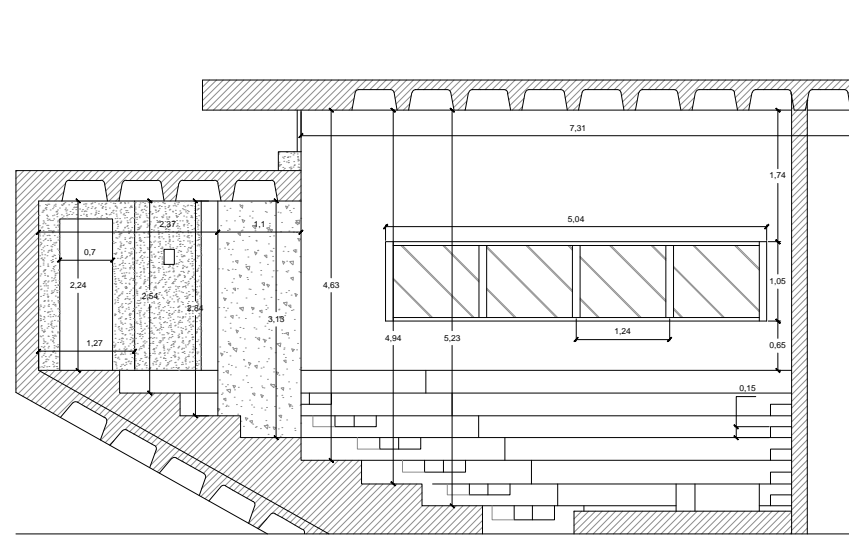
	SUP. ÚTIL (m2)	SUP. CONSTRUIDA (m2)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02



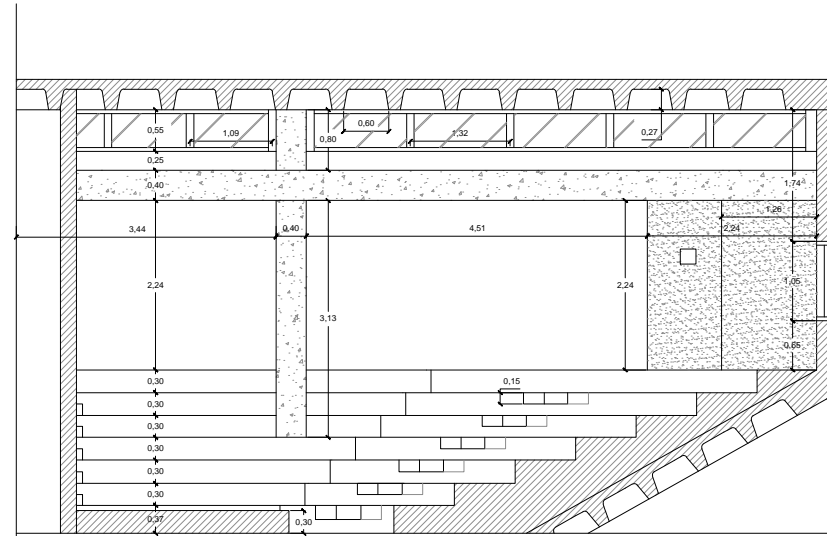
UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT



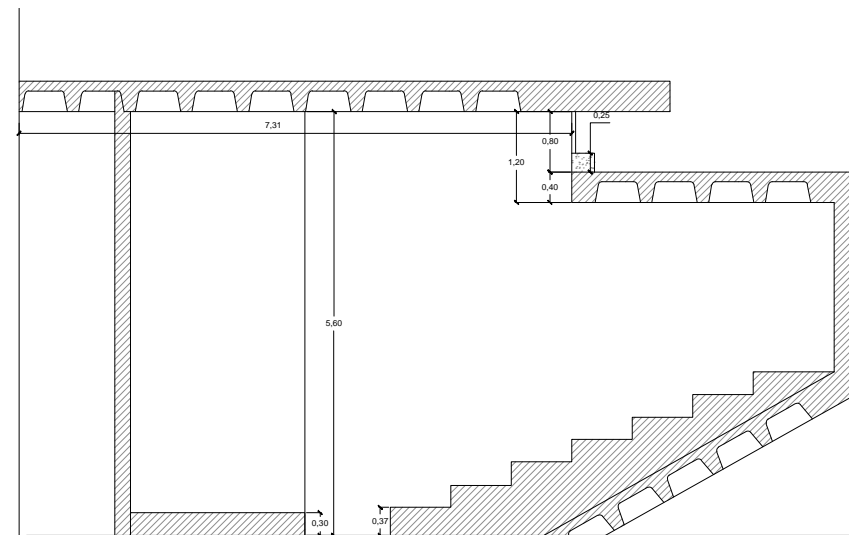
SECCIONES ACOTADAS ESTADO ACTUAL AULA ESPECIAL I



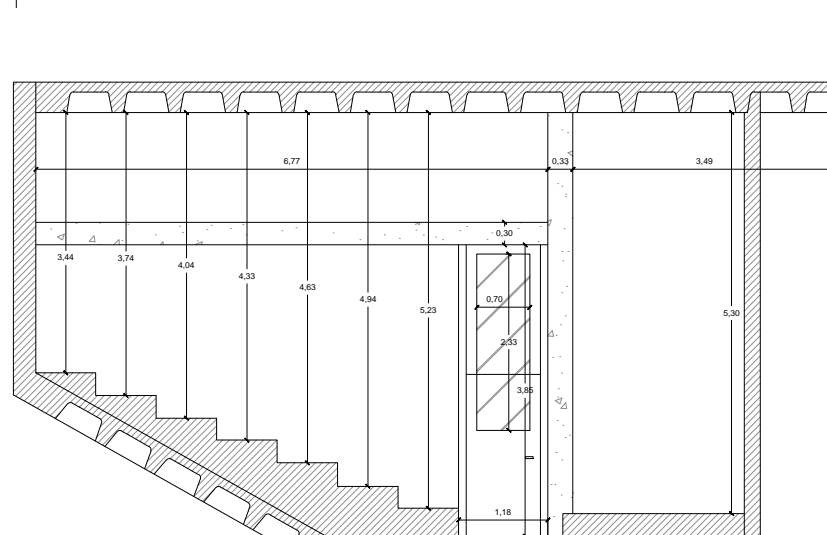
SECCIÓN A-A'



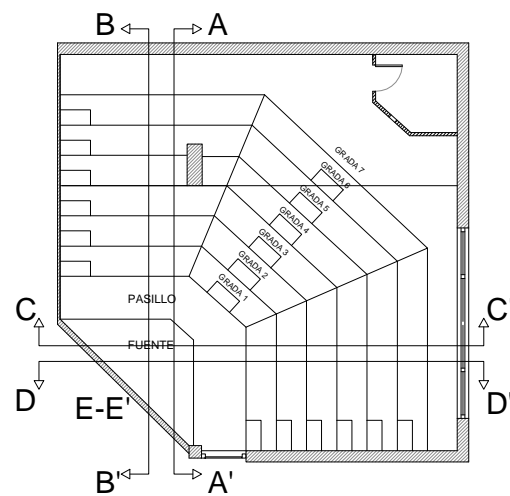
SECCIÓN C-C'



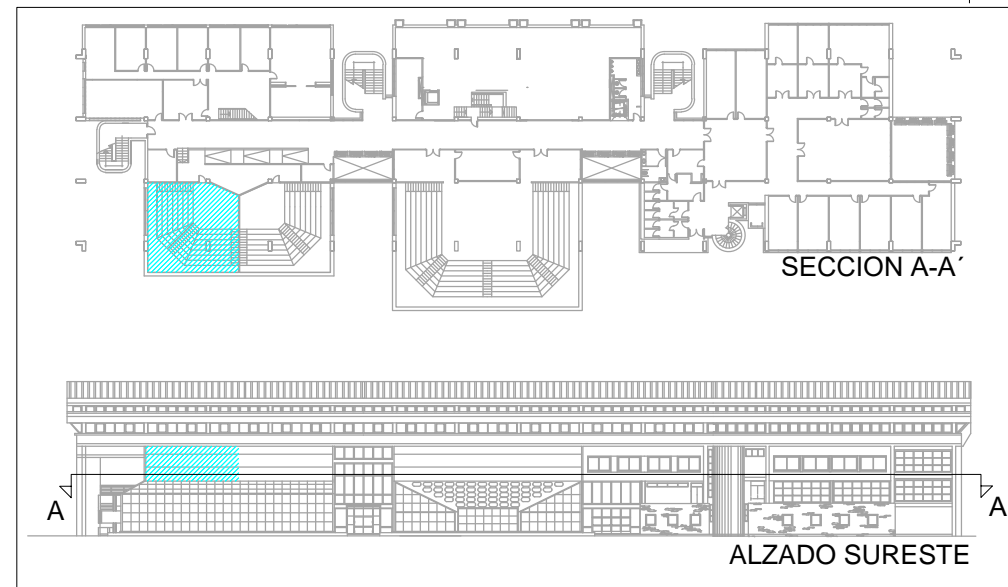
SECCIÓN B-B'



SECCIÓN D-D'



PLANTA AULA ESPECIAL I
ESCALA 1/200

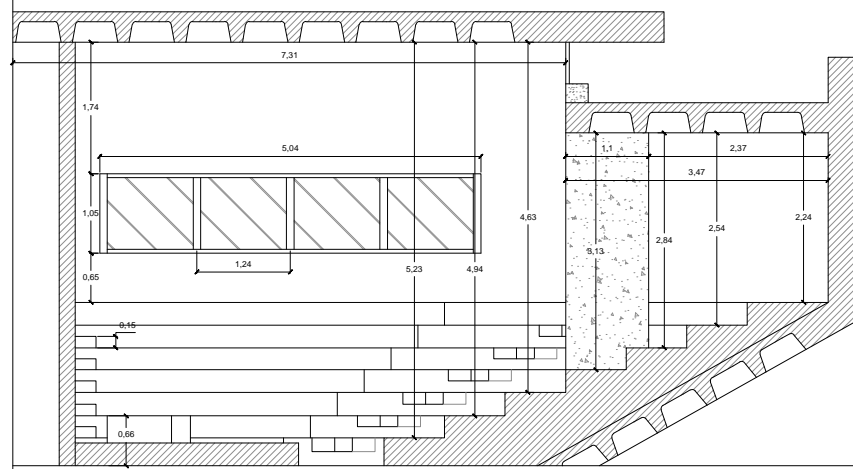


SUPERFÍCIES AULA ESPECIAL I (m ²)			
ELEMENTOS HORIZONTALES			
Tarima	5,95	Pared almacén	6,32
Suelo	9,52	Ventana	8,35
Suelo G1	7,50	Pilar	0,43
Suelo G2	8,57	Forjado	4,20
Suelo G3	9,64	Alzado D-D'	
Suelo G4	10,30	Pared	26,12
Suelo G5	11,76	Pilar	1,90
Suelo G6	12,85	Forjado	2,03
Suelo G7	23,00	Puerta	4,54
Suelo sala	4,08	Grada Vertical	
Forjado Zona 1	36,03	Pared G1	3,22
Forjado zona 2	67,65	Pared G2	3,00
ELEMENTOS VERTICALES			
Alzado A-A'		Pared G3	3,41
Pared	24,04	Pared G4	3,81
Ventana	5,29	Pared G5	4,09
Pared almacén	10,20	Pared G6	4,61
Puerta almacén	2,80	Pared G7	5,00
Alzado B-B'		Huecos escaleras	2,25
Pared	29,27	Pilar aislado	9,11
Alzado C-C'		Alzado E-E'	
Pared	23,29	Pared	26,63

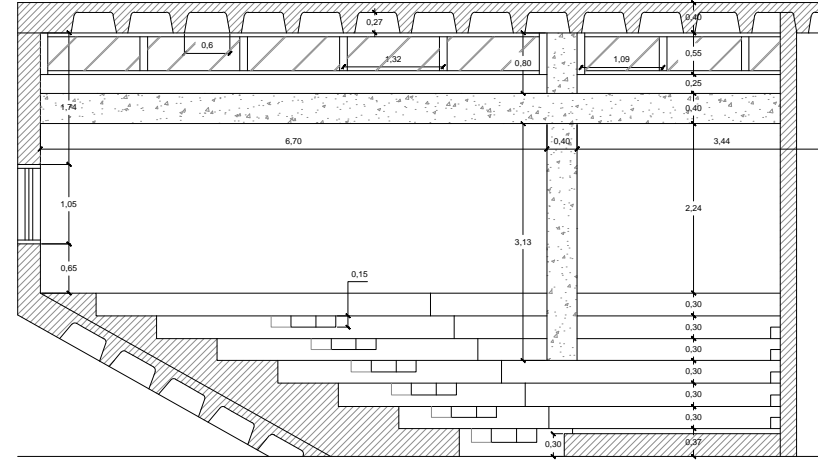
0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros



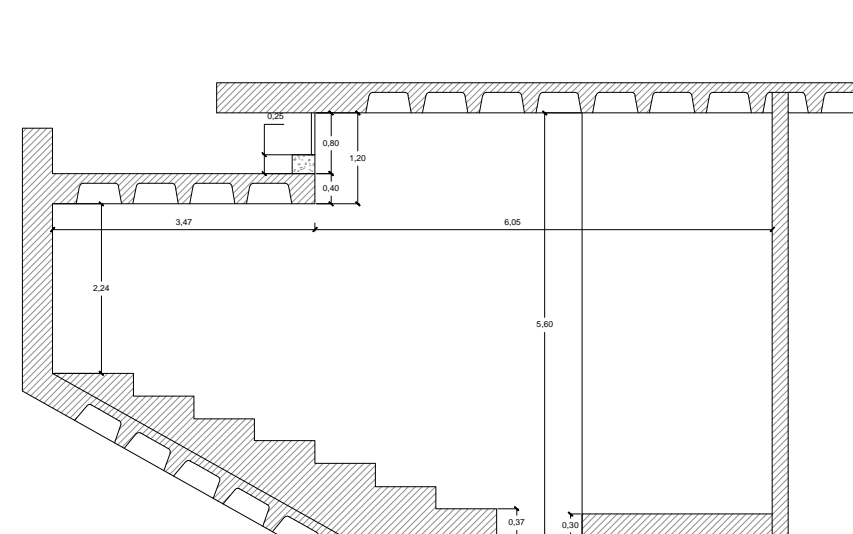
SECCIONES ACOTADAS ESTADO ACTUAL AULA ESPECIAL II



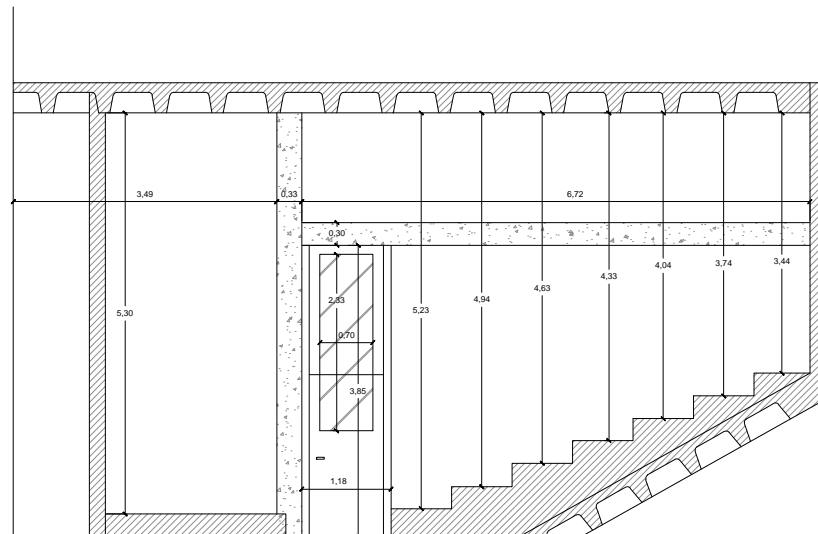
SECCIÓN F-F'



