



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA

**Diseño acústico como generador
de la forma arquitectónica en
espacios educativos de nivel
superior**

TESIS

que para obtener el título de
Arquitecto

PRESENTA

Luis Manuel Quintero Paiz

ASESORES DE TESIS

Dra. Gemma Luz Verduzco Chirino
Dr. José Gerardo Guizar Bermúdez
Dr. Alberto Muciño Vélez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

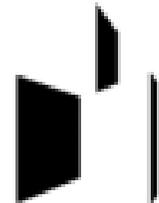
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

diseño acústico

como generador de la forma arquitectónica
en espacios educativos de nivel superior



Tesis que para obtener el Título de Arquitecto

Presenta:

Luis Manuel Quintero Paiz

Asesores:

Dra. Gemma Luz Verduzco Chirino

Dr. José Gerardo Guizar Bermúdez

Dr. Alberto Muciño Vélez

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Arquitectura

Taller Luis Barragán

CDMX, Mayo 2018

TABLA DE CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN	01
1	MARCO TEÓRICO	03
	1.1. Acústica como ciencia	05
	1.2. Historia de la Acústica en la Arquitectura	07
	1.3. Conceptos básicos de la Acústica Arquitectónica	19
	1.4. Efectos psicológicos y fisiológicos del ruido	25
	1.5. Acondicionamiento Acústico	27
	1.6. Normas de Diseño Acústico	29
2	HIPÓTESIS TEÓRICA, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	31
3	CASO DE ESTUDIO	33
	3.1. Situación actual: Aula Antonio Recamier Montes	35
	3.2. Levantamiento fotográfico	37
	3.3. Levantamiento arquitectónico	41
	3.4. Mediciones acústicas	47
	3.5. Análisis de resultados	55
4	PROPUESTA DE PROYECTO	57
	4.1. Descripción del proyecto	59
	4.2. Planos Arquitectónicos	67
	4.3. Renders	77
	4.4. Presupuesto de obra	81
	4.5. Predicción Acústica	88
	CONCLUSIONES	89
	REFERENCIAS	93
	ANEXOS	97

INTRODUCCIÓN

En México existen 9,861 planteles educativos registrados (INEGI, 2012), de los cuales 8,482 son de nivel básico, 683 son de nivel medio superior y 696 son de nivel superior. Dichos planteles en su mayoría fueron construidos por el gobierno de la Ciudad de México en una época donde la acústica no aparecía como concepto dentro del diseño arquitectónico; y aunque los planteles más modernos cuentan con aulas diseñadas para eventos especiales, el resto de las edificaciones carecen de infraestructura acústica.

Ruido exterior, ecos flotantes, reverberación y nodos acústicos de un aula son los factores que interfieren con los canales de comunicación entre el alumno y el docente. El efecto de estos parámetros en la enseñanza y el aprendizaje debe ser estudiado con más conciencia para generar espacios adecuados.

Investigaciones realizadas muestran que los problemas acústicos son comunes en todo tipo de instalaciones educativas y que, llevados al extremo, pueden afectar de manera directa la habilidad del estudiante para entender lo que se imparte durante las clases. Los ambientes acústicamente pobres en las escuelas provocan la degradación del habla, lo que puede ocasionar comportamiento disperso en el alumnado y puede contribuir a causar problemas en la voz y fatiga en el personal docente.

El objetivo general de este documento es demostrar la falta de conciencia sobre la importancia del diseño acústico dentro de los espacios educativos, específicamente a nivel superior, y fomentar la inclusión del diseño acústico de manera integral desde la concepción de una edificación.

Como objetivos particulares se abordará la creación de un listado de parámetros de diseño acústico que permita facilitar la inclusión del diseño acústico dentro de los espacios educativos y que también sirva para realizar un acondicionamiento acústico adecuado para un espacio previamente construido; también se pretende hacer conciencia de los beneficios y perjuicios de una acústica adecuada dentro del salón de clases, proponiendo de igual manera el establecimiento de estas condiciones como una normativa que pueda ser aplicada de manera gradual dentro de los edificios educativos y que permita una mejora de las condiciones acústicas de las instalaciones para su óptimo aprovechamiento.

El documento está integrado por 5 capítulos: Marco teórico, que proporcionará la información adecuada para el entendimiento del documento; Hipótesis; Caso de estudio, Propuesta arquitectónica aplicada al caso de estudio y conclusiones de la investigación.

MARCO TEÓRICO

1



CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. ACÚSTICA COMO CIENCIA

Para comenzar a entender los alcances de este documento, se explicarán a continuación los conceptos básicos del sonido y su comportamiento, así como el comienzo de su estudio para la arquitectura y el diseño de espacios.

La Acústica se define como la ciencia que trata con la producción, control, transmisión, recepción y efectos del sonido. El campo de la acústica se ve limitado por el número de campos conocidos, reduciéndola a sus aplicaciones más comunes como la música o la arquitectura, sin embargo, la acústica cubre un rango de tópicos que van desde el control de ruido, la investigación submarina, imagenología médica, refrigeración termo-acústica, sismología, bioacústica y comunicaciones. Para clasificar de manera adecuadas dichas aplicaciones, R. Bruce Lindsey crea la Rueda Acústica (figura 01), la cuál describe el enfoque de la acústica comenzando por los cuatro campos de estudio más amplios: Ciencias de la Tierra, Ingeniería, Ciencias de la Vida y Artes. Dicha clasificación ayudó a la creación de la Sociedad Acústica de América (ASA), quienes fueron una de las cinco sociedades originales en la formación del Instituto Americano de Física en 1931. La ASA está compuesta de 13 ramas

principales de estudio llamadas Comités Técnicos (TCs): Oceanografía Acústica (AO), Bioacústica Animal (AB), Acústica Arquitectónica (AA), Ultrasonido Biomédico/Biorespuesta a la vibración (BB), Ingeniería Acústica (EA), Acústica Musical (MU), Ruido (NS), Acústica Física (PA), Acústica Fisiológica y Psicológica (PP), Procesamiento de Señales Acústicas (SP), Comunicación y Habla (SC), Acústica Estructural y de Vibración (SA) y Acústica Submarina (UW).

Actualmente se le conoce a la acústica como una rama de la ciencia que estudia las ondas mecánicas que se propagan a través de la materia, y cuyo movimiento es nulo en el vacío, considerando el sonido como una vibración que se propaga generalmente en el aire a una velocidad de 343 m/s. En la arquitectura, se basa principalmente en el control del sonido tanto en lugares públicos como privados. Es necesario, para la construcción de un interior, controlar los fenómenos o anomalías acústicas que puedan llegar a presentarse en el espacio, como lo son la reflexión, refracción, eco, resonancias y nodos acústicos, todo esto mediante la colocación de materiales determinados que ayuden a mejorar las condiciones del lugar.

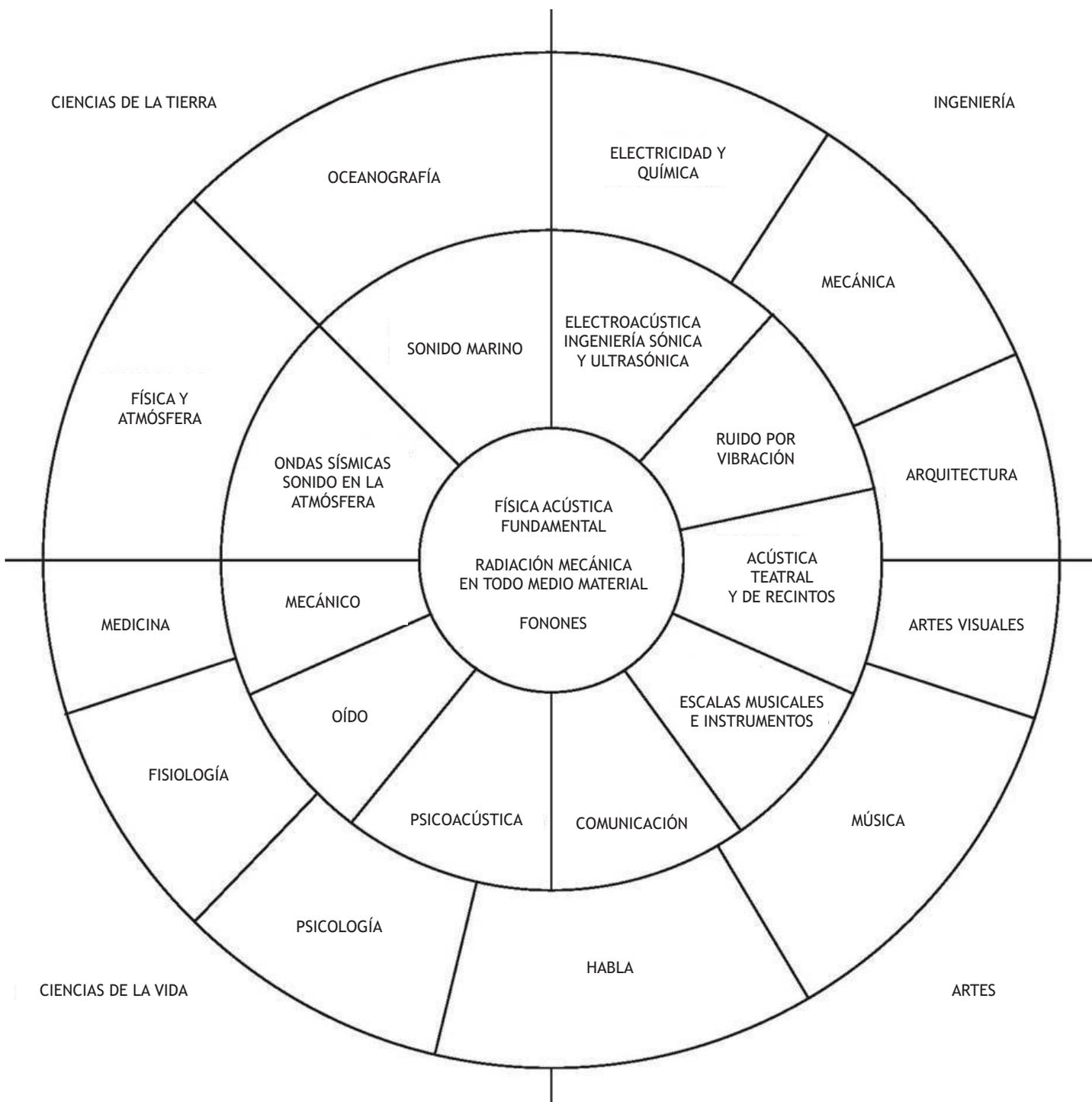


Figura 01. *Rueda Acústica de R. Bruce Lindsey, J.*
 Fuente: The Journal of the Acoustical Society of America 126, 2268 (2009); <https://doi.org/10.1121/1.3249285>.

1.2. HISTORIA DE LA ACÚSTICA EN LA ARQUITECTURA

De los cinco sentidos que posee el ser humano, la vista siempre ha sido el sentido predominante, sin embargo la palabra precede a los demás sentidos para dar forma a las imágenes, dándole un papel central en el desarrollo de las civilizaciones antiguas, donde el sonido tiene un rol fundamental en la convivencia social, la definición del espacio y el desarrollo de actividades.

La experiencia acústica ha ido creando, influyendo y moldeando las relaciones habituales con el medio, pudiendo ser esta relación altamente interactiva pero también opresiva física y mentalmente como ocurre en las situaciones de intenso ruido. La vista separa, divide, marca límites, mientras que el sonido da continuidad y, al ser efímero, se desvanece apenas se produce; dicha naturaleza del sonido fue vislumbrada por Platón, quién definió el sonido como una onda que agita las moléculas hasta que tocan nuestro tímpano y alcanzan el alma. ¹

Los escritos, las tradiciones orales, los restos de monumentos o los sitios permiten encontrar datos y conocimientos acústicos de diversas épocas incluso de las más lejanas. Los instrumentos de música encontrados en papeles dibujados, en dibujos sobre paredes, o perpetuados de época

en época a través de civilizaciones, pueden informarnos acerca del arte sonoro en diferentes períodos. Sin embargo, a pesar de la importancia de lo sonoro, la ciencia acústica es una de las que ha dejado menos huellas. La acústica se ha centrado en algunos campos sectoriales poco conectados entre sí, como la acústica de salas, ignorando por mucho tiempo aspectos fundamentales como las formas de percibir e interpretar el sonido por parte del hombre. Así, la acústica de salas subordinó por mucho tiempo su saber hacer práctico a las analogías con la óptica geométrica lo que dio lugar a las “salas megáfonos” siguiendo el modelo de las obras de Pleyel. Por haber ignorado durante mucho tiempo el fenómeno de la percepción, la acústica física, más preocupada por asegurarse el crédito de la abstracción matemática, ha continuado coexistiendo con creencias casi místicas, razón por la cual la ciencia acústica permanece como un oficio prácticamente desconocido para los arquitectos, incluso llevando a grandes arquitectos como Adolf Loos a afirmar que la música que suena en una sala impregna literalmente sus materiales de sus cualidades o defectos, como él mismo lo dijo: “Se trata de misteriosas transformaciones

moleculares que hasta ahora hemos podido observar sólo en la madera de los violines...”.²

El progreso de las técnicas de medida en psicoacústica y el desarrollo de las tecnologías electroacústicas favorecieron la evolución de la acústica dándole acceso a partir de los años 60 a estudios más avanzados especialmente en el campo de la percepción auditiva y en el de la espacialización del sonido. Actualmente, el crecimiento de conocimientos en todos los dominios y los intercambios de entendimientos entre diversas disciplinas están abriendo campos inmensos de investigación.

Los primeros estudios conocidos sobre el sonido se remontan a Pitágoras quien, al estudiar la relación entre la longitud de un cuerpo vibrante y la altura del sonido, realiza el primer experimento sonoro deducido numéricamente en la historia de la ciencia. Con la idea que un cuerpo al desplazarse con una cierta velocidad produce un sonido, desarrolla el concepto de armonía de las esferas, la cual dicta que los planetas girando alrededor de su órbita producirían una serie de consonancias, generando que todos los elementos entren en resonancia gracias a este acorde universal del microcosmos y el macrocosmos, lo que inspiraría

a numerosos autores en la arquitectura y en la música y estableciendo que sonido y espacio están estrechamente relacionados. La acústica nos enseña cómo el sonido se produce en un punto del espacio y se expande en el mismo interaccionando de maneras diferentes dependiendo de las formas, volúmenes y materiales que encuentra en el espacio. Al mismo tiempo, el espacio que percibimos depende del sonido.

Los sonidos nos informan de manera inmediata acerca de las características físicas del espacio, pero también nos aportan contenidos informativos y emocionales, contribuyendo de manera importante a nuestra percepción de un lugar.

Retrocediendo en materia de la acústica de los teatros, los griegos dejaron ejemplos de su conocimiento en teatros como el de Epidauro. Estos conocimientos fueron desarrollados por los romanos con nuevas aplicaciones teóricas y prácticas. Vitrubio, en su tratado *De architectura: Libro V, capítulo VII*³ dejó escritas referencias y conceptos acerca del estudio de la acústica de teatros al aire libre.

Estos conocimientos iniciales se aplicaron fundamentalmente a favorecer la eficacia en la transmisión de la voz hacia el público y a buscar

(2) Loos, Adolf.

(3) Vitruvio Polion, Marco Lucio. Los Diez Libros de Arquitectura. Ediciones Akal, España, 1992.



Figura 02. *Teatro Epidauro*, Argólida, región del Peloponeso.
Fuente: Foto de Roberto Cacheiro, Facultad de Derecho de Buenos Aires, 2012.

la adecuada inteligibilidad de la misma. En un principio, para lograr la mayor presencia de la voz, ésta se reforzaba con diferentes medios como la utilización de máscaras por parte de los actores lo que permitía, junto al efecto visual, el de amplificar la voz y mejorar la eficacia del sonido directo. El éxito de los teatros griegos radica en su gran eficacia acústica, ya que se trata de teatros en que, como en el de Epidauro (figura 02), en las gradas más alejadas puede percibirse el sonido nítidamente en puntos muy alejados del escenario incluso hasta 70 metros. Ello se debe a un diseño arquitectónico peculiar con diversos elementos dirigidos a crear una acústica eficaz. Un primer elemento es la colocación de la “orchestra”, una tarima circular de carácter reflectante situada entre el escenario y las gradas. Estas primeras reflexiones producidas cerca de la fuente emisora, la voz, van a reforzar el sonido creando unas primeras reflexiones con un retardo pequeño con lo que se incrementa considerablemente la energía acústica sin crear interferencias entre el sonido directo y el sonido reflejado. Otro elemento es la creación de reflexiones mediante la colocación de paredes posteriores. La creación de fuerte

pendiente de las gradas va a proporcionar además unos altos ángulos de incidencia del sonido, tanto del directo como del reflejado. Todo ello unido al efecto de megafonía que producen las máscaras, y otro elemento fundamental como es la ausencia de ruido de fondo, va a contribuir a la gran calidad acústica que poseían teatros antiguos con capacidad de hasta 14.000 personas.

El teatro romano tenía algunas características que lo diferencian del teatro griego; algunas de carácter sociocultural van a tener una incidencia en los aspectos acústicos. Así, el hecho de que las gradas del público cercanas al escenario estuvieran destinadas a autoridades hace que debiera reducirse la altura del escenario hasta aproximadamente 1,50 m. para permitir la adecuada visibilidad. Esta presencia del público cerca del escenario afectaba a las primeras reflexiones del sonido y creaba un elemento de absorción, generando la disminución de dimensiones del teatro romano con respecto al teatro griego, con distancias entre el escenario y la última fila que deben reducirse de los 70.0m a los 55.0m como máximo de los teatros romanos, además de tener que construirse con pendientes altas superiores al 30%.

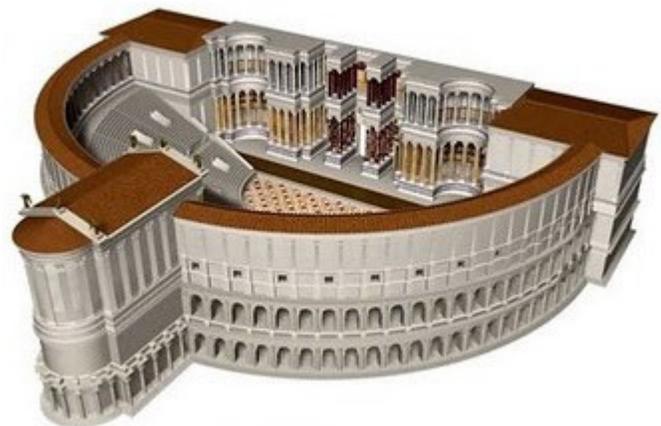
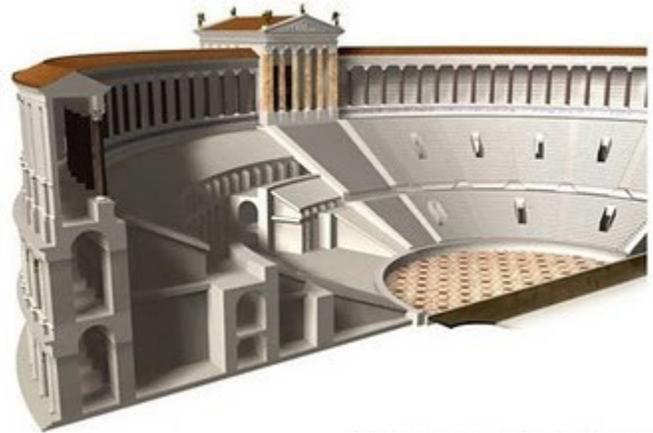


Figura 03. *Representación del Teatro de Pompeyo, Roma.*
Fuente: Guía turística de Atenas. <https://www.atenas.net/epidauro> <https://cdn.civitatis.com/grecia/atenas/guia/epidauro.jpg>

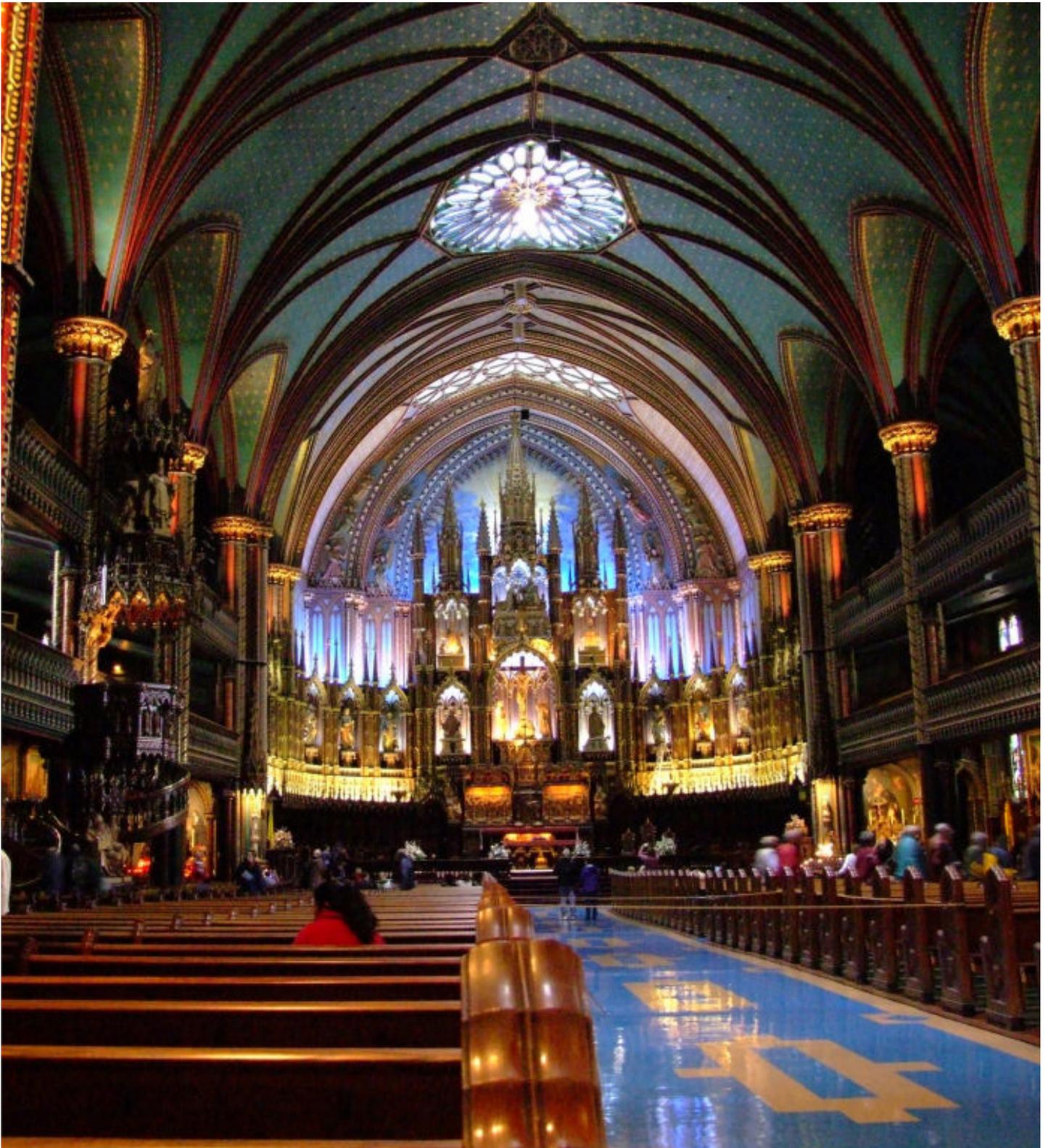


Figura 04. *Catedral de Notre Dame*, Francia.
Fuente: Foto de Helaine Chardon, architectureimg.com, 2016.

Tras el escenario los romanos añadieron un muro elevado con diversos elementos decorativos y sobre los espectadores se colocaba una lona, el velarium, para proteger a los espectadores del sol, la cual podría contribuir a una cierta reflexión del sonido, aunque no excesivamente elevada como para crear una reverberación excesiva que incidiera negativamente en la inteligibilidad de la palabra.

Por otro lado, es importante señalar cómo en el mundo romano empiezan a producirse los primeros casos descritos de contaminación acústica con los núcleos habitados incrementando su tamaño, población y actividades, encontrando en los escritos de algunos autores romanos como Séneca, referencias a las molestias debidas al ruido producido por determinadas actividades urbanas, cuyo incremento llegaría a afectar también al teatro y a su arquitectura.

Este desarrollo de elementos constructivos va a ir ligado además a otras necesidades de las representaciones teatrales, incluyéndose habitaciones y muros tras el escenario, de modo que favorecieran un adecuado refuerzo del sonido, con muros reflectantes del sonido directo y una adecuada protección frente al ruido externo.

Los desarrollos acústicos en la Antigüedad tenían a la voz humana como protagonista, fundamentalmente la voz hablada o recitada, y se trataba de teatros al aire libre. Mientras que en los teatros abiertos la acústica se basa en lograr la eficacia con el sonido directo, en los teatros cerrados al sonido directo se añade el sonido reflejado con sus reverberaciones y ecos. Es en los escenarios cerrados donde se desarrolla lo más importante de esta interacción entre música y arquitectura.

En la música occidental es indudable la relación de las obras musicales y los lugares de ejecución o de escucha, encontrando entre los dibujos de Leonardo da Vinci cómo diferentes necesidades acústicas llevan a diferentes formas de construir. Desde los primeros tiempos, la acústica y especialmente la acústica de los edificios de piedra ha marcado el desarrollo de la música occidental del mismo modo que las necesidades acústicas de la música también han condicionado las formas arquitectónicas: el canto gregoriano se produce en las iglesias románicas, así como la música vocal del Ars Antiqua del siglo XIII se origina en la catedral de Notre Dame de París (figura 04).

En la Edad Media, la relación que se estableció entre la música y las catedrales góticas no fue sólo acústica ya que ambas fueron expresión del concepto del orden propio de la Edad Media, retomando así la relación pitagórica ligada a las consonancias musicales. Los pensadores medievales retomaban la idea de que todo el universo estaba ordenado de acuerdo con números enteros y a consonancias musicales, de manera que las interpretaciones musicales tenían un significado particular en las iglesias medievales. El abad Suger en 1129 inició la reconstrucción de la Abadía de Saint Denis en París, lo que significó el inicio de una serie de construcciones en la Edad Media que se realizaron en proporción a las consonancias pitagóricas de modo que el templum se convierte en un microcosmos del Universo, proporcionando una melodía acústica a los cantos litúrgicos por medio de su reverberación, como Otto von Simson señala, “la arquitectura fue el espejo de la armonía eterna mientras que la música fue su eco”.³

El gran musicólogo Marius Schneider, en su estudio sobre relaciones entre la arquitectura medieval y la música en las iglesias románicas catalanas, realiza una lectura de las figuras fantásticas

de los claustros.⁴ Dichos claustros no ofrecen sólo un desarrollo melódico en piedra, sino que junto a la melodía configuran el ciclo anual a partir del momento del año en que se canta aquella melodía y se celebra aquel santo. Además, juntando todos los datos obtenidos del examen de los claustros se descubre que la sucesión de capiteles está calculada de manera que define el tiempo de ejecución musical: el himno de San Cugat, representado en el claustro de San Cugat consta de 14 corcheas, tiempo típico de muchas músicas populares balcánicas y de oriente medio, y un antecedente de cómo se cantarían más adelante el canto gregoriano. La arquitectura de Iglesias como San Marcos de Venecia favorece, con su particular disposición arquitectónica, determinados experimentos vocales como la colocación de coros simultáneos separados en diferentes posiciones, tal como recogen magníficas partituras de compositores de la escuela veneciana como Gabrieli.

La acústica arquitectónica nos muestra cómo el tiempo de reverberación de una sala contribuye al enriquecimiento de la producción musical de la orquesta. Podemos suponer la existencia de una auténtica complicidad entre el compositor

y la sala en la que se juega con la acústica y fundamentalmente con la reverberación de la misma. Ya sea con tiempos medios de reverberación como la Thomaskirche de Leipzig que tenía un tiempo de reverberación de 1,6 segundos en las frecuencias medias con la sala llena, para la que J. S. Bach escribió numerosas obras para voz como la Misa en si menor y la Pasión según san Mateo o ya sea con largos tiempos de reverberación como la capilla del palacio de Dresde ligada a la música de Heinrich Schütz. Generalmente suele darse conflictos entre la acústica apropiada para la voz hablada y la adecuada para la música. Así, cuando el sermón adquirió importancia en la religión protestante se disminuyó el volumen cúbico de las iglesias de nueva construcción para disminuir el tiempo de reverberación y proporcionar una mayor inteligibilidad y claridad de la palabra. Podemos imaginar también que las salas de ópera del siglo XVIII fueron construidas específicamente para la música de los compositores de aquel periodo. Las grandes obras de Gluck, Haydn o Mozart están pensadas para un lugar específico, ya sea porque se componían por encargo para un lugar o porque se tenía en mente un cantante concreto.

Hasta el siglo XVIII, la música era seguida por lo general en círculos privados, en las salas de baile, en salones de nobles y de las cortes europeas, utilizando salas no construidas necesariamente para la música y, aunque se destinaban salas a la representación musical, éstas diferían del resto de las salas solamente por los elementos decorativos.

La posible relación entre imagen y sonido fue un hecho importante en el periodo romántico, dado el interés por aumentar el impacto sensorial de las obras. Los compositores de este periodo trataban de llenar los sentidos del espectador fundamentalmente con sonidos e imágenes utilizando recursos como la ópera, medio en el que los arquitectos jugaron un importante papel. Una figura central en la arquitectura de teatros del s. XIX fue Richard Wagner, quien a través de una única realización, que además implicó la colaboración entre arquitecto y compositor, construyó su teatro de la ópera ideal de acuerdo con unos principios preestablecidos encaminados a la representación del Anillo del Nibelungo, revolucionando el diseño de salas en Alemania tratando de conseguir la obra total en la que el espectador quede totalmente absorbido por el

arte. Dicho por Wagner: “Apenas ha alcanzado su puesto, el espectador se encuentra en un verdadero y propio teatro, o sea en un lugar pensado exclusivamente para mirar en la dirección en la que le orienta su sitio. Entre el espectador y la imagen a contemplar no se encuentra nada visible, sino sólo una distancia que un artificio arquitectónico mantiene casi suspendida entre los dos proscenios, la cual, alejando la imagen del espectador, se la muestra en la distancia de una visión de ensueño, mientras que la música, saliendo misteriosamente del abismo místico, lo pone en una condición estática de clarividencia, por lo que el cuadro escénico contemplado resulta ahora para el espectador la imagen más fiel que la vida misma”.⁵

El diseño del teatro wagneriano estaba en contraposición directa con la tradicional forma del teatro barroco a la italiana, la cual sin embargo vivía momentos de esplendor y su construcción por toda Europa tuvo un gran desarrollo hasta prácticamente la Primera Guerra Mundial.

Hasta el s. XVIII los compositores escribían música para determinados tipos de construcciones y muchas veces para construcciones. La música, por tanto, se adaptaba técnicamente a una

acústica dada y además las construcciones eran contemporáneas a la música y por tanto de similar estilo, pero a partir del s. XIX los compositores empezaron a liberarse de las Iglesias y de los mecenas de las cortes de modo que de música escrita para una arquitectura y para una acústica preestablecida, la música empezó a independizarse de la locación.

En el siglo XIX se desarrolla la capacidad para representar programas con obras que muestran sensaciones y experiencias alejadas de la propia realidad del entorno de la sala. La escena del Baile en la Sinfonía “fantástica” de Berlioz, la Sinfonía “Fausto” de Liszt, donde se introduce el concepto de música programática, o los poemas sinfónicos de Strauss son ejemplos de música que trasciende la sala de conciertos. Compositores del XIX como Schubert, Mendelssohn, Schumann, Brahms, Dvorák, Mahler y Strauss, experimentaron la más amplia variedad de tonos y de timbres incorporando a la orquesta nuevos instrumentos, especialmente de la familia de la percusión, maximizando la sonoridad de la orquesta para sumergir al espectador en el sonido, utilizando las salas de conciertos reverberantes de este período que eran particularmente adecuadas

para esta música.

Las salas reverberantes ayudan a mantener la acumulación progresiva del sonido propio de las orquestas románticas, y con esta mayor fluidez de la nota en un espacio más reverberante, va a permitir una mejor unión de las notas de una melodía, contribuyendo al uso extensivo de la cuerda en el s. XX. Esta acústica nueva ligada a la música romántica aporta además el desarrollo dinámico creciente sobre pasajes largos.

