



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Fundación Calouste Gulbenkian:
Acústica a través de la materialidad y la geometría

Calouste Gulbenkian Foundation:
Acoustics through materiality and geometry

Autor/es

Dragos Rus

Director/es

Marta Monzón Chavarrías

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2020



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

D./D^a. Dragos Rus con NIE X5471560K ,en
aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de
septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el
Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,
Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/~~Máster~~)
(Título del Trabajo)
Fundación Calouste Gulbenkian: Acústica a través de la materialidad y la geometría

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser
citada debidamente.

Zaragoza, a 16 de noviembre de 2020

Fdo:



FUNDACIÓN CALOUSTE GULBENKIAN

Acústica a través de la materialidad y la geometría

TRABAJO FIN DE GRADO | EINA 2020

Dragos Rus

Dirección

Marta Monzón Chavarrías



Universidad
Zaragoza

Trabajo Final de Grado en Estudios en Arquitectura

AUTOR | Dragos Rus

DIRECTORA | Marta Monzón Chavarrías

EINA Zaragoza | 2020



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN/ABSTRACT | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| 01. Objetivos y motivación | |
| 02. Metodología y fuentes | |
| 03. Estructura del trabajo | |
| BLOQUE I: FUNDACIÓN GULBENKIAN | 7 |
| 01. Calouste Gulbenkian | |
| 02. Lugar y contexto histórico | |
| 03. El proceso del concurso | |
| 04. La obra. Composición y descripción | |
| 04.1 Materialidad | |
| 04.2 Jardín | |
| 05. Biografía arquitectos | |
| BLOQUE II: PRINCIPIOS EN ACÚSTICA | 32 |
| 01. Introducción de los fenómenos acústicos | |
| 01.1 Fenómenos de onda | |
| 01.2 Fenómenos acústicos | |
| 02. Geometría en la acústica | |
| 02.1 Fenómenos acústicos a evitar en salas | |
| 02.2 Dimensiones y proporciones de un recinto | |
| 03. Materialidad en la acústica | |
| 03.1 Absorbentes acústicos | |
| 03.2 Reflectores acústicos | |
| 03.3 Difusores acústicos | |
| 04. Psicoacústica | |
| 04.1 Umbral psicológico y umbral de audición | |
| 04.2 Enmascaramiento sonoro y bandas críticas | |
| 04.3 Sonoridad | |
| BLOQUE III: ANÁLISIS ACÚSTICO | 49 |
| 01. La Fundación y su entorno | |
| 01.1 Acústica en el entorno urbano | |
| 01.2 La acústica del conjunto | |
| 01.3 Estudio gráfico | |
| 02. Anfiteatro al aire libre | |
| 02.1 Espacio y función | |
| 02.2 Geometría y estudio gráfico | |
| 02.3 Materialidad | |
| 03. Gran Auditorio | |
| 03.1 Espacio y función | |
| 03.2 Geometría y estudio gráfico | |
| 03.3 Materialidad | |
| CONCLUSIONES | 68 |
| BIBLIOGRAFÍA | 73 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 76 |

RESUMEN

La Fundación Gulbenkian es uno de los mejores ejemplos de la arquitectura moderna en Portugal, siendo resultado del equilibrio entre arquitectura y paisaje. Investigada y documentada desde numerosos y diferentes enfoques, menos en uno: la acústica arquitectónica.

La pretensión principal de este trabajo es exponer los conceptos básicos de los fundamentos acústicos arquitectónicos poniendo como ejemplo la propia Fundación, observando las estrategias geométricas y materiales desarrolladas en el diseño de los principales espacios del conjunto.

ABSTRACT

The Gulbenkian Foundation is one of the best examples of modern architecture in Portugal, where it is the result of the balance between architecture and landscape. It was investigated and it was documented from different approaches, except for one: the architectural acoustics.

The main goal of this work is to explain the basic concepts of architectural acoustics basics, through the example of the Foundation, where we could observe the geometric and material strategies that are developed in the design of the main spaces of the complex.