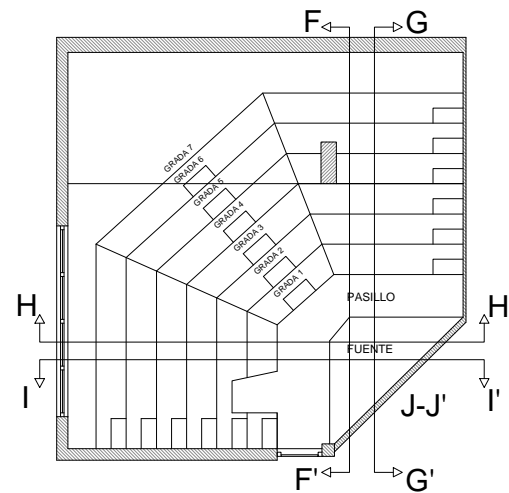
SECCIÓN H-H'



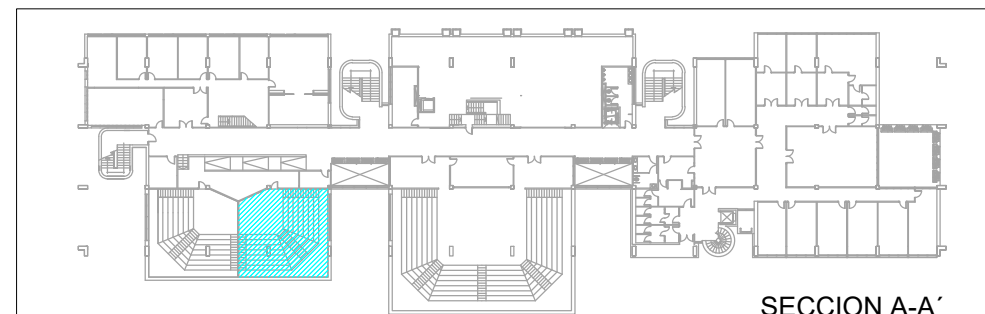
SECCIÓN G-G'



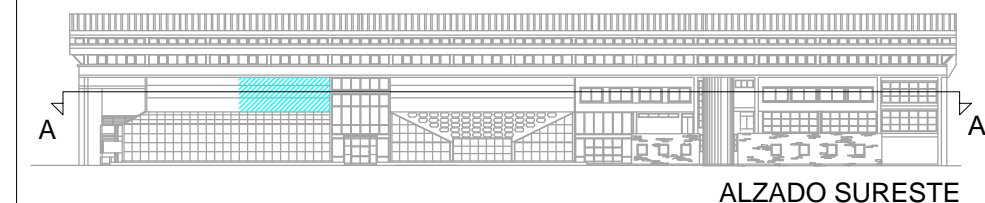
SECCIÓN I-I'



PLANTA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/200



SECCION A-A'



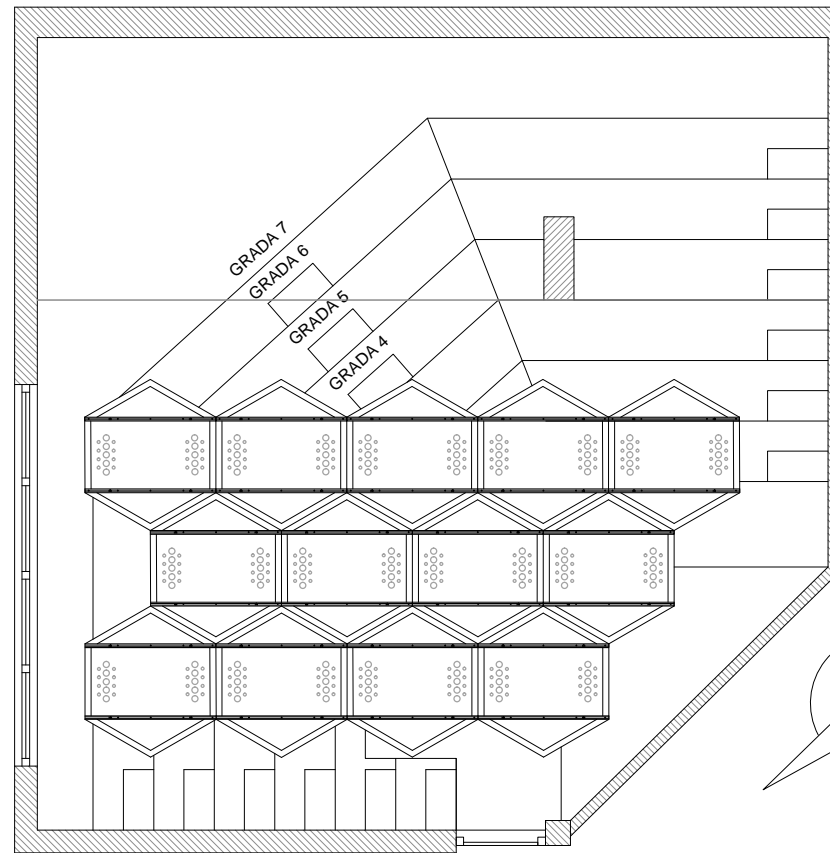
ALZADO SURESTE

SUPERFICIES AULA ESPECIAL II (m²)

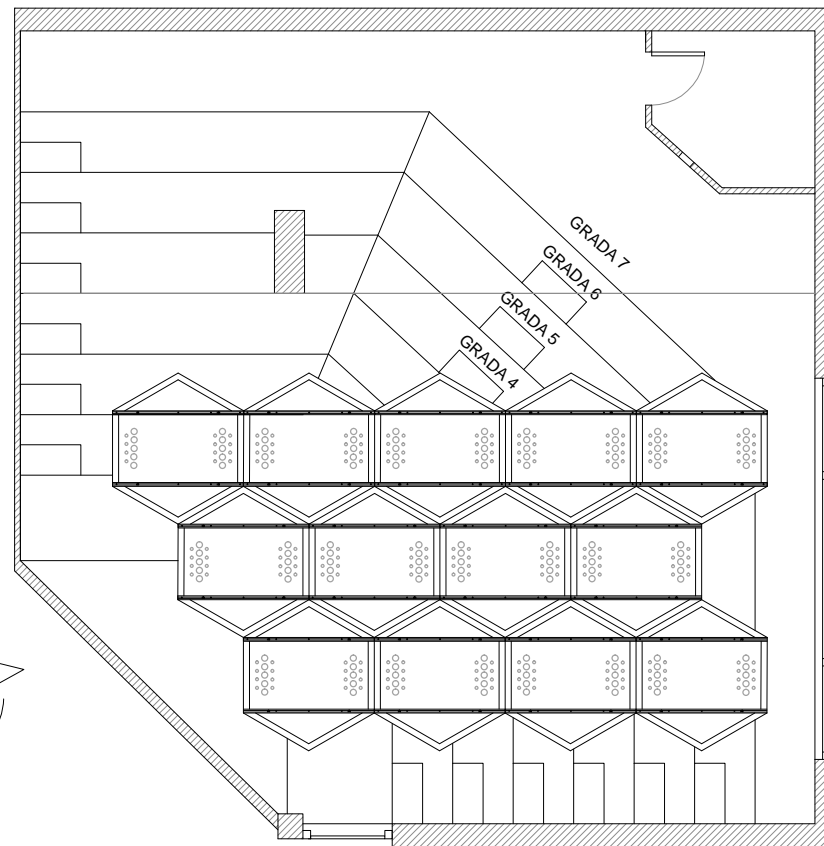
ELEMENTOS HORIZONTALES			
Tarima	5,95	Forjado	4,18
Suelo	10,70	Alzado I-I'	
Suelo G1	6,69	Pared	25,95
Suelo G2	8,21	Pilar	1,91
Suelo G3	9,56	Forjado	2,02
Suelo G4	10,37	Puerta	4,54
Suelo G5	11,63	Grada Vertical	
Suelo G6	12,82	Pared G1	2,82
Suelo G7	27,00	Pared G2	2,72
Forjado Zona 1	35,86	Pared G3	3,41
Forjado zona 2	67,13	Pared G4	3,81
ELEMENTOS VERTICALES		Pared G5	4,10
Alzado F-F'		Pared G6	4,61
Pared	29,44	Pared G7	5,00
Ventana	5,29	Pared tarima	1,97
Alzado G-G'		Hueco gradas	1,66
Pared	29,27	Huecos escaleras	2,25
Alzado H-H'		Pilar aislado	9,11
Pared	28,77	Alzado J-J'	
Ventana	8,26	Pared	26,63
Pilar	0,43		

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

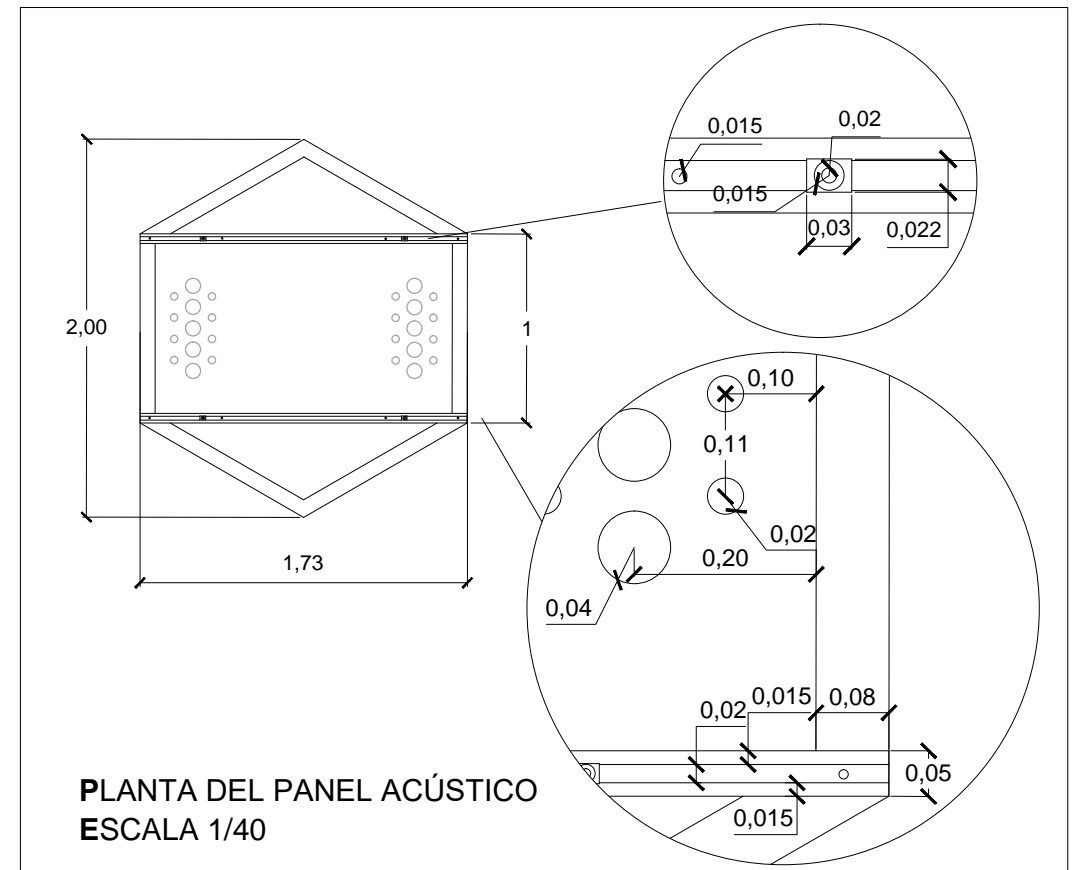




PLANTA REFORMADA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/100



PLANTA REFORMADA AULA ESPECIAL I
ESCALA 1/100

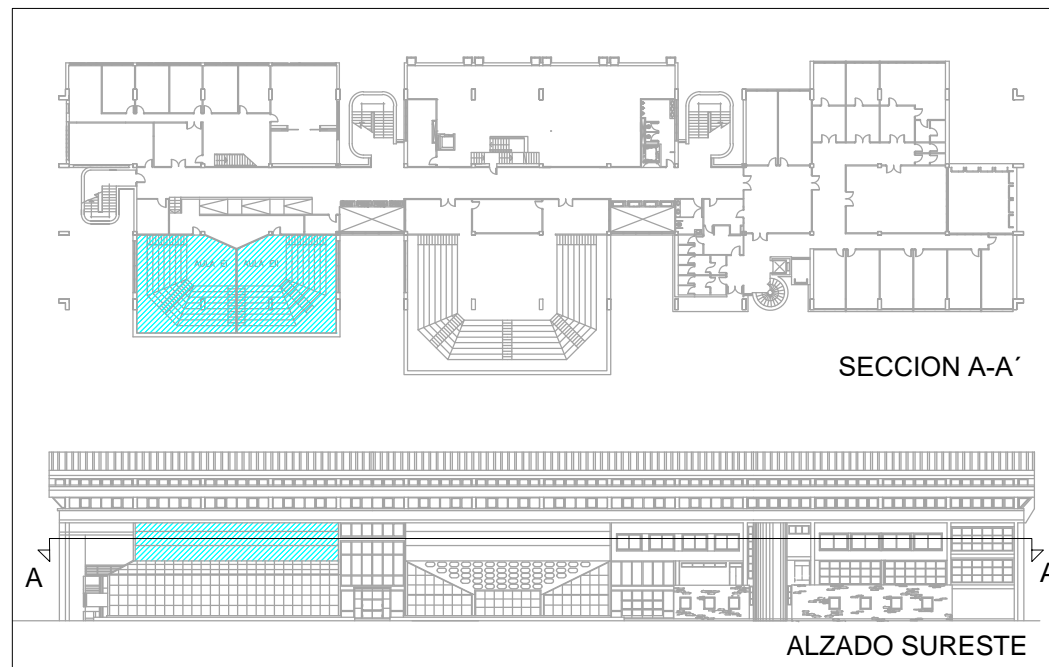


PLANTA DEL PANEL ACÚSTICO
ESCALA 1/40

COTAS PLANTA TECHO	
ZONA 1	● +7,4m
ZONA 2	● +8,6m

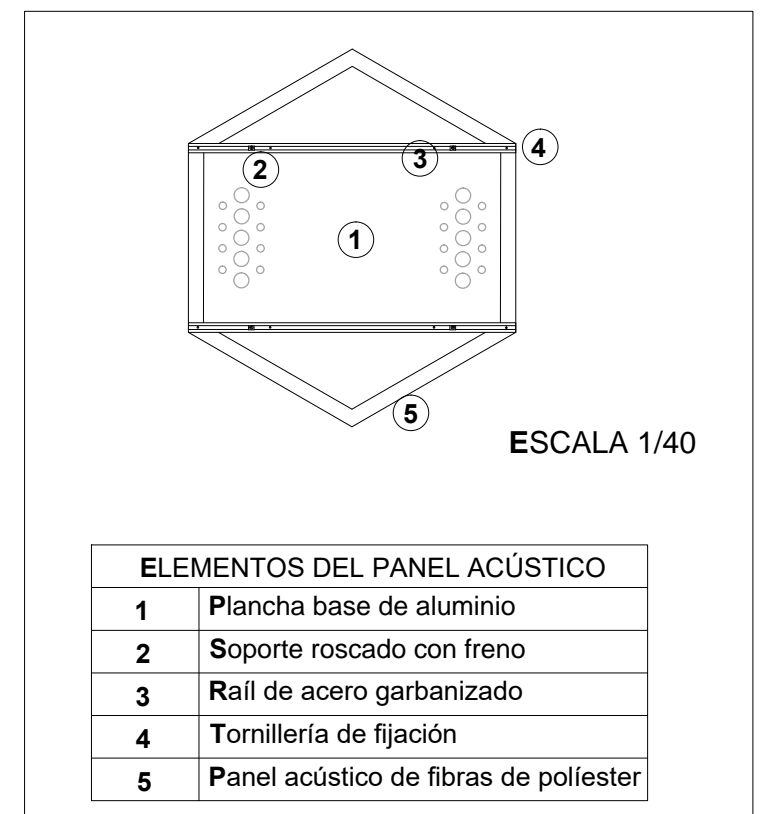
TIPOS DE TECHO	
ZONA 1	BIDIRECCIONAL
ZONA 2	BIDIRECCIONAL

	SUP. ÚTIL (m ²)	SUP. CONSTRUIDA (m ²)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02