Fruto de estos desarrollos acústicos es la creación de nuevas salas, entre las que cabe señalar el teatro de Bayreuth, fruto de la colaboración entre Wagner y el arquitecto Otto Bruckwald entre 1871 y 1876, o el teatro de la Ópera de Dresde que construye el arquitecto Semper entre 1871 y 1878. Contemporáneamente a la construcción de Bayreuth se crean nuevas salas de conciertos que siguen los modelos en forma de caja, estructura considerada como la referencia ideal para los valores acústicos de las salas de conciertos. Entre éstas podemos señalar la Musikvereinsaal de Viena construida por Theophil von Hansen en 1867-69, la Neues Gewandhaus de Leipzig edificada por Martin Gropius y Heinrich Schmieden en 1884-87 y destruida en los bombardeos de la Segunda

Guerra Mundial, la Concertgebouw de Amsterdam construida por A. L. van Gend en 1887-88. Los aforos de estas salas van desde los 1560 puestos de Leipzig hasta los 2206 de Amsterdam.

Esta evolución de las salas de concierto llevó a un interés por el problema de la acústica aplicada y en especial a uno de los problemas que opacaba el sonido: el exceso de reverberación en la sala. Para corregir esto W. C. Sabine realizó una serie de experimentos sobre la absorción del sonido llegando a encontrar una fórmula matemática que permite calcular el tiempo de reverberación de una sala a partir de su volumen y del sonido absorbido por los materiales con los que está construida, iniciando la ingeniería acústica moderna con uno de los primeros ejemplos siendo la Boston Symphony Hall, cuya acústica es diseñada por Sabine y que es considerada como una de las mejores salas de concierto del mundo. Otro método para estudiar el comportamiento del sonido en una sala aparte del modelo matemático de Sabine es el modelo gráfico que representa el modo en que el sonido se transmite, mediante el uso de rayos direccionales que, de manera análoga a los rayos de luz, se reflejan en las superficies que encuentran en su trayectoria.

Este método fue usado por primera vez para explicar los principios del sonido en el s. XVII por el jesuita alemán Athanasius Kircher, quien en 1650 publicó un gran tratado de acústica de 1500 páginas titulado *Musurgia Universalis*.⁶

Como otro aspecto no menos importante en el diseño de salas hay que referirse a la relación urbana. Fue la Ópera de París de Garnier (figura 05) uno de los primeros teatros realizados con la plena conciencia de erigirse en monumento representativo de la ciudad, y que hoy, hace que determinadas salas se planteen como elementos importantes de estructuración urbana como lo son el Palacio Finlandia de Helsinki, y la Sala Filarmónica de Colonia; otras constituyen una intervención aislada dentro de un contexto fuertemente estructurado como el Royal Concert de Nottingham (figura 06) y Casals Hall de Tokio. Las comunidades han ido seleccionando con el paso del tiempo determinadas sonoridades que funcionan como hitos o señales características de las mismas. La combinación resultante de los sonidos presentes en cada comunidad contribuye a la identidad de esta misma, a sus realidades simbólicas, estéticas y emocionales, proporcionando unas cualidades que las identifican y representan.

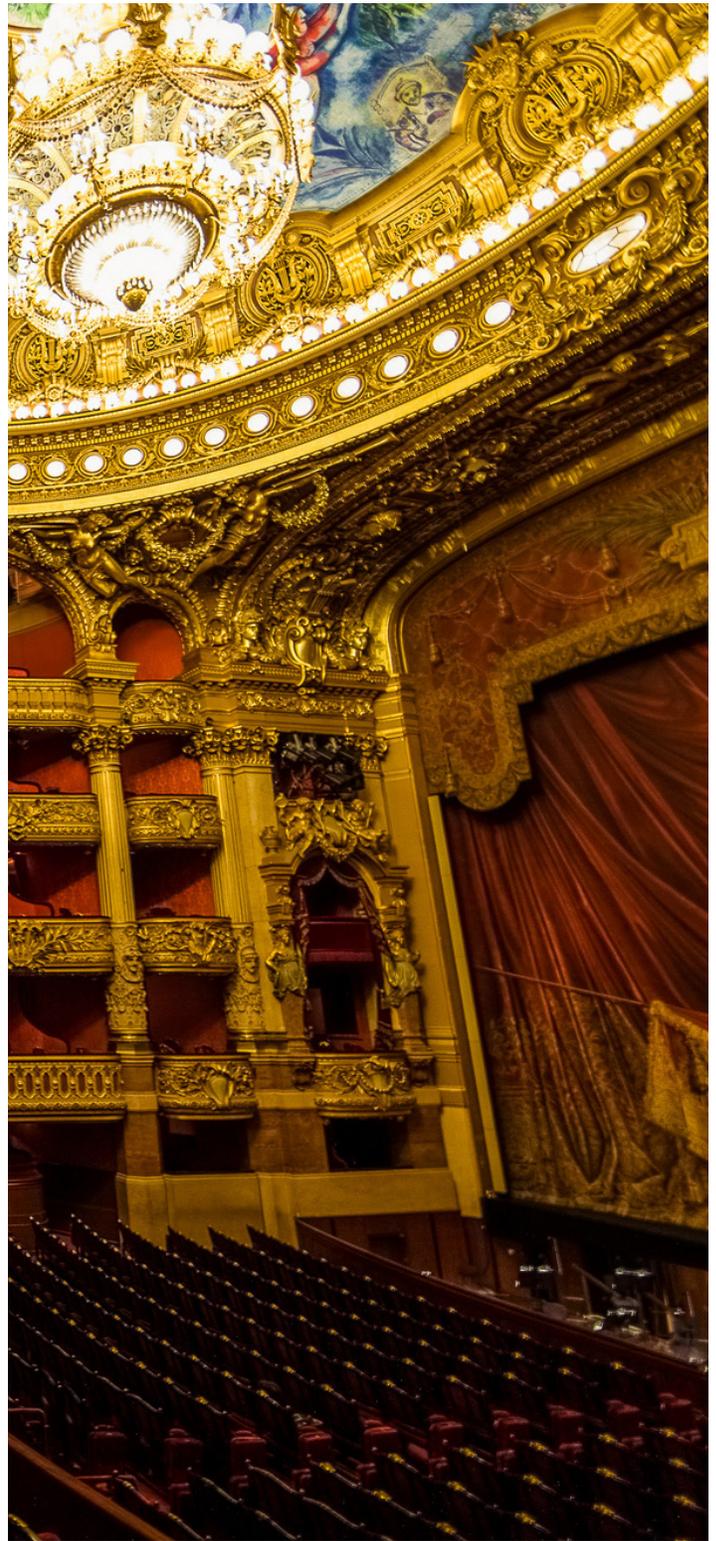


Figura 05. *Ópera de Garnier*, Francia.

Fuente: Site officiel de l'Office du Tourisme et des Congrès, 2014. https://es.parisinfo.com/var/otcp/sites/images/node_43/node_51/node_77884/node_77888/palais-garnier-op%C3%A9ra-de-paris-salle-principale-%7C-630x405-%7C-%C2%A9-otcp/

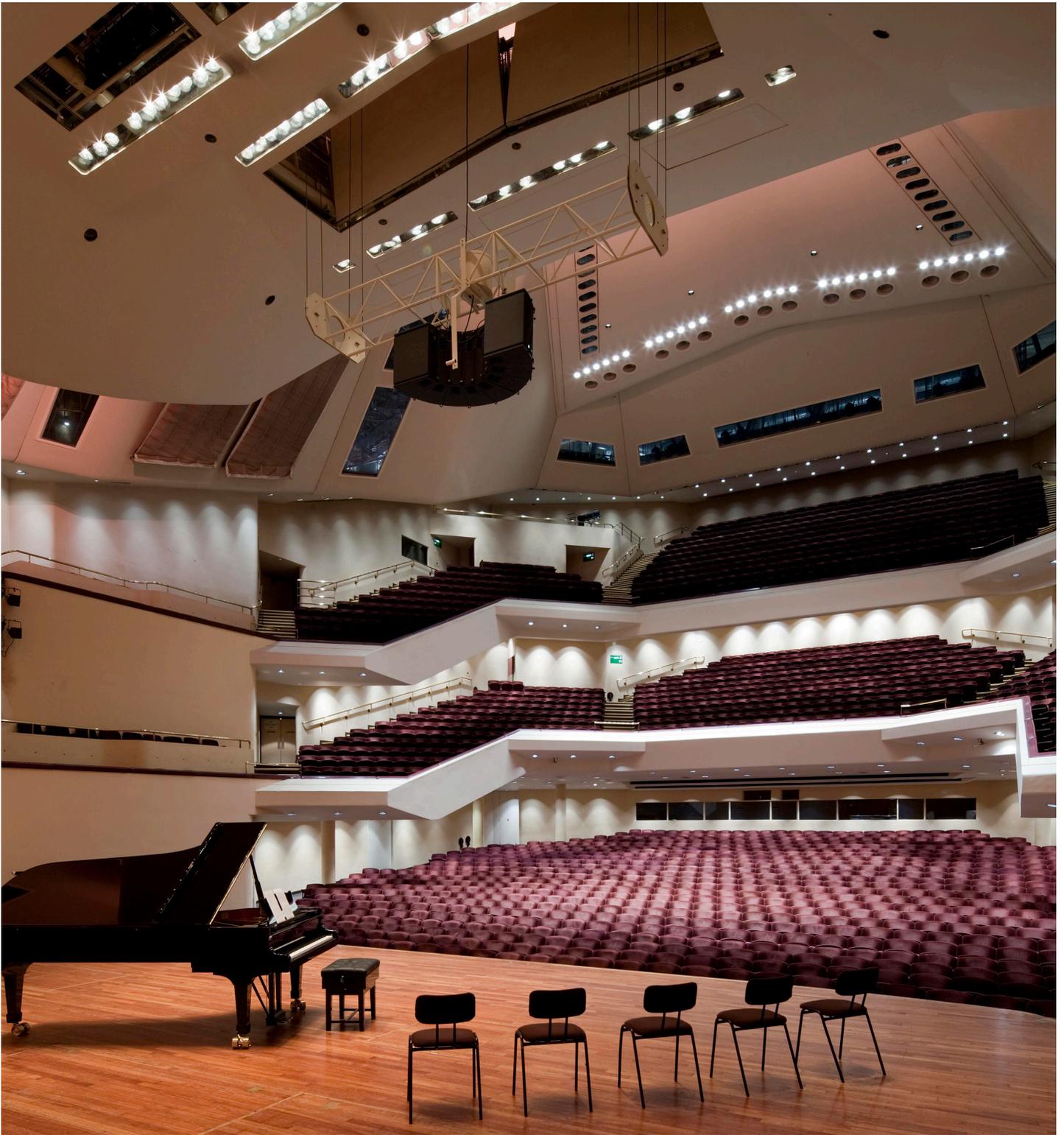


Figura 06. *Theatre Royal Concert*, Nottingham, Inglaterra.
Fuente: Página de información de Theatre Royal, Royal Theater of Nottingham. <https://trch.co.uk/>, 2015.

1.3. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

Para poder comprender el alcance del diseño acústico en la Arquitectura, es necesario tener presente la teoría básica del sonido.

Entendemos por sonido una variación de la presión ambiental que se propaga en forma de ondas, mas científicamente, se puede definir de la siguiente manera: “El sonido es un fenómeno vibratorio que, a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, bien sea gaseoso, líquido o sólido, se propaga, en ese medio, bajo la forma de una variación periódica de presión”.⁷

Diremos que hay un sonido cuando la perturbación se propaga a través de un medio elástico, causando una alteración de la presión o un desplazamiento de las partículas del medio que pueda reconocerse por una persona o por un instrumento. La definición anterior del sonido sugiere que esta perturbación puede detectarse por la medida de algunas magnitudes físicas del medio, que se perturba desde su valor de equilibrio. Para que haya una onda en movimiento en un medio material, este debe tener dos propiedades, inercia y elasticidad: inercia es la propiedad que permite a un elemento del medio transferir la perturbación a otro adyacente,

esto tiene relación con la densidad del medio, es decir la masa de un elemento; elasticidad es la propiedad que produce una fuerza sobre un elemento desplazado de su posición de equilibrio, tendiendo a volver a esa posición.

Otro factor a tomar en cuenta es la presión atmosférica, la cual resulta del peso de una columna de aire, indicando que el aire posee masa. Al observar que el aire cumple con las especificaciones necesarias para que existan ondas en movimiento, dichas variaciones en la presión generan a lo que llamamos una onda acústica aérea, que se define como una vibración del aire caracterizada por una sucesión periodica en el tiempo y en el espacio de expansiones y compresiones.⁸

La velocidad de propagación del sonido es la velocidad con que se desplazan las ondas, y depende de la presión atmosférica y temperatura así como del medio donde se propaga, llamado campo acústico. Se considera que las ondas se propagan adiabáticamente, es decir, que no existe intercambio de calor entre elementos adyacentes del medio. Se llaman ondas sonoras a las ondas acústicas que producen sensaciones a través del órgano de la audición.

Se puede establecer una clasificación de las ondas sonoras atendiendo a la forma en que se mueven las partículas del medio respecto a la dirección de propagación. Cuando el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación, la onda se denomina transversal; cuando el movimiento de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación, la onda se llama longitudinal. También se pueden clasificar por la forma geométrica de las ondas. Si la perturbación se propaga en una sola dirección, los frentes de onda son planos paralelos y las ondas se denominan planas; en el caso de que la perturbación se propague igual en todas las direcciones, los frentes de onda son esferas concéntricas cuyo centro es la fuente y las ondas asociadas se denominan esféricas. ⁹

Si representamos gráficamente una onda cualquiera, se llama periodo al tiempo que se tarda en realizar un ciclo completo, midiéndose en segundos. La frecuencia es el número de ciclos que se realizan en un segundo. La distancia que recorre una onda sonora en el tiempo de un periodo es lo que se llama longitud de onda. Por tanto, esta longitud de onda dependerá de la velocidad de propagación y del periodo.

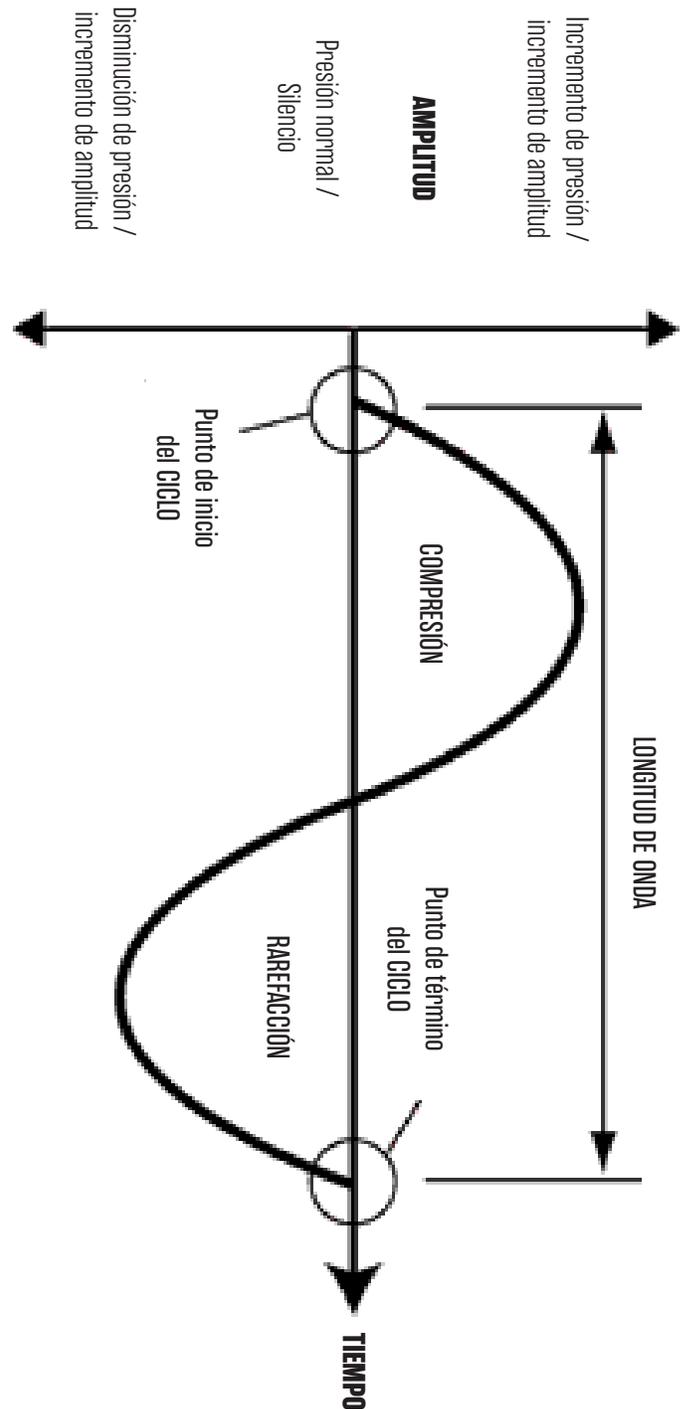


Figura 07. *Diagrama de una onda.*
Fuente: Elaborado por el autor.

(9) Ermann, Michael. *Architectural Acoustics Illustrated*. Wiley & Sons, New Jersey, USA. 2015. pág. 3.

El sonido puede ser medido ocupando tres magnitudes diferentes: la primera es la potencia, que describe la fuerza del sonido desde la fuente que lo emite; la segunda es la intensidad y la tercera la presión, donde las últimas dos describen la fuerza con la que el sonido viaja hacia el receptor y consideran en su cálculo la distancia entre el emisor y la fuente, la absorción de los materiales, la geometría del espacio, entre otros factores del entorno. La potencia es medida en watts, mientras que la intensidad se mide en watts/m^2 y la presión en Newtons/m^2 .

A pesar de ser magnitudes que describen el sonido desde el punto de vista de la Física, en Arquitectura su aplicación no es viable por las siguientes razones: primero, el sonido no se escucha 100 veces más si son 100 fuentes las emisoras; segundo, las unidades representan cantidades muy pequeñas (siendo un susurro $0.000000001 \text{ watts/m}^2$ y un trueno 0.1 watts/m^2); y por último, debido al amplio rango del oído humano, las analogías no son útiles para hacer comparaciones entre dichas magnitudes. Debido al uso de escalas logarítmicas en la medición sonora para presión, intensidad y potencia, se creó la unidad, nombrada decibel.

El decibel se utiliza para comparar la presión sonora en el aire con una presión de referencia. Este nivel de referencia tomado en acústica es una aproximación al nivel de presión mínimo que hace que nuestro oído sea capaz de percibirlo, y varía lógicamente según el tipo de medida que estemos realizando. No es el mismo nivel de referencia para la presión acústica, que para la intensidad acústica o para la potencia acústica. Cero decibeles es el umbral auditivo, 50 decibeles equivale a una conversación normal, mientras que 100 decibeles causarían pérdida auditiva a una exposición constante (ver figura 08).



Figura 08. *Nivel de ruido en decibeles (dB).*
Fuente: Elaborado por el autor.

El decibel provee algunas reglas empíricas pero consistentes, que son utilizadas para mediciones preeliminares en el campo acústico. Dichas reglas establecen lo siguiente: 1) en un campo libre, un sonido se reduce 6dB al ser medido al doble de distancia; 2) dos sonidos idénticos combinados producen un sonido 3dB más fuerte que cualquiera de los dos por separado; 3) para que el oído humano perciba un sonido al doble de fuerza, tendrá que elevarse por 10dB.

Las longitudes de onda de media y alta frecuencia son las mejor escuchadas por el oído humano, esto debido a la fisiología del canal auditivo, teniendo un rango superior a los 500 Hz. Dicha capacidad auditiva es un resultado directo de la evolución del ser humano, adaptándose al sonido del habla, especialmente las consonantes, aunque las máquinas creadas por el mismo hombre han ido desarrollando una sensibilidad en nuestro sistema auditivo como respuesta a la exposición diaria al ruido generado por ellas.

Esta selectividad auditiva que poseemos ha llevado al campo de la arquitectura a especializarse en promover la inteligibilidad del habla mediante la mejora de transmisión y reflectividad de los tonos dentro del rango auditivo del ser humano,

sin embargo, el sonido de baja frecuencia también tiene un rol importante a pesar de nuestra disminuida sensibilidad hacia él. Los tonos bajos tienen mayor facilidad de traspasar barreras acústicas, son omnidireccionales, se difractan en espacios abiertos, crean vibraciones en los elementos arquitectónicos de un espacio, generan ecos flotantes y promueven una diversa gama de respuesta fisiológicas que se abordaran con más detalle más adelante.

De la misma manera, las longitudes de onda cortas de los sonidos de media y alta frecuencia pueden ser modelados geoméricamente utilizando líneas en un diagrama de cualquier espacio, contrariamente a los sonidos de baja frecuencia que se comportan como ondas y no como rayos, volviéndose más sensibles a la geometría del espacio, superficie y ubicación del receptor.

Los elementos más comunes que generan sonidos de baja frecuencia en un edificio son ventiladores, máquinas de aire acondicionado, bombas hidroneumáticas, trituradores de basura, generadores, compactadores y puertas automatizadas.

Para completar la definición de sonido, a continuación se definirá la absorción acústica. Se utiliza un coeficiente de absorción (α), un número entre cero y uno, que describe la cualidad absorbente de una superficie y cuantifique la proporción de incidencia de energía sonora que no regrese dentro del campo acústico en forma de reflexión. Entre más alto sea el valor, la energía sonora es absorbida en mayor proporción o transmitida; entre más pequeño sea el valor, más energía sonora es reflejada y menos energía es absorbida o transmitida. Todos los materiales cuentan con coeficientes variantes en el espectro de frecuencias que agrupamos en los llamados valores de banda de octavas.

De tal manera, el mármol puede tener un coeficiente de absorción de 0.80 a 1,000 Hz pero un coeficiente de 0.32 a 125 Hz. Los valores altos de coeficientes de absorción están relacionados con materiales que son más porosos, más texturizados, de menor peso, de mayor grosor, montados sobre una cámara de aire o de menor masa. Los valores de absorción bajos están relacionados con materiales lisos, densos, montados directamente sobre una superficie y masivos. Los materiales con coeficientes de

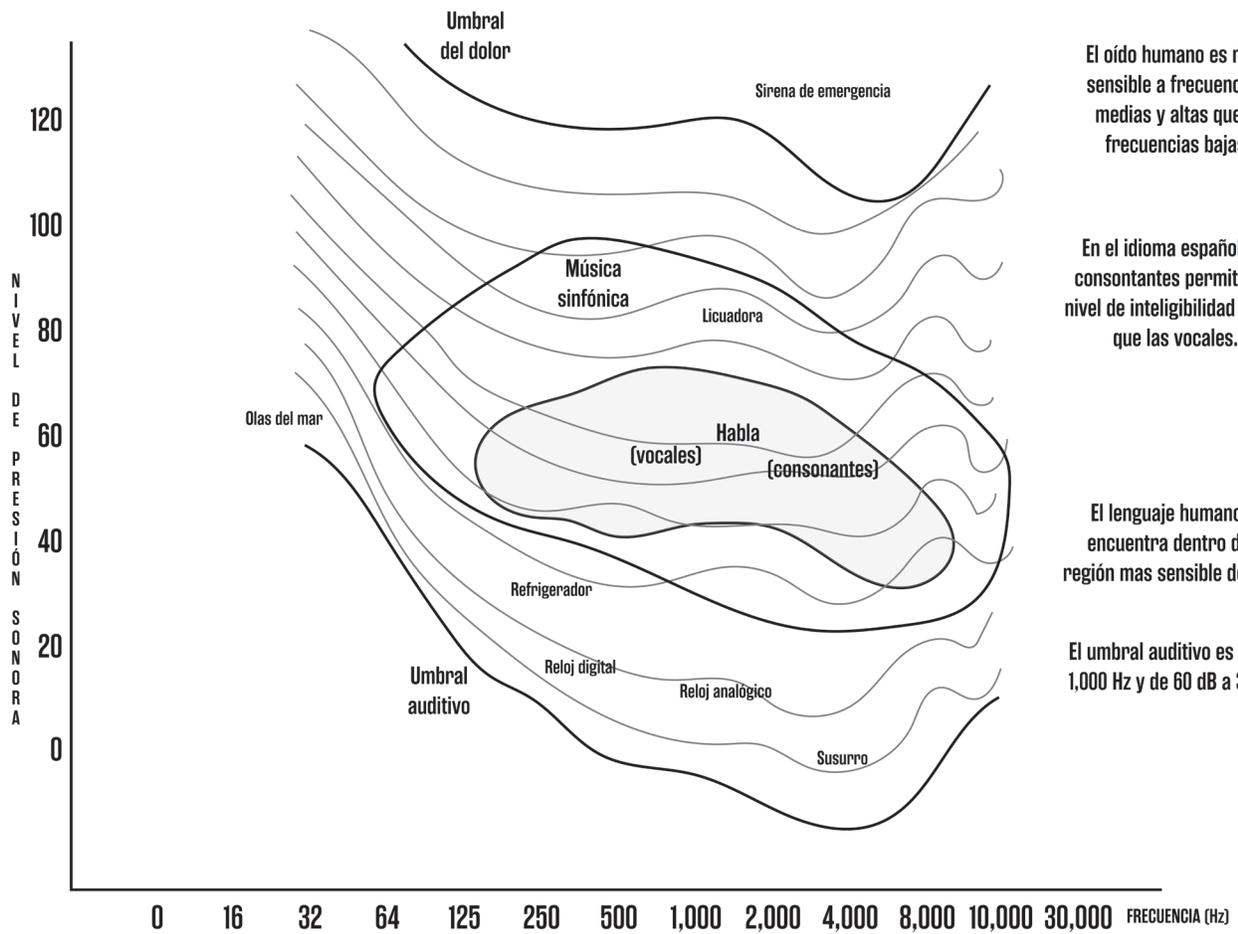
absorción mayores a 0.50 son considerados absorbentes, mientras que los materiales con un valor menor a 0.20 son considerados reflejantes. Esta diferencia entre materiales no puede ser percibida en cambios menores a 0.10, siendo un cambio en 0.40 una diferencia considerable.

Para calcular la absorción total de un espacio, se utilizan las unidades llamadas sabines, que son el resultado de la absorción y la superficie total del espacio en conjunto. Para calcularlo se utiliza la siguiente fórmula:

$$A_{recinto} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_n S_n$$

(1.2) donde A es la absorción total, α_n es el coeficiente de absorción de cada material y S_n es la superficie ocupada por cada material en el recinto

Para definir un valor promedio de absorción se utiliza el valor conocido como coeficiente de reducción de ruido (NRC), el cuál evalúa la absorción del material en las 4 bandas de octavas más comunes (250, 500, 100 y 2000 Hz) y nos da un promedio para poder utilizarlo de manera más general.



El oído humano es más sensible a frecuencias medias y altas que a frecuencias bajas.

En el idioma español, las consonantes permiten un nivel de inteligibilidad mayor que las vocales.

El lenguaje humano se encuentra dentro de la región más sensible del oído.

El umbral auditivo es 0 dB a 1,000 Hz y de 60 dB a 32 Hz.

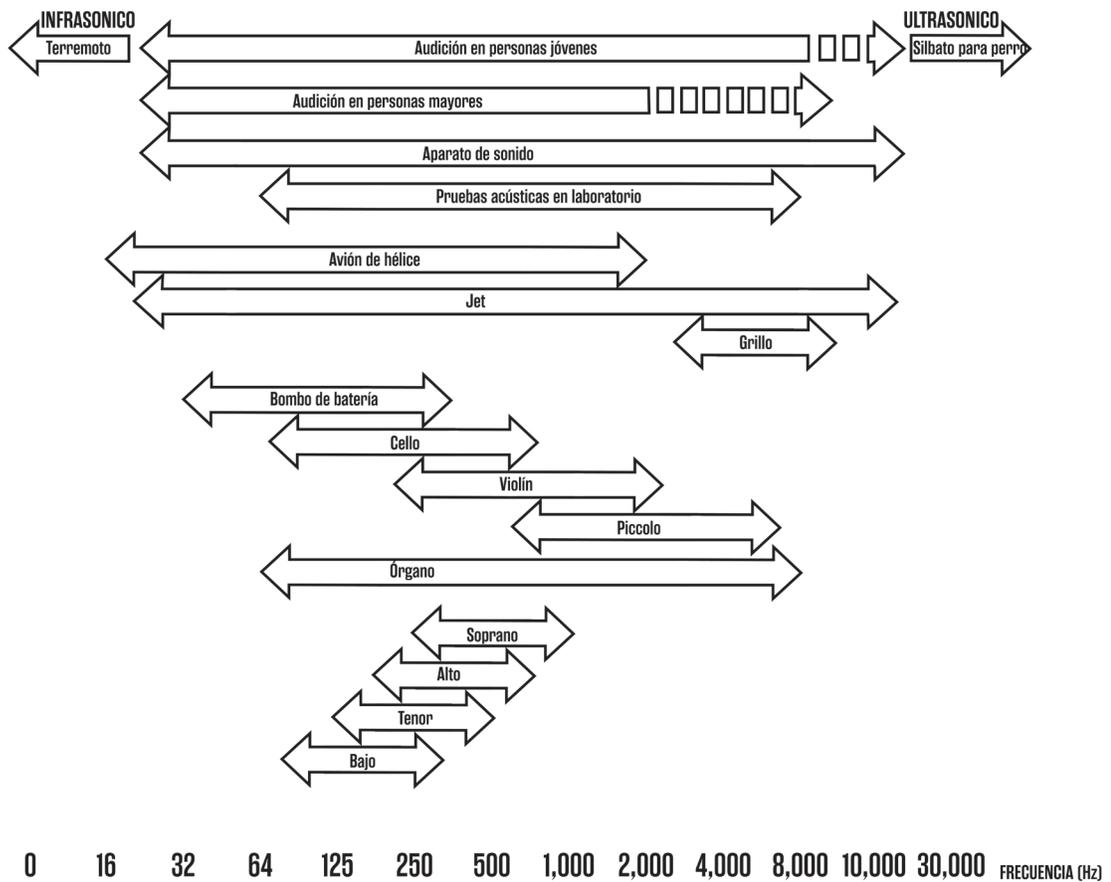


Figura 09. Frecuencias audibles para el ser humano.
Fuente: Elaborado por el autor.

1.4. EFECTOS PSICOLÓGICOS Y FISIOLÓGICOS DEL RUIDO

La directiva 2002/49/EC de la Unión Europea (EU) define el ruido ambiental como “el sonido exterior no deseado o dañino que es generado por las actividades humanas, incluyendo transporte y sitios industriales.”¹⁰

El ruido es un problema ambiental mayormente relacionado con las áreas urbanas, y que afecta a un gran número de personas. Hasta la fecha, el mayor número de estudios de ruido ambiental están basados en las molestias que causa en el ser humano o la manera en que afecta las actividades cotidianas.¹¹

De acuerdo a los resultados preliminares de la Environmental Burden of Disease (EBD), proyecto creado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se reporta el ruido de tráfico vehicular como el segundo estresor ambiental en términos de impacto a la salud pública.¹²

Los términos de ruido residencial, comunitario o doméstico también son aplicables al ruido ambiental, aunque no son necesariamente aplicables a todo tipo de sonido generado dentro de los espacios que definen los mismos términos. Para lograr una política informativa y desarrollar estrategias de manejo y planes de acción para el control de ruido, se necesita entender y considerar la evidencia del impacto del ruido sobre la salud. Para cumplir este objetivo, se genera una asesoría de riesgo con la cuál se conozcan los siguientes datos: la naturaleza de los efectos del ruido en la salud, los niveles de exposición a los cuáles

comienzan los efectos sobre la salud y la relación entre dichos efectos y el aumento de niveles de ruido, así como el número de personas expuestas a estos niveles dañinos. Dichas asesorías fueron llevadas a cabo por la OMS mediante el EBD y han llevado a resultados cuantitativos del daño causado por el ruido, expresado en el llamado disability-adjusted life year (DALY), unidad que combina los conceptos de años potenciales perdidos por muerte prematura y los años “perdidos” de vida saludable por salud deficiente. Después de realizar dichas asesorías, se logró encontrar una relación directa entre el ruido y diversos tipos de enfermedades y padecimientos como son: enfermedades cardiovasculares, problemas de sueño, problemas cognitivos, tinitus e irritabilidad.