INTRODUCCIÓN

01. Objetivos y motivación

La música es una realidad que lleva presente en mi vida desde hace quince años, cuando empecé mis estudios en el Conservatorio. Me ha ofrecido la posibilidad de actuar en diversidad de salas y escenarios, como protagonista, y también poder disfrutarla como espectador. En ambas situaciones el espacio era el factor predominante para que el espectáculo fuera un éxito.

Ante esta premisa, mientras estoy disfrutando de mi estancia Erasmus en Lisboa, descubro en medio de una caótica ciudad, un oasis de tranquilidad y respiro, donde poder desconectar del acelerado estilo de vida que la sociedad actual impone. Se trataba de la Fundación Gulbenkian, donde tuve la suerte de presenciar un concierto al aire libre de un festival local de Jazz. Me quedé fascinado ante la gran calidad acústica que ofrecía el lugar, y comenzó un sentimiento de necesidad por saber porqué era así.

Estas circunstancias personales y situacionales desembocaron en la decisión de realizar un trabajo de investigación acerca de la acústica arquitectónica sobre la Fundación Gulbenkian.

El objetivo principal es introducir un conocimiento básico en fundamentos acústicos arquitectónicos a través del estudio de la geometría y la materialidad de la Fundación Gulbenkian. Para ello, se consideran objetivos secundarios que sirvan como hilo conductor del estudio.

La primera tarea es realizar una introducción al lector sobre la Fundación y la importancia que tiene en la historia de la arquitectura portuguesa. Seguidamente, es necesario presentar de forma teórica una serie de principios y fenómenos acústicos que permitan reflexionar sobre la importancia que tiene la acústica en la generación de los espacios y en la propia Fundación.

Al tratarse de un asunto que implica gran complejidad técnica, se prefiere profundizar en la acústica arquitectónica a través de un análisis basado en estudios descriptivos, gráficos y visuales de la geometría y la materialidad del conjunto, con la finalidad de entender la importancia que tiene el adecuado tratamiento de los espacios para la consecución de un confort acústico.

02. Metodología y fuentes

El procedimiento realizado en la elaboración del trabajo ha sido la siguiente:

- Numerosas visitas a la Fundación Gulbenkian entre noviembre de 2019 y febrero de 2020 para tomar anotaciones y asistir a espectáculos y conferencias en el Gran Auditorio.
- Consecución de un permiso para acceder al archivo de la Fundación Gulbenkian en febrero de 2020 para la recopilación de bibliografía.
- Consulta de revistas arquitectónicas y artículos disponibles de forma online sobre la Fundación Gulbenkian y su proceso de desarrollo.
- Investigación y lectura de tesis doctorales realizados por arquitectos portugueses sobre la Fundación Gulbenkian.
- Lectura de libros de acústica arquitectónica, artículos y apuntes sobre acústica arquitectónica de diferentes fuentes y universidades.
- Realización del estudio acústico a través de la inspección visual y el análisis gráfico.
- Extracción de conclusiones a partir del aprendizaje llevado a cabo en el análisis acústico gráfico.

He de recalcar que, durante el desarrollo del presente trabajo, comenzó la pandemia de COVID-19 que supuso el cierre de la Fundación Gulbenkian y su archivo en marzo de 2020, limitando de forma drástica la obtención de bibliografía, y la visita al Gran Auditorio para tomar anotaciones y fotografías in situ.

03. Estructura del trabajo

En primer lugar, se realiza una breve introducción donde se presentan las motivaciones y los objetivos principales del trabajo, la metodología que se ha llevado a cabo, la elección de fuentes bibliográficas y una organización inicial de la información.