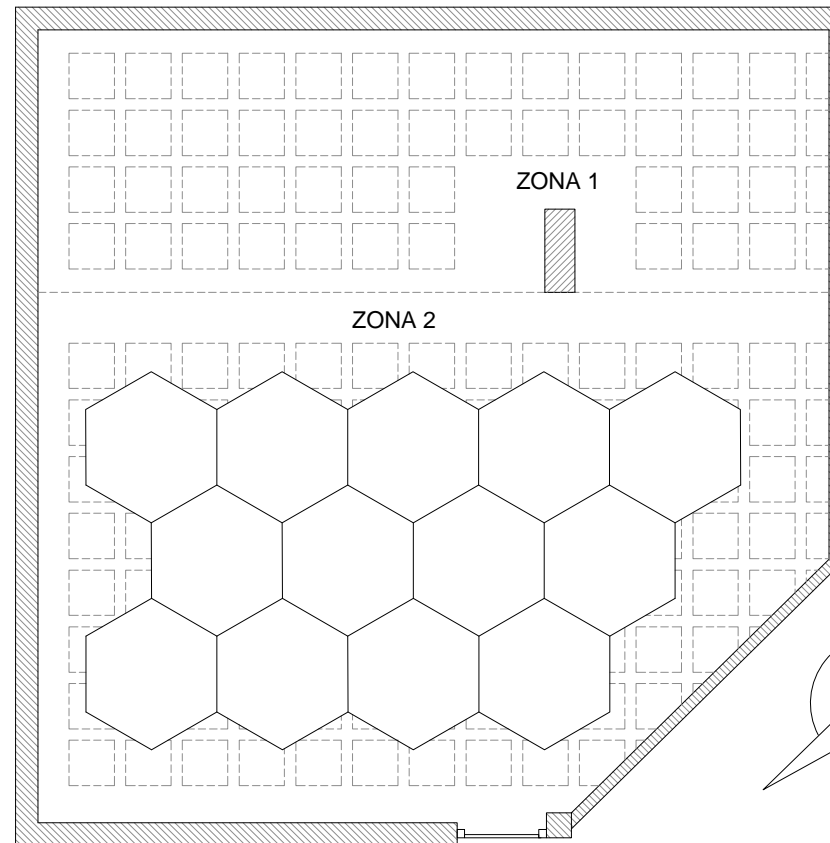
UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

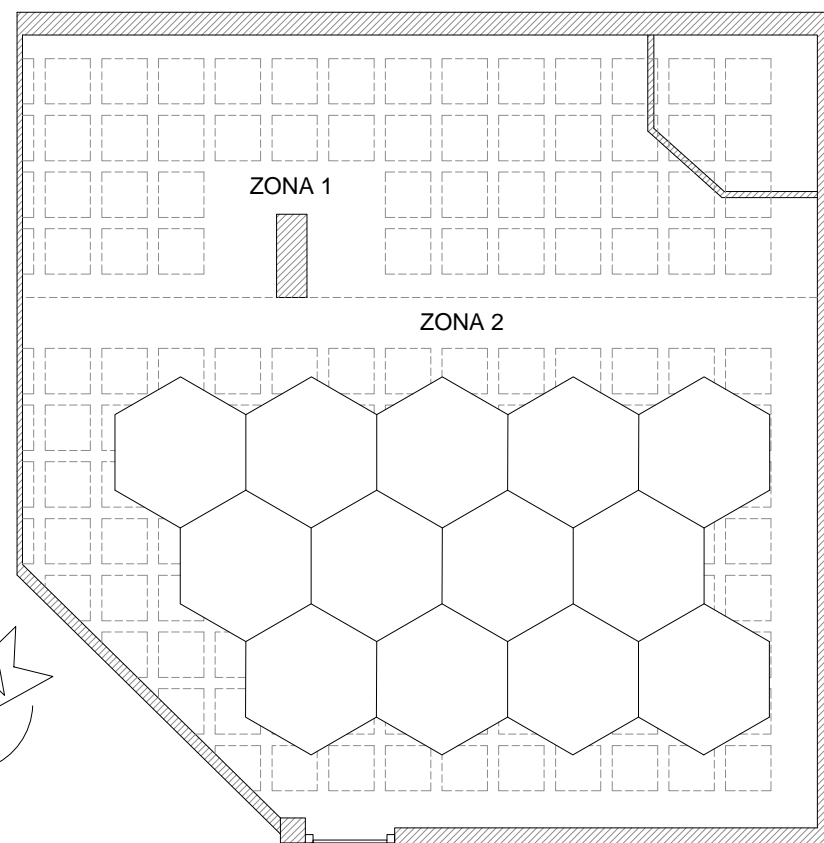


ELEMENTOS DEL PANEL ACÚSTICO	
1	Plancha base de aluminio
2	Soporte roscado con freno
3	Rail de acero galvanizado
4	Tornillería de fijación
5	Panel acústico de fibras de poliéster

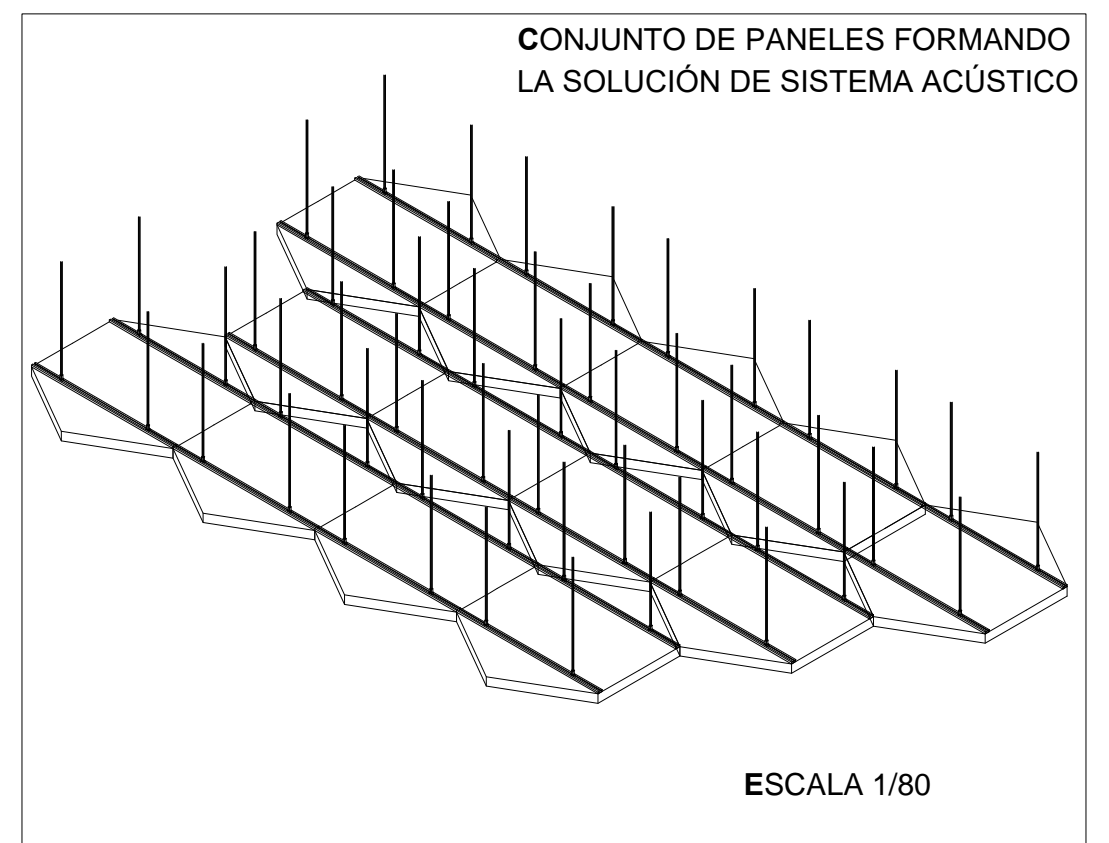




PLANTA TECHO REFORMADA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/100



PLANTA TECHO REFORMADA AULA ESPECIAL I
ESCALA 1/100

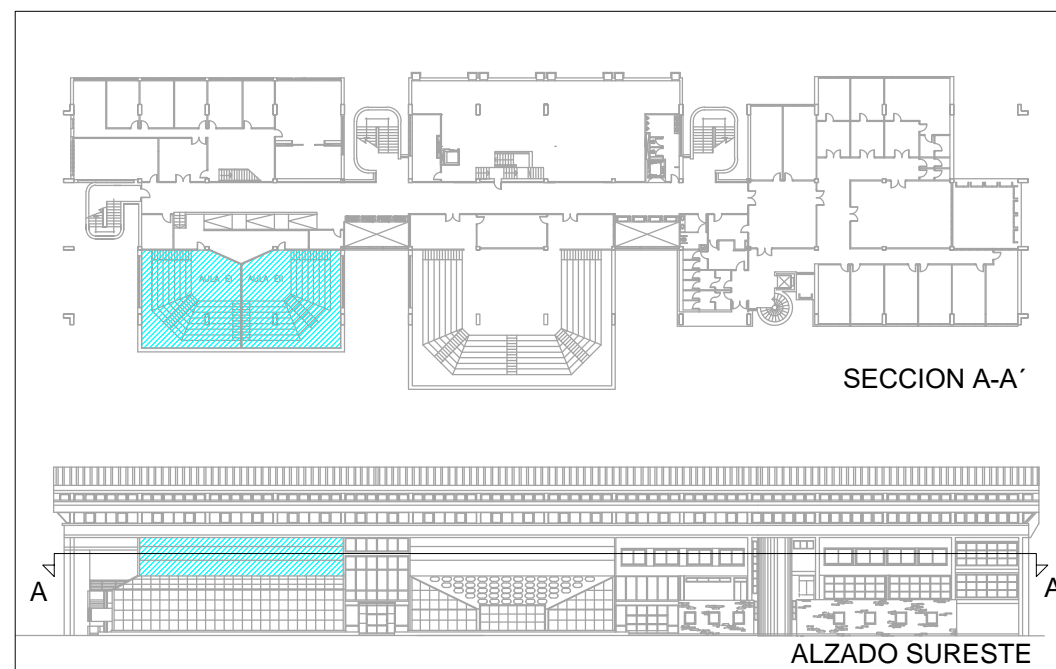


ESCALA 1/80

COTAS PLANTA TECHO	
ZONA 1	+7,4m
ZONA 2	+8,6m

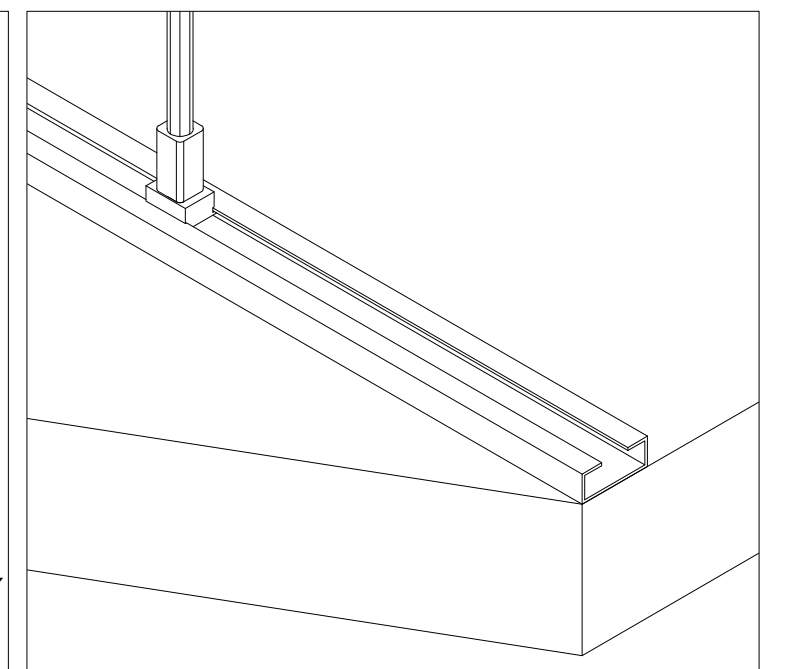
TIPOS DE TECHO	
ZONA 1	BIDIRECCIONAL
ZONA 2	BIDIRECCIONAL

	SUP. ÚTIL (m2)	SUP. CONSTRUIDA (m2)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02



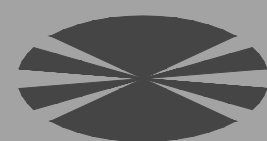
UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

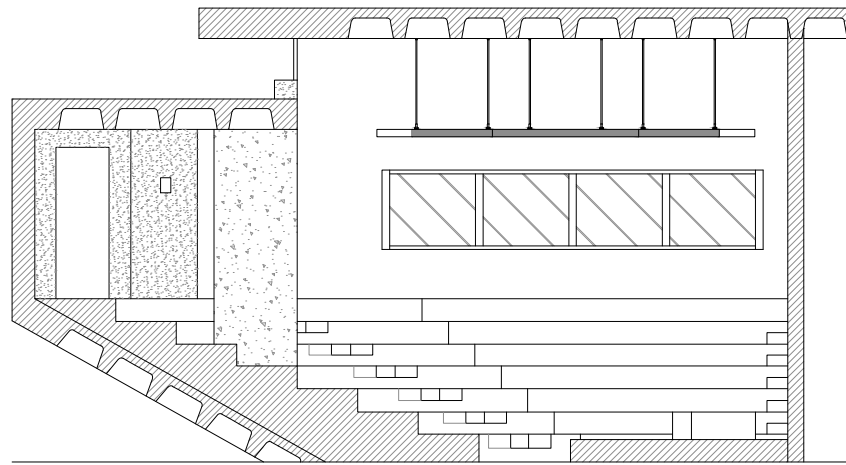


PANEL ACÚSTICO CON RAÍL Y CABLE DE SUSPENSIÓN

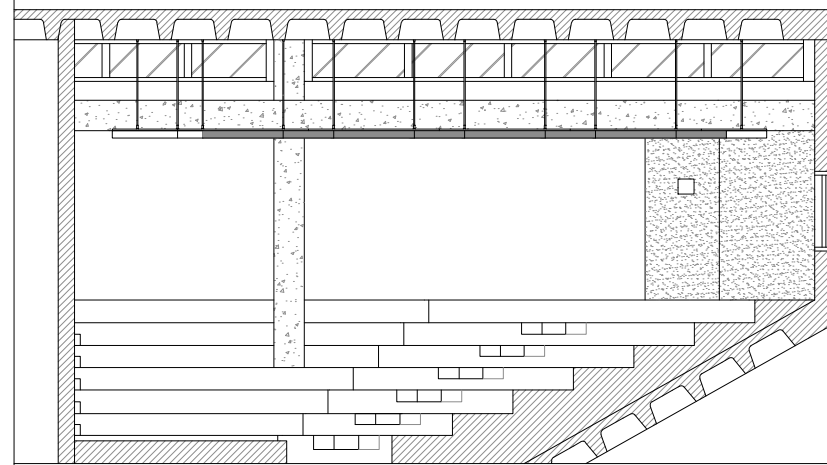
ESCALA 1/5



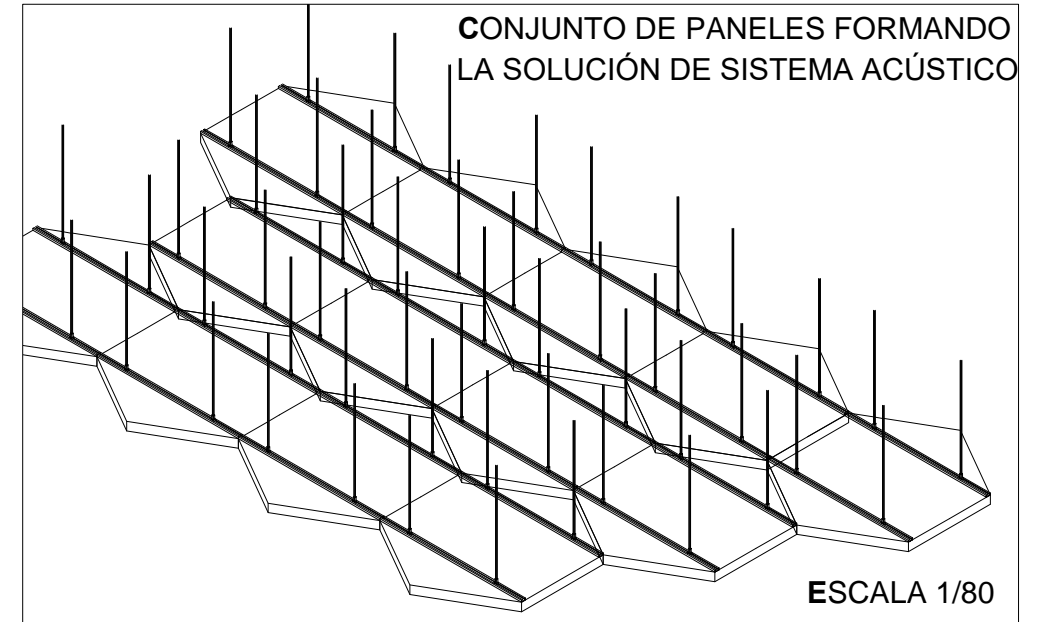
SECCIONES REFORMADAS AULA ESPECIAL I



SECCIÓN A-A'