De acuerdo a la OMS, las enfermedades isquémicas del corazón son la mayor causa de muerte en países desarrollados y en desarrollo (22.8% y 9.4% respectivamente)¹³; siendo alrededor del mundo el 12.6% de las muertes causadas por enfermedades del corazón, 9.6% por enfermedades cerebrovasculares y el 1.6% por hipertensión.¹⁴

La presión elevada y altos niveles de lípidos en la sangre, incluyedo colesterol y triglicéridos, son una causa mayor de riesgo para enfermedades isquémicas del corazón. Dichos factores pueden ser elevados por factores externos como la nutrición u otros factores ambientales.

(10) Directive 2002/49/EC of the European Parliament about environmental noise assessment. Official Journal of the European Communities, 2002, págs. 12–25.

(11) de Hollander, AE. An aggregate public health indicator to represent the impact of multiple environmental exposures. *Epidemiology*, 1999, págs. 606–617

(12) EBoDE, 2010 (<http://en.opasnet.org/w/Ebode>, accesado el 18 de septiembre de 2017).

El aparato auditivo está en constante análisis de la información que recibe, la cual se filtra e interpreta por diferentes sistemas cerebrales corticales y sub corticales. La alteración del sistema nervioso autónomo y el aparato endocrino están asociadas con cambios repetidos a lo largo de un tiempo en las respuestas biológicas. A largo plazo, el estrés crónico inducido por el ruido puede afectar la homeostasis del organismo llevándolo a irregularizarse y tener una adaptación negativa ante las respuestas al ruido.¹⁵

El ruido es considerado un estresor no específico que causa efectos adversos en la salud cardiaca a largo plazo, relacionandolo con síntomas que van desde la elevación de la presión arterial hasta el infarto al miocardio en personas con exposición constante a la contaminación auditiva generada por el transporte.

En el caso de los impedimentos cognitivos generados por el ruido, más de 20 estudios han demostrado que el aprendizaje y la memoria de los estudiantes no se ve afectada¹⁶; sin embargo el procesamiento central y del habla, así como la comprensión de lectura y atención reportan severos daños ante la exposición aguda al ruido. Exposiciones prolongadas durante periodos críticos de aprendizaje podrían potencialmente mermar el desarrollo y tener un efecto de por vida en el desempeño educativo.

Entre los efectos adversos más conocidos del ruido ambiental, encontramos también los problemas

del sueño, los cuales tienen un mayor impacto en el ser humano ya que no solo afecta su salud, sino también su estilo de vida. Estudios muestran que el ruido afecta el sueño de manera inmediata (respuestas autónomas, cambios en la etapa del sueño, despertares, movimientos corporales), efectos posteriores (sueño durante el día, deterioro en la función cognitiva, afectaciones en el desempeño) y efectos a largo plazo (problemas crónicos para dormir).¹⁷

El organismo humano reconoce, evalúa y reacciona al ruido ambiental incluso dormido. Estas reacciones forman parte de un proceso integral de activación que son vitales para el organismo, como la aceleración de ritmo cardiaco y cambios en la estructura del sueño, los cuales al verse afectados pueden llevar a problemas de salud por medio de activaciones repetidas, también llamado fragmentación del sueño. Entre otros problemas que causa el ruido al dormir están: alteración del desempeño psicomotriz, problemas de consolidación de memoria, disminución de la creatividad, riesgo de accidentes y actitudes arriesgadas.^{18 19}

Además de los riesgos inmediatos, también es conocido que los problemas del sueño están relacionados con riesgo de enfermedad cardiovascular.²⁰

(13) The world health report 2002 – reducing risks, promoting healthy life. Geneva, World Health Organization, 2002.

(14) Lopez AD. Global burden of disease and risk factors. Washington, DC. The World Bank and Oxford University Press, 2006 22 July 2010)

(15) Maschke C, Rupp T, Hecht K. The influence of stressors on biochemical reactions. *International Journal of Environmental Health*, 2000, págs. 45–53

(16) Evans GW, Hygge S. Noise and cognitive performance in children and adults. Chichester. 2007. págs. 549–566.

(17) Banks S, Dinges DF. Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 2007, págs. 519–528

(18) Barger LK et al. Extended work shifts and the risk of motor vehicle crashes among interns. *New England Journal of Medicine*, 2005, págs. 125–134

(19) Scott LD et al. The relationship between nurse work schedules, sleep duration, and drowsy driving. *Sleep*, 2007, págs. 1801–1807.

(20) Babisch W. Transportation noise and cardiovascular risk. Berlin, Federal Environmental Agency, 2006

1.5. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El acondicionamiento acústico es una parte fundamental en el diseño de espacios arquitectónicos, a pesar de ser considerado más como una adecuación que una parte integral del diseño de una edificación. El acondicionamiento acústico engloba todas aquellas técnicas destinadas a corregir y adecuar el campo sonoro en el interior de un espacio, del cual se necesita previamente conocer su comportamiento y para ello, se recurre a programas de simulación acústica, que facilitan un análisis detallado del campo sonoro en el interior de la sala, proporcionando parámetros acústicos y auralizaciones. También existen métodos empíricos que nos dan una aproximación del estado acústico del recinto, pudiendo ser geométricos, como el Ray Tracing que dibuja en alzado y planta una representación de los rayos sonoros que emitiría una fuente y sus posibles reflexiones sobre las superficies de muros, piso y plafón (ver figura 11), tomando en cuenta el comportamiento del sonido como una serie finita de rayos con una duración limitada y cuyo movimiento puede ser predecido; o bien, utilizando el método de W.C. Sabine mediante la fórmula desarrollada durante sus estudios en el Fogg Art Museum sobre el tiempo de reverberación en un espacio, la cuál fue mencionada anteriormente en este documento. El tiempo de reverberación es uno de los factores esenciales a considerar dentro de un espacio que requiere una acústica específica. Podemos distinguir dos tipos de acondicionamiento: acondicionamiento primario es aquel que se aplica durante la fase de diseño, antes de la construcción de la sala. Este analiza el efecto que tiene la utilización de distintos materiales de construcción y se seleccionan cuáles son los más adecuados para el caso; también, se puede variar la geometría y el volumen de la sala para que se adapte a los requisitos acústicos: tiempo de reverberación óptimo, eliminación de ecos, calidez del sonido; mientras que el acondicionamiento secundario es el acondicionamiento que se aplica como corrección a una construcción inadecuada, y consiste en la aplicación de materiales de acondicionamiento: absorbentes, resonadores, reflectores y difusores, para tratar los problemas del recinto. Con este acondicionamiento mejorarán las condiciones acústicas, pero los resultados siempre serán mejores si se aplica el diseño acústico desde el origen de la concepción del diseño en cuestión.

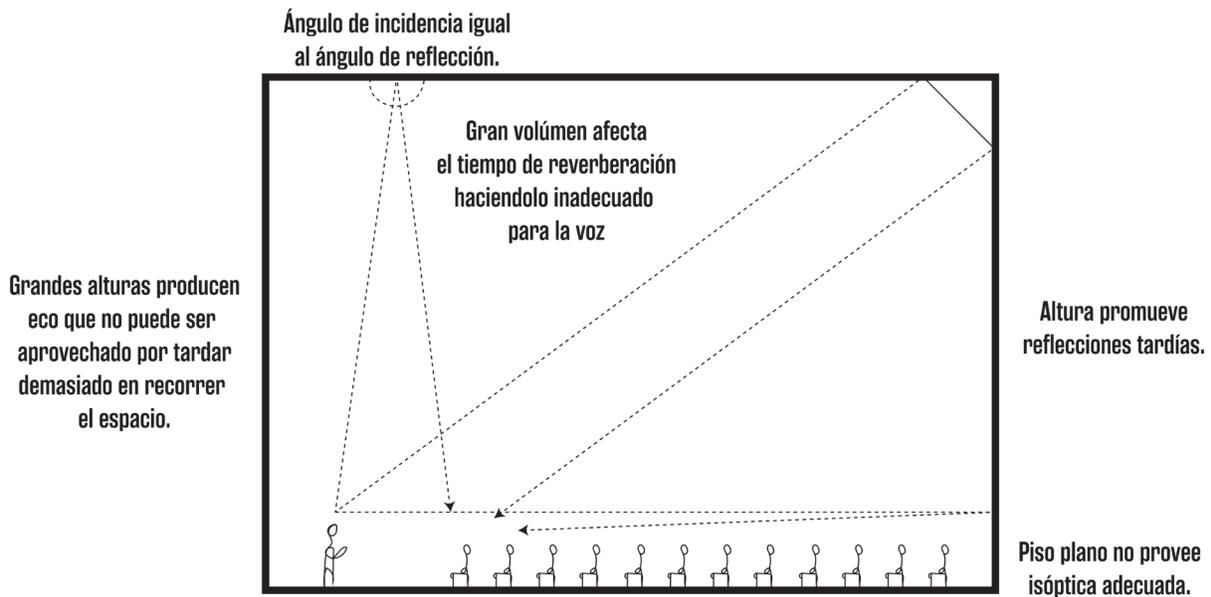


Figura 10. *Diseño de un espacio acústicamente defectuoso.*
 Fuente: Elaborado por el autor.

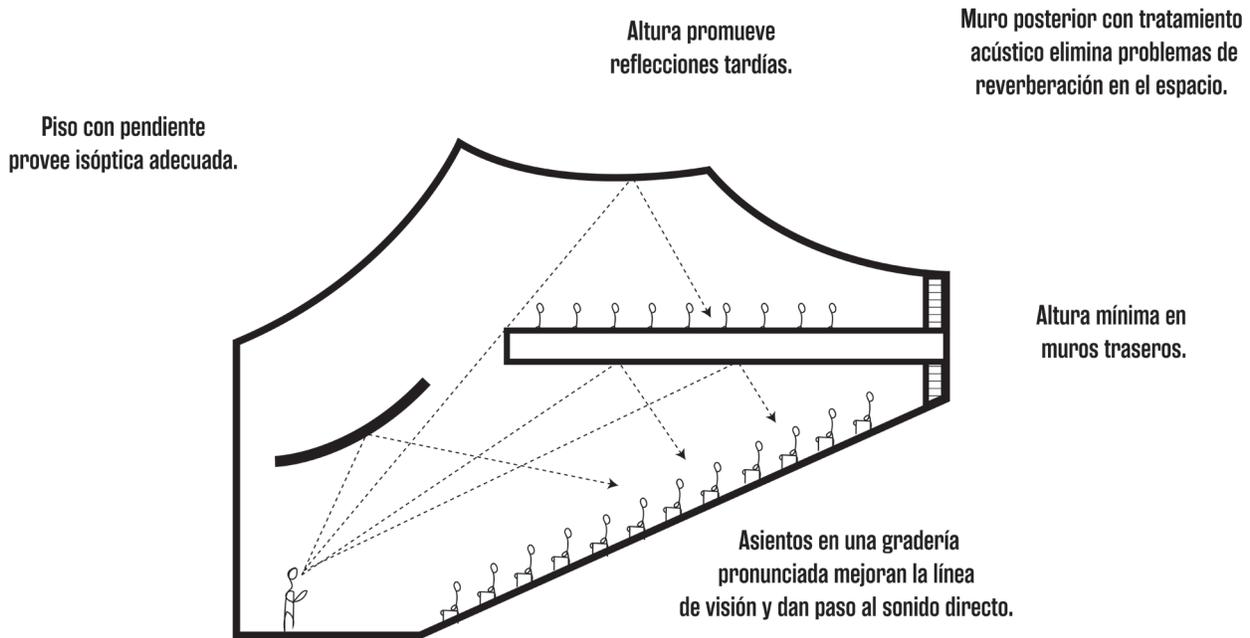


Figura 11. *Diagrama de diseño de un espacio diseñado para el habla.*
 Fuente: Elaborado por el autor.

1.6. NORMAS DE DISEÑO ACÚSTICO

El país pionero en la regulación del ruido ambiental fue Estados Unidos, cuando el 10 de mayo de 1929 se funda la Acoustics Society of America (ASA) con una plantilla de 450 integrantes. Desde la creación de dicha sociedad, sus miembros se han visto involucrados en el desarrollo de estándares acústicos, terminología, procedimientos de medida y criterios para determinar los efectos del ruido y la vibración, y desde el año 1932 trabajan en conjunto con el American National Standards Institute (ANSI) en la creación de catálogos y normas que han sido publicadas a lo largo de los años.

Dicha institución cuenta con normas específicas para espacios educativos, con publicaciones que regulan los niveles sonoros y describen los requerimientos necesarios para tener una acústica deseable dentro de un aula. Entre otros, se encuentran los documentos “Classroom Acoustics for Architects - A companion booklet for ANSI/ASA 12.60” publicado en abril del año 2015 y “Classroom Acoustics I - A resource for creating learning environments with desirable listening conditions” publicado en el año 2000. En ambos documentos podemos encontrar guías prácticas para entender y cumplir con las normas ANSI

de manera que puedan ser utilizadas tanto por estudiantes como profesionales de la Arquitectura por medio de la definición de conceptos como selección de sitio, ruido de fondo, acústica en un aula, tiempo de reverberación, tipo de transmisión de sonido (STC) y refuerzo sonoro.

Hasta la década de 1960, la exposición constante al ruido no generaba ninguna preocupación entre los habitantes del mundo, sin embargo, las cosas cambiaron radicalmente en 1969 con la aprobación del acta National Environmental Policy Act (NEPA) y la Noise Control Act (NCA) en el año 1972, esto después de presentarse evidencia sobre el ruido siendo el causante de pérdida de audición en más de 30 millones de norteamericanos expuestos al ruido ambiental constante generado por aeropuertos y automoviles.²¹

Diversos países europeos trataron de imitar las legislaciones norteamericanas sobre control de ruido ambiental: Holanda en 1979, Francia en 1985, España en 1993 y Dinamarca en 1994; sin embargo, la Unión Europea (EU) junto con la OMS se encargaron de regular este tema en directivas especializadas aplicables a cualquier país y compilandolas en la llamada Guidelines for Community Noise²², publicada en

(21) Noise Control Act, Public Law 92-574, 1972

(22) Guidelines for Community Noise. World Health Organization WHO, 1999, whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf.

(23) Listado de Normas Oficiales Mexicanas. http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NOM/

(24) Listado de Normas Mexicanas. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/>

1999, actualmente vigente a nivel mundial, y constantemente en actualización.

En México no existe una asociación encargada de regular los niveles de ruido ambiental, sin embargo, el país cuenta con una serie de normativas, ya sean Normas Oficiales Mexicanas (NOM)²³ o Normas Mexicanas (NMX)²⁴, que de manera muy general establecen parámetros para el control de ruido ambiental. Las NOM publicadas sobre esta materia son: NOM-082-SEMARNAT-1994 (1995) que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las motocicletas y triciclos motorizados nuevos en planta y su método de medición; NOM-081-SEMARNAT-1994 (1995), que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición; NOM-080-SEMARNAT-1994 (1995), que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de los vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación y su método de medición; y NOM-079-SEMARNAT-1994 (1995), que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de los vehículos automotores nuevos en planta y su método de medición.

Las NMX sobre el tema son las siguientes:

NMX-AA-040-1976 Clasificación de ruido; NMX-AA-062-1979 Acústica-Determinación de los niveles de ruido ambiental; y NMX-CH-1996-1-IMNC-2009 Acústica - Descripción, medición y evaluación de ruido ambiental - parte 1: Magnitudes básicas y procedimientos de evaluación. Además de dichas regulaciones, los arquitectos contamos con el Reglamento de Construcción²⁵ aplicable a cada entidad federativa, donde también encontramos diversos datos que ayudan al diseño acústico de una edificación y proporciona pautas a seguir para evitar la contaminación acústica.

La última normativa implementada fue en el año 2011 por medio del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED), cuyo manual Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones define de manera más clara las condiciones que debe presentar un aula para su adecuado funcionamiento, también tomando como base las normativas oficiales NMX y NOM previamente mencionadas. Específicamente establece el tiempo de reverberación para un aula entre los 0.6 y los 0.8 segundos.

(25) Arnal, L. y Betancourt M. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Comentado, ilustrado y actualizado. (6ª ed.) México: Trillas.

(26) INIFED. Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones. 2011. México.

**HIPÓTESIS TEÓRICA
JUSTIFICACIÓN
Y OBJETIVOS**

2

HIPÓTESIS TEÓRICA

La contaminación sonora producida por la falta de un diseño acústico adecuado dentro de las aulas produce efectos adversos en la salud física y mental de los alumnos y docentes, remarcando la existencia de una relación entre la falta de regulaciones en la materia de acondicionamiento acústico de espacios educativos y la calidad de las actividades desarrolladas dentro de dichos espacios que corresponde a la falta de inclusión de la acústica como parte integral del diseño arquitectónico. Aplicando los criterios de las normas internacionales ISO y ANSI existentes en materia de acústica arquitectónica para el aula considerada como caso de estudio, se podrán obtener mejores resultados en las mediciones de tiempo de reverberación y nivel de presión e intensidad sonora, cuyos valores definen la calidad de transmisión de la voz dentro del espacio y permiten una mejora en la relación docente - alumno.

JUSTIFICACIÓN

En México, debido a la falta de regulaciones en materia de acústica en espacios educativos, se ignoran los efectos adversos de la contaminación acústica y el mal acondicionamiento de espacios, derivando en la nula reglamentación de dicho tema que genera edificios inadecuados para la enseñanza y, aunque existen acondicionamientos

acústicos secundarios hechos posteriormente a la construcción de un espacio, no poseen la misma efectividad que el diseño primario de dichos recintos. Debido a la falta de normativas que regulen estas faltas, surge la idea de abordar en este documento las diferencias entre un espacio acústicamente adecuado y uno espacio no funcional en el ámbito sonoro, esto mediante la creación de parámetros generales aplicables a cualquier caso de estudio y que estén basados en la normativa vigente tanto nacional como internacional para complementar las necesidades de los espacio y sus ocupantes.

OBJETIVO GENERAL

Hacer un diseño acústicamente adecuado para el aula K-403 “Antonio Recamier Montes” del Taller Luis Barragán en la Facultad de Arquitectura ubicada en Ciudad Universitaria que mejore su funcionamiento.

OBJETIVOS PARTICULARES

Crear conciencia sobre el problema que represental a contaminación sonora y el correcto diseño acústico dentro de los espacios educativos. Generar criterios de diseño aplicables en cualquier edificio educativo, sea nuevo o previamente construido, que permitan mejorar la calidad de las actividades escolares.

CASO DE ESTUDIO

3



Figura 12a. Placa metálica ubicada fuera del aula K-403 del Taller Luis Barragán. Fuente: Elaborado por el autor.

CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO

3.1. SITUACIÓN ACTUAL: AULA ANTONIO RECAMIER MONTES

Como se mencionó en los capítulos anteriores, México cuenta con más de ocho mil planteles educativos en su capital, de los cuáles aproximadamente setecientos pertenecen al género de educación superior. Dichos planteles no cuentan con una infraestructura acústica adecuada, y aunque si cuentan con espacios especialmente dedicados a eventos con una necesidad acústica específica como aulas magnas y auditorios, las aulas generales no fueron consideradas como una prioridad de diseño acústico. El ejemplo abordado en este documento lo encontramos dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México, específicamente dentro de la Facultad de Arquitectura. Desde el año de la apertura de Ciudad Universitaria en 1953, los edificios de la Facultad de Arquitectura han sufrido numerosos cambios en su funcionamiento, adaptándose al ritmo de vida y necesidades de cada taller, sin embargo, las aulas siguen sin cumplir especificaciones acústicas que mejoren la calidad de las clases impartidas. El edificio principal cuenta con las aulas magnas, de gran capacidad y diseño acústico e isóptico, sin embargo no son suficientes para dar abasto a las clases de toda la Facultad. Este documento se enfoca principalmente en el Taller Luis Barragán, ubicado en el cuarto piso del edificio principal y del cual se analizará el aula con la nomenclatura K-403, utilizada por los estudiantes de Seminario de Tesis en noveno y décimo semestre para realizar sus asesorías.

El aula Antonio Recamier Montes está ubicada a un costado del cubo de escaleras que da acceso al Taller Luis Barragán. La fachada principal del mismo está ubicada hacia el poniente y alberga el único acceso al espacio, mientras que la fachada de ventilación se ubica hacia el oriente. Su forma es ortogonal exceptuando por los elementos sobresalientes, como trabes y columnas, que definen los marcos estructurales del edificio. Los elementos estructurales anteriormente mencionados crean espacios muertos que generan anomalías acústicas que no permiten la buena distribución del sonido y se complica aún más con la proporción del aula hacia el lado ancho. Los materiales ocupados concreto para la estructura, tabique para los muros divisorios y terrazo para la loseta de piso, materiales con alta reflectividad ante las ondas sonoras y cuyas características reflejan el sonido provocando efectos que dañan la inteligibilidad del aula, la calidez del sonido,

la correcta transmisión de la información y el desempeño general de alumnos y profesores. El aula no cuenta con equipo o maquinaria que genere vibraciones las cuales puedan alterar o afectar la dispersión sonora.

La ubicación del aula también representa un factor de riesgo ante el aumento de niveles de presión sonora y filtración de ruido dentro del aula al estar ubicado a un costado de espacios concurridos dentro de la Facultad.

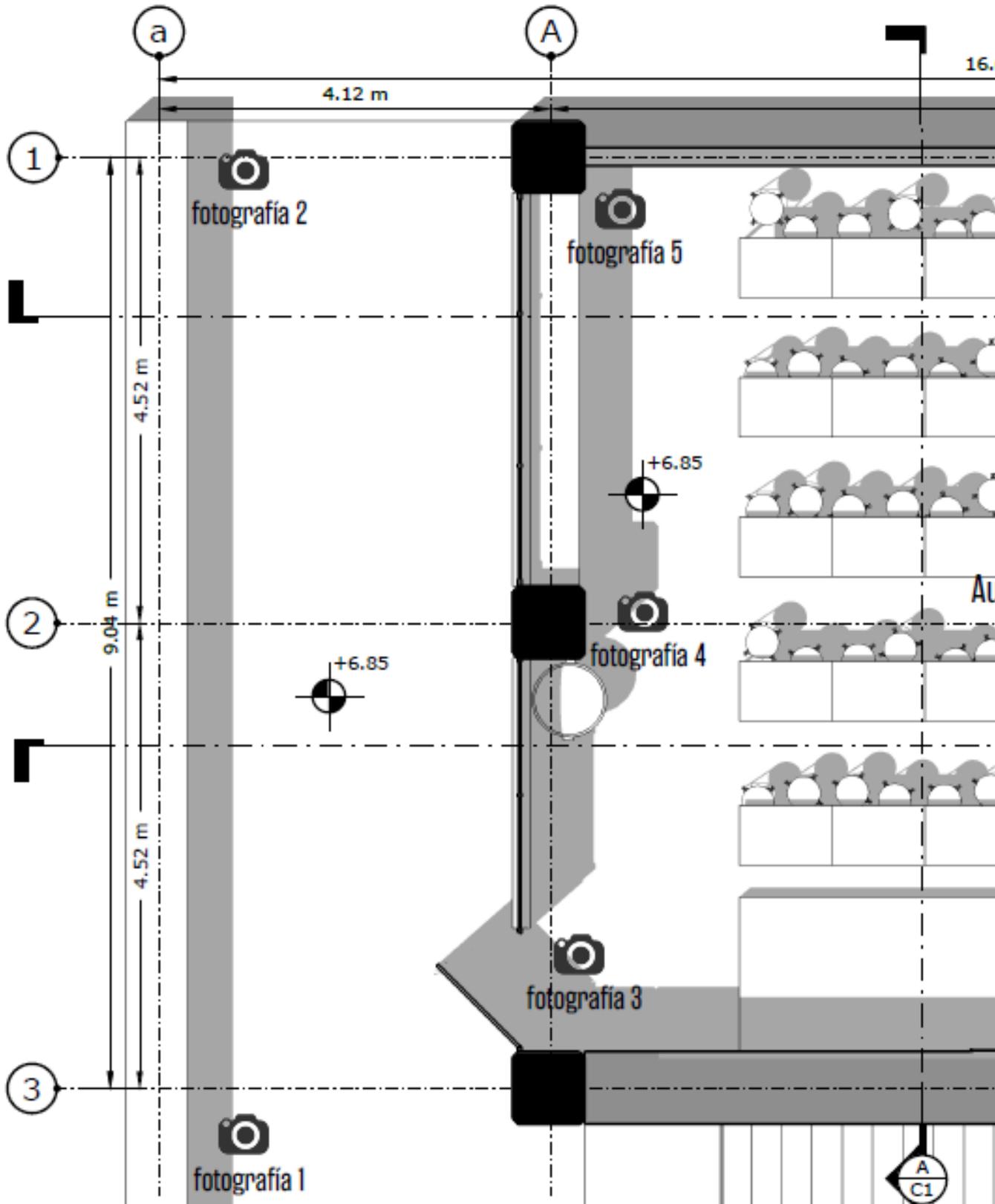
En los temas posteriores a tratar en este documento se abordaran con mayor detalle las problemáticas generadas por los aspectos anteriormente mencionados, así como el análisis cuantitativo sobre las mediciones acústicas del espacio a estudiar y sobre los que posteriormente se realizará una propuesta que genere una solución al problema específico de esta aula.

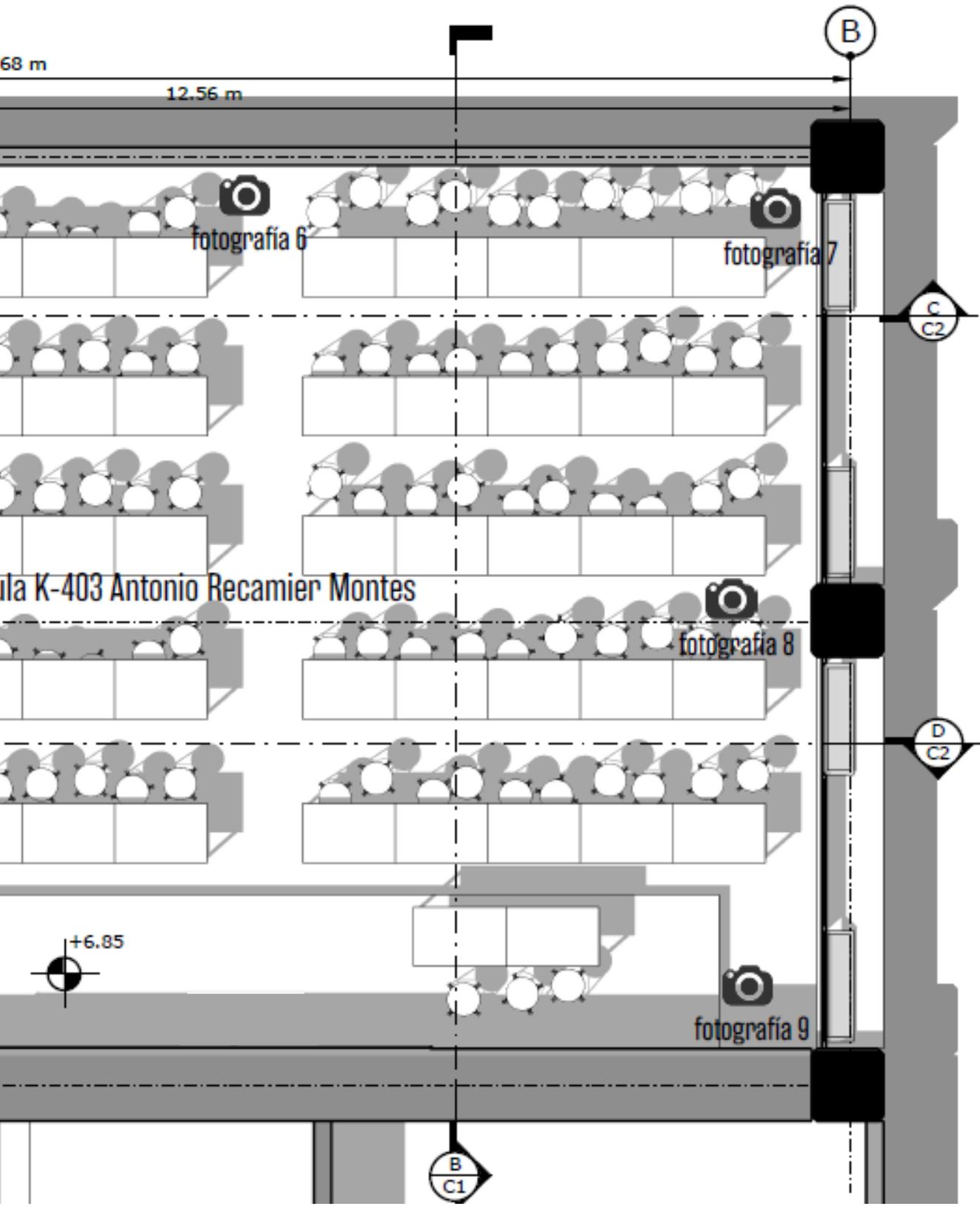


Figura 12. Patio principal de la Facultad de Arquitectura, Ciudad Universitaria.

Fuente: Fotografía de Joyce Meneses. 2010.

3.2. LEVANTAMIENTO FOTOGRÁFICO





3.2. LEVANTAMIENTO FOTOGRÁFICO

Fotografía 1. Vista exterior del Aula Antonio Recamier Montes. Podemos observar el área de acceso al aula, punto de reunión de alumnos y profesores del Taller Luis Barragán. Dicho espacio colinda con el patio principal de la Facultad y posee comunicación con el campus de Ciudad Universitaria y sus espacios al aire libre, lo cual significa un alto nivel de contaminación auditiva.



Fotografía 2. Vista exterior del Aula Antonio Recamier Montes. Se aprecia el emplazamiento del aula dentro del Taller Luis Barragán, así como los elementos estructurales que lo enmarcan y el posicionamiento del acceso cerca de las escaleras del edificio.



Fotografía 3. Interior del Aula Antonio Recamier Montes. Vista desde el acceso al mismo. Se observa el mobiliario utilizado dentro del aula y las condiciones sobre las cuales se trabaja, lo que nos permite tener una idea sobre el funcionamiento acústico del espacio.



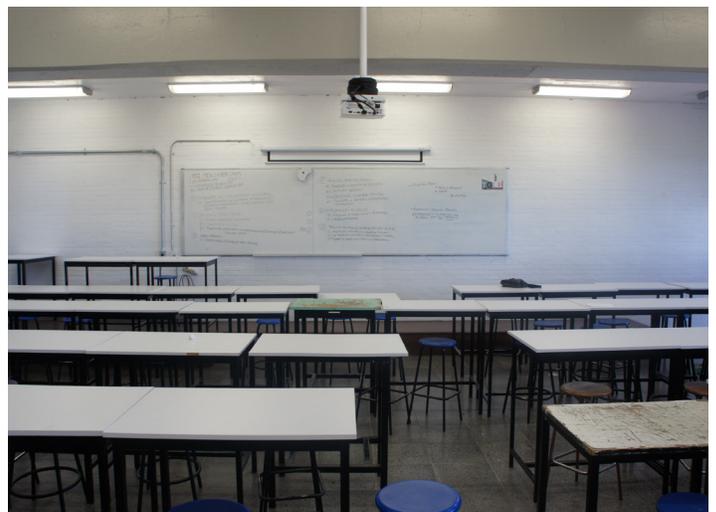
Fotografía 3. Interior del Aula Antonio Recamier Montes. Vista desde el acceso al mismo. Vista del aula desde la fachada posterior hacia el acceso. Esta perspectiva nos da una idea del dimensionamiento del aula y el posicionamiento del mobiliario con respecto al uso del espacio.