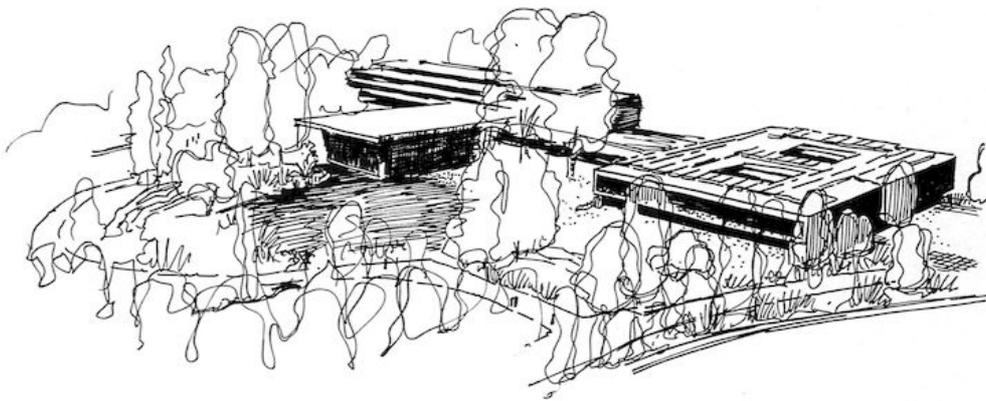
A continuación, se presenta un primer bloque dedicado a la Fundación Gulbenkian, introduciendo la figura de Calouste Gulbenkian, el emplazamiento y el contexto social, histórico y arquitectónico de la obra, así como, el proceso del concurso que se desarrolló, para finalizar con una descripción compositiva de la Fundación y la biografía de los arquitectos que participaron en el proyecto.

El segundo bloque está destinado a la presentación de conceptos acústicos básicos, la aplicación de los fenómenos acústicos en la geometría y la materialidad para conseguir el diseño de un espacio óptimo, además de una breve introducción a la psicoacústica.

El análisis acústico a través de la inspección visual, gráfica y descriptiva de la obra compone el tercer bloque de investigación, profundizando en tres apartados principales: el conjunto y su entorno próximo, el anfiteatro al aire libre y el Gran Auditorio.

Para finalizar, se presentan las conclusiones del trabajo donde se sintetizan y comentan las estrategias utilizadas, además de exponer la futura línea de investigación.

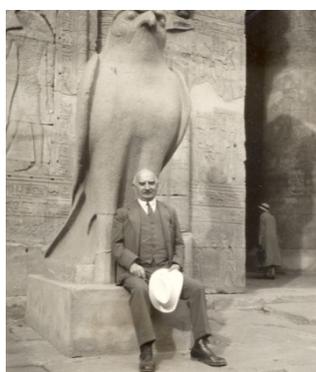
BLOQUE I: FUNDACIÓN GULBENKIAN



01. Calouste Gulbenkian



[1] Figura de Calouste Gulbenkian



[2] Calouste Gulbenkian en el templo de Edfu, Egipto, 1930

Calouste Gulbenkian nace en la ciudad de Scutari (actual Estambul) en 1869, hijo de una familia de comerciantes y filántropos de origen armenio [1]. Recibe educación en Marsella, Londres y Bakú, especializándose en conocimientos en petróleo, que posteriormente llamarán la atención del gobierno otomano, contratándolo para realizar informes sobre los recursos petroleros acerca de unos campos adquiridos en la actual Irak ¹. Debido a tensiones en su ciudad de residencia, se mudó a Londres donde se especializó en las finanzas corporativas, adquiriendo habilidades en las inversiones, además de tener visión y habilidad para mantener contacto con inversores internacionales.

Funda en 1908 el Banco Nacional de Turquía, con el objetivo de modernizar el financiamiento del Imperio Otomano, además del desarrollo de recursos petroleros y naturales. Consigue un acuerdo para explotar los campos iraquíes entre el Imperio Otomano, la Royal Dutch-Shell y el Deutsche Bank, obteniendo un gran porcentaje de la operación gracias a su visión empresarial y sentido de equilibrio de intereses de juego, considerándose a sí mismo un "arquitecto empresarial" ¹. En 1910 es nombrado asesor financiero del Imperio Otomano en París, trasladando su residencia al país francés.