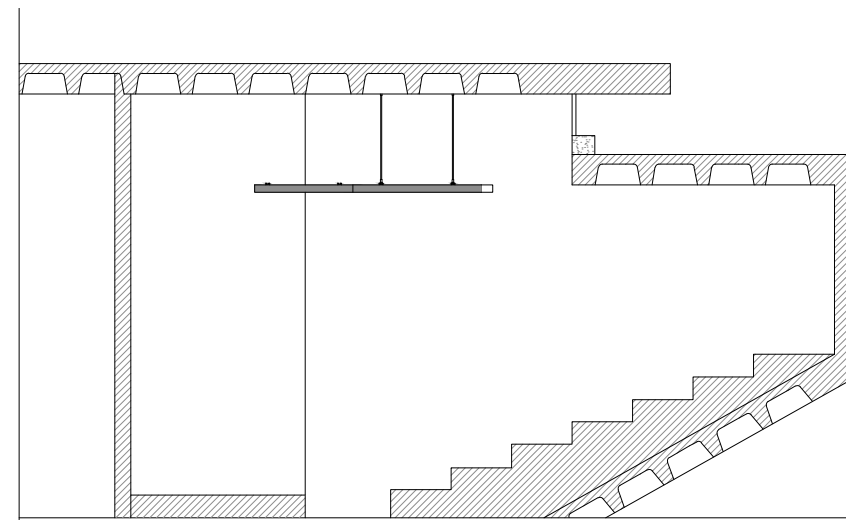


SECCIÓN C-C'

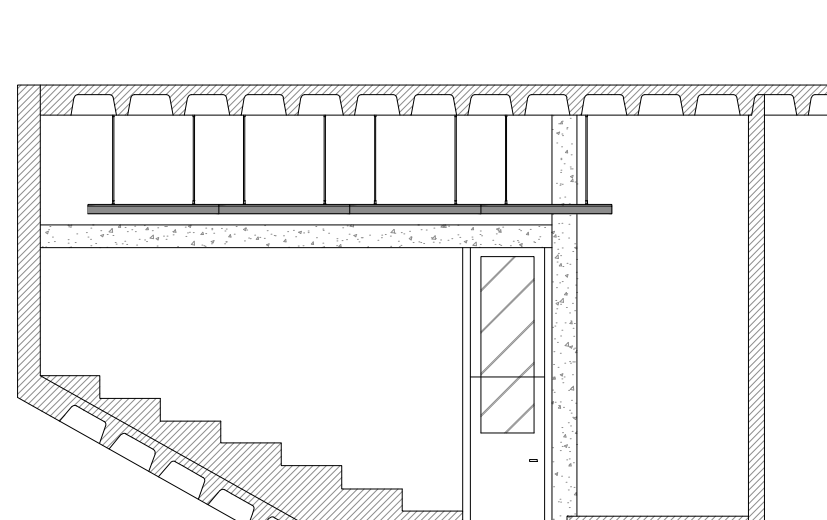


CONJUNTO DE PANELES FORMANDO LA SOLUCIÓN DE SISTEMA ACÚSTICO

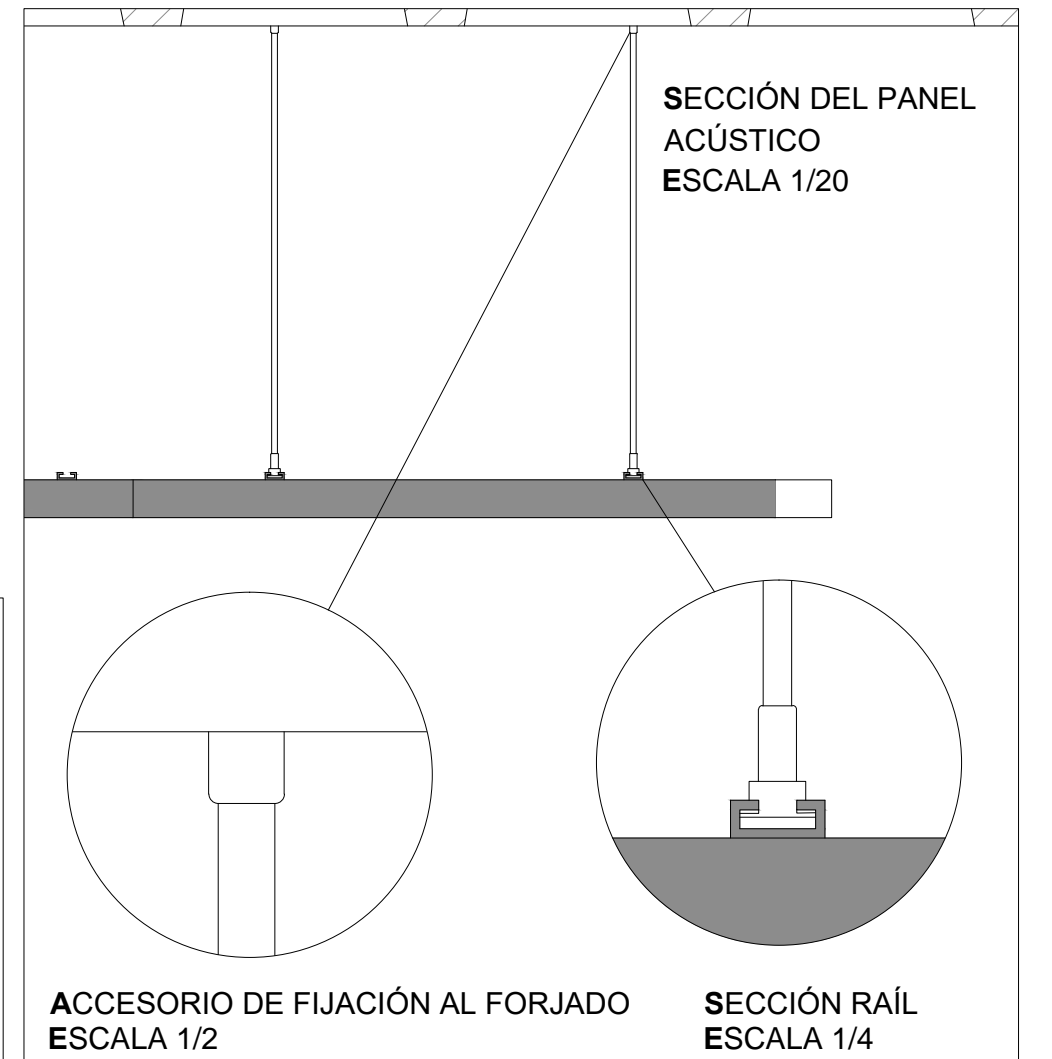
ESCALA 1/80



SECCIÓN B-B'



SECCIÓN D-D'

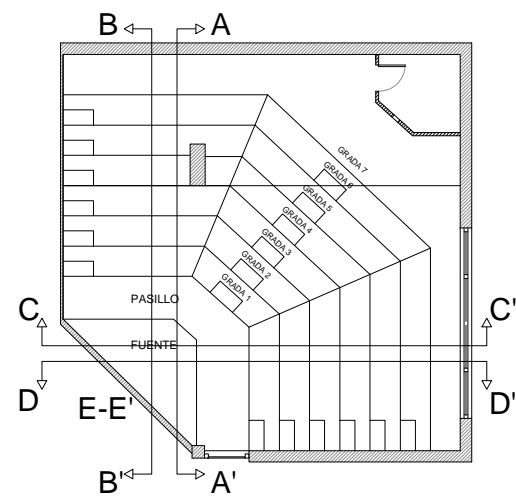


SECCIÓN DEL PANEL ACÚSTICO ESCALA 1/20

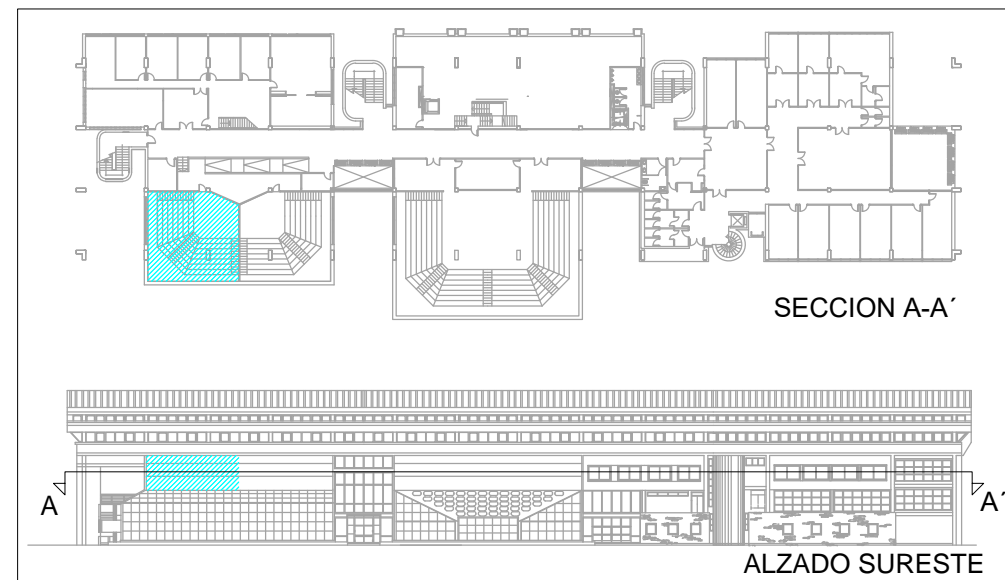
ACCESORIO DE FIJACIÓN AL FORJADO ESCALA 1/2

SECCIÓN RAIL ESCALA 1/4

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

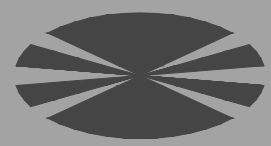


PLANTA AULA ESPECIAL I ESCALA 1/200

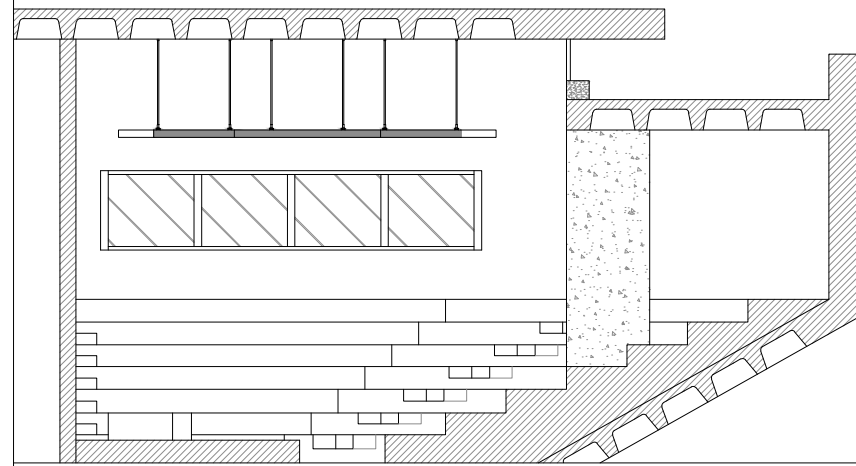


SECCION A-A'

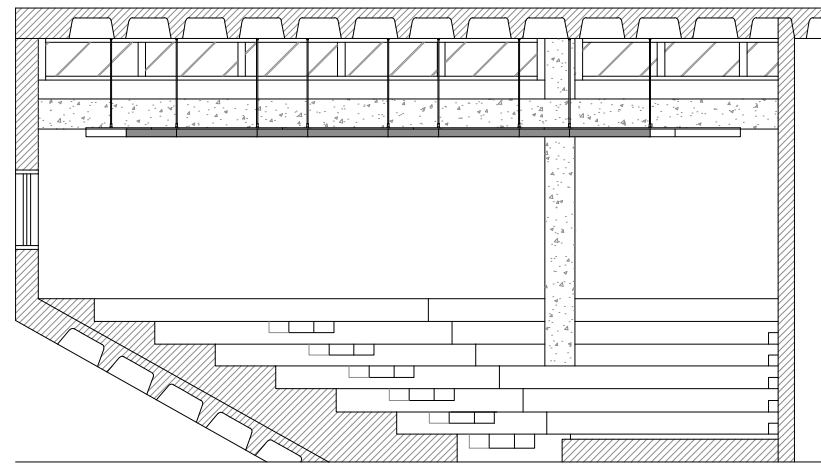
ALZADO SURESTE



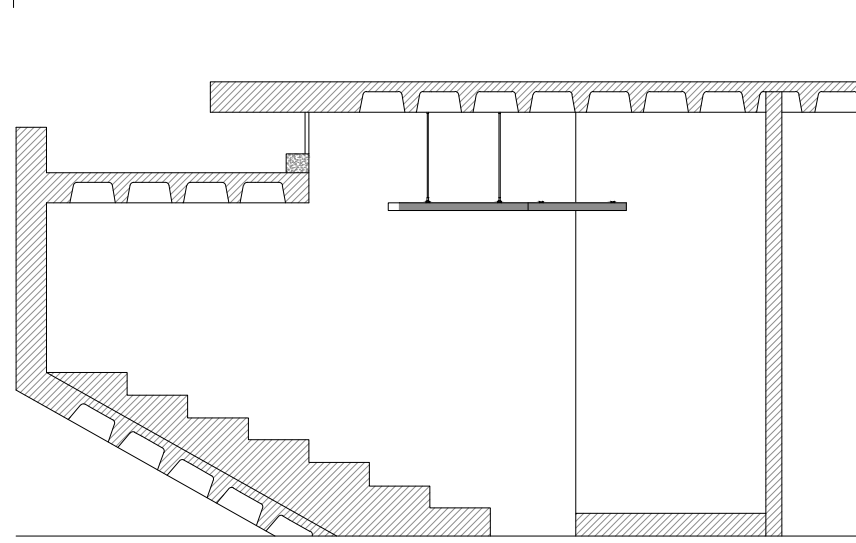
SECCIONES REFORMADAS AULA ESPECIAL II



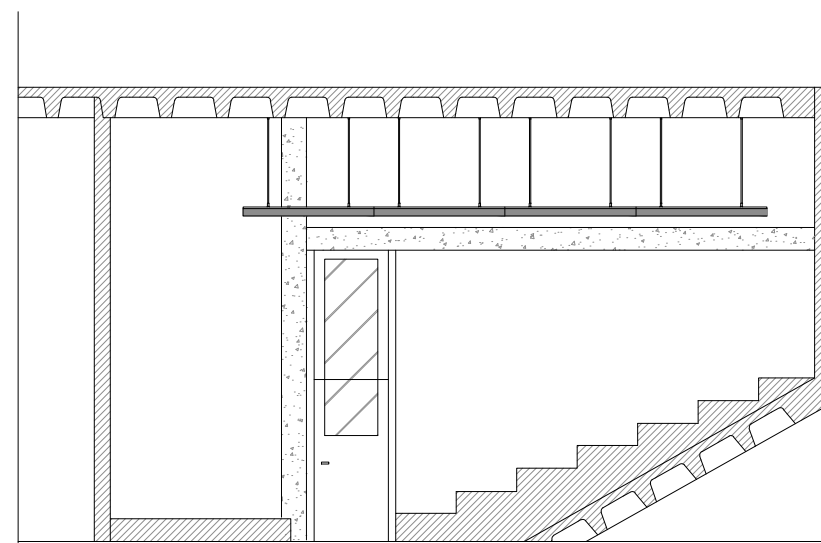
SECCIÓN F-F'