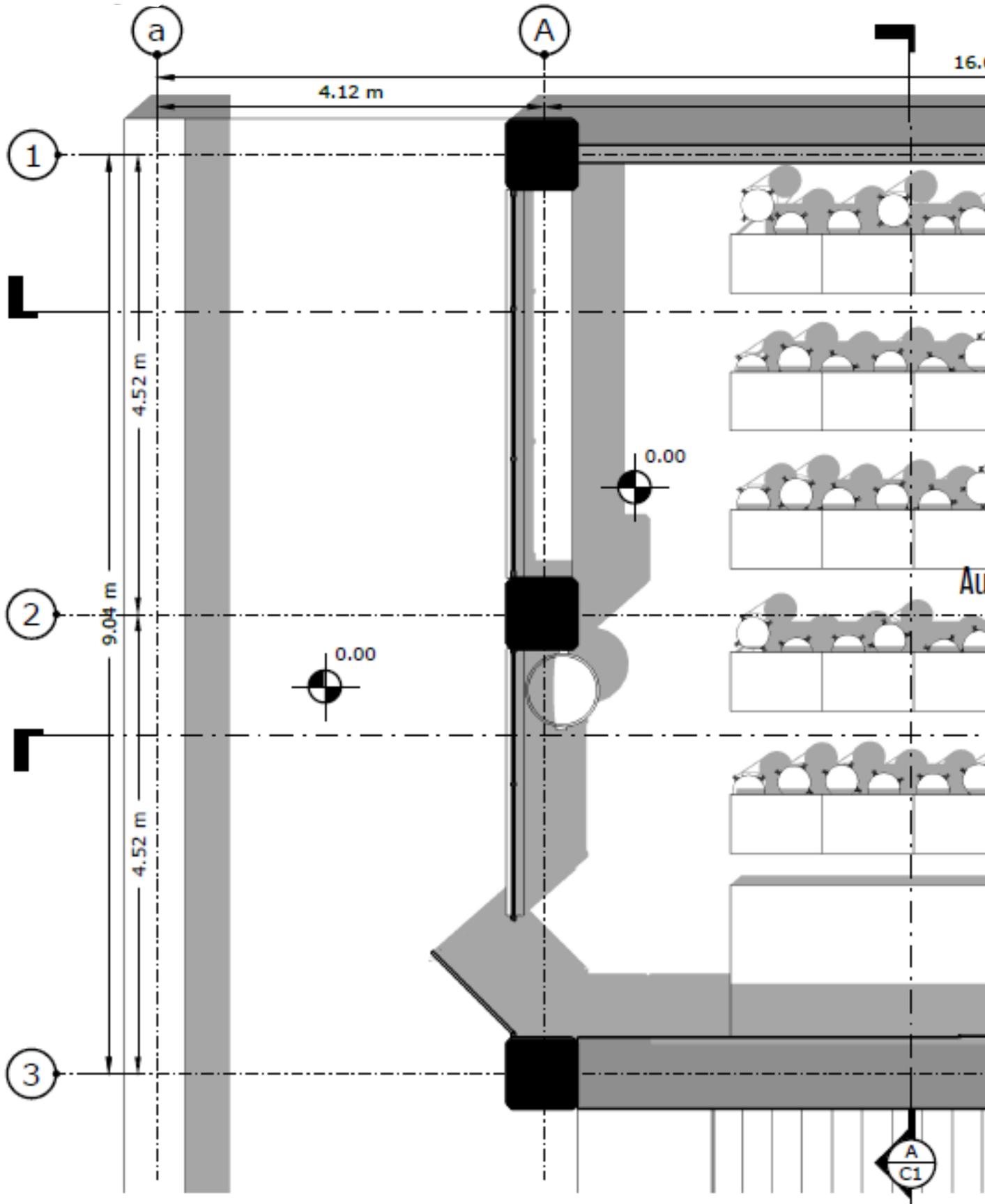
Fotografía 5. Interior del Aula Antonio Recamier Montes. Vista del aula hacia la sección posterior desde la posición del ponente.



Fotografía 6. Interior del Aula Antonio Recamier Montes. Vista hacia el área frontal del aula. Se observa la posición jerárquica del docente mediante el uso de la elevación del nivel con una tarima que da mayor visibilidad sobre los alumnos.



3.3. LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

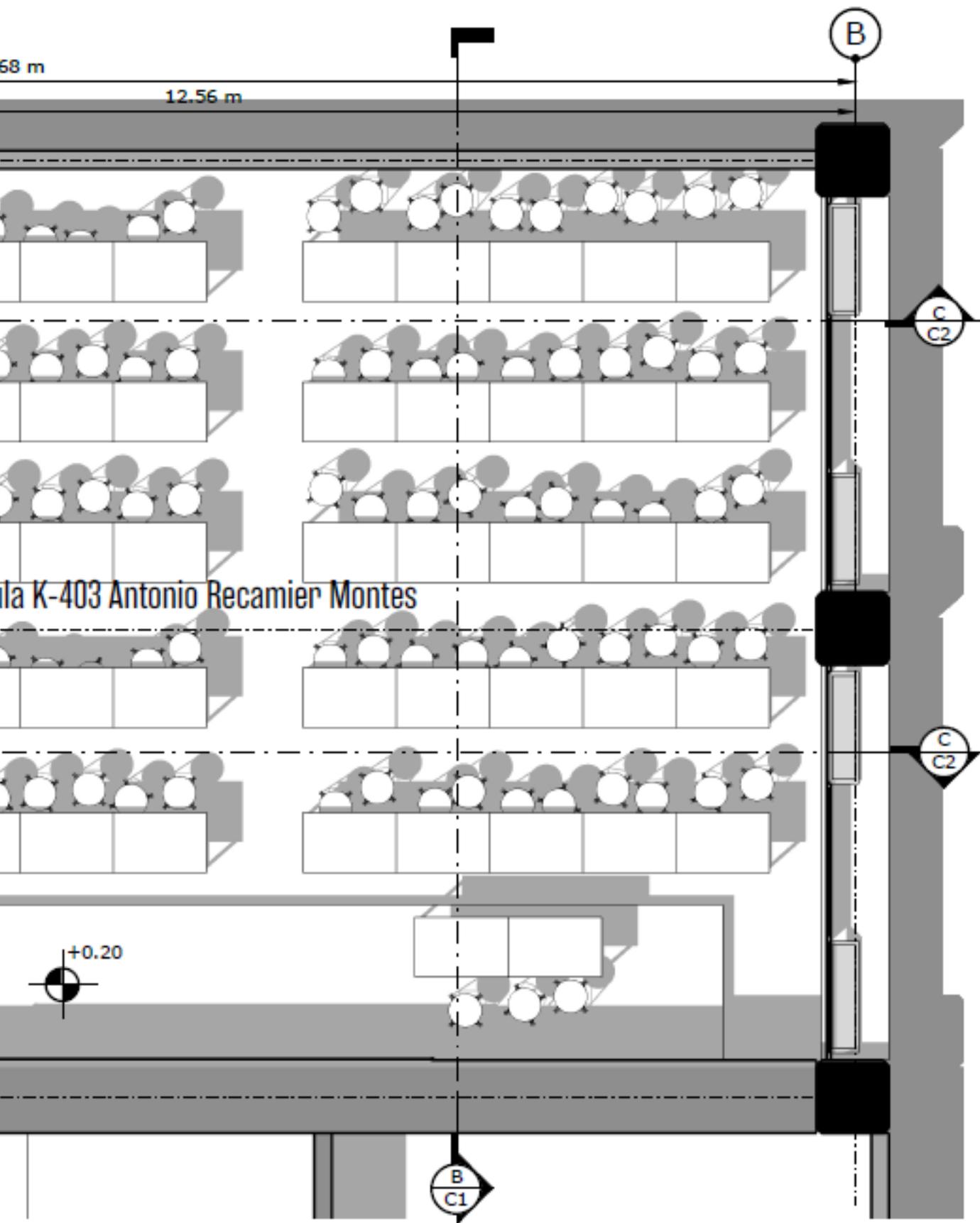


68 m

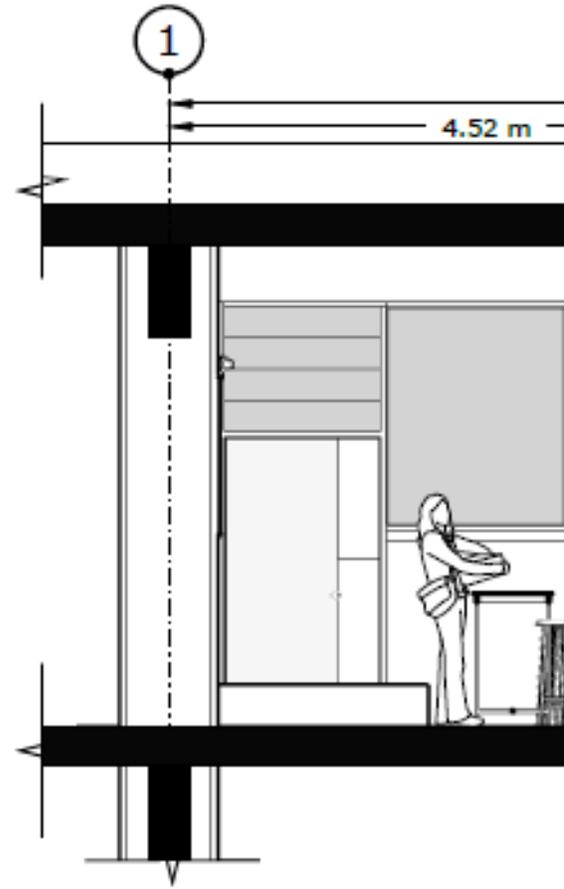
12.56 m

la K-403 Antonio Recamier Montes

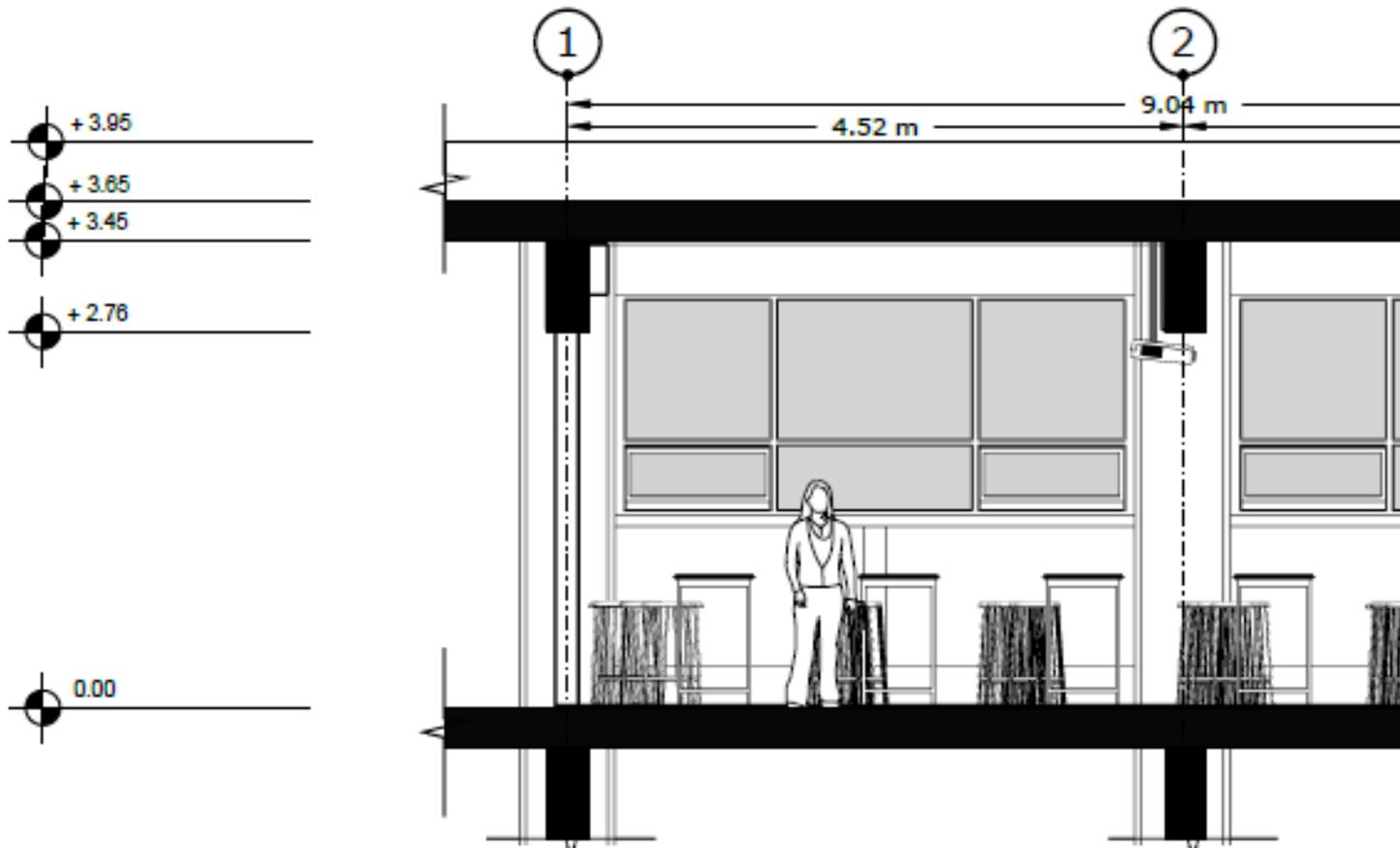
+0.20

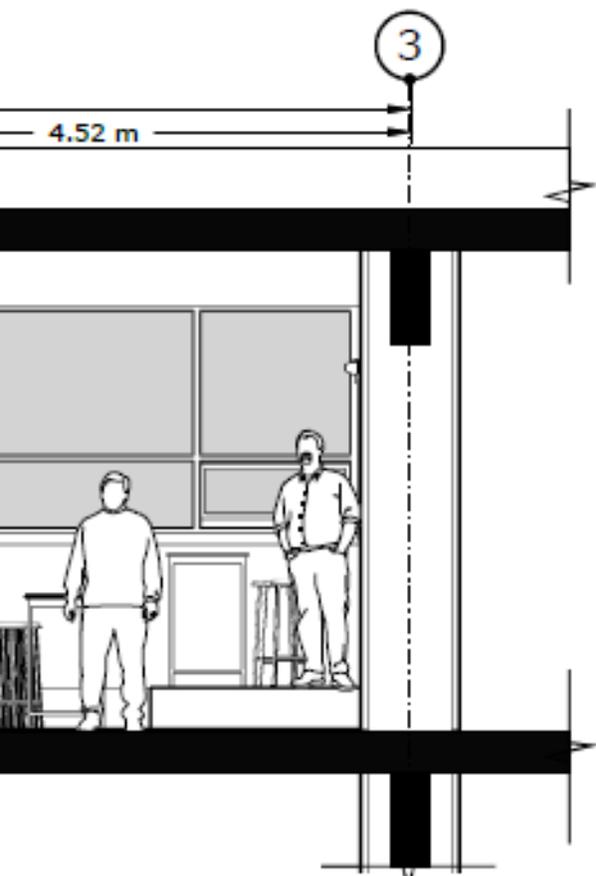
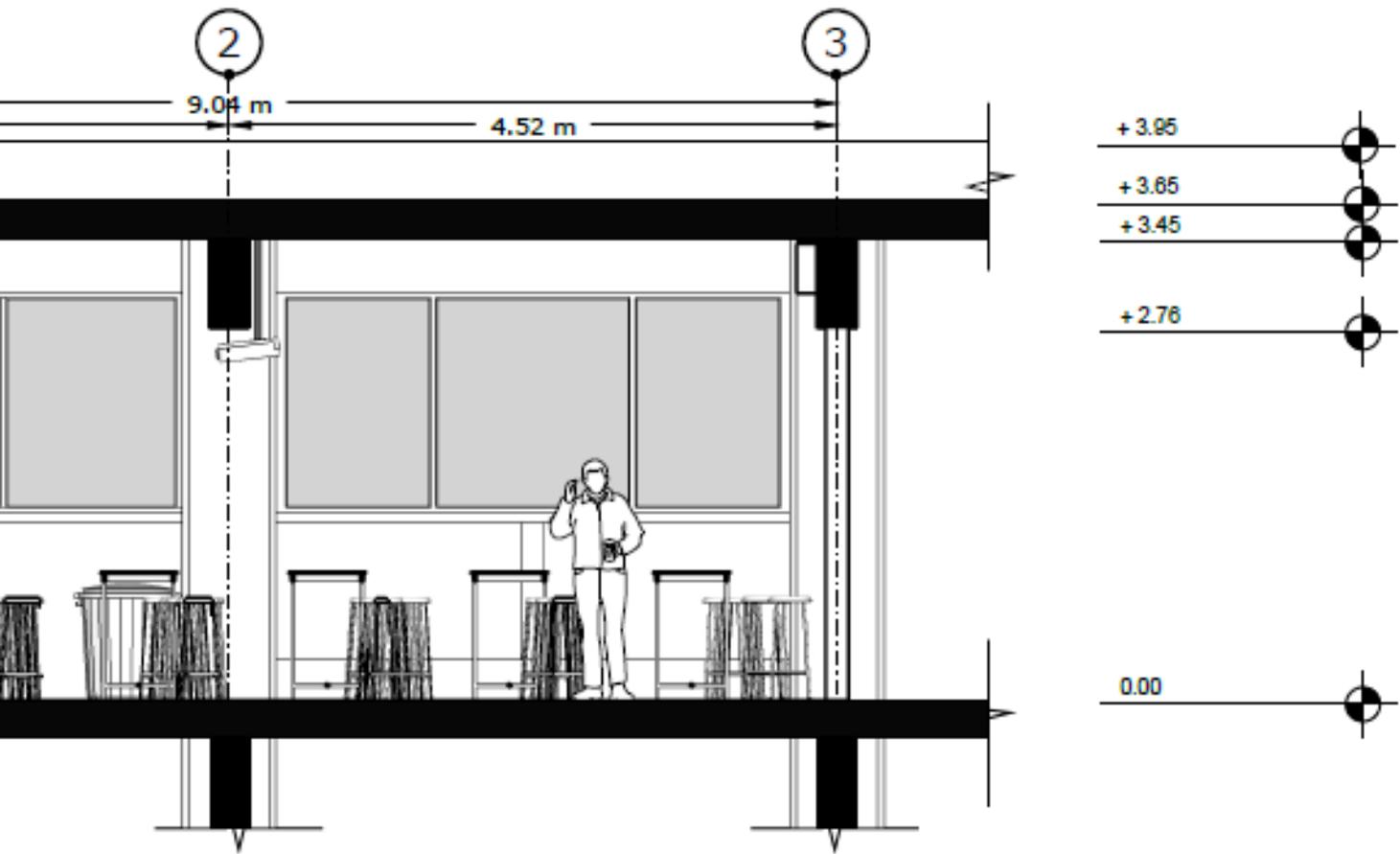


3.3. LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO



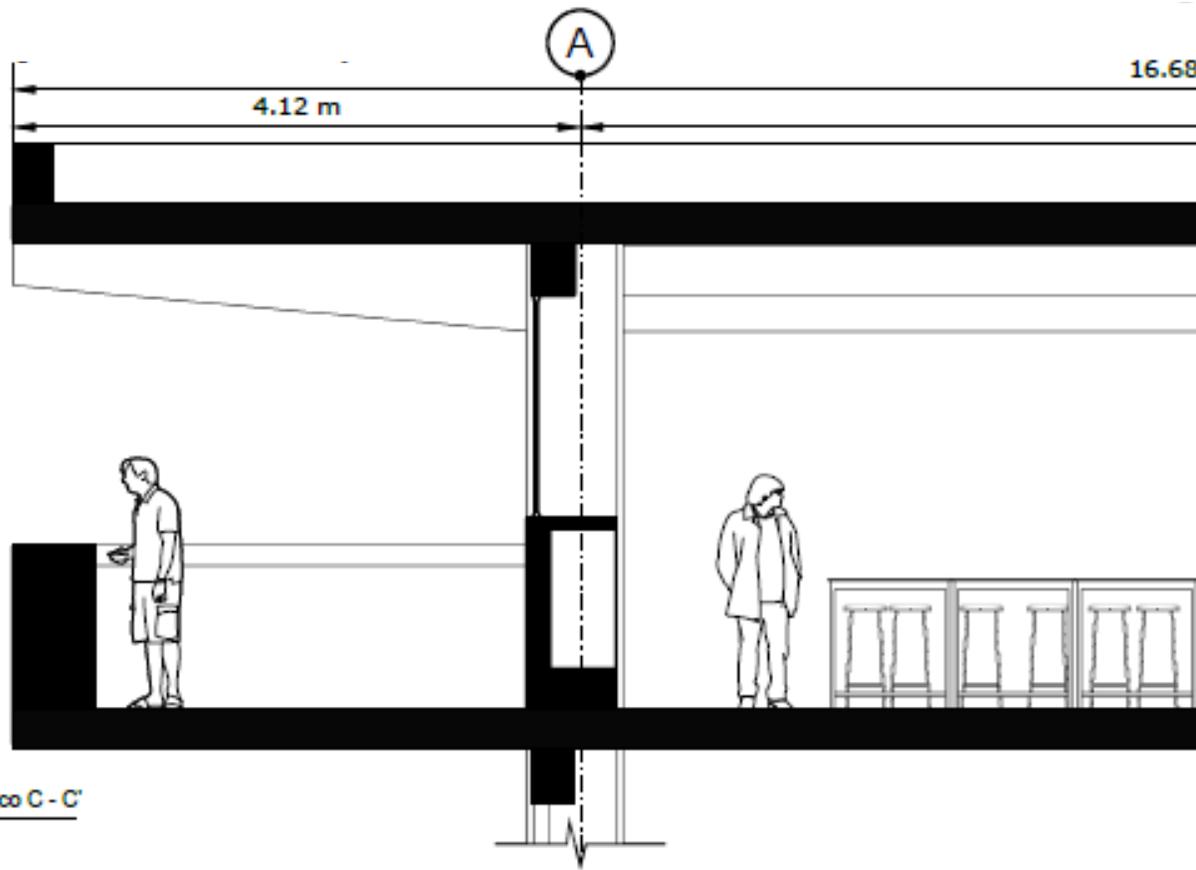
A
A01 Corte Arquitectónico A - A'
Escala: 1 : 50



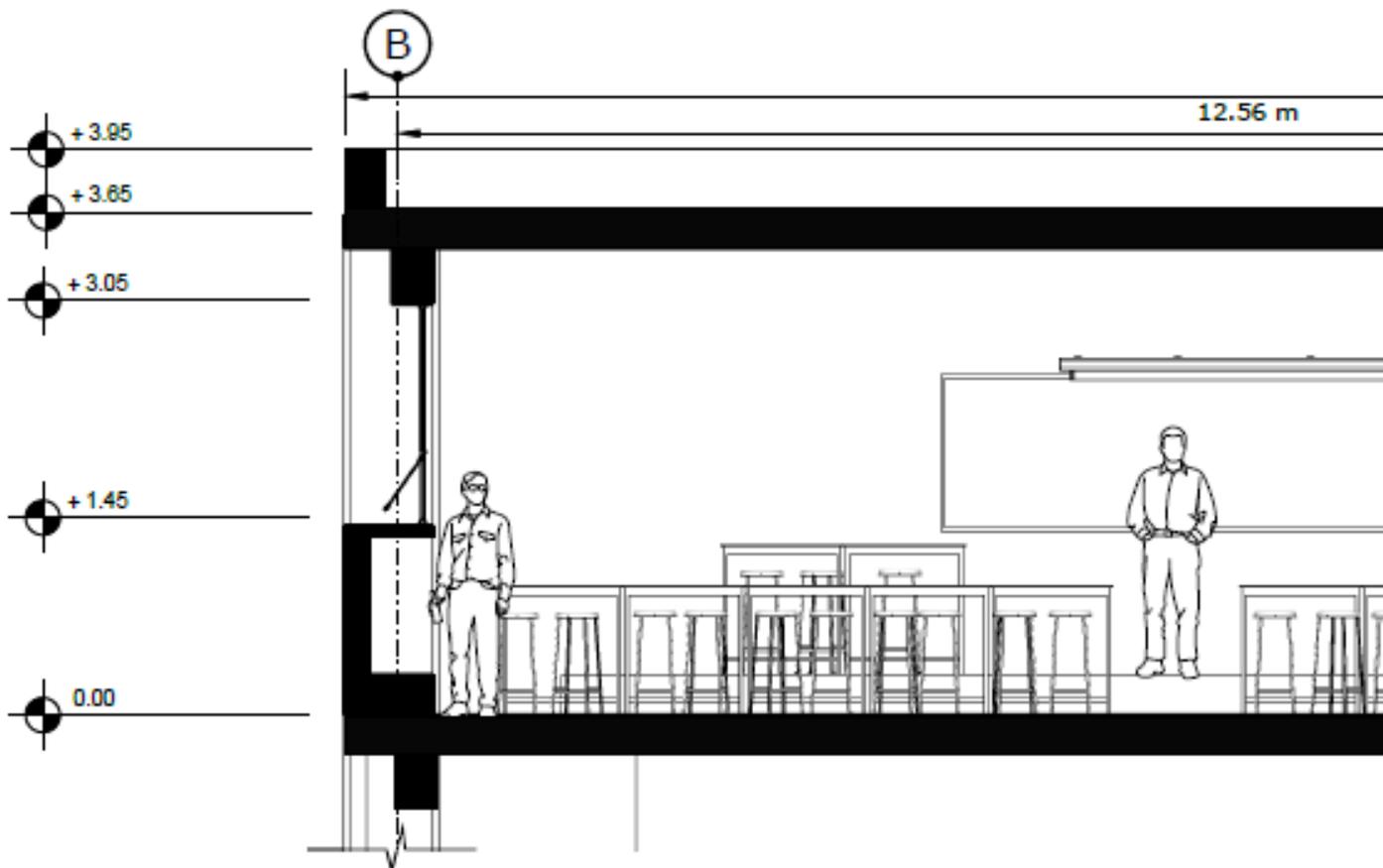


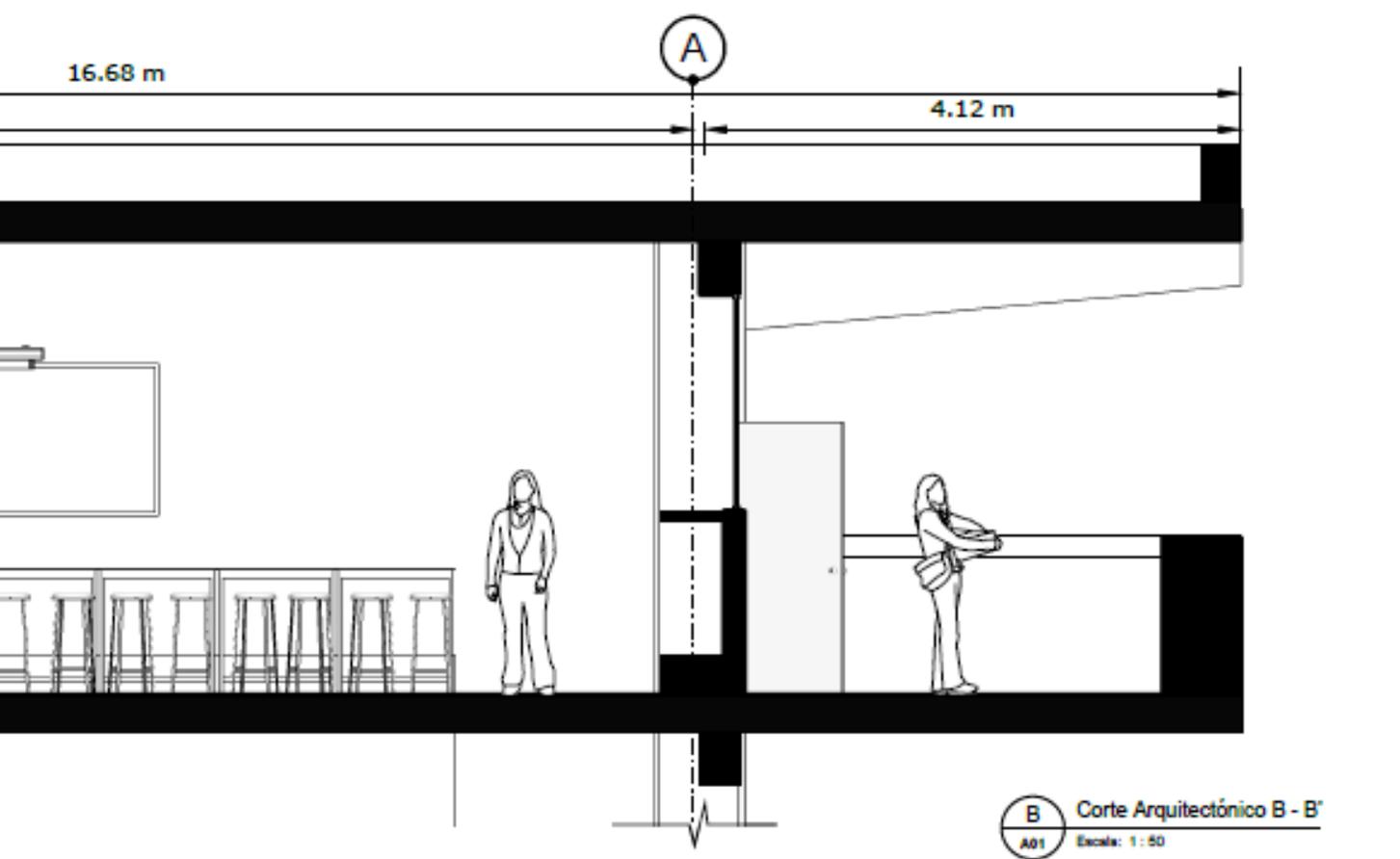
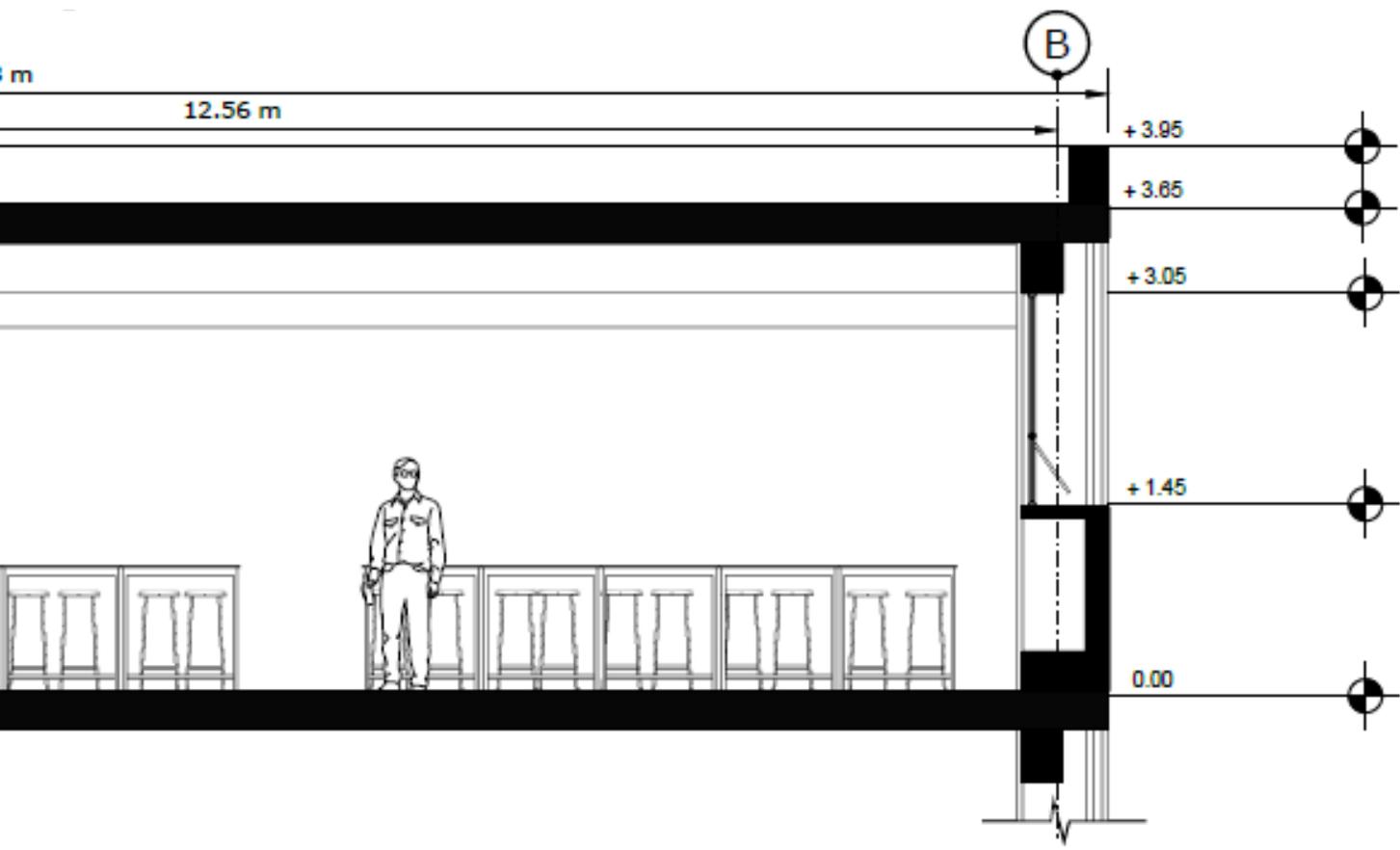
B Corte Arquitectónico B - B'
A01 Escala: 1 : 50

3.3. LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO



C Corte Arquitectónico C - C'
A01 Escala: 1 : 50





B Corte Arquitectónico B - B'
A01 Escala: 1:50

3.4. MEDICIONES ACÚSTICAS

Se hizo un análisis cualitativo del aula Antonio Recamier con el objetivo de encontrar las posibles fallas acústicas que lo afectan, para lo cual se utilizó el documento publicado por la ASA: “Classroom Acoustics for Architects - A companion booklet for ANSI/ASA 12.60”, donde se enlistan una serie de elementos a considerar cuando se trata del diseño acústico de espacios educativos. Al tratar cada punto individualmente, se obtuvieron las siguientes observaciones:

1) Evaluación y proyección de fuentes externas de ruido: Dada la ubicación del aula, encontramos que hay diversos factores sonoros a considerar que pueden influir dentro del diseño del espacio. La ubicación geográfica del espacio, colindando al norte con “Las Islas”, espacio de convivencia donde frecuentemente se llevan a cabo eventos culturales y recreativos de Ciudad Universitaria; al este con los edificios de los talleres de Arquitectura, donde la actividad de los alumnos se convierte en una fuente de ruido considerable durante el horario de mayor concurrencia entre las 7AM y las 8PM; al sur colindando con el Circuito Escolar y la Alberca Olímpica, siendo los vehículos el mayor problema a tomar en cuenta; y al oeste con el edificio principal de la Facultad

de Arquitectura y el Museo Universitario de Ciencias y Arte (MUCA), ambos espacios de gran concurrencia y que albergan diversos puntos de encuentro de alumnos y profesores.