Su principal éxito llega tras la Primera Guerra Mundial, con el "Acuerdo de la Línea Roja" ². Deutsche Bank traspasó sus derechos a la compañía francesa Compagnie Française des Pétroles, y la irrupción en Irak de Gran Bretaña, generó la necesidad de establecer un consorcio entre estas potencias para seguir explotando los recursos petroleros. Se acordó de esta forma la generación de una empresa común, la Compañía Petrolera Turca, en la cual Calouste tenía un 5 % de participación ¹. Las habilidades de negociación y flexibilidad para acomodar los nuevos intereses hicieron que se ganara un reconocimiento mundial, siendo conocido como "Mr. Five Percent" ¹.

Además de los negocios, había que tener en cuenta su pasión por el arte, reflejándose desde temprana edad motivada por los orígenes de su familia en Capadocia, donde la religión y el arte se cruzan, y de Constantinopla, ciudad que es una encrucijada entre civilizaciones y antigua capital bizantina [2].

Dicho gusto por el arte hizo que realizase numerosos viajes a lo largo de su vida con el fin de ampliar su colección de arte, que llegó a superar la cifra de 6 000 obras que van desde la antigüedad hasta principios del siglo XX ¹.

¹ www.gulbenkian.pt

² El acuerdo se firmó en 1928 con el objetivo de formalizar la estructura corporativa de la compañía petrolera además de establecer un acuerdo común para que los accionistas no buscasen intereses petrolíferos de forma independiente en la región



[3] Hotel Aviz en la década de los 40. Lisboa

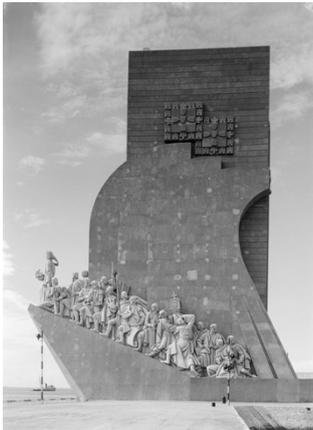
Su afán filántropo se expresó en las numerosas donaciones a museos e instituciones públicas, además de prestar parte de su colección al Museo Británico, la Galería Nacional de Londres o la Galería Nacional de Arte de Washington, entre otras.

A partir de finales de la década de 1930, empieza a aumentar su preocupación por la preservación de su patrimonio, especialmente por el pago de impuestos que esto conllevaba. Empieza en 1937 conversaciones con Kenneth Clark, director de la Galería Nacional de Londres, con el propósito de crear el Instituto Gulbenkian, en donde poder albergar su colección. Mientras tanto, estalla la Segunda Guerra Mundial, y el gobierno británico lo declara enemigo y le confisca su participación en la Compañía Petrolera. A pesar de que se tratasen de unas imposiciones procesales de un país en guerra, el propio Calouste las tomó como acciones personales, y decidió buscar otro emplazamiento para su colección.

En 1942 decide abandonar su residencia en París, buscando refugio en un país neutral. Se decanta por Portugal por su situación geográfica, permitiéndole escapar a EE. UU. si fuere necesario. Se instala en el Hotel Aviz de Lisboa, permaneciendo ahí hasta su muerte en 1955 [3]. La tranquilidad y hospitalidad de la ciudad, junto a un sistema fiscal laxo, le hicieron tomar la decisión de establecer una fundación internacional, a su nombre, con sede en Lisboa. Dejó a cargo a su abogado, Lord Radcliffe para reunir la colección que se encontraba distribuida en varios países. Hubo que esperar hasta la década de 1960 para que toda su obra llegase a Lisboa, siendo expuesta en el Palacio Marques de Pombal de Oeiras hasta 1969, cuando se celebró la apertura de la Fundación Gulbenkian ³.