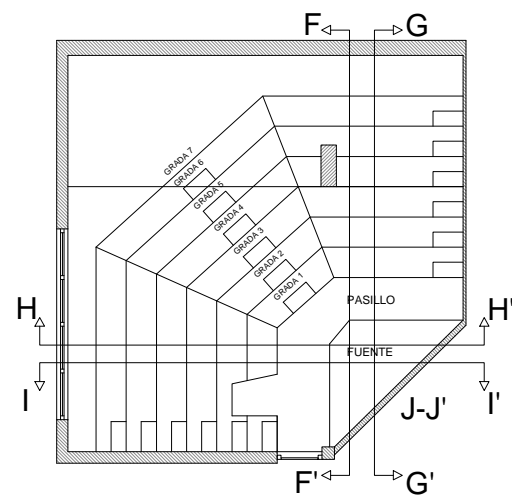
SECCIÓN H-H'



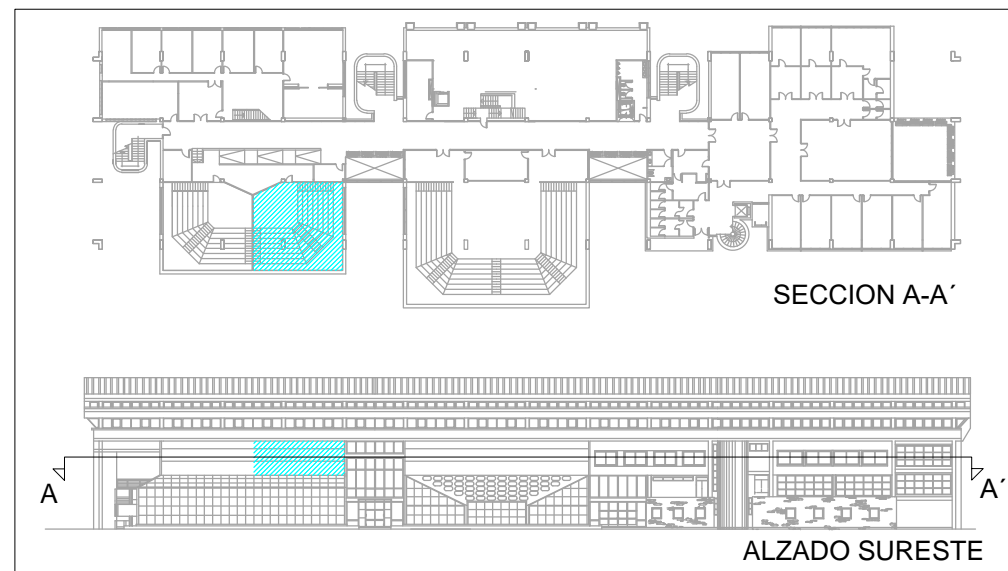
SECCIÓN G-G'



SECCIÓN I-I'

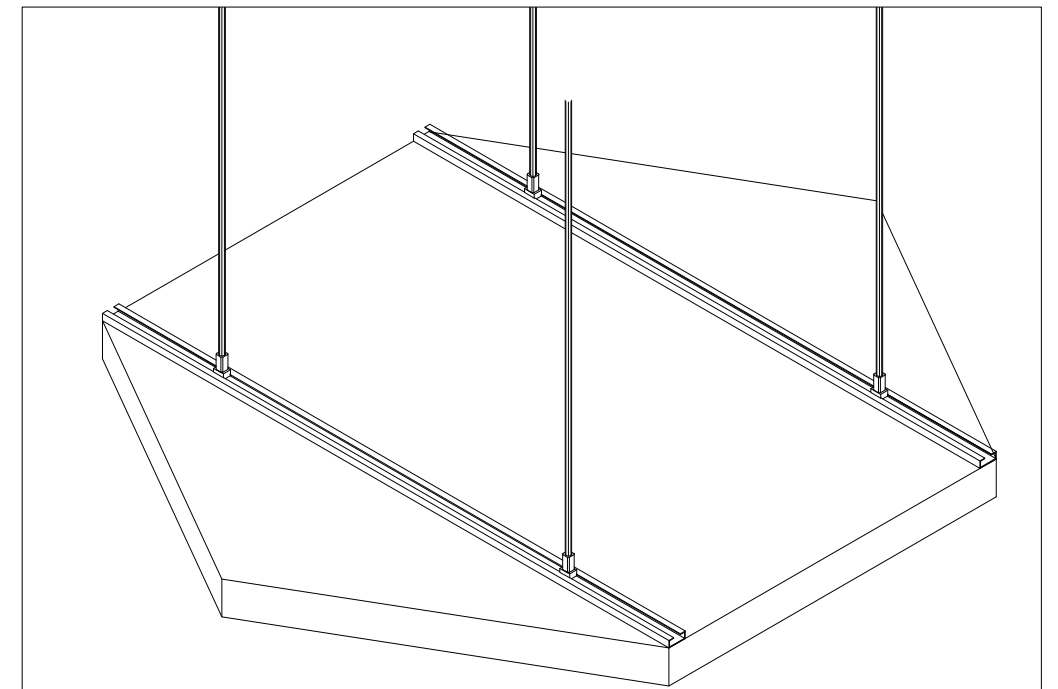


PLANTA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/200

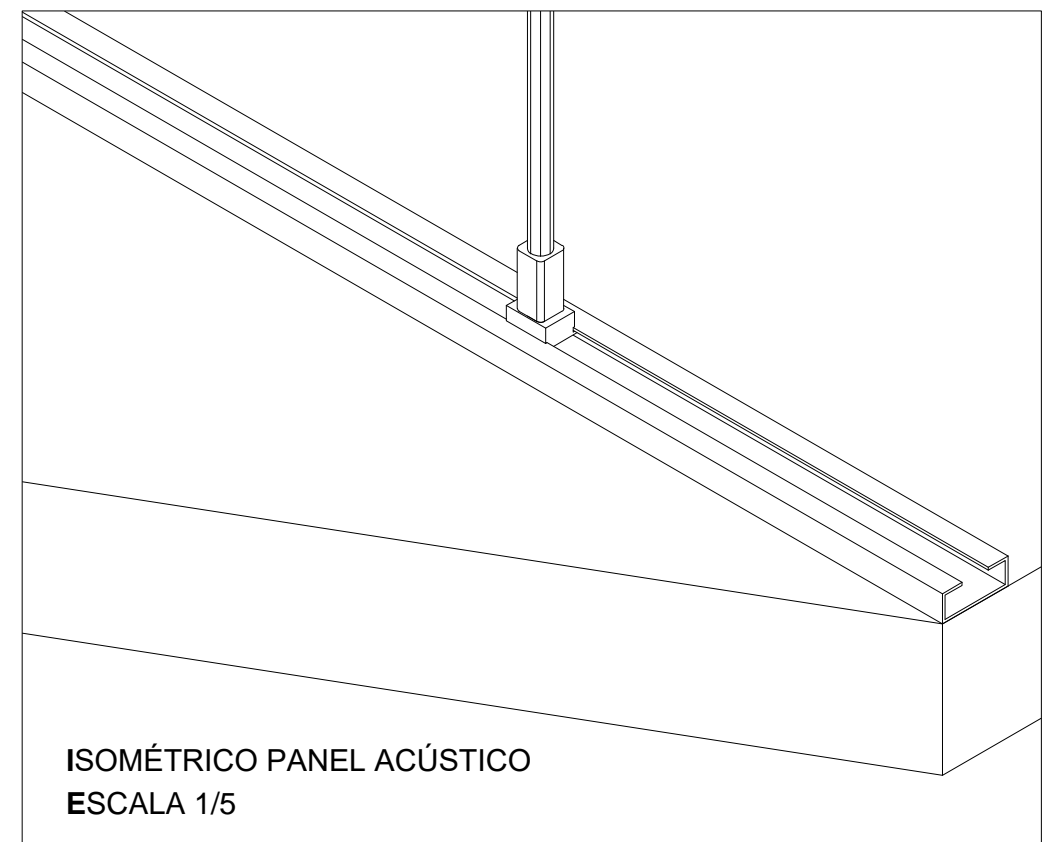


SECCION A-A'

ALZADO SURESTE



ISOMÉTRICO PANEL ACÚSTICO
ESCALA 1/20



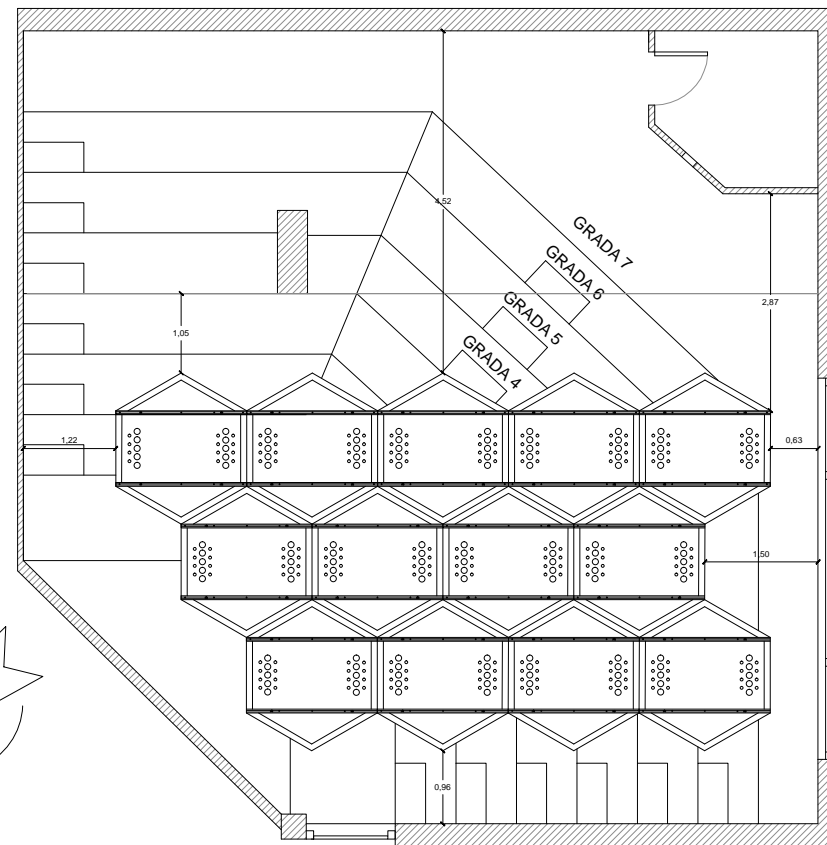
ISOMÉTRICO PANEL ACÚSTICO
ESCALA 1/5

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

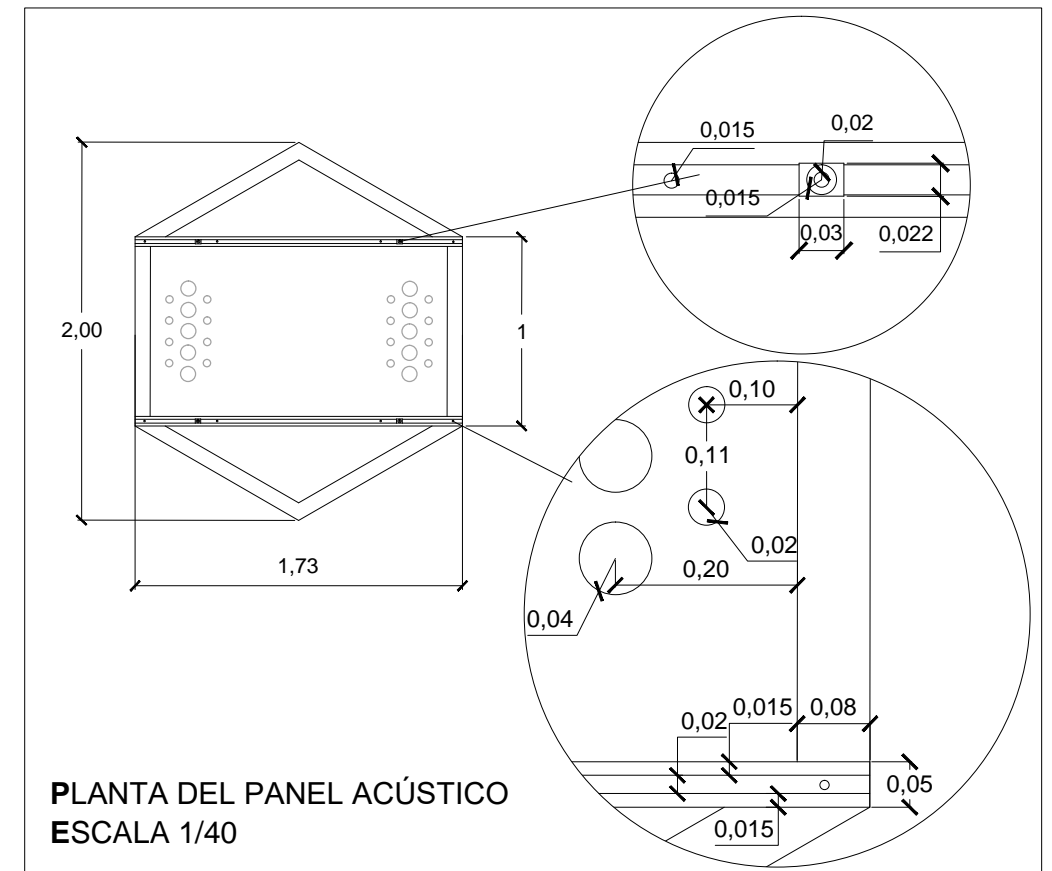




PLANTA REFORMADA ACOTADA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/100



PLANTA REFORMADA ACOTADA AULA ESPECIAL I
ESCALA 1/100

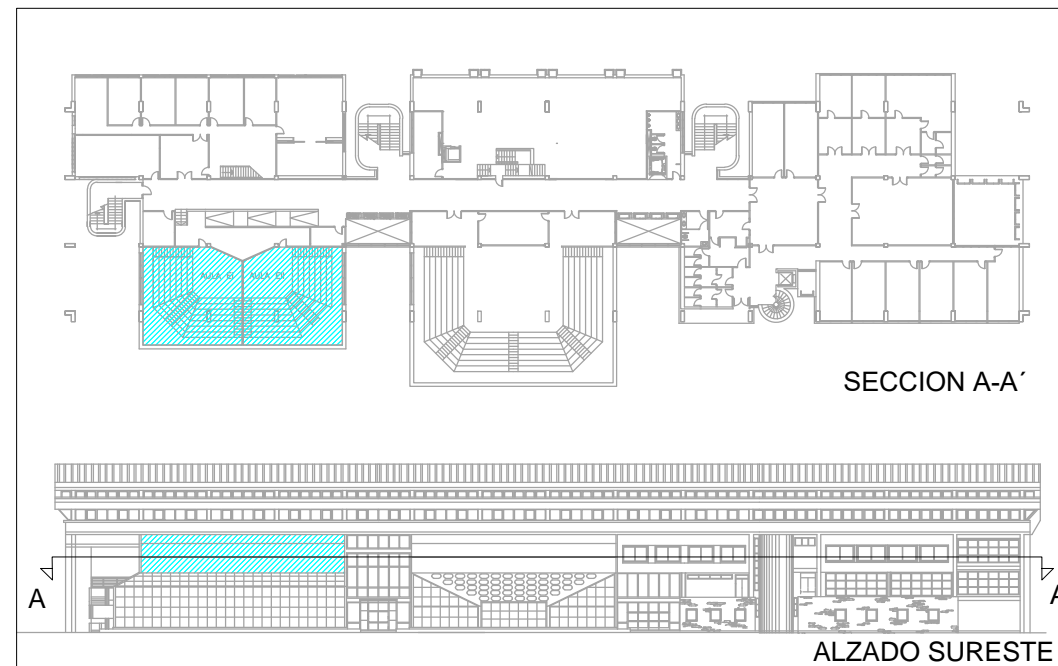


PLANTA DEL PANEL ACÚSTICO
ESCALA 1/40

COTAS PLANTA TECHO	
ZONA 1	● +7,4m
ZONA 2	● +8,6m

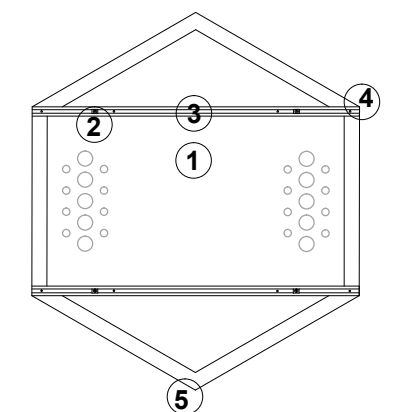
TIPOS DE TECHO	
ZONA 1	BIDIRECCIONAL
ZONA 2	BIDIRECCIONAL