2) Factor ruido por transporte local: Como se mencionó anteriormente, el caso de estudio es próximo al Circuito Escolar de Ciudad Universitaria, que junto a los espacios de estacionamiento designados para los espacios que conforman la Facultad de Arquitectura y la proximidad de Avenida de los Insurgentes, es necesario considerar el impacto acústico generado por vehículos automotores circulantes.

3) Edificios/espacios adyacentes que contribuyan al ruido exterior: Los espacios de convivencia mencionados anteriormente en el punto 1 son la principal fuente de ruido externo que podrían ser un factor de contaminación ambiental dentro del aula.

4) Servicios de entregas y recolección de basura: Los servicios de entrega y recolección de basura utilizan el estacionamiento de la Facultad de Arquitectura para realizar sus maniobras con un horario matutino y, por lo tanto, esta fuente de ruido no tiene un impacto importante, además de no encontrarse cerca del caso de estudio.

- 5) Arreglo del edificio con respecto a otras fuentes sonoras: La posición elevada del Taller Luis Barragán no favorece el control sonoro para el aula en cuestión.
- 6) Fuentes de ruido interior y su distribución: La principal fuente de ruido a considerar en el interior del salón es la comunicación profesor-alumno. Al ser un salón de clases con distribución tradicional, donde el profesor se encuentra al frente de un grupo de alumnos con una posición de jerarquía, y de distribución por núcleos durante las asesorías, la acústica puede llegar a ser variable.
- 7) Fuentes mecánicas de ruido: No es aplicable al caso de estudio.
- 8) Salones adyacentes: El caso de estudio solo cuenta con un salón adyacente, el aula K-402, la cual tiene la misma naturaleza de uso que los demás salones del Taller Luis Barragán.
- 9) Pasillos: El aula cuenta con un pasillo principal de circulación, el cual funciona como único acceso. Sin embargo, hay que considerar su cercanía a la única circulación vertical que permite el acceso al Taller Luis Barragán.
- 10) Aislamiento que cumpla con el nivel de ruido permisible por la normatividad: De acuerdo a las normas ANSI, que son el patrón internacionalmente adecuado para realizar las mediciones del caso de estudio en materia de acústica, el nivel máximo permisible de ruido ambiental para un núcleo de aprendizaje con una superficie menor a los 280 m² es de entre los 33 y 55 db.
- 11) Planeación de espacios: Al ser un edificio ya construido, solamente es candidato para reacondicionamiento. La planeación de espacios no aplica en este caso.
- 12) Diseño de muros y plafones: Los materiales usados en los muros del aula son altamente reflejantes en altas y bajas frecuencias, lo que perjudica la calidez y tiempo de reverberación del sonido, factores ligados directamente a la inteligibilidad del habla.
- 13) Puertas y ventanas: Las ventanas cuentan con cancelería de herrería con vidrios sencillos de 6mm de espesor, los cuales no aíslan el ruido exterior. La puerta de acceso principal está hecha de madera sin un encuadramiento adecuado, permitiendo el paso de ruido desde el exterior.
- 14) Exteriores: El diseño exterior no será incluido dentro del análisis ya que no forma parte del aula.
- 15) Diseño interior: El diseño del aula no favorece

la acústica del lugar. Los diferentes elementos estructurales sobresalientes interfieren con el habla, mientras que los materiales altamente reflejantes generan anomalías acústicas como ecos flotantes y nodos.

16) Accesos: Existe un solo acceso al aula, lo cual no eleva la posibilidad de filtración de ruido dentro del aula.

17) Tiempos de reverberación e inteligibilidad: El tiempo de reverberación de un recinto es la medición base para conocer el estado acústico de un espacio, por lo tanto, esta sección no fue tratada empíricamente ya que es necesario tener medidas acústicas para realizar un análisis. Se realizó un levantamiento acústico para conocer las condiciones del aula y determinar si se cumplen con los requisitos mínimos establecidos por la norma ANSI S12.60-2002 Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools.

Durante dicho levantamiento cuantitativo se llevaron a cabo mediciones de Nivel de Presión Sonora utilizando una aplicación para sistema operativo Android, llamada iNVH y desarrollada por la compañía Bosch Engineering & Business que determina los niveles de presión sonora NPS

y niveles de vibración para trabajos de campo.

Las mediciones fueron hechas en 5 diferentes horarios (6:30 AM, 8:00 AM, 9:30 AM, 11:00 AM y 13:30 PM) en diferentes nodos ubicados dentro de la retícula trazada en planta sobre el aula y mostrados en la Figura 14, esto con el objetivo de evaluar los niveles de ruido exterior a lo largo de un día de actividades en el Taller Luis Barragán. Posteriormente a obtener las mediciones en los nodos planteados, se obtuvo una media del Nivel de Presión Sonora para estandarizar los valores acústicos a tomar en consideración.

Los resultados se muestran en la Tabla 01. Posteriormente fue necesario obtener los datos para el uso de la fórmula de Sabine:

$$RT = \frac{0.05 V}{(S_1 \alpha_1) + (S_2 \alpha_2) + (S_n \alpha_n)}$$

(1.2) donde RT es el tiempo de reverberación, V es el volumen del espacio, S es la superficie que ocupan los materiales dentro del espacio y α es el coeficiente de absorción de cada material

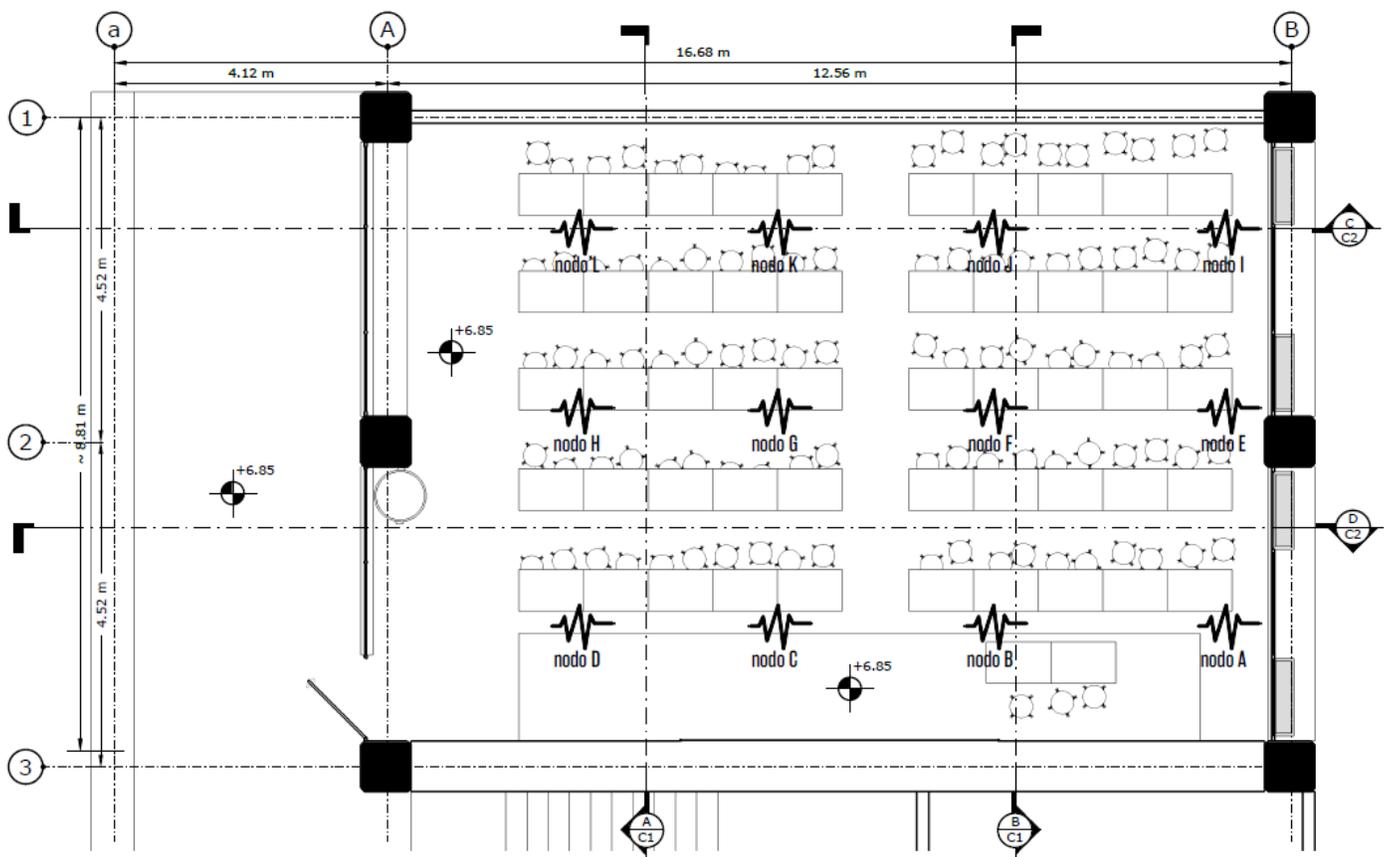


Figura 14. *Retícula de mediciones acústicas para el Aula Antonio Recamier Montes.* Elaborada por el autor del documento.

	1 (6:30AM)	2 (8:00AM)	3 (9:30AM)	4 (11:00AM)	5 (13:30PM)	MEDIA
A	48.00	53.00	43.00	46.00	60.00	50.00
B	44.00	53.00	40.00	51.00	57.00	49.00
C	52.00	40.00	38.00	36.00	45.00	42.20
D	41.00	42.00	35.00	58.00	38.00	42.80
E	55.00	52.00	50.00	43.00	53.00	50.60
F	45.00	43.00	46.00	52.00	58.00	48.80
G	41.00	43.00	45.00	39.00	47.00	43.00
H	47.00	48.00	42.00	38.00	52.00	45.40
I	52.00	43.00	50.00	35.00	39.00	43.80
J	46.00	41.00	52.00	36.00	38.00	42.60
K	43.00	47.00	39.00	42.00	38.00	41.80
L	50.00	53.00	48.00	54.00	50.00	53.00

Tabla 01. Mediciones acústicas dentro del Aula Antonio Recamier Montes

Para el cálculo de la fórmula (1.2), el primer dato a obtener es el volúmen del aula, calculado durante el levantamiento arquitectónico, y cuyo resultado fue de 352.12 m³.

Se calcularon las superficies que ocupa cada material utilizado en el aula y se obtuvieron los valores del coeficiente de absorción para cada uno, ambos valores representados en las Tablas 02 y 03 respectivamente. Sustituyendo los valores obtenidos dentro de la fórmula de Sabine, se obtuvieron los resultados de la Tabla 04 y la Gráfica 02.

MATERIAL	S (m²)
concreto	86.22
tabique	93.08
vidrio	21.16
terrazo	91.54
madera	19.28
usuarios (aula a media capacidad)	55.00

Tabla 02. Superficie ocupada por cada material utilizado dentro del Aula Antonio Recamier Montes. Elaborado por el autor del documento.

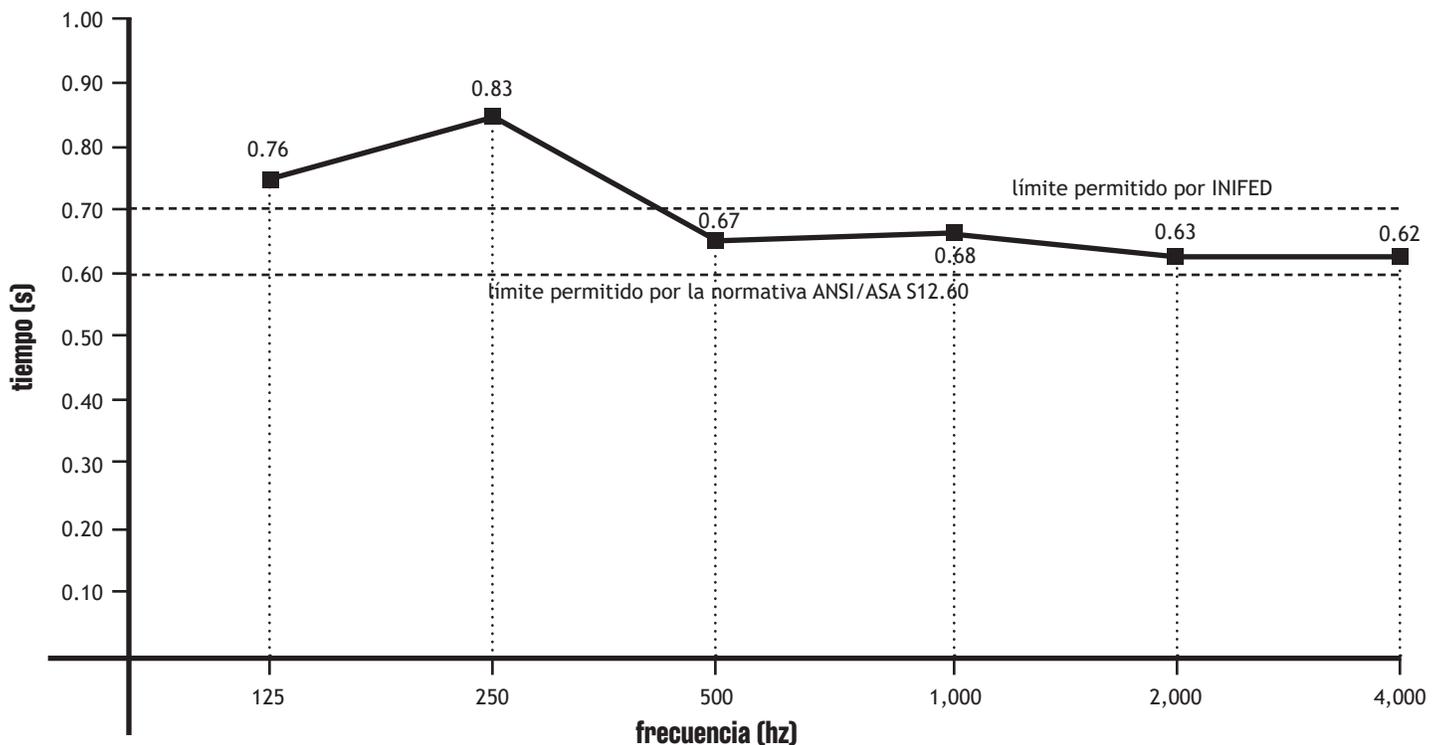
MATERIAL	125 HZ	250 HZ	500 HZ	1,000 HZ	2,000 HZ	4,000 HZ
concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
tabique	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
vidrio	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
terrazo	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
madera	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
usuarios	0.18	0.20	0.27	0.30	0.36	0.36

* <http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/271/files/2012/02/Tablas-de-Absorcion.pdf>

Tabla 03. Coeficientes de absorción α por material y frecuencia (hz). Elaborado por el autor del documento.

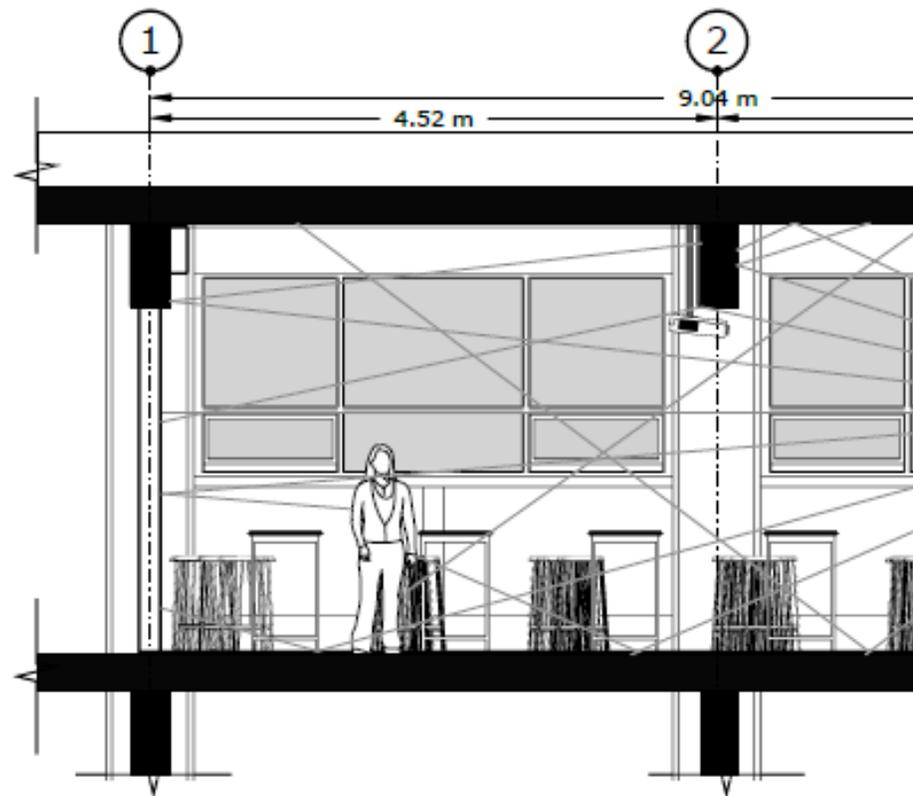
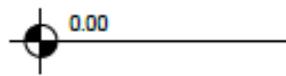
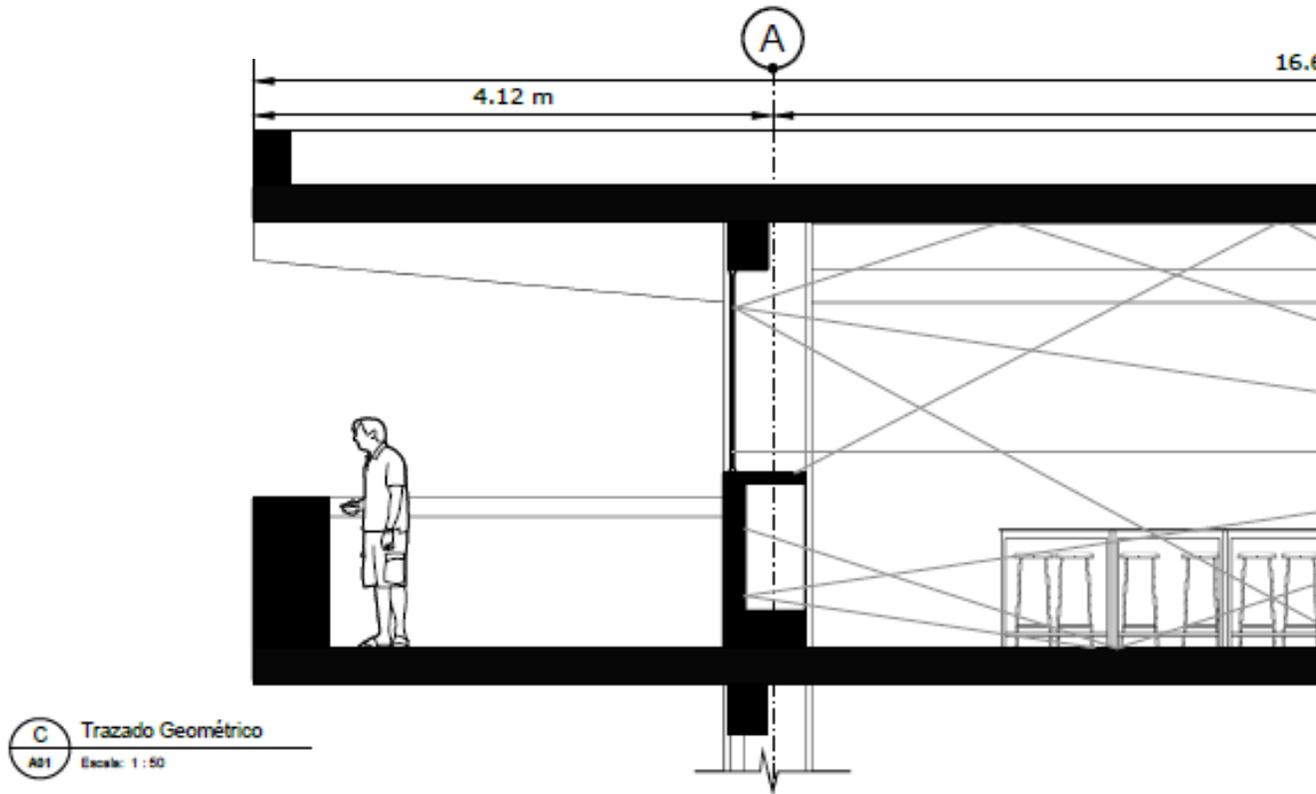
MATERIAL	SUPERFICIE (m ²)	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (α)						ABSORCIÓN TOTAL (A)					
		125 HZ	250 HZ	500 HZ	1,000 HZ	2,000 HZ	4,000 HZ	125 HZ	250 HZ	500 HZ	1,000 HZ	2,000 HZ	4,000 HZ
concreto	86.22	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.862	0.862	1.724	1.724	1.724	1.724
tabique	93.08	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.930	0.930	1.861	1.861	1.861	2.792
vidrio	21.16	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	7.406	5.290	3.808	2.539	1.481	0.846
terrazo	91.54	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.915	0.915	1.830	1.830	1.830	1.830
madera	19.28	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	2.892	2.120	1.928	1.349	1.156	1.349
usuarios	55.00	0.18	0.20	0.27	0.30	0.36	0.36	9.900	11.00	14.85	16.50	19.80	19.80
ΣA								22.90	21.11	26.00	25.80	27.85	28.34
VOLUMEN (V)								352.12					
RT (s)								0.76	0.83	0.67	0.68	0.63	0.62

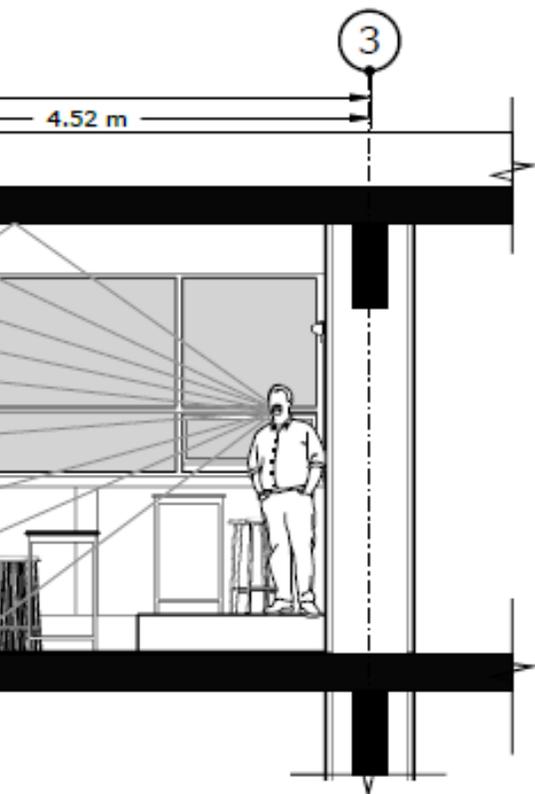
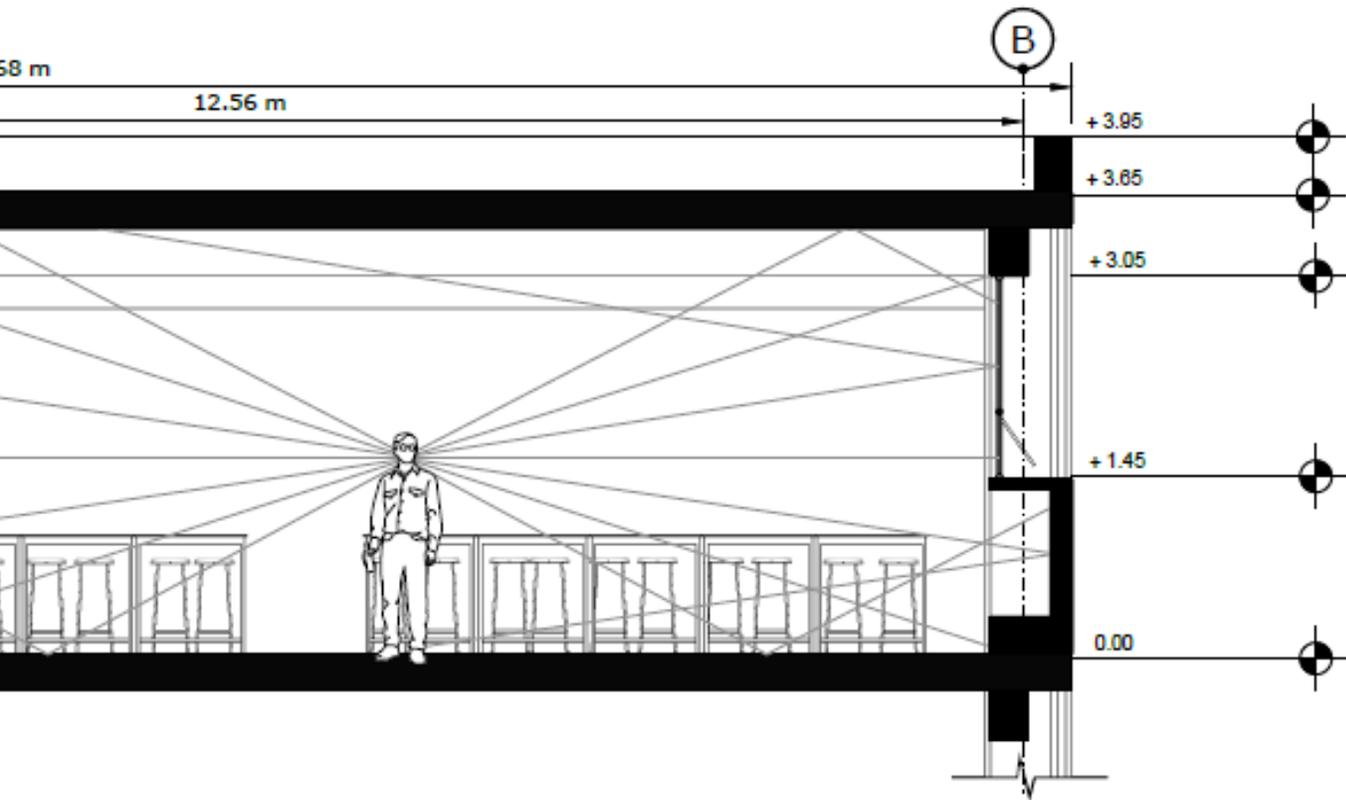
Tabla 04. Cálculo de Tiempo de Reverberación TR para los diferentes materiales y frecuencias. Elaborado por el autor.



Gráfica 01. Tiempo de Reverberación TR para los diferentes materiales y frecuencias. Elaborado por el autor.

3.4. MEDICIONES ACÚSTICAS - RAY TRACING





B Trazado Geométrico
A01 Escala: 1 : 50

3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de las pruebas cualitativas y cuantitativas realizadas dentro del aula utilizada como caso de estudio se obtuvieron los resultados descritos a continuación. Para el estudio empírico se obtuvieron las siguientes aseveraciones: 1) Al ser el caso de estudio un espacio previamente construido, el tipo de acondicionamiento acústico aplicable es el secundario, lo que limita las opciones de intervención óptimas para su desempeño acústico; 2) La ubicación del edificio dentro del campus Ciudad Universitaria no es favorable debido a su colindancia con avenidas y circulaciones de flujo importante como son el Circuito Escolar del mismo campus y Avenida de los Insurgentes, cuya carga vehicular se ve más afectada entre las 6:00 y 9:00 AM; las 12:00 y 3:00 PM; y 6:00 a 8:00 PM, y cuyos horarios coinciden con la mayor fluctuación de alumnos dentro de la Facultad de Arquitectura, situaciones que se convierten en las principales fuentes de ruido ambiental; 3) La contaminación auditiva del espacio de estudio se ve propiciada por los espacios adyacentes al salón, como son circulaciones verticales, pasillos y aulas contiguas. En el caso del análisis cuantitativo, dichos resultados nos muestran que: 1) Los niveles de ruido, cuyo valor promedio más alto de acuerdo a las mediciones es de 53 dB, no sobrepasa los límites establecidos por la normativa NOM 081 SEMARNAT 1994, normativa vigente en la Ciudad de México, y que propone como valor los 55 dB en el horario de 6:00 AM a 22:00 PM y los 50 dB de 22:00 PM a 6:00 AM; 2) A pesar de no infringir la norma mexicana vigente, si hay un incumplimiento de la norma ANSI/ASA S12.60 que establece el límite de nivel de ruido ambiental en 40 dB para aulas educativas cuyo volumen se encuentre entre los 283 y los 566 m³, norma que será utilizada como punto de referencia para el análisis y comparación de datos dentro de este documento; 3) Podemos apreciar una alta reflexión del sonido al interior del espacio, esto debido al uso y distribución de materiales inadecuados, así como un pésimo acomodo del espacio; 4) La morfología del aula cuenta con elementos estructurales que forman superficies irregulares que obstruyen o desvían las ondas sonoras, por lo que los usuarios no reciben de manera uniforme el sonido; la distribución del aula hacia el sentido horizontal propicia la propagación del sonido al disminuir la distancia recorrida por el mismo; 5) Al realizar los cálculos con la fórmula de Sabine

(1.2), observamos tiempos de reverberación (TR) con resultados sobre los 0.60 segundos, siendo los valores límite establecidos por el manual de acústica ASA Classroom Acoustics entre los 0.40 y los 0.60 segundos. El tiempo de reverberación nos indica fallas en la inteligibilidad y calidez del sonido al crear intersecciones llamadas nodos acústicos, los cuales no permiten la distribución adecuada del habla; 6) Por último, en el trazo geométrico que se llevó a cabo podemos observar interferencias en el viaje de la voz del emisor al receptor y cuyas causas principales son la altura del recinto y las irregularidades estructurales y morfológicas que reducen la posibilidades de un buen canal de comunicación entre los usuarios. El tipo de actividad realizada dentro del aula también es un factor a considerar ya que, si bien el uso de un aula tradicional supone a un emisor ubicado en una posición jerárquica al frente del aula con respecto a los receptores, en el caso de la Facultad de Arquitectura y específicamente de las asesorías llevadas a cabo en el aula para Seminario de Tesis, se establecen núcleos de alumnos con su asesor o asesores designados, lo que crea una acústica irregular con distintos emisores distribuidos a lo largo de la volumetría

generando acústicas variables con diferentes emisores en diferentes ubicaciones del espacio, produciendo comportamiento acústico errático. Después de analizar los resultados obtenidos podemos confirmar que el aula en cuestión no cuenta con las características adecuadas para un buen funcionamiento acústico. Las irregularidades en su forma y distribución no permiten un buen canal de comunicación, mientras que los materiales utilizados generan una alta reflectividad en la voz, disminuyendo la calidad de la conversación e incluso dificultando el entendimiento de la palabra y por lo tanto la inteligibilidad dentro del aula.