³ Se denomina fundación a una sociedad u organización en donde los miembros se dedican a obras sociales, culturales y humanitarias sin ánimo de lucro. El propósito fundamental de la fundación consiste en la mejora de la calidad de vida de los portugueses a partir de proyectos artísticos, científicos.

02. Lugar y contexto histórico



[4] Monumento a los Descubrimientos. Cottinelli Telmo y Leopoldo de Almeida. Lisboa, 1940



[5] Cine Imperio. Cassiano Branco. Lisboa, 1948



[6] Quinta do proveedor dos Armazéns, 1826



[7] Grabado del Parque de Santa Gertrudes. 1909

Mientras en Europa en la década de 1960 se daban los últimos atisbos de una arquitectura racionalista, la realidad portuguesa era diferente. Portugal se encontraba en un régimen político autoritario, conocido como Estado Novo, encabezado por Antonio de Oliveira Salazar, donde la arquitectura era utilizada como propaganda de la ideología. Valores como la familia, la tradición y la monumentalidad eran los principios de un estilo más regionalista [4]. Siendo conocido como "suave portugués", predominaba un carácter tradicional, puritano y conservador, influenciado por el Art Decó y la arquitectura portuguesa de los siglos XVII y XVIII [5]. Fue apoyado hasta mediados de la década de 1950 por el Estado, a pesar de contar con la persistente crítica de la generación de jóvenes arquitectos, siendo descrito como "provinciano y falto de imaginación" ⁴. El punto de inflexión vino con el Primer Congreso Nacional de Arquitectura de Portugal, donde se buscaba, de forma progresiva, una transición hacia un estilo más internacional. En estas circunstancias surge en 1957 la Fundación Gulbenkian, siendo uno de los ejemplos más emblemáticos de arquitectura moderna en Portugal, sobre todo por el diálogo entre el jardín, exponente del paisaje portugués, y el lenguaje moderno de los edificios.

La decisión de su ubicación fue tema de discusión en la época, pero sería Guimarães Lobato (por aquel entonces, director de servicios de urbanización de Lisboa) quien propuso el parque de Santa Gertrudes, un espacio verde situado en el centro de una Lisboa en expansión, que cumplía con los propósitos de la fundación. Desde el siglo XIX este emplazamiento era una de las entradas de la ciudad, siendo una granja recreativa conocida como "Quinta do proveedor dos Armazéns" perteneciente a Fernando Larre, generando el límite entre lo urbano y lo rural. Su forma trapezoidal característica viene procedente de esta época [6].

En 1861 la propiedad es adquirida por el burgués José María Eugenio de Almeida, convirtiéndolo en un gran jardín paisajístico con un palacio neoclásico. Fue bautizado como Parque de Santa Gertrudes y la obra fue realizada por el jardinero suizo Jacob Weiss construyendo un paisaje pintoresco donde *"... se crían lagos, cenadores y viveros, se abren callejones de árboles exóticos especialmente importados para este fin"* ⁵ (Tostões, 2006), estableciéndose como un centro social en Lisboa [7].

En las sucesivas décadas numerosas fueron las actividades que se desempeñaron, destacando como instalación del Zoológico de Aclimatación de Lisboa entre 1884-1894, pista de carreras e hipódromo a inicios del siglo XX o como Recinto Ferial entre 1943 y 1957 [8] [9] [10].

⁴ BRITES, J. C. [2017]. Estado Novo, Arquitetura E "Renascimento Nacional." Risco Revista de Pesquisa Em Arquitetura e Urbanismo (Online), 15(1), Lisboa, p.106



[8] Planta del Parque Zoológico de Aclimatación de Lisboa. 1884



[9] Planta del Parque de Santa Gertrudes.1909



[10] Vista del Parque de Santa Gertrudes.1957

A finales de año sería adquirido por la Fundación Gulbenkian y se comenzaría con el desarrollo de un programa inicial compuesto por cinco elementos esenciales: sede, museo, auditorio, biblioteca y anfiteatro al aire libre [11].