	SUP. ÚTIL (m ²)	SUP. CONSTRUIDA (m ²)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02



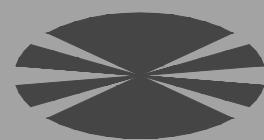
UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT

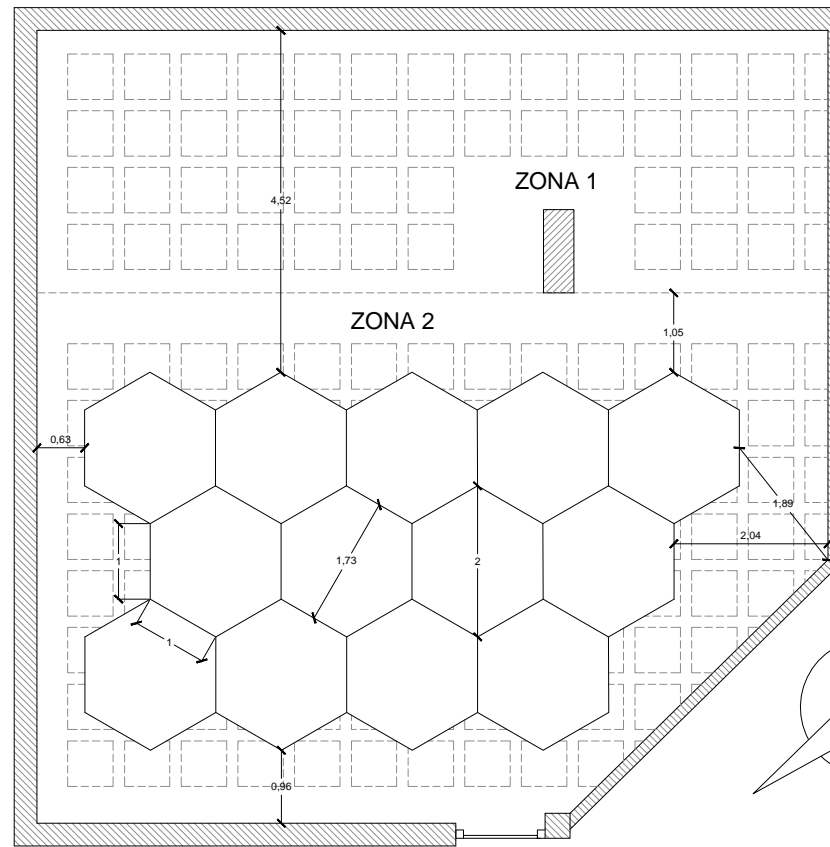
0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros



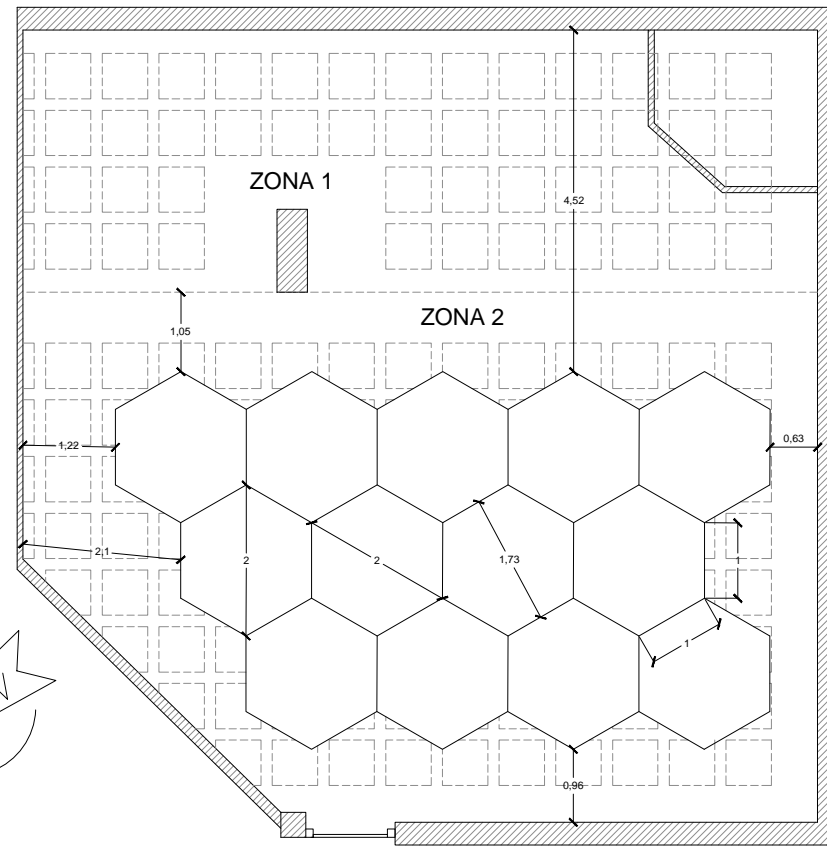
ESCALA 1/40

ELEMENTOS DEL PANEL ACÚSTICO	
1	Plancha base de aluminio
2	Soporte roscado con freno
3	Raíl de acero galvanizado
4	Tornillería de fijación
5	Panel acústico de fibras de poliéster

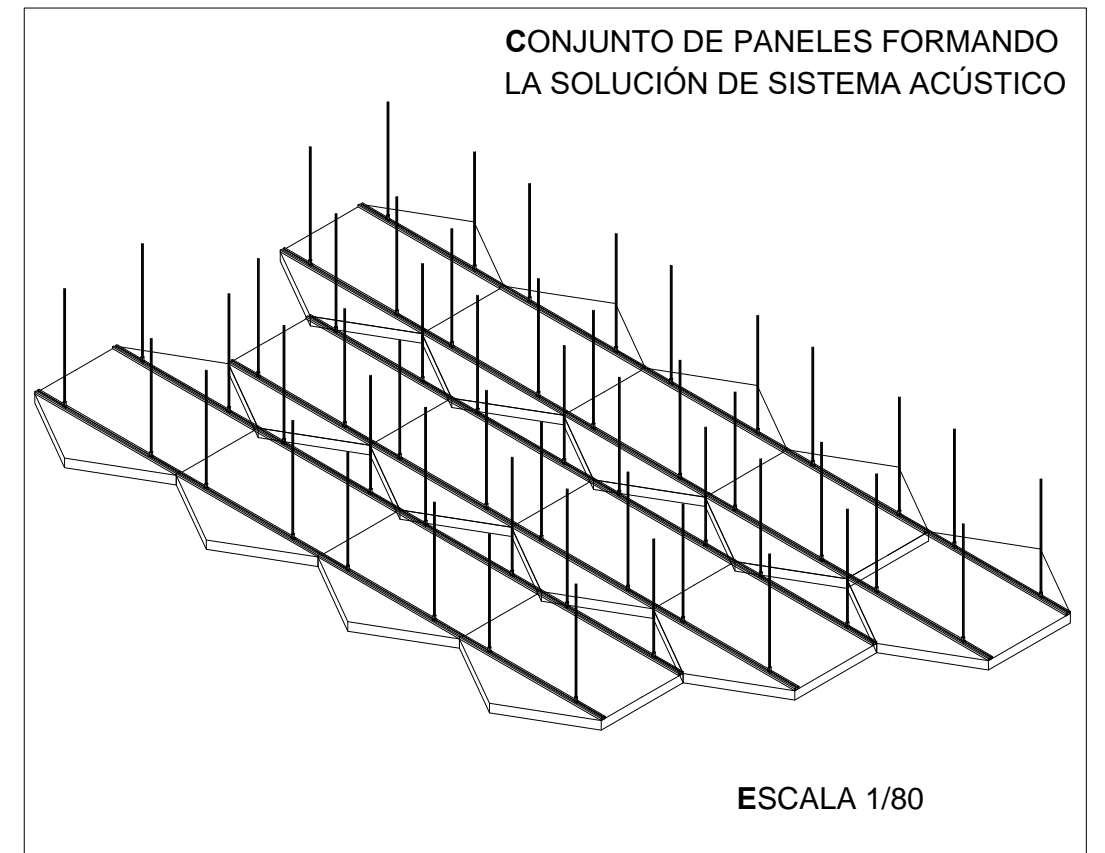




PLANTA TECHO REFORMADA ACOTADA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/100



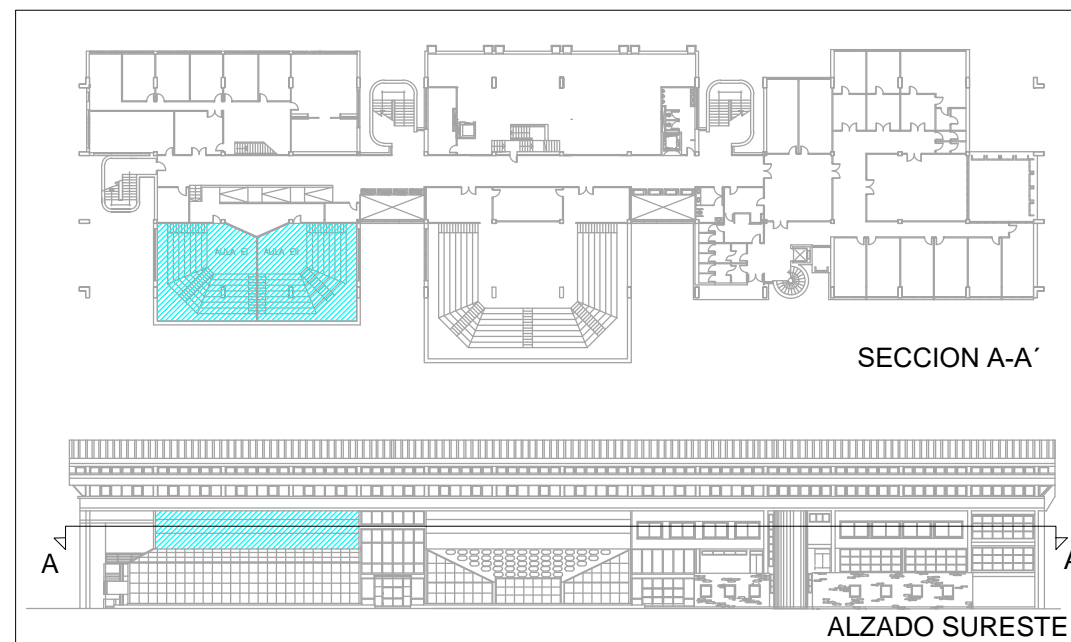
PLANTA TECHO REFORMADA ACOTADA AULA ESPECIAL I
ESCALA 1/100



COTAS PLANTA TECHO	
ZONA 1	⊕ +7,4m
ZONA 2	⊕ +8,6m

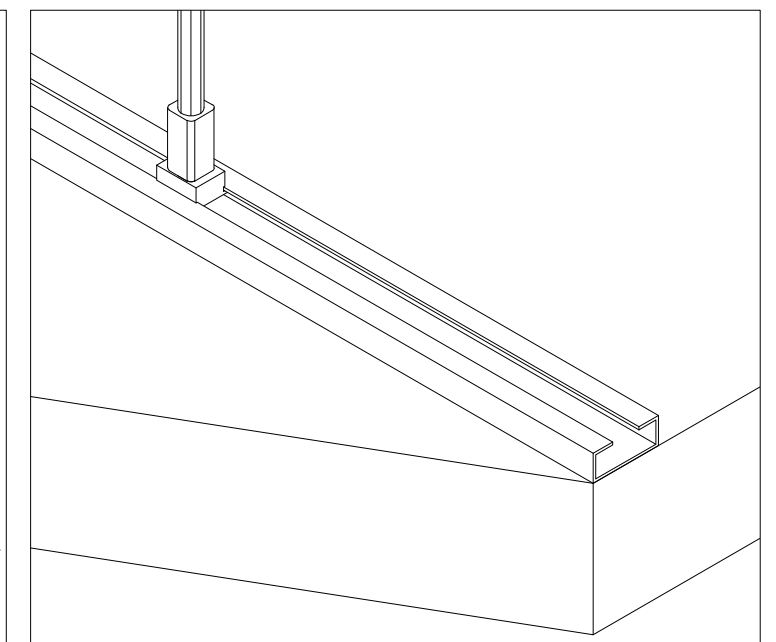
TIPOS DE TECHO	
ZONA 1	BIDIRECCIONAL
ZONA 2	BIDIRECCIONAL

	SUP. ÚTIL (m ²)	SUP. CONSTRUIDA (m ²)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02



UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

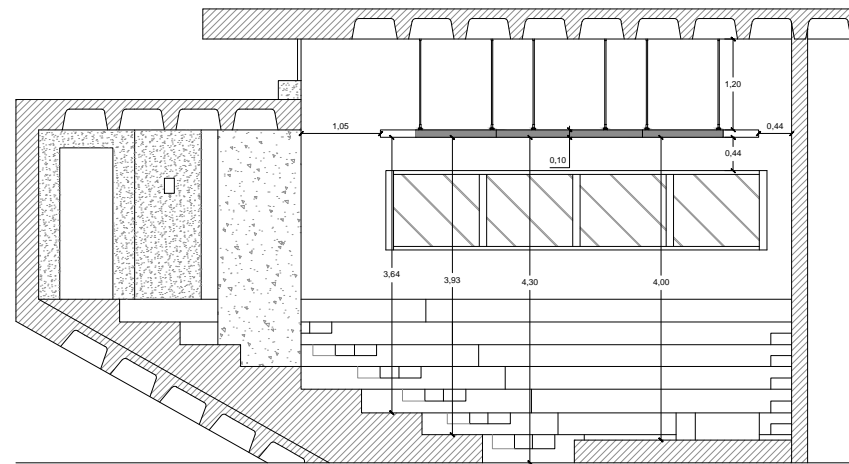


PANEL ACÚSTICO CON RAÍL Y CABLE DE SUSPENSIÓN

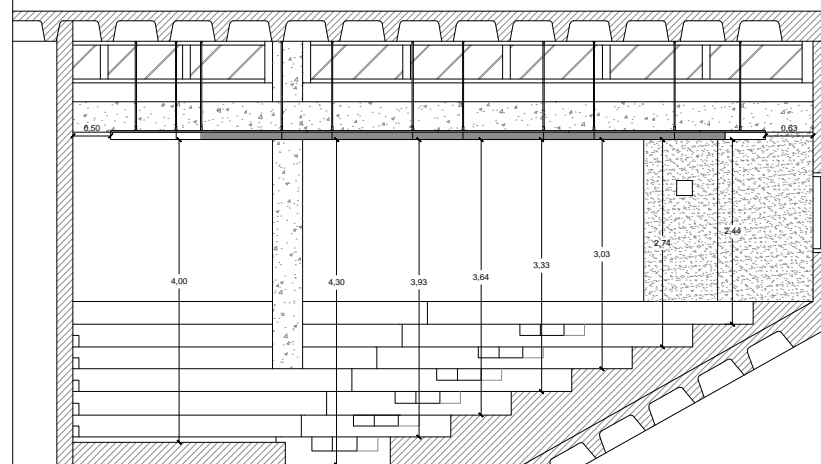
ESCALA 1/5



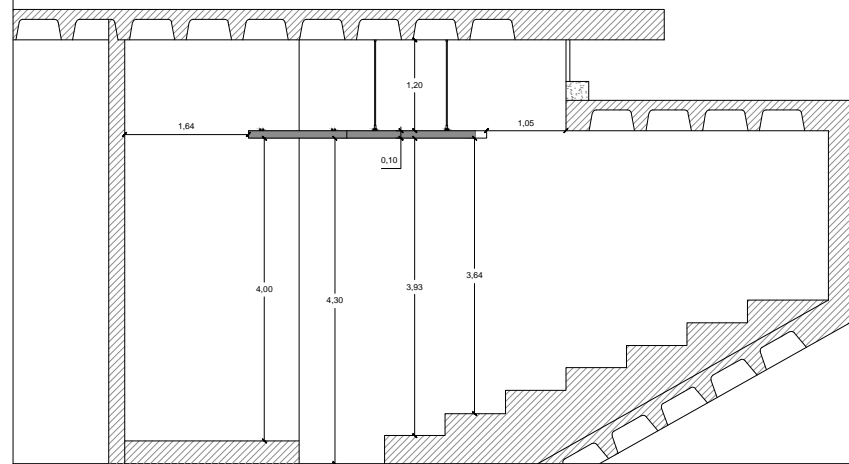
SECCIONES REFORMADAS ACOTADAS AULA ESPECIAL I