Para resolver los problemas acústicos del recinto, se propone un proyecto arquitectónico que atienda los principales problemas que generan las anomalías sonoras: eliminación de espacios y superficies irregulares, disminución de la altura y volumen del aula, mejorar la distribución espacial del mobiliario, mejorar el aislamiento acústico del exterior, sustituir materiales actuales por sistemas absorbentes/reflejantes posicionados estratégicamente para fomentar la direccionalidad del sonido.

**PROPUESTA DE
PROYECTO**

4



4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para llevar a cabo el proyecto, se realizó un compendio de las características necesarias para la adecuación acústica de un espacio educativo tomando en cuenta las diferentes normativas existentes para crear una solución lo más integral posible, dividiéndolas en diferentes rubros que fueron tratados punto por punto para la elaboración de la propuesta.

El primer aspecto a evaluar será el Tiempo de Reverberación (RT), cuya fórmula empírica (1.2) fue propuesta por W.C. Sabine, y mencionada anteriormente en este documento:

$$RT = \frac{0.05 V}{(S_1 \alpha_1) + (S_2 \alpha_2) + (S_n \alpha_n)}$$

(1.2) donde RT es el tiempo de reverberación, V es el volumen del espacio, S es la superficie que ocupan los materiales dentro del espacio y α es el coeficiente de absorción de cada material

Las consideraciones necesarias son las siguientes: 1) Si una superficie cubre otra, o casi completamente la cubre, solo se necesita tomar en cuenta la superficie visible; 2) Señalética, luminarias y accesorios pueden ser omitidos del cálculo para el tiempo de reverberación; 3) Sustituir el valor de los materiales cuando se requiera. Los fabricantes proporcionan un valor

de coeficiente de absorción para sus materiales, sin embargo, en etapas tempranas de diseño cuando no se ha decidido que material se utilizará, no sabremos que valor ocupar. En estos casos, se puede sustituir el valor por el de un material de masa, textura o montaje parecido al que se planea usar; 4) Promediar el coeficiente de absorción de dos materiales si no tenemos seguro cuál se va a utilizar; 5) Ser preciso al calcular el volumen del aula, ya que una subestimación de la absorción del vidrio no tienen un cambio significativo dentro del tiempo de reverberación de un espacio, sin embargo una subestimación en el volumen del aula puede cambiar el valor del tiempo de reverberación significativamente; 6) Se deben considerar las orillas de los asientos cuando se calcule el área de la audiencia, en este caso, de los alumnos. Si una fila de personas está sentada en un pasillo con un lateral expuesto, se debe incluir el largo del pasillo en la consideración del valor de absorción, lo que automáticamente ajusta el valor de la porción visible de audiencia en la elevación del recinto.

El segundo aspecto a evaluar es la morfología del recinto. En el caso de los espacios dedicados al habla, se buscan reflexiones tempranas

que eleven la inteligibilidad de la voz para el mejor entendimiento, llegando a las siguientes consideraciones de diseño: 1) El emisor y receptor deben estar en el mismo espacio volumétrico, se deben evitar moquetas o salientes que impidan la impresión espacial; 2) Definir la geometría del espacio de tal manera que se fomenten las reflexiones tempranas para aumentar la fuerza y claridad del sonido; 3) El espacio debe fomentar las reflexiones laterales o superiores mediante el plafón; 4) Limitar el ancho del espacio para mejorar las reflexiones tempranas, mejorando la fuerza, impresión espacial, claridad, intimidad del sonido y prevenir la presencia de defectos acústicos; 5) Limitar el largo del espacio para colocar al mayor número posible de receptores cerca de la fuente sonora; 6) Limitar el tamaño del recinto, siendo el principal factor a considerar la altura del espacio; 7) Tratar el muro posterior, ya que es la principal fuente de eco. Debe ser minimizado mediante difusores o plafones.

El tercer punto a evaluar son el tipo de superficies que encontramos dentro del espacio, y cuyas condiciones de diseño son: 1) Diseñar el espacio de la audiencia considerando su acústica, ya que las reglas acústicas básicas definen que la

absorción necesaria dentro de un aula se cubre con la audiencia; 2) Se debe reflejar el sonido de baja frecuencia usando materiales masivos, montados sobre el muro y sin cámaras de aire. Se recomienda utilizar yeso de mínimo 2cm de espesor, block de concreto o concreto pulido. La madera y ensambles como la tabla de yeso o cemento absorben el sonido de baja frecuencia y causan problemas con la calidez del sonido; 3) Detallar superficies irregulares utilizando curvas convexas, superficies dentadas o anguladas sobre columnas, pilastras, salientes, repisones y demás superficies. Ésto protege contra ecos, ecos flotantes y otros defectos acústicos; 4) Tomar en cuenta acústicas variables usando superficies retráctiles o móviles para dar un ángulo más variado de tiempos de reverberación dentro del espacio.

El cuarto punto a especificar será una lista general de elementos comunes dentro de cualquier espacio arquitectónico, y son: 1) Limitar el sonido de fondo, especialmente de sistemas mecánicos y espacios adyacentes; 2) Considerar un refuerzo sonoro electrónico sutil para nuestro espacio.

El quinto punto a discutir será específico para las aulas en los espacios educativos. 1) Diseñar

espacios en forma de abanico para acercar más a la audiencia hacia el ponente, con ángulos menores a 125°, o espacios rectilíneos que promuevan reflexiones laterales y mantengan la línea de visión entre la audiencia y el ponente;

- 2) Biselar las esquinas del lado emisor para evitar ecos flotantes con los muros de fondo;
- 3) Colocar materiales absorbentes con un área igual a la del piso, no todo tiene que ser colocado en el plafón;
- 4) Mantener el plafón bajo y con una superficie reflejante para que el volumen del aula sea de entre 2.2 a 4.2 m³ por asiento;
- 5) Reconocer que el habla no es percibida a más de 10m de la fuente sonora sin un diseño acústico adecuado. Aulas con más de 100 asientos deberán contar con refuerzo sonoro electrónico;
- 6) Usar cierres automáticos de puertas sin pestillos para evitar interrupciones por quien llegue tarde al aula;
- 7) Asegurar superficies reflejantes en la parte media del plafón y los muros cerca del emisor para beneficiar las reflexiones tempranas;
- 8) Utilizar muros que separen completamente las aulas, evitar muros con espacios en la parte superior.

El sexto punto a tratar será el ruido por flanqueo.

- 1) Calafatear en áreas donde se deba sellar el

espacio como juntas de muro con piso, juntas de muro con losa, ductos de instalaciones, contactos, apagadores, entre otros;

- 2) Hacer pruebas de efectividad de ensamblaje de muros y plafón previo a completar la construcción del espacio para asegurar el aislamiento acústico;
- 3) Ubicar contactos, salidas telefónicas, apagadores, salidas de TV y otras instalaciones en un solo lado del muro para evitar filtraciones de sonido desde otros espacios;
- 4) Utilizar cajas eléctricas de plástico con barrera para vapor ya que funcionan mejor que las metálicas;
- 5) Tomar en cuenta las juntas constructivas en el diseño acústico, ya que se pueden disminuir el cuarteo de los muros y la filtración de sonido posterior al término de la construcción;
- 6) Unir las superficies del espacio a la estructura mediante materiales resistentes no rígidos. Por ejemplo, el hueco de los pernos en un muro de tabla de yeso;
- 7) Especificar clips de aislamiento acústico resistentes con canal de sombrero para sistemas de paneles;
- 8) Evitar persianas en las puertas de los recintos. Dejar bajo la puerta un espacio máximo de 2mm.

El séptimo punto es la privacidad acústica, y habla sobre el desempeño del ensamblaje. 1)

No confundir los términos absorción acústica y

pérdida de transmisión de sonido; 2) Especificar un ensamblaje que exceda el mínimo requerido. Los fabricantes ocupan el valor más alto obtenido en sus pruebas, pero no garantiza que sea el mismo resultado siempre; 3) Tomar en cuenta que las pruebas acústicas de los ensamblajes cuando son hechas en campo, serán más bajas que las hechas en un laboratorio.

El octavo punto abordado será el diseño para impacto. Éste se dividirá en 2 secciones: desempeño de ensamblaje y flanqueo. Para el desempeño de ensamblaje: 1) Evitar reflejos excesivos al utilizar madera ya que provoca ruidos secos o rechinidos cuando el espacio entre el piso flotante y la losa es muy pequeño; 2) Recordar que el aislamiento acústico no protege contra el ruido por impacto; 3) Utilizar pisos flotantes en superficies duras; 4) Utilizar plafones en todos los espacios, ya que ayudan a reducir el ruido por impacto que venga de la parte superior; 5) En construcciones de concreto, mantener un espacio de al menos 10cm entre el elemento estructural horizontal y el falso plafón, la medida recomendada es de 20cm; 6) Colocar fibra de vidrio en el espacio entre la estructura y el plafón. Para flanqueo: 1) Detallar las juntas de los elementos constructivos

con la estructura para evitar contacto mecánico directo que transmita el sonido; 2) Reconocer que las luminarias o ductos empotrados en los elementos estructurales pueden generar una posible filtración de sonido; 3) Detallar el plafón de manera que no haga contacto mecánico directo con los muros para evitar transmisión por vibración.

El noveno punto a tratar serán las barreras exteriores. 1) Colocar barreras exteriores lo más cerca posible dentro de lo razonable hacia el emisor o receptor, asegurando sombra para ambos; 2) Diseñar barreras para que mínimo logren romper la línea de visión; 3) Extender las barreras mínimo 4 veces la distancia entre el emisor y la barrera; 4) Evitar quiebres en las barreras que comprometan su efectividad; 5) Tomar en cuenta las reflexiones de las barreras; 6) En el caso de dos barreras, una en cada lado del espacio, evitar que sean paralelas y colocar un acabado absorbente para evitar ecos y ecos flotantes.

El décimo punto será el ruido ambiental. Será dividido en dos rubros: sitio y diseño. Para sitio: 1) Reconocer que algunos sitios son demasiado ruidosos para cierto tipo de edificios, aún cuando la normatividad lo permita; 2) Considerar las

necesidades de los ocupantes; 3) Ser precavido con zonas de tranquilidad aceptable pero ruidos fuertes periódicos. Los ruidos intermitentes son más molestos que los permanentes; 4) Tomar en cuenta que un sitio silencioso puede no quedarse así por siempre; 5) Aprovechar barreras naturales como cerros o frondas para interrumpir el sonido directo que pueda afectar al edificio; 6) Utilizar asfalto silencioso, el cual reduce el ruido del pavimento por 5 a 10 dB, lo cual equivale a tener una barrera acústica efectiva en un 70%. Para diseño: 1) Ubicar espacios como bodegas, estacionamientos y áreas de mantenimiento como áreas buffer para reducir el ruido; 2) Orientar espacios tranquilos con las ventanas hacia el lado contrario de las fuentes sonoras; 3) Ubicar las puertas de acceso de los edificios del lado silencioso, evitando rejillas para el correo, puertas para mascotas y similares; 4) Utilizar cancelería gruesa, utilizando doble vidrio donde se pueda y tomando en cuenta que al abrir la ventana se pierde todo aislamiento; 5) Utilizar lastre de grava o cubiertas verdes donde el ruido por impacto de lluvia sea una preocupación; 6) Mantener equipo como ventiladores, extractores, compresoras, enfriadoras, generadores,

transformadores y basureros fuera de la línea de visión y de las ventanas.

La siguiente consideración sería el ruido mecánico, que se divide en cuatro partes: ventiladores, ductos, control de vibración y ruido en aparatos.

Por ventiladores: 1) Especificar sistemas de alta eficiencia y baja presión estática ya que ventiladores que no funcionan adecuadamente generan hasta 15 dB más; 2) Utilizar escapes silenciosos, cuyo nivel de ruido es de 40 dB; 3) Seleccionar sistemas con velocidades variables en respuesta a la cantidad de aire necesario.

Para ductos: 1) Usar conexiones elásticas entre ductos para reducir la vibración; 2) Especificar ductos rectangulares de calibre delgado para mejorar la reducción de ruido, ya que su forma es mejor que la geometría circular para absorber energía sonora; 3) Reconocer que los ductos forrados interiormente son muy efectivos para la reducción de ruido; 4) Equipar el regreso de aire con silenciadores y control de ruido similar, ya que el ruido se mueve en ambas direcciones;

5) Mantener velocidades en los silenciadores menores a 10 m/s, ya que con altas velocidades pueden producirse silbidos. Para control de vibración: 1) Reconocer que el sonido viaja

en forma de vibración a través de elementos estructurales como columnas, losas y trabes; además, puede viajar tan lejos como el sonido aéreo; 2) Usar juntas estructurales o estructuras independientes para separar secciones del edificio con equipo que genere vibración; 3) Utilizar conduit flexible para la tubería eléctrica que abastezca al equipo que genera vibración; 4) Usar pisos flotantes y plafones con varias capas de aislamiento cuando coloquemos equipo sobre un espacio sensible al ruido. Para el ruido en aparatos: 1) Comprar equipo silencioso; 2) Ubicar equipo como lavavajillas, secadoras, lavadoras, etc. sobre apoyos o plataformas y balancearlos para evitar vibración; 3) Evitar el uso de puertas automáticas en un garage si está cerca de un espacio sensible al ruido.

El último punto que se abordará es la instalación hidrosanitaria. Se divide en dos secciones: aislamiento de la estructura y diseño de sistemas. Para aislamiento de la estructura: 1) Usar soporte ligeramente más grandes que la tubería y rellenar el espacio sobrante con algún material aislante como neopreno; 2) Colocar tuberías sobre los elementos estructurales más masivos como muros de tabique o concreto; 3) Donde la tubería

atraviere un muro, colocar una manga de tamaño más grande y rellenar con algún material aislante como neopreno, calafateando ambos lados del hueco para evitar transmisión de ruido por la apertura. Por diseño de sistemas: 1) Usar tubería de hierro forjado en lugar de PVC, ya que son más silenciosas para plomería. Para abastecimiento utilizar PVC; 2) Reconocer que algunos muebles de baño asistidos por presión son más ruidosos que otro tipo de muebles; 3) Mantener la presión general de las tuberías del edificio menores a 50 psi y los ramales principales menores a 35 psi, para esto se utilizan reguladores o reductores de presión; 4) Calcular adecuadamente el tamaño de las tuberías para evitar la sobrevelocidad y presión excesiva. La velocidad promedio debe ser de 2 m/s; 5) Diseñar conectores flexibles para equipos que produzcan vibración como bombas, lavadoras, unidades de aire acondicionado y refrigeradores; 6) Encajillar tuberías de abasto de diámetro grande con insulación de fibra de vidrio.

Utilizando los parámetros definidos por el checklist anterior, se logró definir una propuesta arquitectónica para el caso de estudio que aborde todos los problemas acústicos de manera que pueda funcionar adecuadamente para todas las actividades llevadas a cabo dentro de él.

La propuesta consiste en los siguientes puntos:

1) TR cambiando materiales: sustituir tabique y concreto aparentes por yeso en una capa de 2cm espesor, reemplazar terrazo en el acabado de piso por un piso flotante utilizando concreto pulido abillantado como material, cubrir la losa aparente por plafón colgante conformado por paneles acústicos absorbentes y reflejantes, colocados de manera estratégica para mejorar la transmisión de voz.

2) Promover reflexiones tempranas quitando nichos bajo las ventanas, cubrir trabes y columnas con plafón y paneles que regularicen la superficie del aula, tratar el muro posterior para absorber sonido excesivo mediante paneles y difusores, colocar plafones curvos convexos que reflejen el sonido hacia donde se desea y biselar área del emisor principal mediante paneles desmontables y móviles que permitan flexibilidad acústica. 3) Limitar sonido de fondo: sustituir la cancelería

existente por ventanas dobles, y colocar una puerta especializada con cierre automático y asilamiento acústico.

4) Absorción: A pesar de ser cubierta con la audiencia, se pretende reforzar con materiales absorbentes usando la relación de volumen de $3m^3$ de aula por espectador.

5) Sellar cajas eléctricas e instalaciones, usar cajas de plástico con barrera de vapor y conduit flexible para evitar ruido por flanqueo.

6) Colocar el plafón a 20cm mínimo de la losa, con fibra de vidrio y sin contacto directo con muros para evitar vibración y ocupar luminarias colgantes para evitar empotramiento y transmisión de ruido por vibración.

7) Colocar Lastre de grava en la cubierta para evitar ruido por impacto.

8) Utilizar Bases especiales absorbentes de vibración para elementos electrónicos como el proyector.

9) Reforzar el muro del lado este del aula y muro del lado sur mediante una doble membrana que retenga el sonido exterior.

10) Tuberías encajilladas con relleno de neopreno para evitar vibración en elementos estructurales.

De acuerdo a las modificaciones mencionadas en el apartado anterior, se obtuvo un modelo 3D con la nueva propuesta que nos permitió obtener las superficies para llevar a cabo los cálculos correspondientes de Tiempo de reverberación.

Se utilizan las mismas tablas y fórmulas que en el apartado de mediciones acústicas del Capítulo 2.

El proyecto realizado para el caso de estudio fue realizado con la premisa del rediseño morfológico y acústico para la optimización de su funcionamiento en ambas modalidades de uso: como aula de clases y para asesorías en grupo.

En el ámbito de forma, se evitan puntos acústicos muertos mediante el encubrimiento de los espacios debajo de las ventanas en la sección interior de la fachada de acceso, así como la inclusión de paneles a 45° en las esquinas noreste y noroeste del recinto para propiciar las reflexiones tempranas del sonido hacia los alumnos.

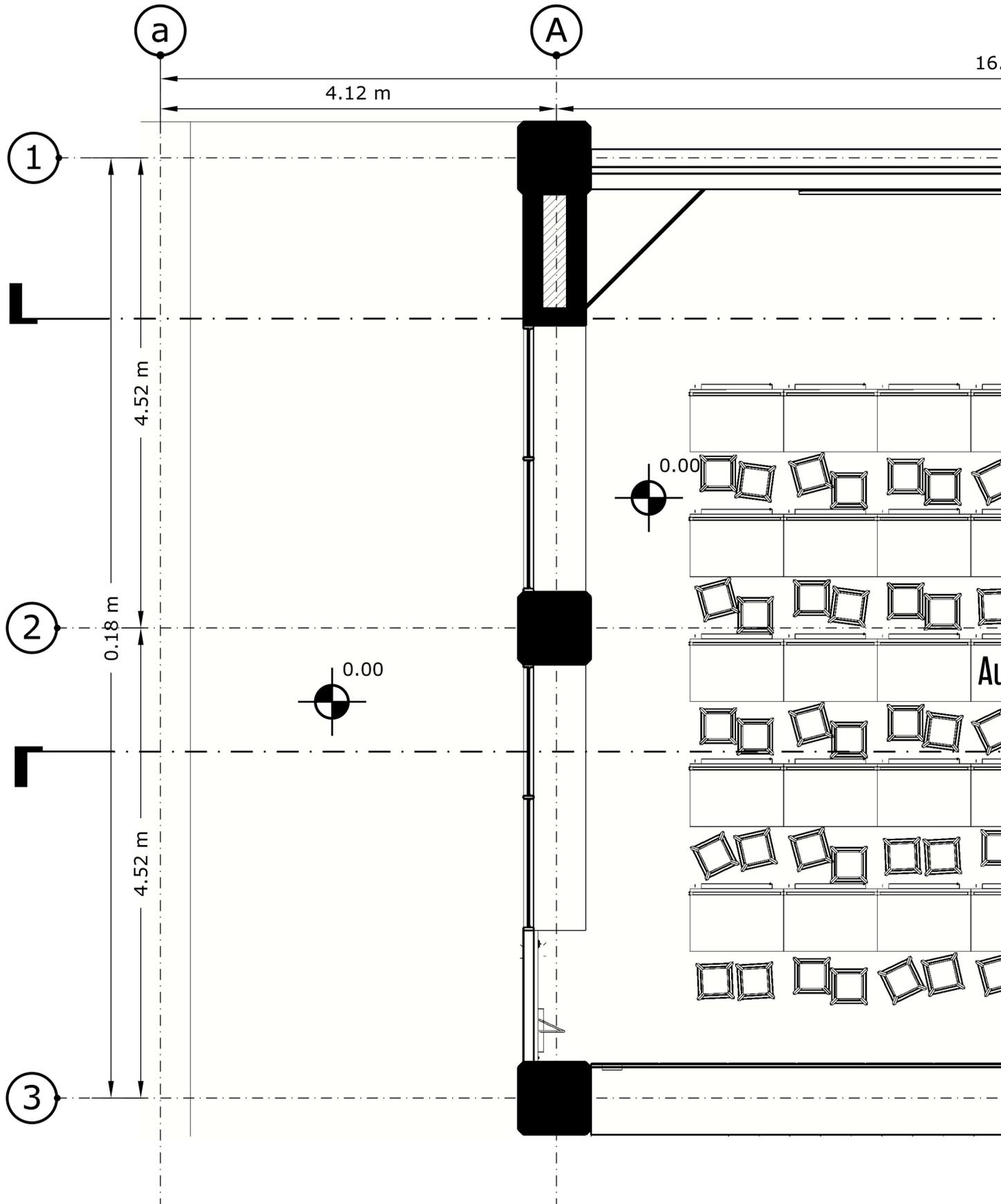
La altura del espacio es reducida mediante un plafón de sistema prefabricado cuyos paneles son intercalados entre reflejantes y absorbentes para mejorar la inteligibilidad del habla y reducir frecuencias molestas, así como mejorar la calidad

de la voz. Se introducen ventanas de mayor altura sobre la fachada posterior, permitiendo una mejor iluminación y ventilación del aula.

Las instalaciones previamente aparentes se ocultan por encima del plafón colocado o se oculta dentro de los muros y losa base, evitando vibraciones innecesarias. El muro anterior del salón fue tratado con paneles multiperforados y con relleno de lana mineral y espuma acustovibratoria, de igual manera que las ventanas y puerta de acceso al espacio cuentan con aislamiento acústico mediante mecanismos de cámara de aire con doble vidrio y sellos de aire en las uniones entre elementos estructurales y cancelería, así como cancelería y vidrio en la parte interior de los armados.

Los acabados utilizados dentro de la nueva propuesta favorecen la reflexión del sonido, y respetan la paleta de colores previamente existente dentro del diseño original de la Facultad de Arquitectura, pero aportando un nuevo enfoque visual que permita una imagen que represente el cambio que se ha llevado a cabo hacia un mejor futuro en la educación.

4.2. PLANOS ARQUITECTÓNICOS - PLANTA ARQUITECTÓNICA



68 m

12.56 m

B

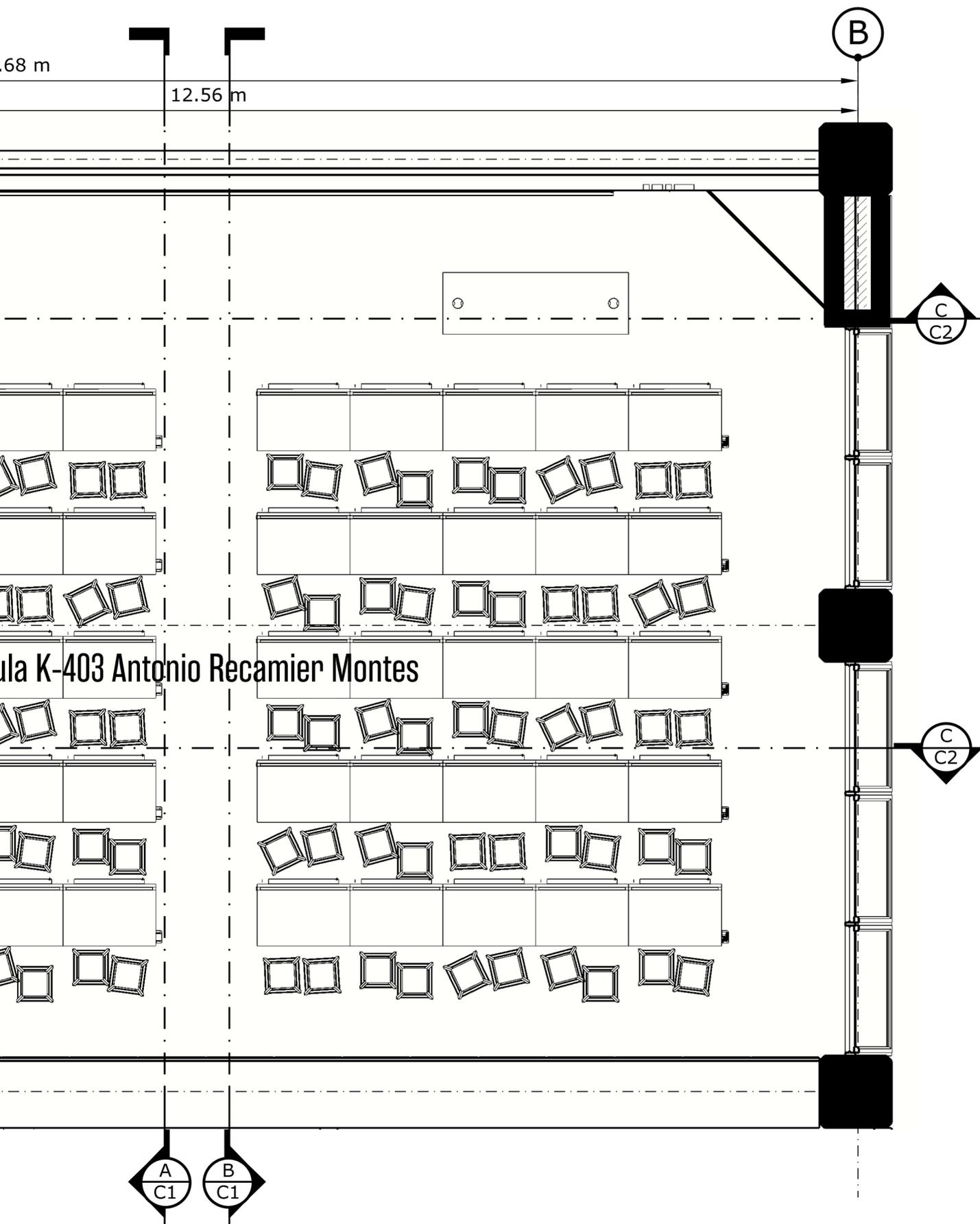
C
C2

C
C2

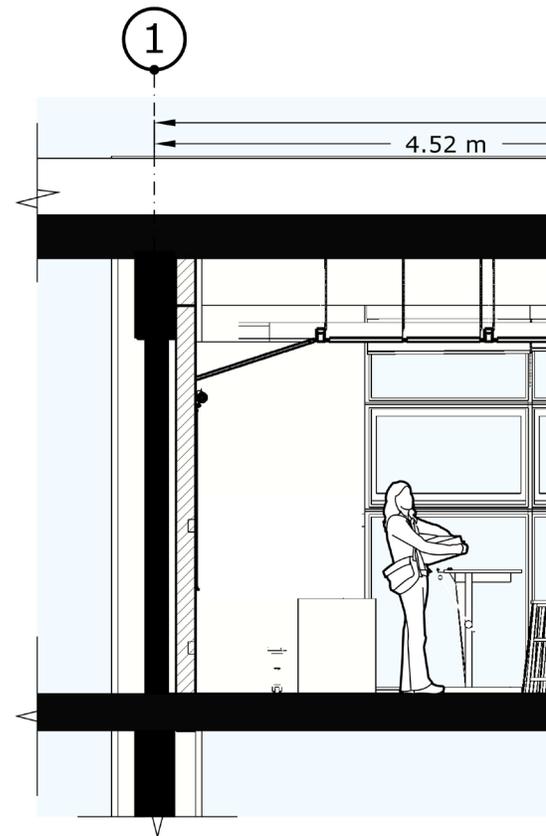
ula K-403 Antonio Recamier Montes

A
C1

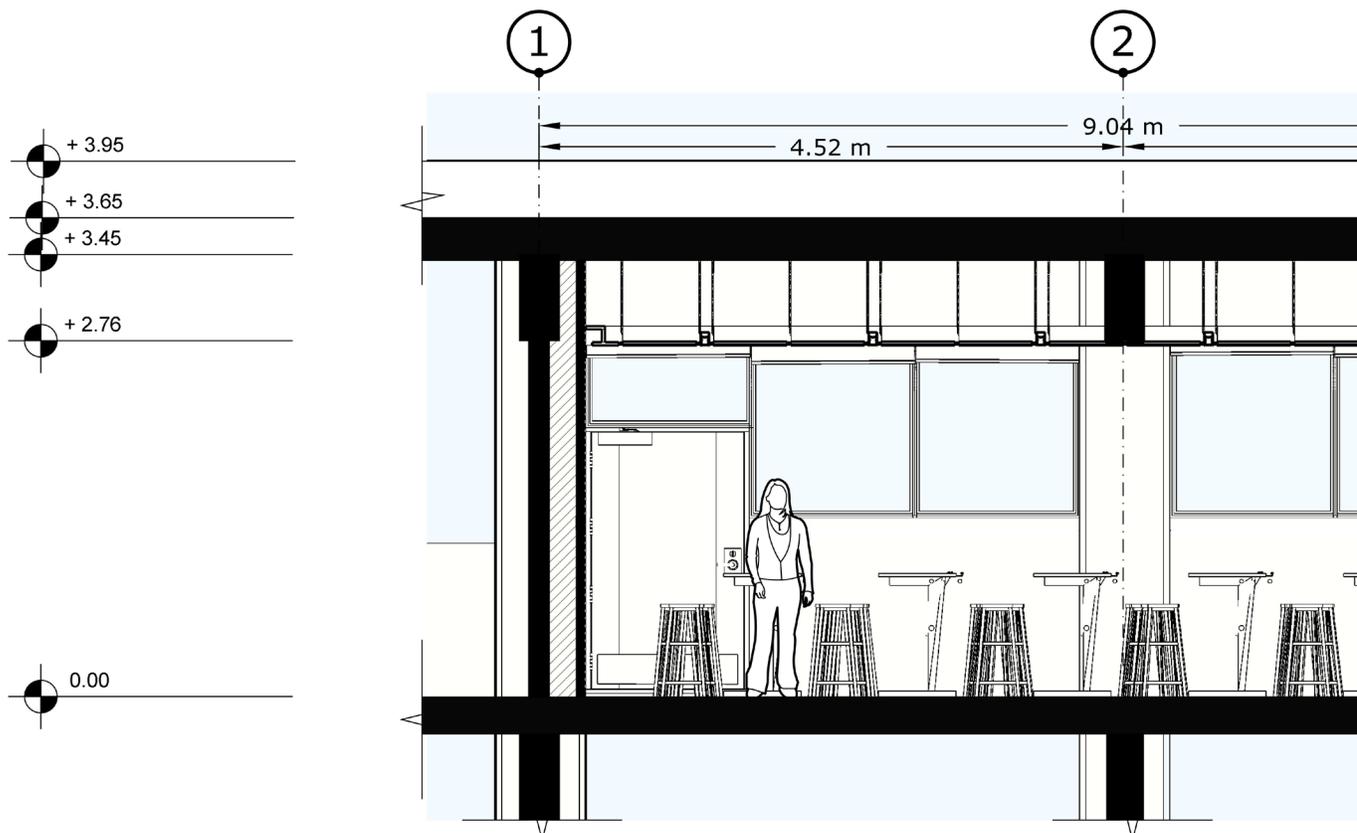
B
C1

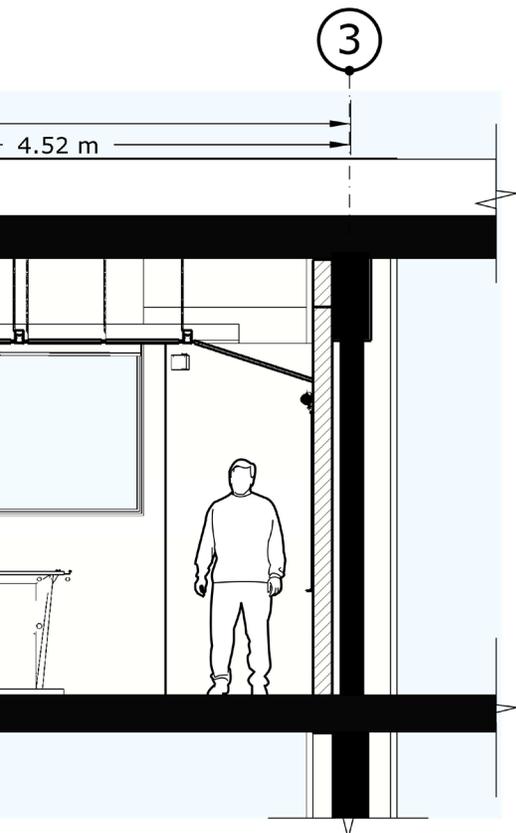
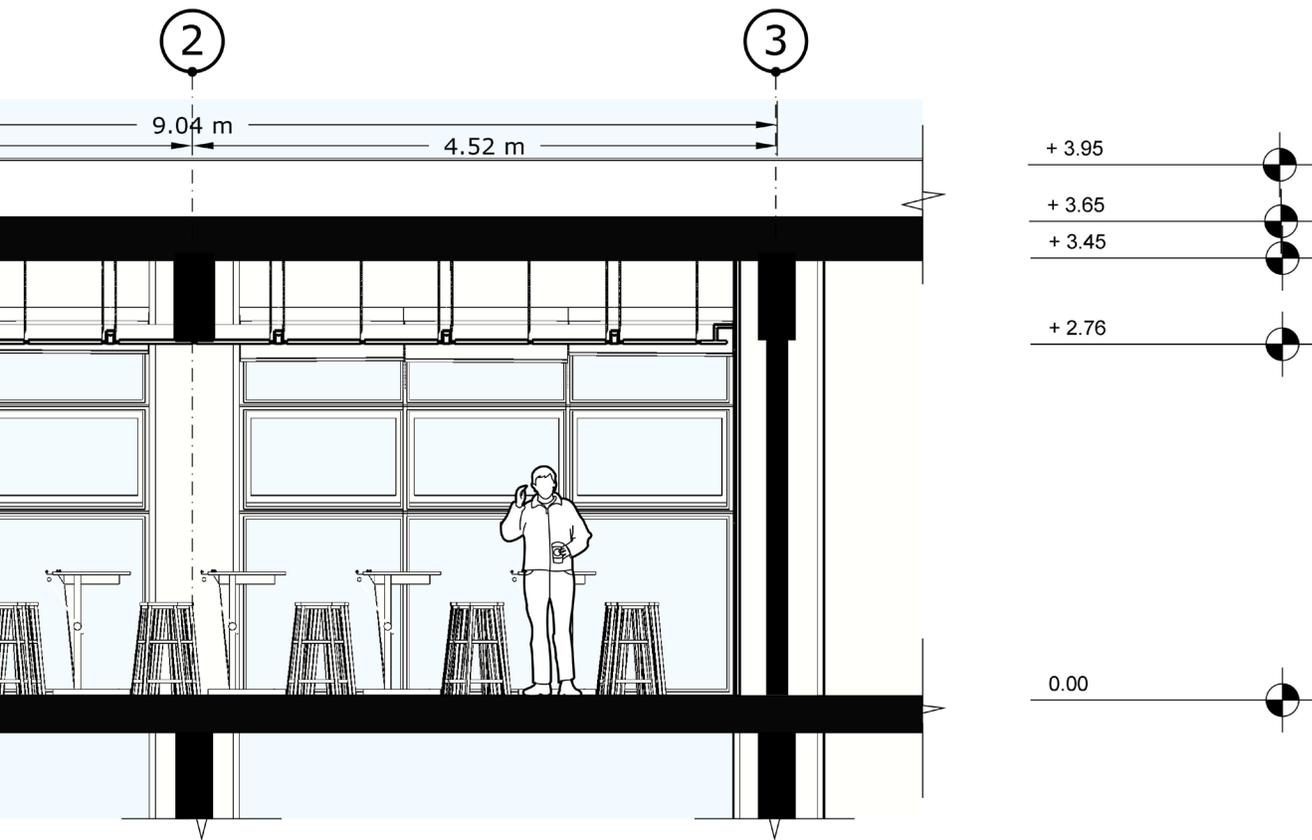


4.2. PLANOS ARQUITECTÓNICOS - CORTES ARQUITECTÓNICOS



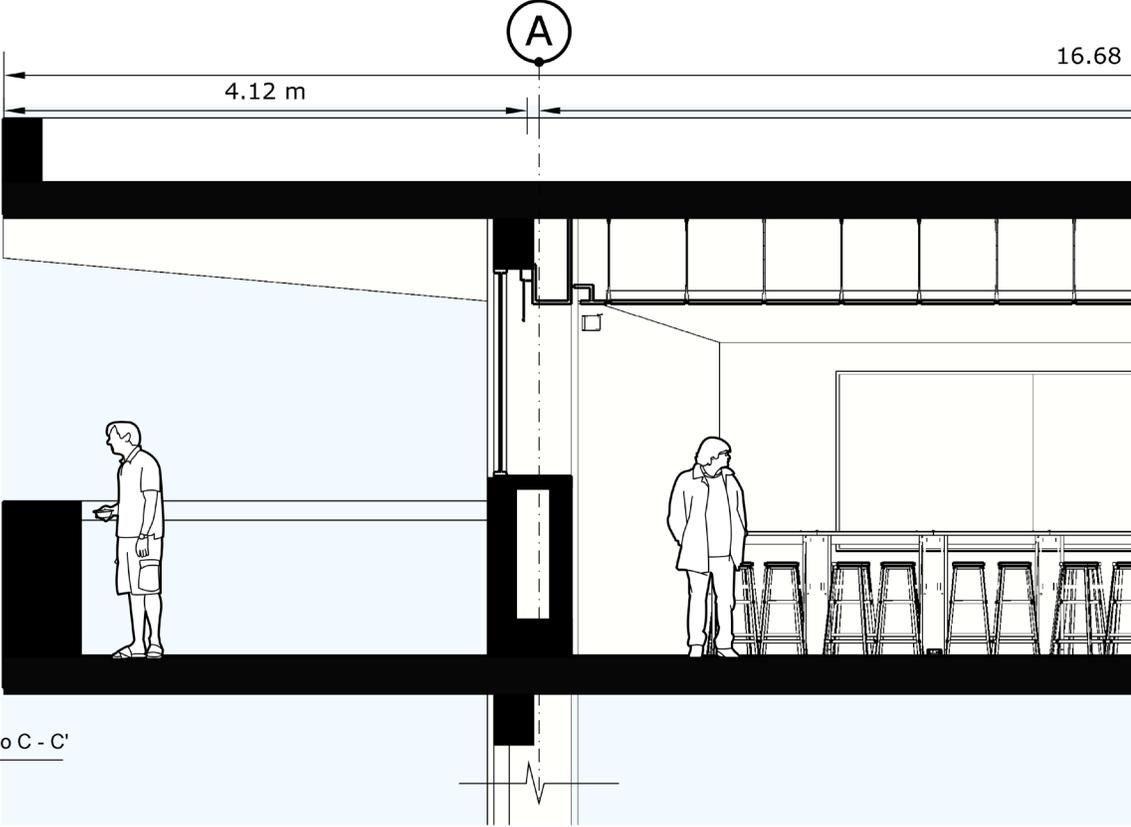
A Corte Arquitectónico A - A'
A01 Escala: 1 : 50



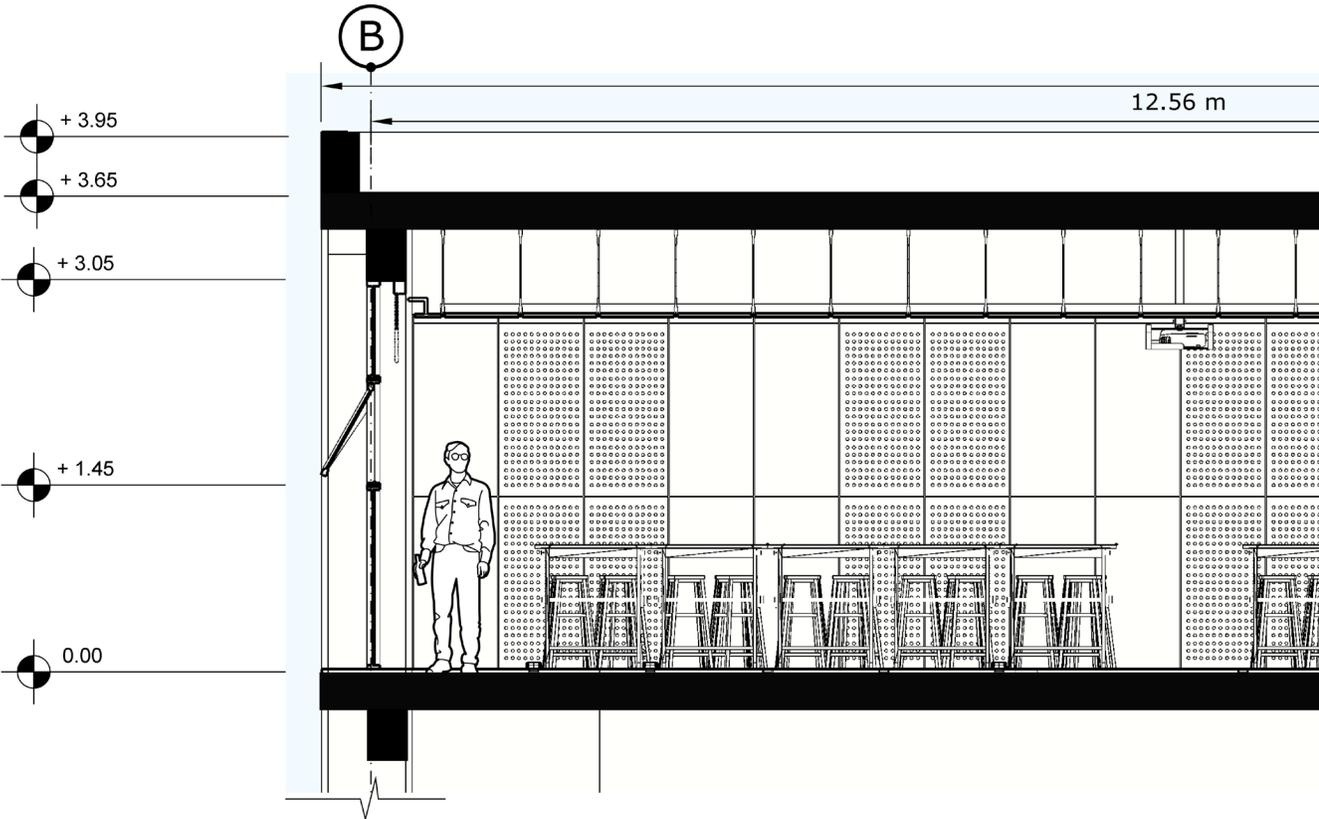


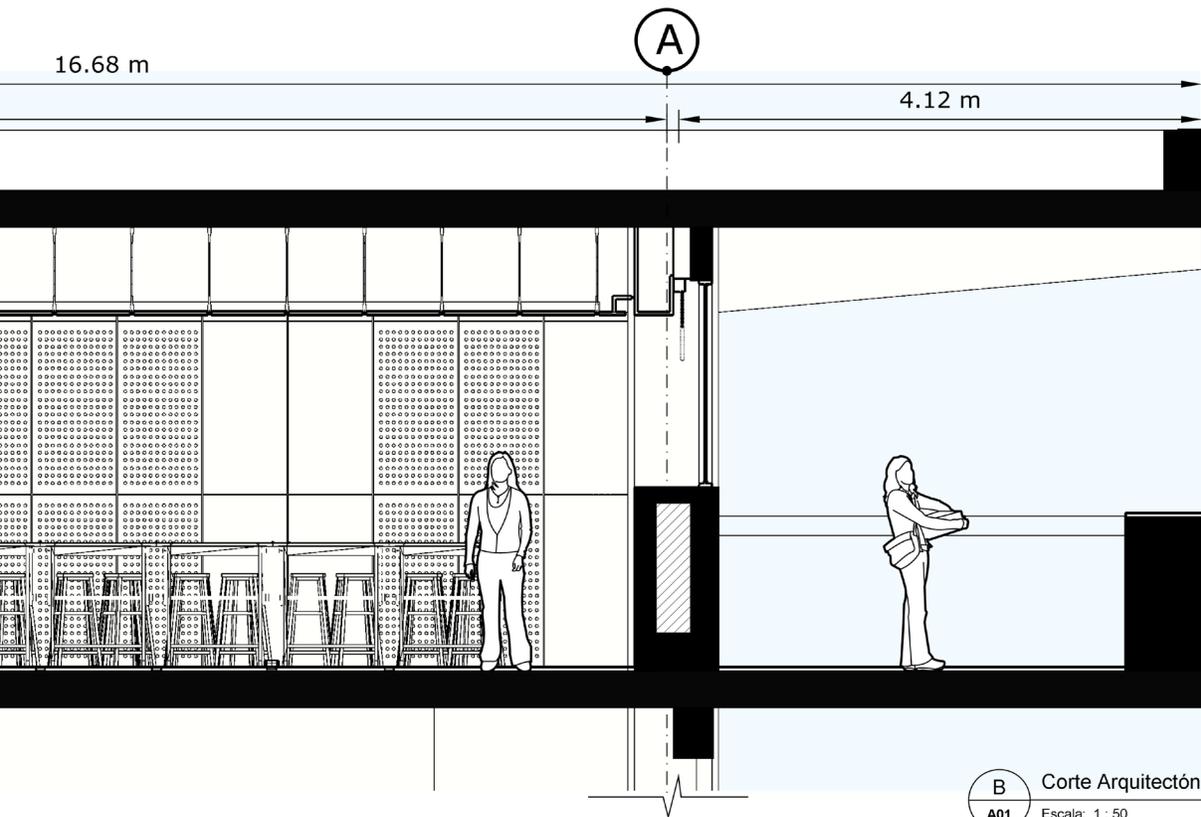
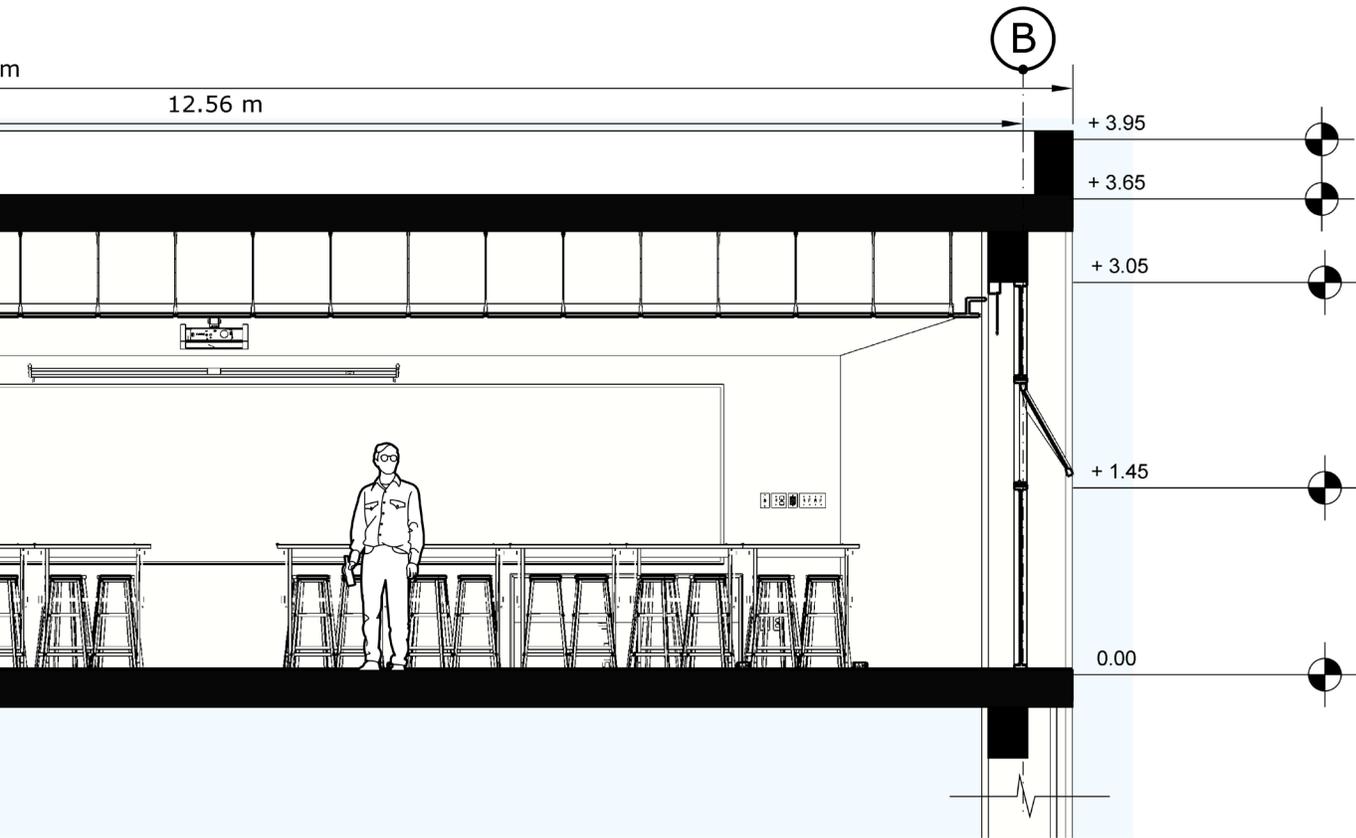
B Corte Arquitectónico B - B'
A01 Escala: 1 : 50

4.2. PLANOS ARQUITECTÓNICOS - CORTES ARQUITECTÓNICOS



C Corte Arquitectónico C - C'
A01 Escala: 1 : 50

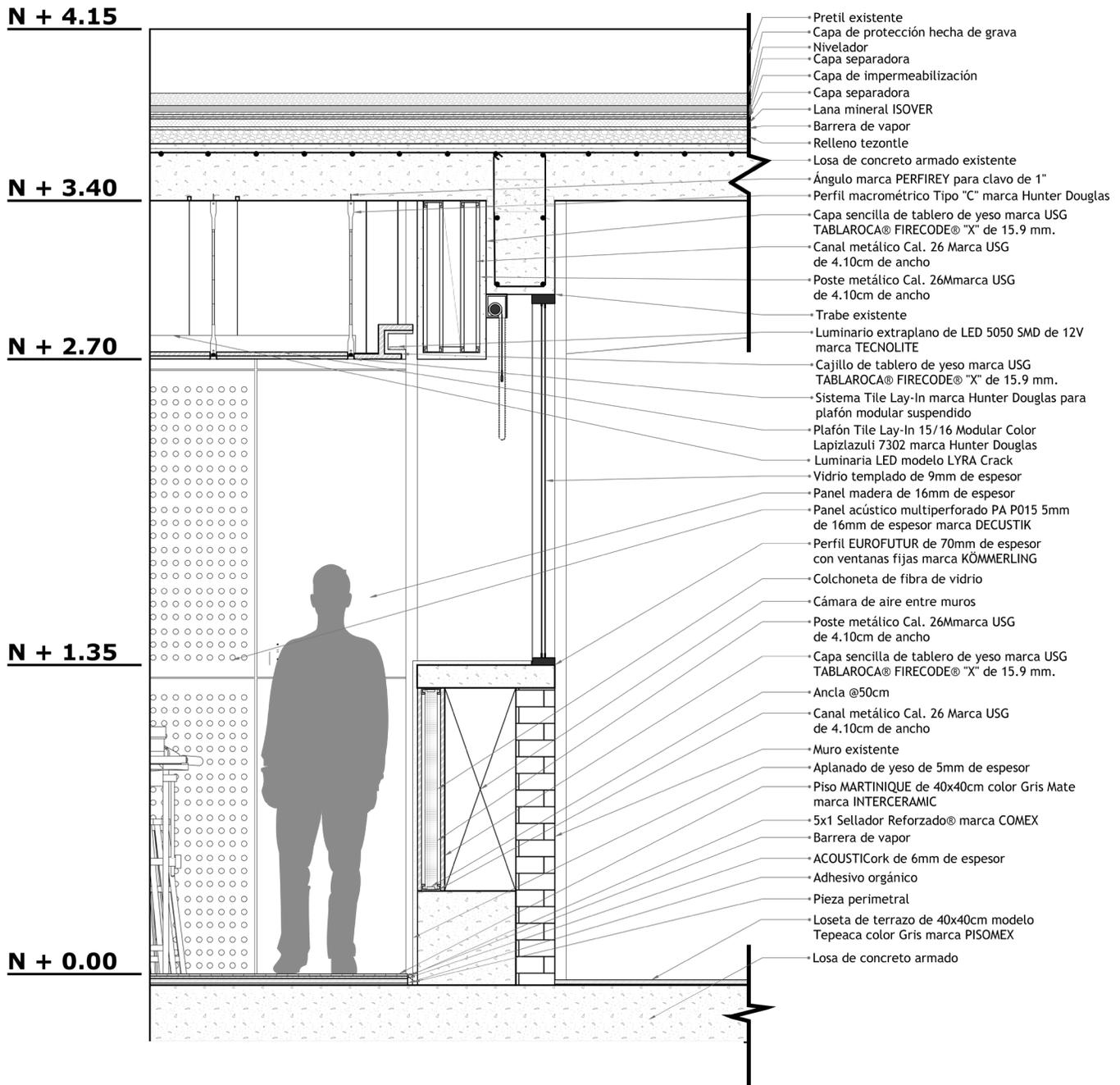




B Corte Arquitectónico B - B'