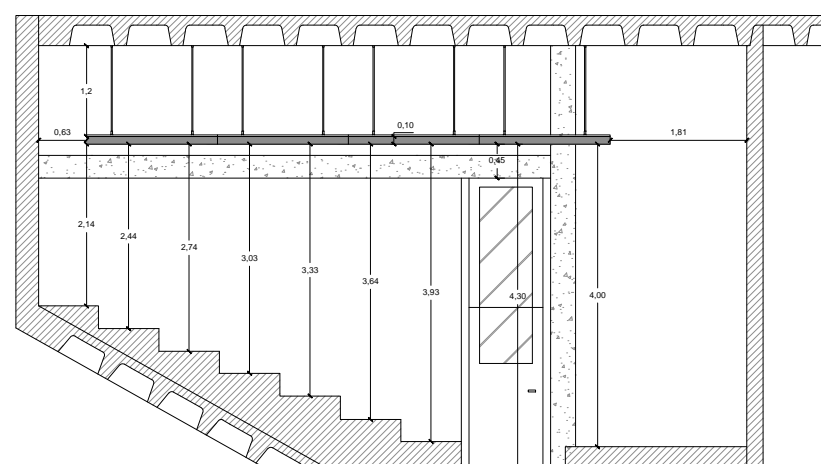
SECCIÓN A-A'



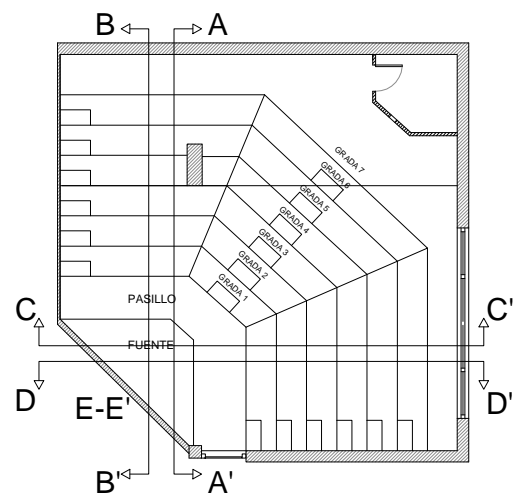
SECCIÓN C-C'



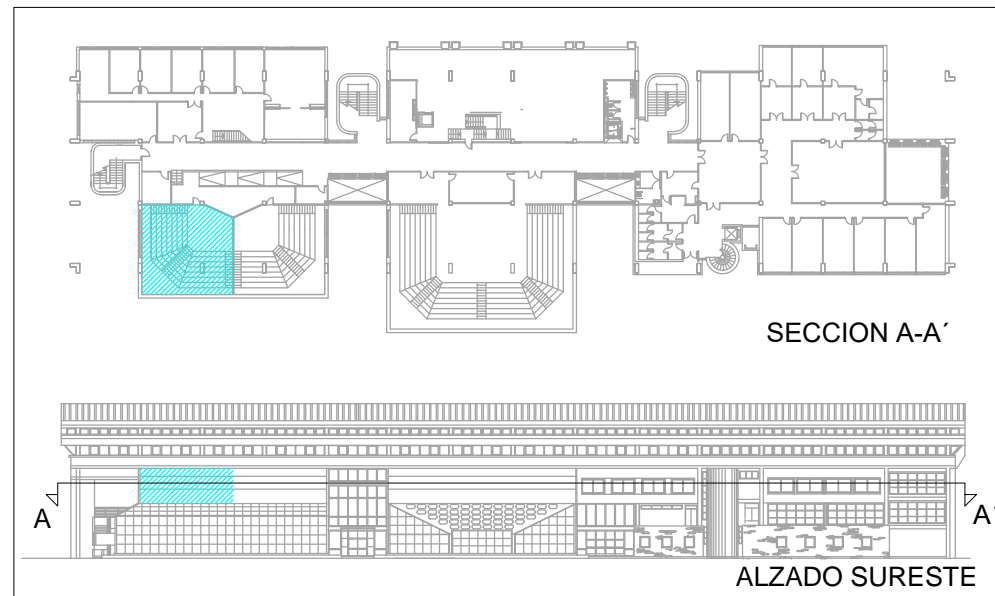
SECCIÓN B-B'



SECCIÓN D-D'



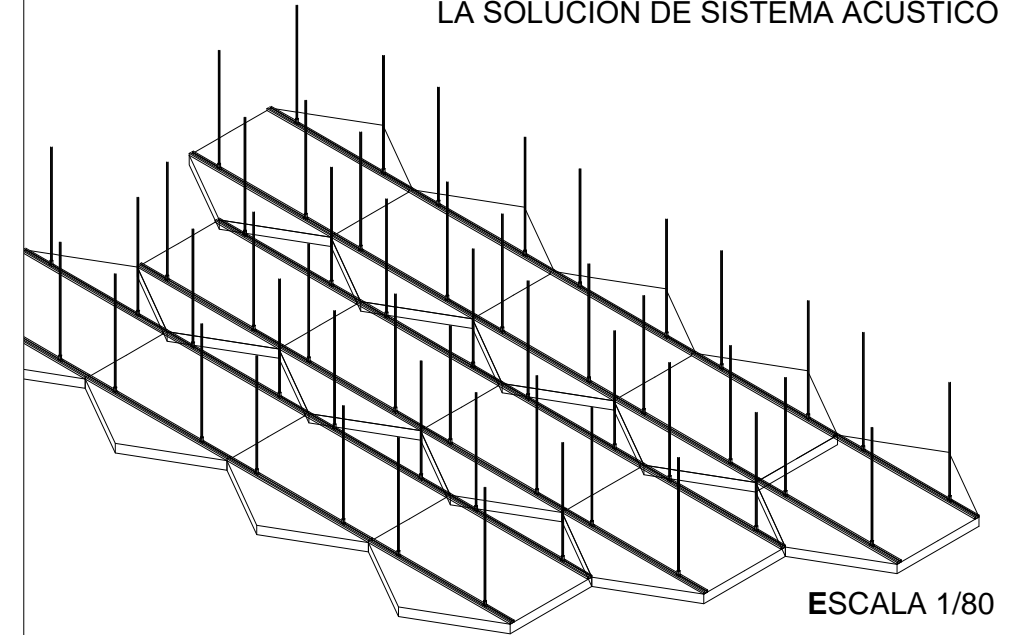
**PLANTA AULA ESPECIAL I
ESCALA 1/200**



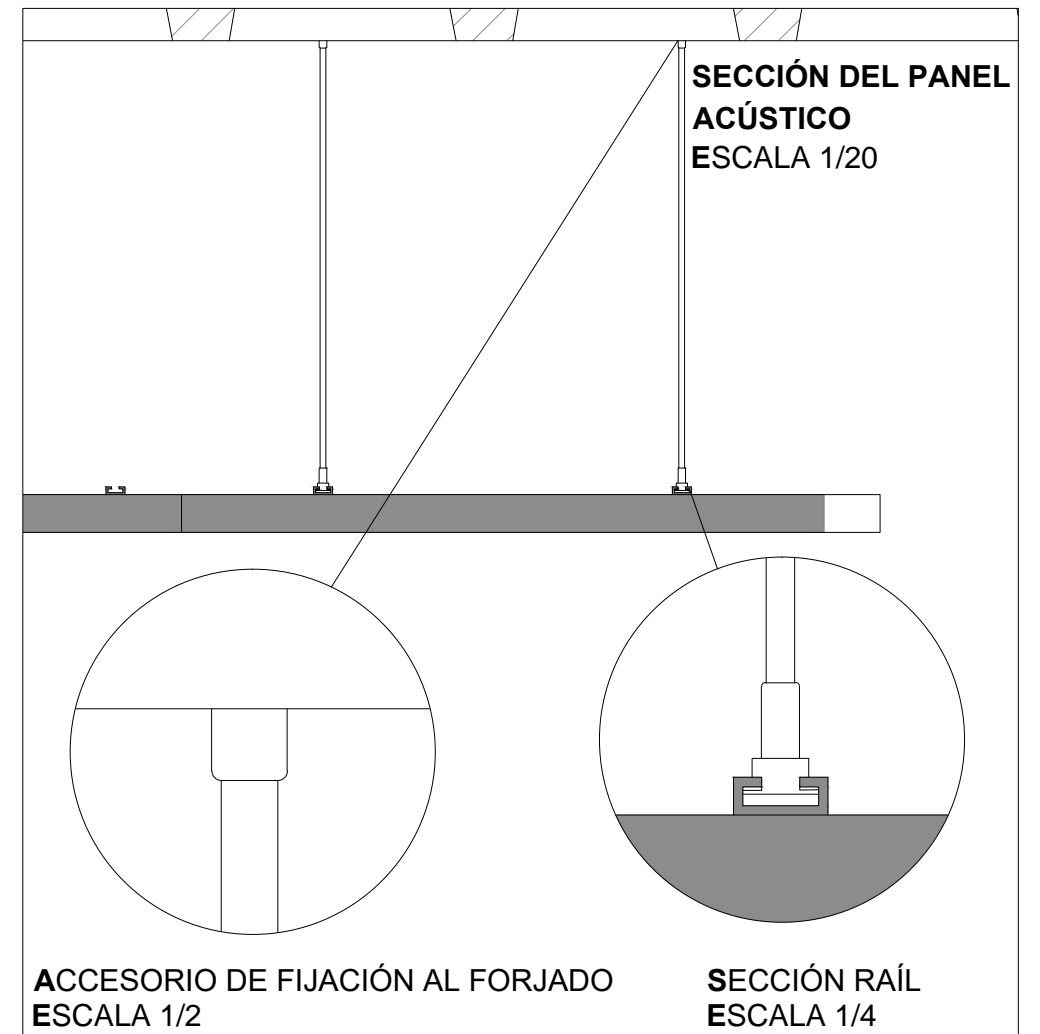
SECCION A-A'

ALZADO SURESTE

CONJUNTO DE PANELES FORMANDO LA SOLUCIÓN DE SISTEMA ACÚSTICO



ESCALA 1/80



**SECCIÓN DEL PANEL ACÚSTICO
ESCALA 1/20**

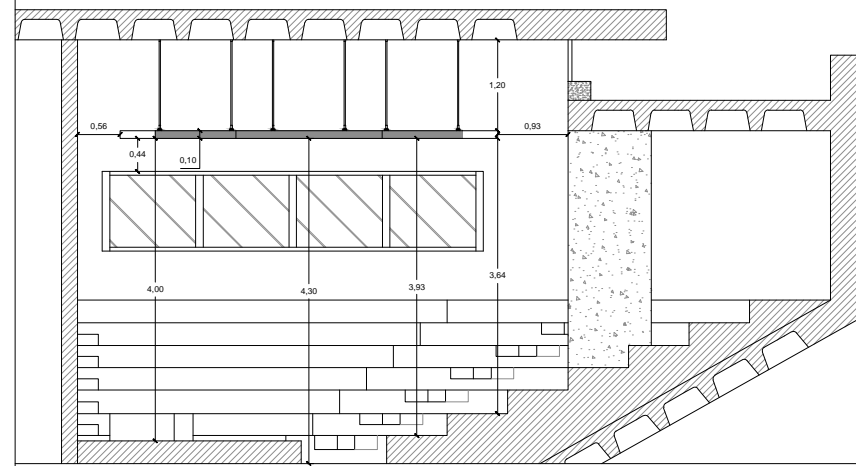
**ACCESORIO DE FIJACIÓN AL FORJADO
ESCALA 1/2**

**SECCIÓN RAIL
ESCALA 1/4**

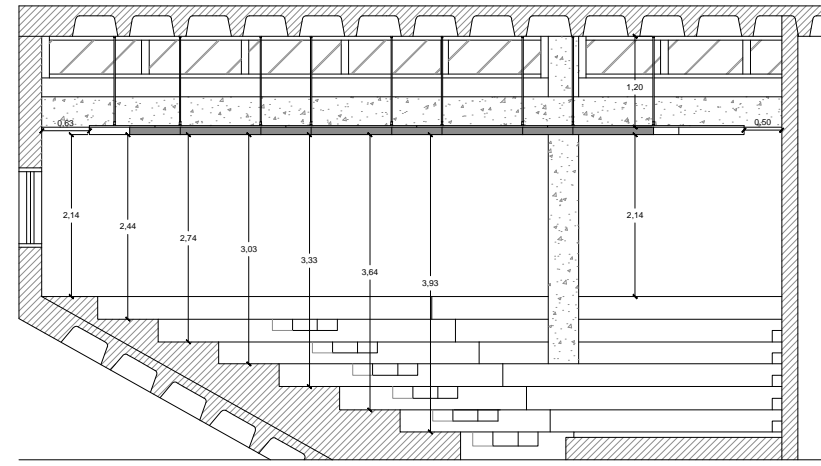
0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros



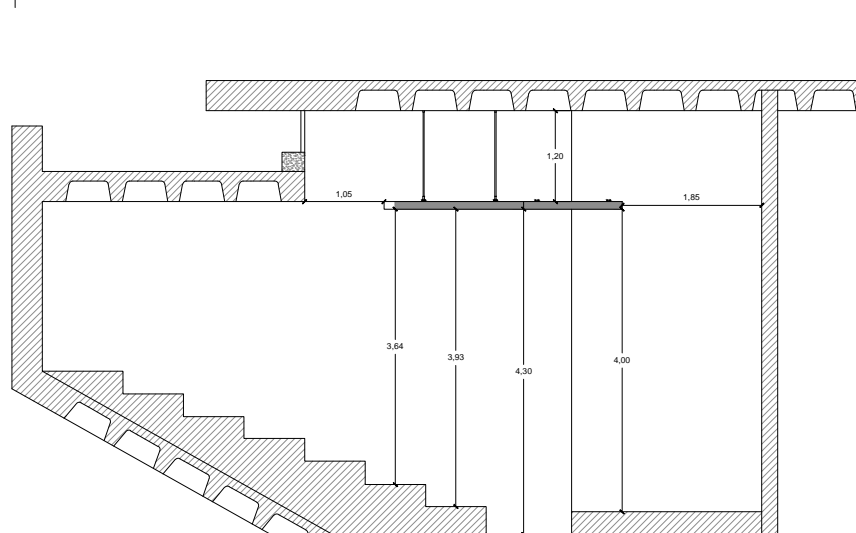
SECCIONES REFORMADAS ACOTADAS AULA ESPECIAL II



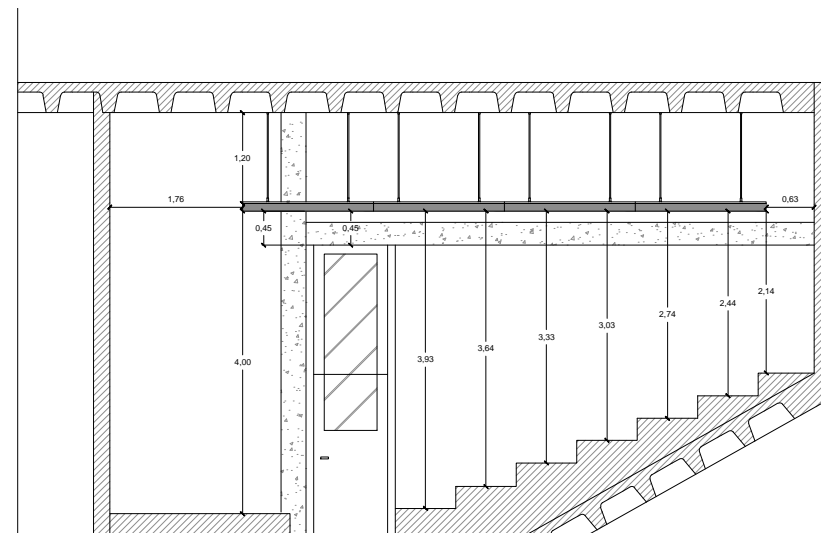
SECCIÓN F-F'



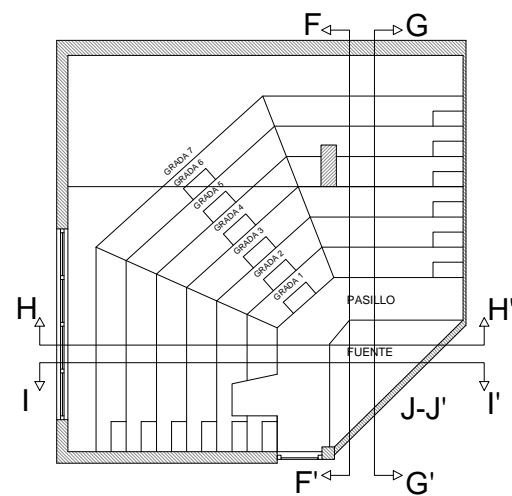
SECCIÓN H-H'



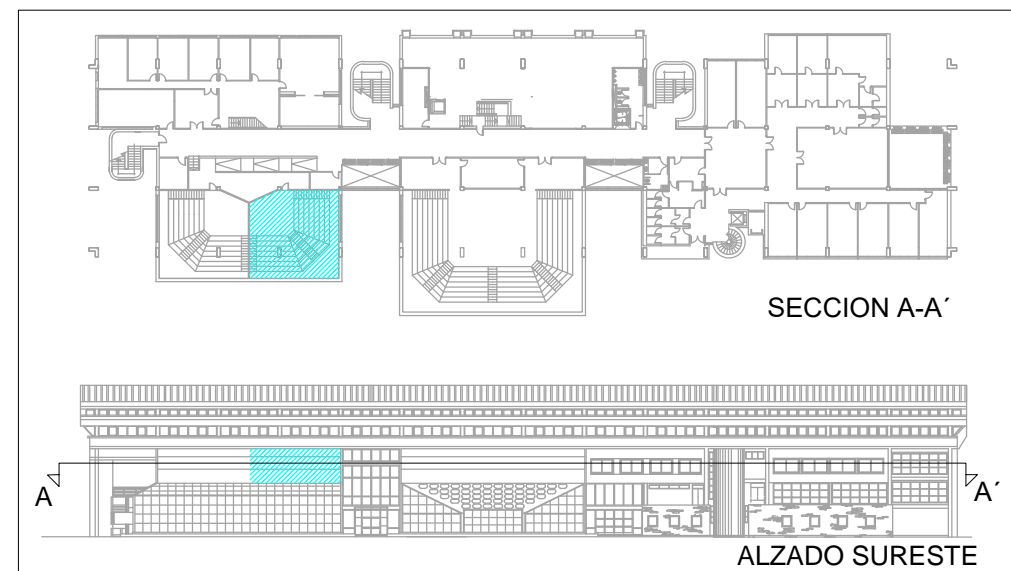
SECCIÓN G-G'



SECCIÓN I-I'

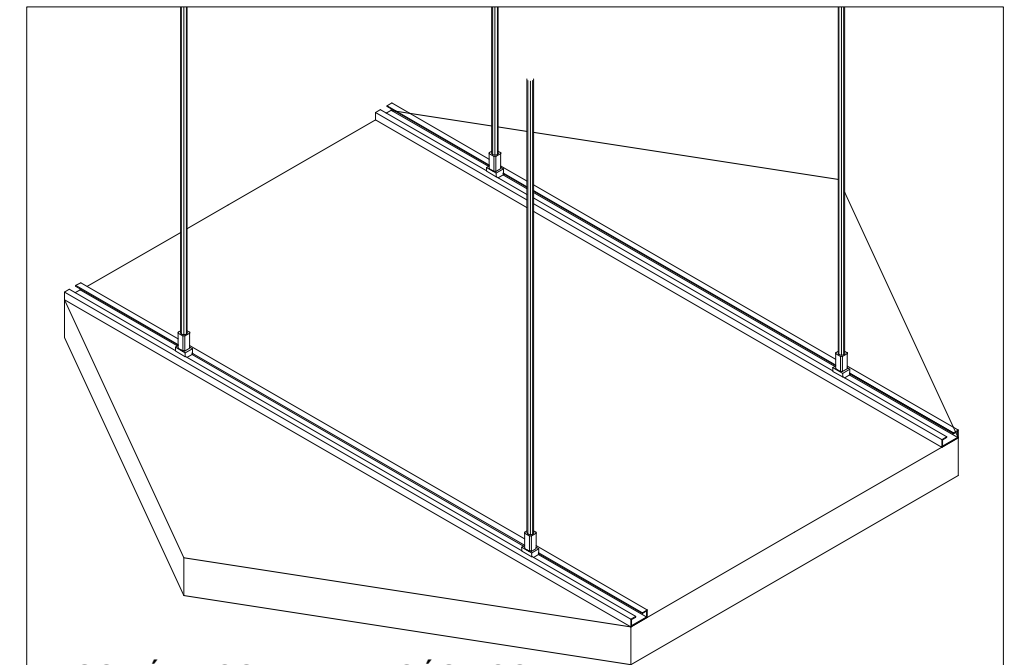


PLANTA AULA ESPECIAL II
ESCALA 1/200

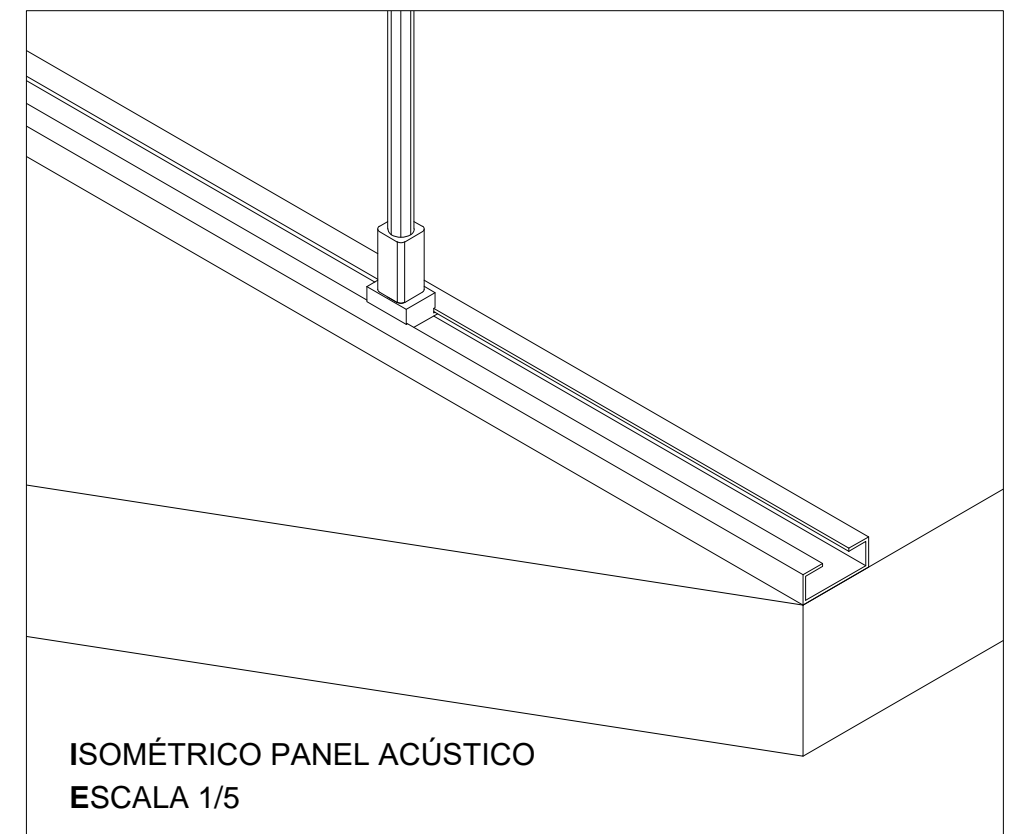


SECCION A-A'

ALZADO SURESTE

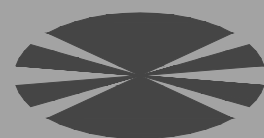


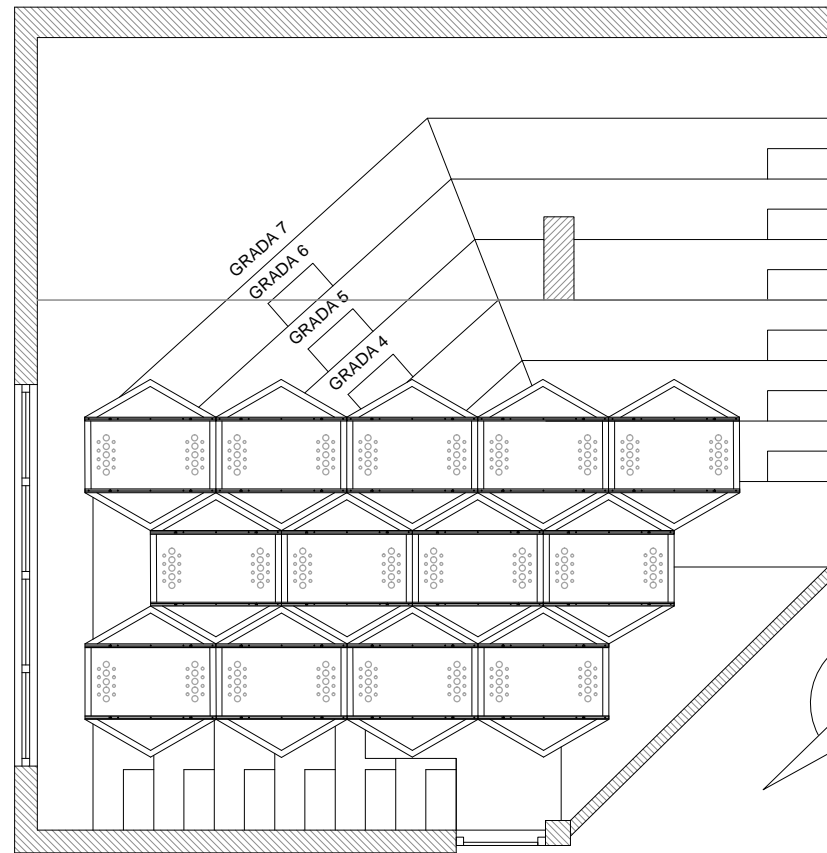
ISOMÉTRICO PANEL ACÚSTICO
ESCALA 1/20



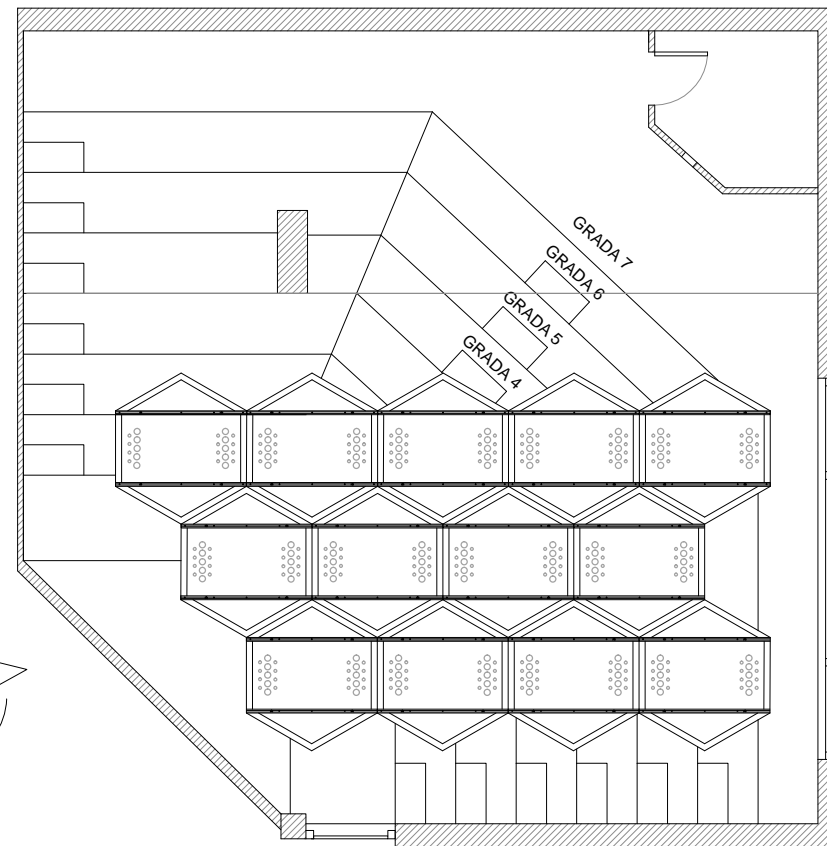
ISOMÉTRICO PANEL ACÚSTICO
ESCALA 1/5

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros





ESCALA 1/100



ESCALA 1/100



Suelo: pavimento de linóleo, de 2,5mm de espesor, con tratamiento antiestático y fijado con adhesivo de contacto.



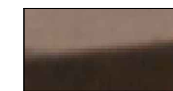
Techo: forjado bidireccional de hormigón armado.



Panel acústico: panel de 10cm de espesor de fibras de poliéster, con acabado textil color vainilla código 4051.



Paredes: pintura color blanco con acabado de gota fina, aplicada sobre mortero.



Rodapié: de PVC flexible color negro, fijado con adhesivo.



Ventana: vidrio con carpintería de aluminio.

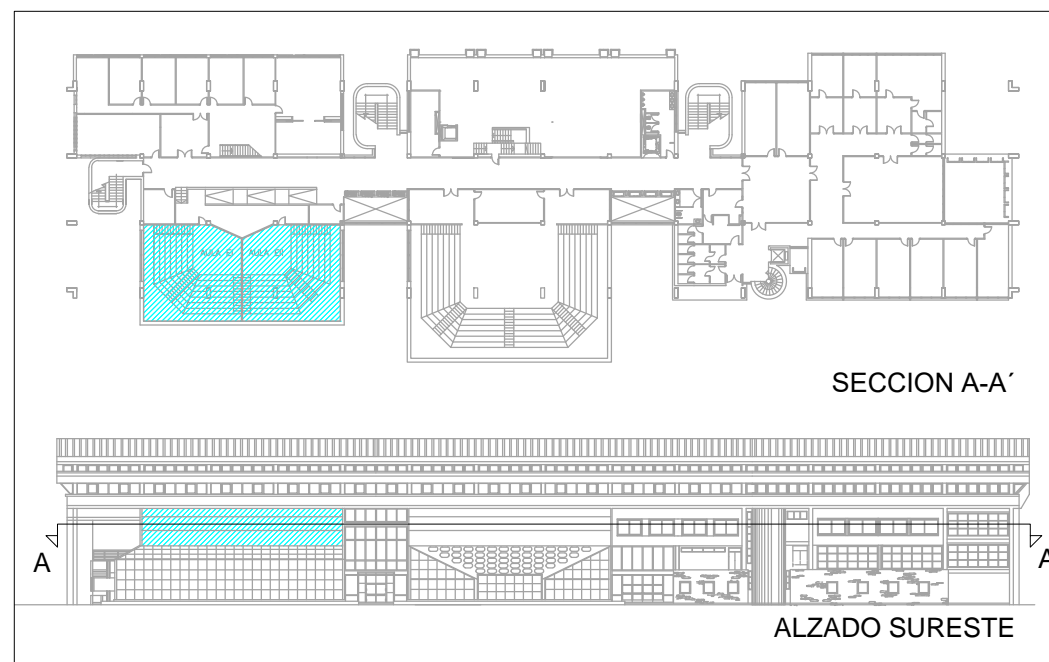


Puerta: tablero de fibras con alma alveolar de papel kratf marco de pino país y bisagras.

COTAS PLANTA TECHO	
ZONA 1	+7,4m
ZONA 2	+8,6m

TIPOS DE TECHO	
ZONA 1	BIDIRECCIONAL
ZONA 2	BIDIRECCIONAL

	SUP. ÚTIL (m2)	SUP. CONSTRUIDA (m2)
AULA ESPECIAL I	103,42	114,25
AULA ESPECIAL II	103,64	114,02



UBICACIÓN DE LAS AULAS ESPECIALES I Y II CON RESPECTO A LA FACHADA PRINCIPAL DE LA EUAT

0 1 2 3 4 5 6 Cotas en metros