A01 Escala: 1 : 50

4.2. PLANOS ARQUITECTÓNICOS - CORTES POR FACHADA



01 Corte por Fachada
A00 escala 1:10

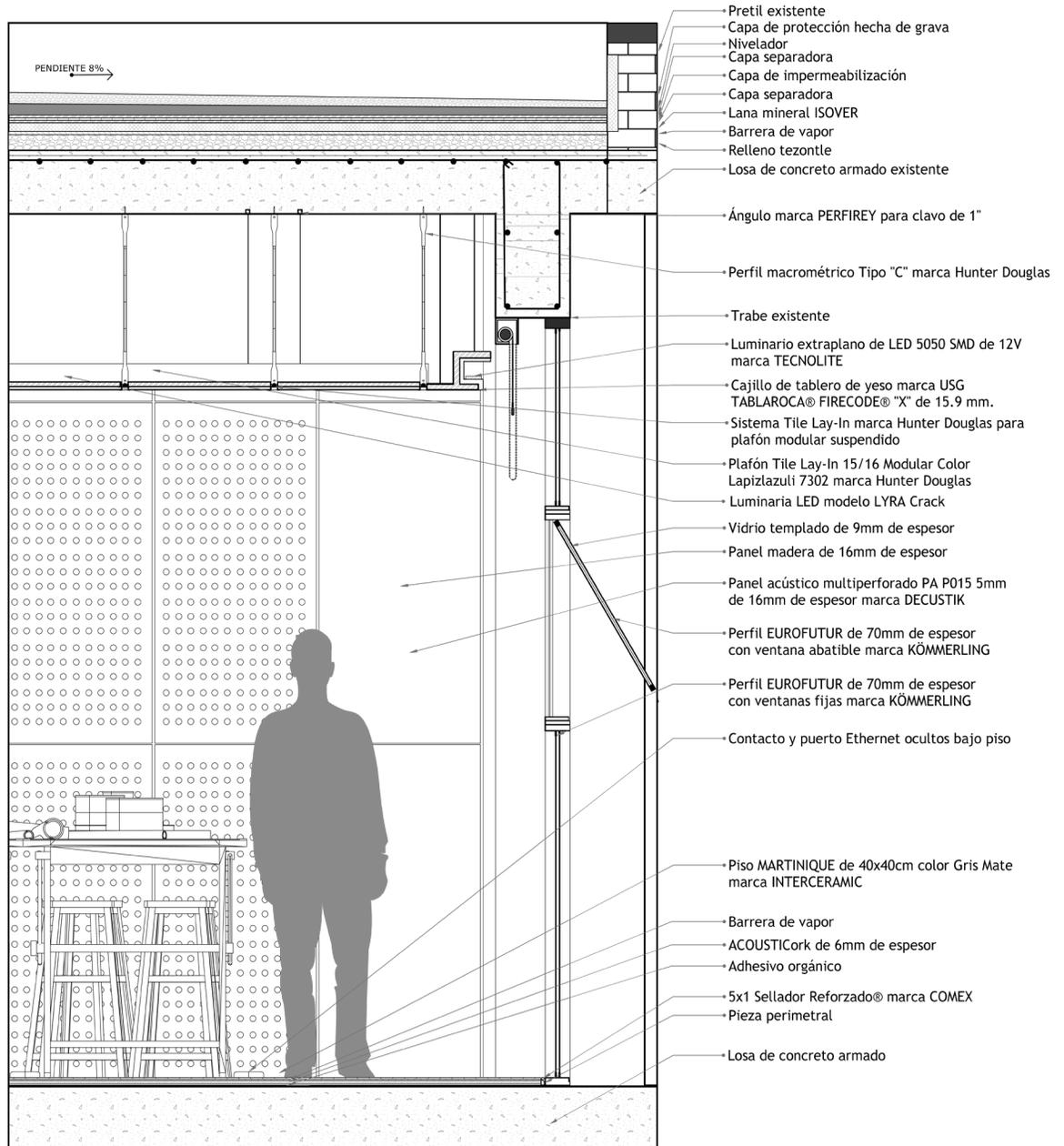
N + 4.15

N + 3.40

N + 2.70

N + 1.35

N + 0.00



02 Corte por Fachada
A00 escala 1:10

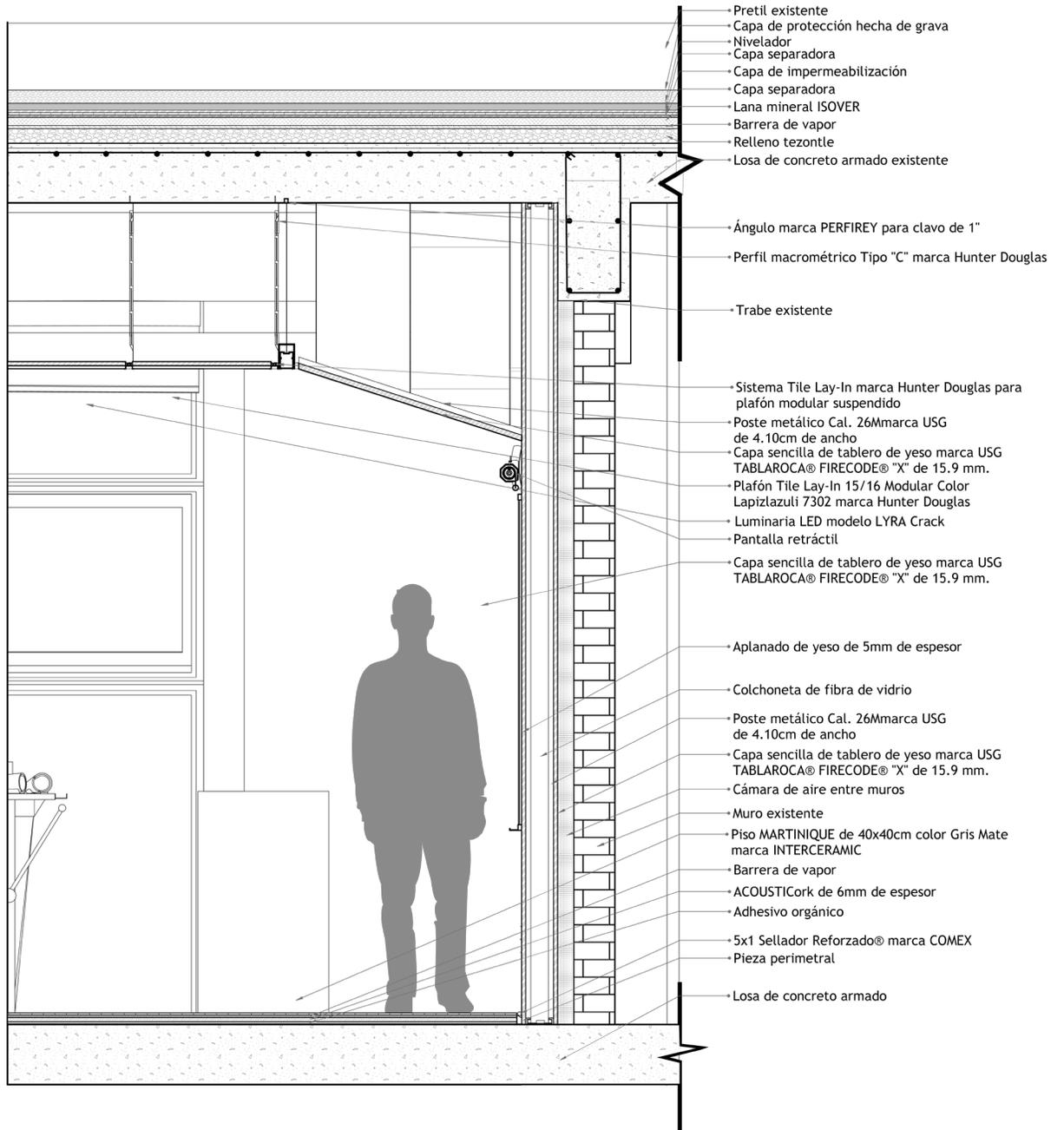
N + 4.15

N + 3.40

N + 2.70

N + 1.35

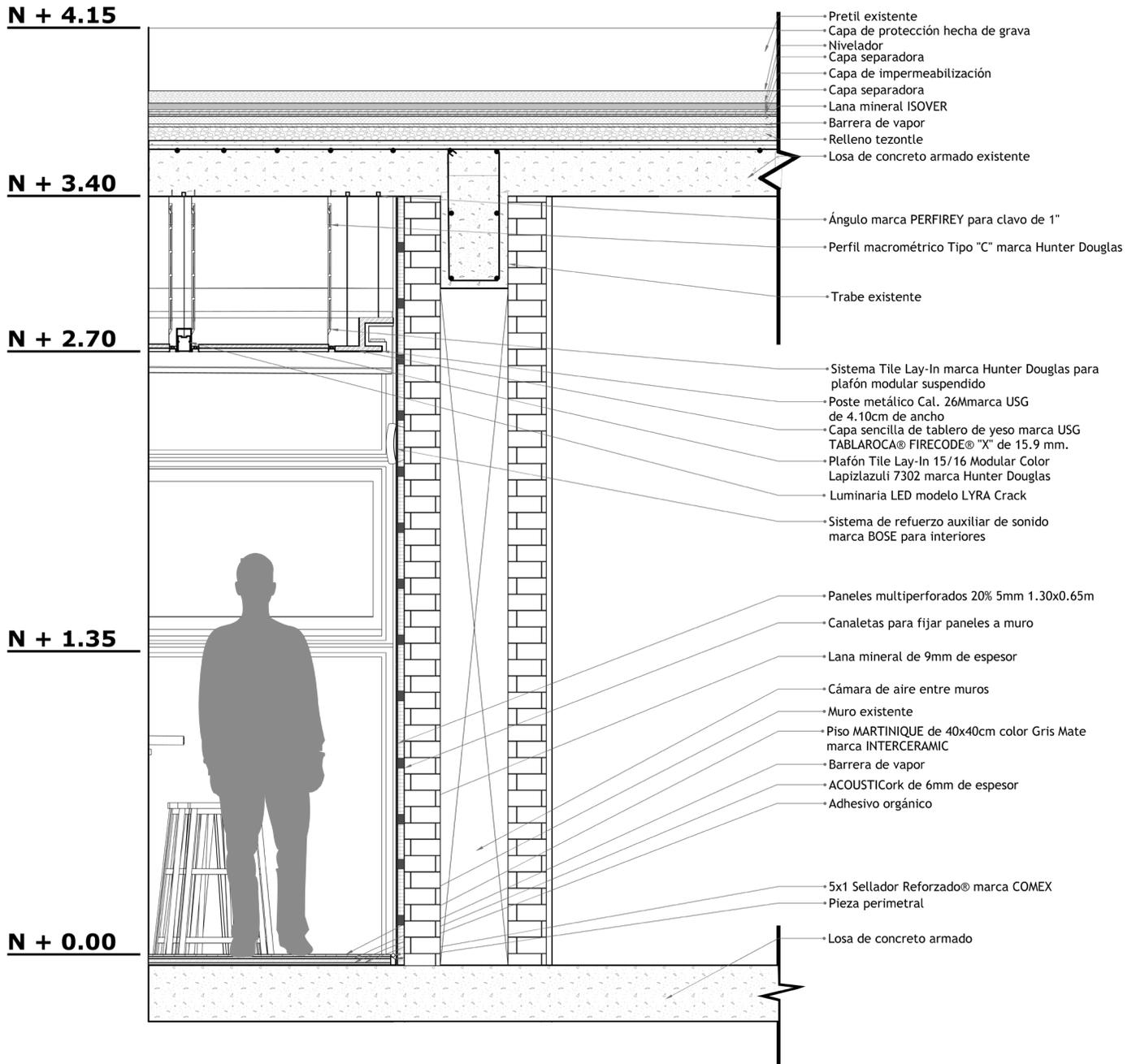
N + 0.00



03
A00

Corte por Fachada

escala 1:10



04 Corte por Fachada
A00 escala 1:10

4.3. RENDERS



Figura 13. Fachada principal de propuesta



Figura 14. Vista hacia muro posterior



Figura 15. Vista desde fachada de ventilación



Figura 14. Vista hacia área de profesor



Figura 17. Vista hacia fachada de acceso

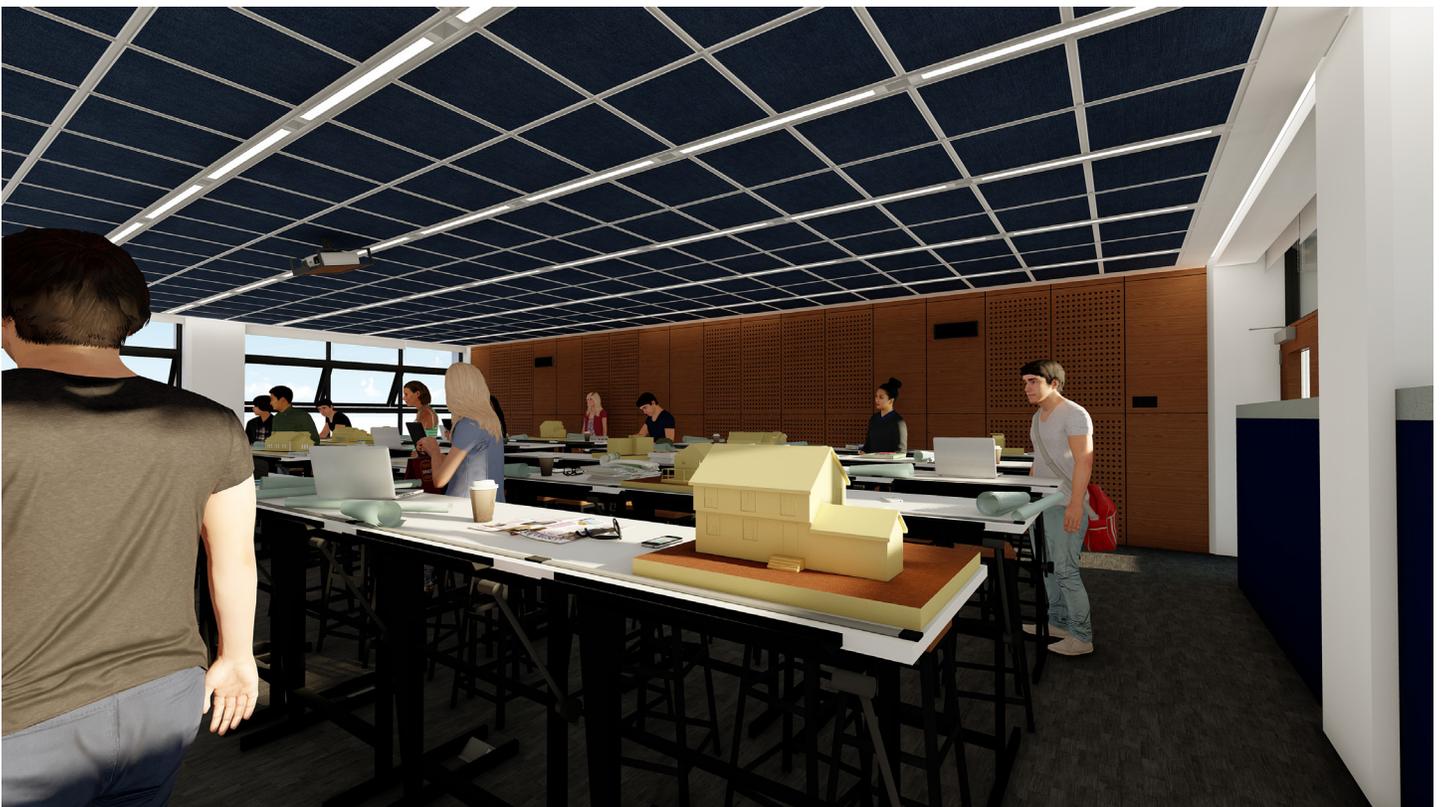


Figura 18. Vista desde fachada de acceso



Figura 19. Vista desde fachada de acceso



Figura 20. Vista desde acceso al aula

4.4. PRESUPUESTO DE OBRA

CLAVE	SUB CLAVE	PARTIDA	UNI-DAD	CANT.	P.U.	COSTO
OP		OBRAS PRELIMINARES				
	OP001	Desmontaje de marcos metálicos y cajones de madera para puertas, incluye: apile del material en el lugar.	pza.	1.00	250.00	\$ 250.00
	OP002	Desmontaje de vidrios hasta 9 mm. de espesor, a una altura de 4.00 m., incluye: apile del material en el lugar.	m2	19.79	\$28.27	\$ 559.51
	OP003	Desmontaje cancelería de aluminio, hasta 4.00m una de altura, incluye: apile del material.	m2	6.73	\$28.27	\$ 190.27
	OP004	Demolición a mano de pisos de loseta de terrazo incluyendo mortero; incluye apile de material demolido en el lugar.	m2	106.28	\$18.94	\$ 1,012.94
	OP005	Demolición de elementos de concreto armado por medios mecánicos hasta 4.00 m. de altura, incluye: mano de obra, utilización de la herramienta y/o equipo necesario, traspaleos.	m3	1.25	\$282.72	\$ 353.40
	OP006	Tapial provisional de 2.44 mts de altura, de tabalaroca de 13 mm a base de bastidor de polín de madera de pino de 3 1/2' x 3 1/2' x 10'. Incluye material, mano de obra, herramienta, equipo y todo lo necesario para su correcta ejecución.	mL	7.75	\$128.68	\$ 997.27
	OP007	Acarreo en carretilla a 1a. estación 20.00 m. de distancia horizontal incluye: carga a pala en costales, hasta 3.50 m. de altura y acarreo a 20.00 m.	m3	12.00	\$47.12	\$ 565.44
	OP008	Acarreo subsecuente al 1o. en carretilla a 1a. estación 20.00 m. de distancia horizontal incluye: carga a pala en costales, hasta 3.50 m. de altura y acarreo a 20.00 m.	m3	12.00	\$13.85	\$ 166.20
	OP009	Limpieza general de zonas exteriores recolectando cascajo y basura. Incluye acarreo en carretilla a centro de acopio, carga manual y acarreo en camión fuera de la obra, mano de obra, herramienta y equipo.	m2	150.00	\$23.76	\$ 3,564.00
	OP010	Transporte de cascajo en camión de 20 tons.	via-je	1.00	\$2,600.00	\$ 2,600.00
SUBTOTAL						\$ 11,259.04

			UNI-DAD	CANT.	P.U.	COSTO
ALB		ALBAÑILERÍA				
	ALB001	Muro de block de cemento de 20 x 20 x 40., asentado con mortero cemento - arena 1:4, juntas de 1.5 cm. de espesor, acabado común, hasta una altura de 4.00 m., incluye: acarreo de los materiales a 1a. estacion a 20.0 m. de distancia horizontal.	m2	7.61	\$257.32	\$ 1,958.21
	ALB002	Losa de concreto fabricado en obra f'c = 250 kg/cm normal para remate de muro, incluye: preparación de la superficie, pasajuntas, sellado de juntas, curado.	m3	0.22	\$451.88	\$ 99.41
	ALB003	Muro interior panel TABLAROCA® FIRECODE® "X" , con 2 paneles de 15.9mm de esp. con bastidor a base de poste y canal liston de 9.20 cm cal. 26, ancho de muro 12.00 cm, relleno con colchona de lana mineral, sellado de juntas a base de compuesto redimix y perfacinta. Incluye: materiales, mano de obra y herramienta.	m2	6.88	\$192.51	\$ 1,324.47
	ALB004	Muro interior panel TABLAROCA® FIRECODE® "X" a 1 cara , con 2 paneles de 15.9mm de esp. con bastidor a base de poste y canal listón de 9.20 cm cal. 26, sellado de juntas a base de compuesto redimix y perfacinta. Incluye: materiales, mano de obra y herramienta.	m2	8.88	\$165.73	\$ 1,471.68
	ALB005	Falso plafón panel TABLAROCA® FIRECODE® "X" 15.9 mm de espesor, terminado en juntas a hueso con Perfacinta y compuesto redimix, a una altura de 3.00m. Incluye: bastidor para suspensión oculta a base de canaleta de carga 410 galvanizada calibre 22 de 38 mm (1 1/2") a cada 120 cm en un sentido, suspendidas a 75cm de la losa con alambre galvanizado calibre 14, canal listón galvanizado calibre 26 de 62.5 mm a cada 61 cm, amarrados a canaleta con alambre galvanizado calibre 18, en el otro sentido.	m2	10.27	\$165.73	\$ 1,702.05
	ALB006	Cajillo de remate en ventana a base de panel TABLAROCA® FIRECODE® "X" 15.9 mm de espesor, con un desarrollo de 1.20m, anclado a trabe pre existente, armado a base de perfiles con canales y postes de lámina galvanizada calibre 26 de 4.1 cms, incluye: suministro de todo los materiales, acarreos, elevaciones, cortes, desperdicios, fijación, esquineros, pasta y cinta de refuerzo de acuerdo al tipo de panel utilizado, mano de obra, equipo y herramienta.	mL	25.60	\$165.73	\$ 4,242.69

	ALB007	Cajillo de remate perimetral a base de panel TABLAROCA® FIRECODE® "X" 15.9 mm de espesor, con un desarrollo de 0.90m, con bastidor de 0.75m, suspendido a 0.75m la losa, armado a base de perfiles con canales y postes de lámina galvanizada calibre 26 de 4.1 cms, incluye: suministro de todo los materiales, acarreo, elevaciones, cortes, desperdicios, fijación, esquineros, pasta y cinta de refuerzo de acuerdo al tipo de panel utilizado, mano de obra, equipo y herramienta.	mL	7.10	\$165.73	\$ 1,176.68
SUBTOTAL						\$ 11,975.19
ALU		ALUMINIO Y VIDRIO				
	ALUM001	Ventanas fijas marca KOMMERLING de 70mm de espesor con vidrio templado de 9mm de sistema fijo, color Azul (bajo pedido), medidas 1.40 x 1.20m. Incluye: suministro, colocación y transporte.	lote	1.00	\$19,836.00	\$ 19,836.00
	ALUM002	Ventanas fijas marca KOMMERLING de 70mm de espesor con vidrio templado de 9mm de sistema fijo, color Azul (bajo pedido), medidas 0.75 x 1.20m. Incluye: suministro, colocación y transporte.	lote	1.00	\$11,823.60	\$ 11,823.60
	ALUM003	Ventanas oscilobatientes marca KOMMERLING de 70mm de espesor con vidrio templado de 9mm de sistema fijo, color Azul (bajo pedido), medidas 0.80 x 1.20m. Incluye: suministro, colocación y transporte.	lote	1.00	\$24,032.00	\$ 24,032.00
SUBTOTAL						\$ 55,691.60
ELE		INSTALACIÓN ELÉCTRICA				
	ELE001	Instalación eléctrica: cableado, salidas, conexiones, luminarias, tiras LED, reguladores, transformadores, etc. Incluye: material, mano de obra y herramienta.	lote	1.00	\$12,468.39	\$ 12,468.39
SUBTOTAL						\$ 12,468.39
VYD		VOZ Y DATOS				
	VYD001	Instalaciones especiales: cableado, salidas, conexiones, router, regulador, bocinas, transformador, etc. Incluye: material, mano de obra y herramienta.	pza.	1.00	\$8,755.31	\$ 8,755.31
SUBTOTAL						\$ 8,755.31

ACA		ACABADOS				
	ACA001	Aplanado en muros, con mortero yeso - agua, de 2.0 cm. de espesor promedio, a reventón, hasta una altura máxima de 4.00 m, incluye: acarreo de los materiales a una 1a. estación a 20.00 m de distancia horizontal.	m2	15.76	\$55.72	\$ 878.15
	ACA002	Aplanado en plafón, con mortero yeso - agua, de 2.0 cm. de espesor promedio, a reventón, hasta una altura máxima de 4.00 m, incluye: acarreo de los materiales a una 1a. estación a 20.00 m de distancia horizontal.	m2	10.27	\$55.72	\$ 572.24
	ACA003	Panel decorativo en muro interior en MDF de 12mm diseño Bamboo acabado foil de pvc, marca Decustik de 0.65x1.30m, incluye bastidor de madera, colocación y acarreo de los materiales a una 1a. Estación a 20.0m de distancia horizontal.	m2	13.52	\$1,366.50	\$ 18,475.08
	ACA004	Panel acústico multiperforado 5mm de diámetro en 25% en muro interior en MDF de 12mm diseño Bamboo acabado foil de pvc, marca Decustik de 0.65x1.30 m, incluye bastidor de madera, colocación y acarreo de los materiales a una 1a. Estación a 20.0m de distancia horizontal.	m2	16.90	\$2,380.00	\$ 40,222.00
	ACA005	Pintura acrílica Vinimex Total marca Comex color Palco 184-05 en muros con yeso, hasta 4.00 m.de altura, incluye: una mano sellador y dos de pintura, acarreo a 1a. estación a20.00 m.	m2	26.03	\$72.40	\$ 1,884.57
	ACA006	Piso flotante a base de una capa de Acousti-CORK de 6mm sobre losa pre existente. Incluye: adhesivo orgánico, barrera de vapor, pieza perimetral, colocación y acarreo de los materiales a una 1a, estación a 20.00m de distancia horizontal.	m2	106.28	\$582.14	\$ 61,869.84
	ACA007	Piso de loseta interceramic Martinique Grey Mate de 0.40 x 0.40m, asentado con mortero cemento-arena 1:4, lechadeado con cemento blanco-agua, incluye: acarreo a 1a. estación a 20.00 m, sellador perimetral y colocación sobre base para piso flotante.	m2	106.28	\$250.00	\$ 26,570.00
SUBTOTAL						\$ 150,471.88
MOB		MOBILIARIO Y ACCESORIOS				
	MOB001	Restirador STUDIO DESIGNS 42" Vintage Blanco 13305	pza.	50.00	\$2,145.35	\$ 107,267.50

	MOB002	Banco Winsome Wood 29" Saddle Seat con estructura de acero y tapa de madera en acabado BAMBOO.	pza.	100.00	\$ 362.75	\$ 36,275.00
	MOB003	Escritorio Need Computer Workstation Office DeskAC3BB-160 en color BAMBOO.	pza.	1.00	\$ 3,168.75	\$ 3,168.75
	MOB004	Proyector DR.J 4" Mini Projector LED Full HD con HDMI, VGA, USB marca THZY.	pza.	1.00	\$ 1,856.06	\$ 1,856.06
	MOB005	Persiana PASSENGER PIGEON con insulación térmica 100% Blackout a prueba de agua en medida personalizada de 1.24 x 1.61m en color blanco.	pza.	4.00	\$ 2,635.66	\$ 10,542.64
	MOB006	Persiana PASSENGER PIGEON con insulación térmica 100% Blackout a prueba de agua en medida personalizada de 1.24 x 2.91m en color blanco.	pza.	5.00	\$ 3,874.11	\$ 19,370.55
SUBTOTAL						\$ 178,480.50
LIM		LIMPIEZA Y OBRAS FINALES				
	LIM001	Limpieza de vidrio y cancelería por ambas caras	m1	28.76	\$ 6.75	\$ 194.13
	LIM002	Limpieza de pisos cerámicos, con cepillo agua y ácido muriático.	m1	106.28	\$ 5.66	\$ 601.54
	LIM003	Limpieza general de zonas exteriores recolectando cascajo y basura. Incluye acarreo en carretilla a centro de acopio, carga manual y acarreo en camión fuera de la obra, mano de obra, herramienta y equipo.	m2	150.00	\$ 23.76	\$ 3,564.00
SUBTOTAL						\$ 3,564.00
SUBTOTAL DE PARTIDAS						\$ 432,665.91
TOTAL DE OBRA						\$ 432,665.91

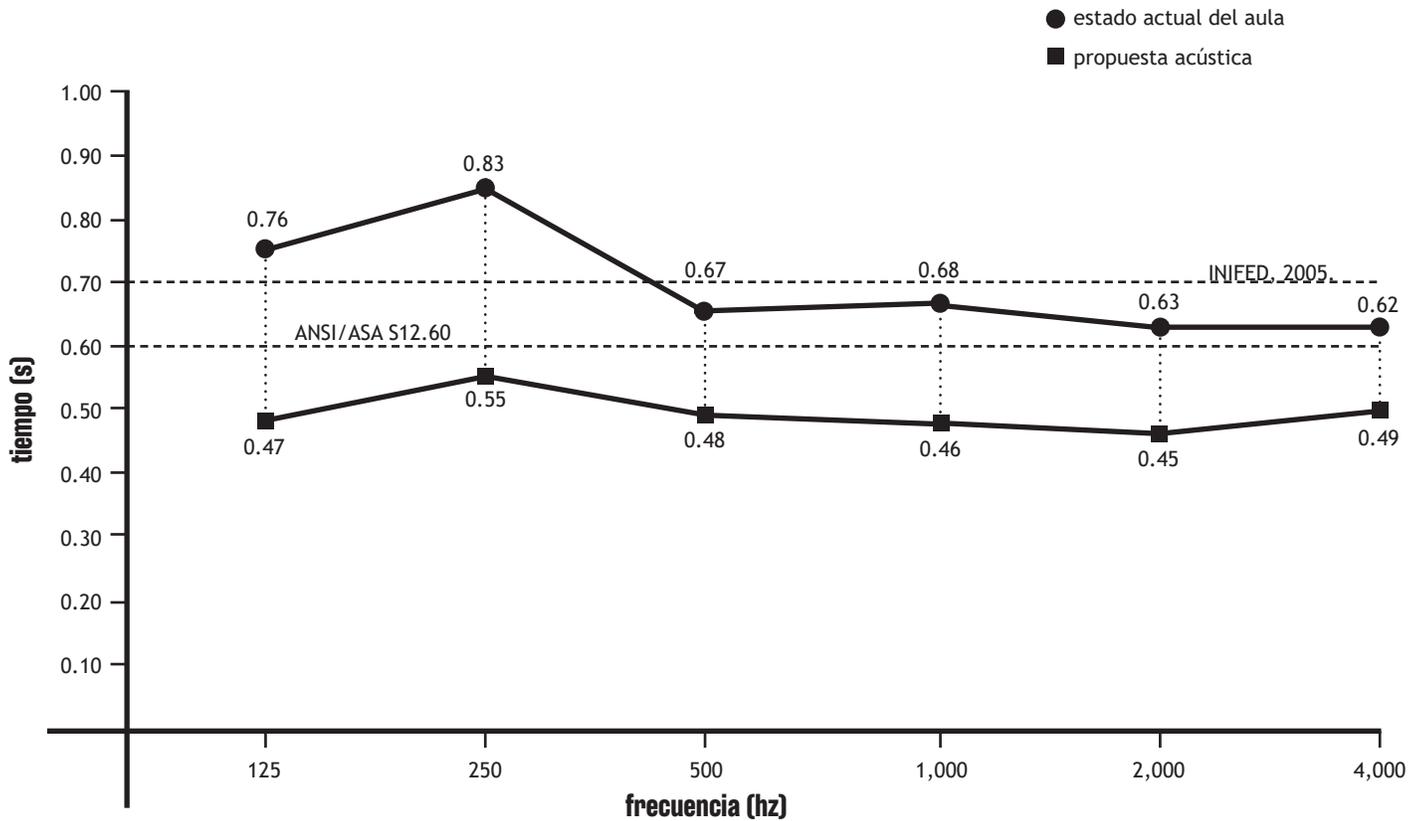


4.5. PREDICCIÓN ACÚSTICA

Para la predicción acústica de la propuesta se utilizó el mismo método ocupado para el análisis cuantitativo del caso de estudio, pero en este caso se sustituyen los datos por los de la propuesta, permitiéndonos obtener una aproximación al funcionamiento acústico del aula que permita justificar el uso de los materiales elegidos.

MATERIAL	SUPERFICIE (m ²)	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (α)						ABSORCIÓN TOTAL (A)					
		125 HZ	250 HZ	500 HZ	1,000 HZ	2,000 HZ	4,000 HZ	125 HZ	250 HZ	500 HZ	1,000 HZ	2,000 HZ	4,000 HZ
piso	110.13	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	2.20	3.30	3.30	4.40	4.40	4.40
panel de madera	13.52	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	2.02	1.48	1.35	0.94	0.81	0.94
panel multi-perforado	16.90	0.20	0.35	0.65	0.80	0.90	0.90	3.38	5.91	10.98	13.52	15.21	15.21
yeso	32.16	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09	9.32	3.21	1.60	1.28	2.25	2.89
vidrio	24.50	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	8.57	6.12	4.41	2.94	1.71	0.98
aluminio	10.34	0.40	0.60	0.80	0.80	0.70	0.50	4.13	6.20	8.27	8.27	7.23	5.17
madera (puerta)	1.65	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.24	0.18	0.16	0.11	0.099	0.11
pizarrón	11.60	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.23	0.34	0.34	0.46	0.46	0.46
paneles modulares (plafón)	8.40	0.17	0.07	0.09	0.09	0.07	0.06	1.42	0.58	0.75	0.75	0.58	0.50
ΣA								31.51	27.32	31.16	32.67	32.74	30.66
VOLUMEN (V)								301.28 m ³					
RT (s)								0.47	0.55	0.48	0.46	0.45	0.49

Tabla 05. *Cálculo de Tiempo de Reverberación TR para los diferentes materiales y frecuencias.* Elaborado por el autor.



Gráfica 02. *Tiempo de Reverberación TR para los diferentes materiales y frecuencias.* Elaborado por el autor.

Como podemos observar en la Gráfica 02, los valores para el tiempo de Reverberación fueron disminuidos por debajo de lo permitido por la norma. Dicho cambio se logró mediante la colocación de materiales reflejantes en puntos clave del aula, como el área de exposición al frente del aula y los muros laterales, el tratamiento del muro posterior del aula utilizando paneles multiperforados que permitan la absorción de frecuencias no deseadas y la reducción de la volumetría del aula mediante el uso de un plafón suspendido que reduce la altura del recinto, mejorando el control de las reflexiones y la calidez del sonido, por lo tanto mejorando la inteligibilidad.



CONCLUSIONES



El objetivo fundamental de esta tesis era abordar el problema del diseño acústico arquitectónico dentro de los salones de clases mediante la intervención en el caso de estudio, resaltando los problemas que genera la falta de diseño sonoro y las posibilidades que existen para mejorar la calidad del habla que permita llevar a cabo las actividades educativas de manera adecuada y posteriormente, dichos criterios utilizados en el rediseño del aula, puedan ser aplicados a cualquier espacio educativo de nivel superior.

Así pues, la principal aportación de este trabajo consiste en el diseño e implementación de un sistema acústico basado en la modificación de la morfología del aula, los materiales utilizados en su construcción, así como el correcto redireccionamiento del sonido y aislamiento de la contaminación auditiva del exterior del espacio.

Los análisis cuantitativo y cualitativo del espacio mencionados en el capítulo 3 permiten observar la nula consideración que se tuvo sobre el diseño acústico del espacio ya que, si en fechas más recientes, el diseño sonoro es considerado una implementación de menor importancia en espacios educativos, durante la fecha de construcción de Ciudad Universitaria se consideraba aún de menor importancia.

Los estudios de Wallace Clement Sabine, cuyos parámetros y fórmulas fueron ocupados en este documento, a pesar de haber sido concebidos en una época anterior proponen un acercamiento lo más próximo posible al cálculo acústico de un espacio, tomando variables que hasta la fecha siguen vigentes como parámetros de medición en software de diseño acústico automatizado utilizado por las grandes industrias. Los datos obtenidos mediante el estudio de la investigación de W.C. Sabine arroja resultados precisos mediante un método experimental que pudieron ser analizados e interpretados en un solo gráfico que permite observar las características sonoras del aula en cuestión. Mediante dichos resultados graficados y comparando con los datos obtenidos de las normas acústicas consideradas dentro del estudio (INIFED, ANSI, SEMARNAT, NOM y NMX) esta tesis demuestra que no se cumple con ninguna de las normativas, justificando la utilidad del documento para proponer una intervención arquitectónica y acústica del aula que posteriormente pudiera ser concretada.

Las conclusiones que se derivan del trabajo de investigación que se presentó en los primeros capítulos del documento se enlazan entre sí con los temas de diseño acústico y acondicionamiento

sonoro, generando las bases para la propuesta presentada en el Capítulo 4, y permitiendo la generación de una propuesta de alta calidad acústica y de diseño interior, interviniendo no solamente el ámbito auditivo y de voz, sino corrigiendo situaciones de colocación y distribución del aula y su mobiliario, así como las instalaciones eléctricas y especiales necesarias para la función del espacio.

Para comprobar la mejora con respecto al diseño actual del aula Antonio Recamier Montes, se llevó a cabo una predicción acústica utilizando los mismo parámetros del análisis cuantitativo llevado a cabo anteriormente, permitiendo la comparación de datos duros en lugar de un análisis meramente cualitativo.

Después de ser comparados dichos datos, logramos apreciar que el objetivo del documento fue cumplido al elaborar una propuesta arquitectónica que permitiera una mejora acústica mediante un acondicionamiento secundario, comprobando la importancia del diseño sonoro dentro de cualquier espacio de índole educativa y reforzando la idea de la inclusión del diseño acústico en las etapas tempranas de desarrollo de un proyecto arquitectónico de cualquier variante.

Si bien este trabajo abordó la problemática de las aulas del Taller Luis Barragán, la situación es general a lo largo de los espacios educativos a nivel nacional. En futuras investigaciones, sería un importante tema a tratar la consideración de crear una normativa que proponga criterios generales en el diseño acústico que sean específicos de los espacios educativos en México, y así poder independizarnos de las normas internacionales como las que tuvieron que ser consideradas en la elaboración de este documento a falta de regulaciones nacionales.

REFERENCIAS

1. Platón. Diálogos. Obra completa. Volumen VI: Filebo. Timeo. Critias. Biblioteca Clásica Gredos 160. 1ª edición, 2ª reimposición. Editorial Gredos. Madrid.
2. Vitruvio Polion, Marco Lucio. Los Diez Libros de Arquitectura. Ediciones Akal, España, 1992.
3. von Simson, Otto. La Catedral Gótica. Editorial Alianza, España, 1980.
4. Schneider., Marius. El origen musical de los animales-símbolos en la mitología y la escultura antiguas. Indiana University, USA. 1998.
5. Kircher, Athanasius. Musurgia Universalis Sive Ars Magna Consoni Et Dissoni. Corbetti, Alemania. Digitalizado en 2010.
6. Ermann, Michael. Architectural Acoustics Illustrated. Wiley & Sons, New Jersey, USA. 2015.
7. Directive 2002/49/EC of the European Parliament about environmental noise assessment. Official Journal of the European Communities, 2002.
8. de Hollander, AE. An aggregate public health indicator to represent the impact of multiple environmental exposures. Epidemiology, 1999.
9. EBoDE, 2010 (<http://en.opasnet.org/w/Ebode>, accesado el 18 de septiembre de 2017).
10. The world health report 2002 - reducing risks, promoting healthy life. Geneva, World Health Organization, 2002.
11. Lopez AD. Global burden of disease and risk factors. Washington, DC. The World Bank and Oxford University Press, 2006 22 July 2010)
12. Maschke C, Rupp T, Hecht K. The influence of stressors on biochemical reactions. International Journal of Environmental Health, 2000.
13. Evans GW, Hygge S. Noise and cognitive performance in children and adults. Chichester. 2007.
14. Banks S, Dinges DF. Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. Journal of Clinical Sleep Medicine, 2007.
15. Barger LK et al. Extended work shifts and the risk of motor vehicle crashes among interns. New England Journal of Medicine, 2005.
16. Scott LD et al. The relationship between nurse work schedules, sleep duration, and drowsy driving. Sleep, 2007.
17. Babisch W. Transportation noise and cardiovascular risk. Berlin, Federal Environmental Agency, 2006
18. Noise Control Act, Public Law 92-574, 1972
19. Guidelines for Community Noise. World Health Organization WHO, 1999, whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf.
20. Listado de Normas Oficiales Mexicanas. http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medio-ambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NOM/
21. Listado de Normas Mexicanas. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/>
22. Arnal, L. y Betancourt M. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Comentado, ilustrado y actualizado. (6ª ed.) México: Trillas.
23. INIFED. Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones. 2011. México.

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

1. Architectural acoustics : principles and practice / New York : J. Wiley, c1999.
2. Architectural acoustics design guide / New York ; México City : McGraw-Hill, c2000.
3. Asselineau, Marc, 1958- , autor Bui ión sonora : singularidad y caracterización de los procesos auditivos / Madrid : Biblioteca Nueva, c2005.
4. Blackstock, David T., autor Fundamentals of physical acoustics / New York : J. Wiley, c2000.
5. Carrion Isbert, Antoni, autor Diseño acustico de espacios arquitectonicos / Barcelona : Universitat Politecnica de Catalunya, 1998.
6. Cowan, James P., autor Handbook of environmental acoustics / New York : Van Nostrand Reinhold, c1994.
7. Egan, M. David, autor Concepts in architectural acoustics / New York : McGraw-Hill, c1972.
8. Ermann, Michael (Michael A.), autor Architectural acoustics illustrated / Hoboken, New Jersey : J. Wiley & Sons, [2015].
9. Fundamentals of sound and vibration / Boca Raton : CRC Press, [2015].
10. Garrido Bullon, Angel, autor Fisica del sonido / Madrid : Sanz y Torres, 1996.
11. Giani, Alejandro L., autor Acústica arquitectónica / Bogotá : Ediciones de la U, 2013.
12. Gil-Carcedo Sañudo, Elisa, autor Efectos del ruido en la salud humana / [Valladolid]: Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, Universidad de Valladolid, depósito legal, 2008.
13. Hassan, Osama A. B., autor Building acoustics and vibration : theory and practice / Singapore : World Scientific, 2009. Howard, David M. (David Martin), 1956-, autor Acoustics and psychoacoustics / Oxford : Elsevier : Focal, 2009.
14. Josse, Robert, autor La acustica en la construccion / Barcelona : Gustavo Gili, 1975.
15. Kavalier, Lucy, autor Ruido : La nueva amenaza / Buenos Aires : Tres tiempos ; México : Nuevomar, c1977.
16. Linares Galiana, Jaime, autor Acustica arquitectonica y urbanistica / Valencia : Universidad Politecnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, 1996.
17. Maekawa, Z., autor Environmental and architectural acoustics / Abingdon, Oxon : Spon Press, c2011.
18. Miller, Richard K. (Richard Kermit), 1946- autor Survey on environmental noise : Survey report 200 / Lilburn, georgia : Future technology surveys, c1992.
19. Morales Alanís, Javier, autor Acústica en espacios y en volúmenes arquitectónicos / México, D. F. : Editorial Trillas, 2012.
20. Payá, Miguel autor Aislamiento termico y acustico / Barcelona, espana : CEAC, 1989.
21. Pulkki, Ville, autor Communication acoustics : an introduction to speech, audio, and psychoacoustics / Chichester, West Sussex, United Kingdom : Wiley & Sons, 2015.
22. Recuero Lopez, Manuel, autor Acustica arquitectonica aplicada / Madrid : Paraninfo, 1999.

23. Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier, autor Guía acústica de la construcción / Madrid, España : Dossat, 2008.
24. Saad, Eduardo, autor Acustica arquitectonica / [Lugar de publicación no identificado : editor no identificado, 1990?].
25. Sancho Vendrell, Francisco Javier, autor Acustica arquitectonica y urbanistica / Valencia : Universidad Politecnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, deposito legal 1996. Weisse, Karlhans 1909, autor Acustica de los locales : compendio para arquitectos e ingenieros / Barcelona : Gustavo Gili, 1956.