El programa fue desarrollado esencialmente por la encargada del inventario de la colección María José de Mendonça y el ingeniero estructural João Hipólito Raposo, que tuvieron claro desde el primer momento que querían mantener la esencia del jardín inicial. *"El parque paisajístico diseñado por Jacob Weiss (...) permaneció cuando la junta directiva de la Fundación Calouste Gulbenkian decidió adquirir como parte para cumplir el deseo de su fundador"* (Carapinha, 2006) ⁶ [12].

En 1958 se contacta con los arquitectos paisajistas Gonçalo Ribeiro Telles y Manuel de Azevedo para el desarrollo del proyecto de los jardines provisionales de un estudio sobre el mantenimiento y la conservación de la vegetación existente, que había sido dañada por los usos anteriores. Asimismo, el carácter del parque fue muy influyente en el diseño de los edificios.

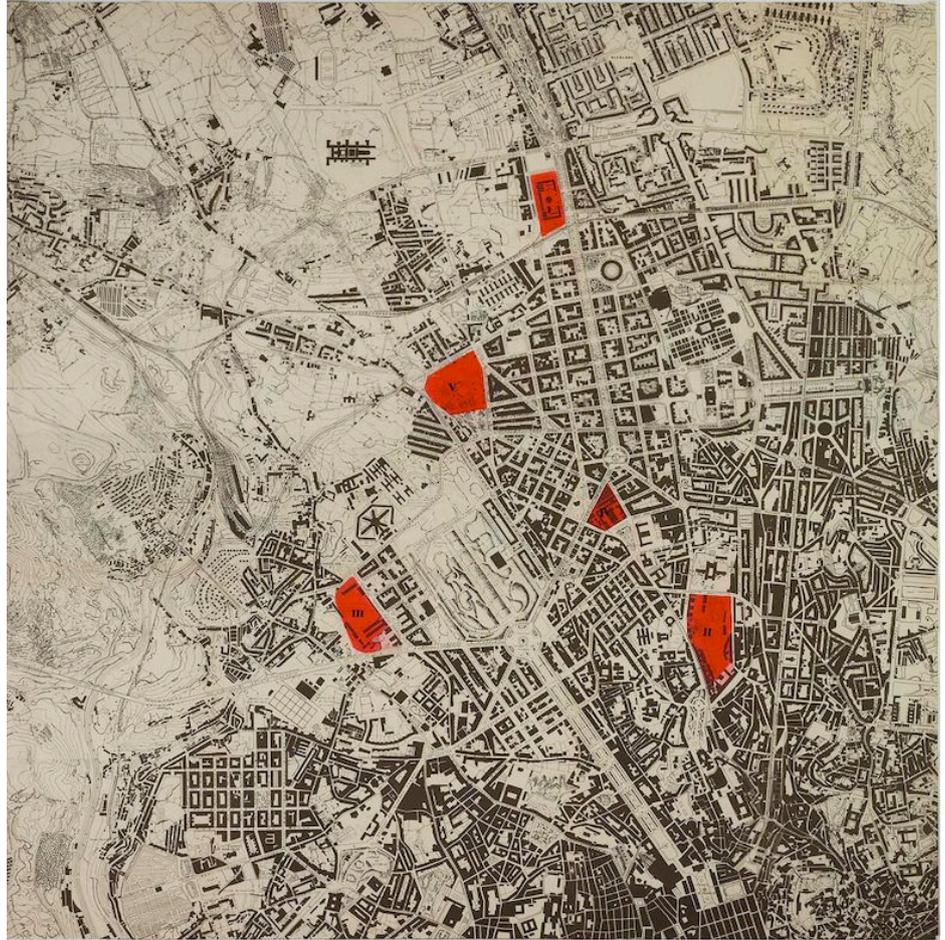
"El Parque de Santa Gertrudes, debidamente restaurado a su original y exuberante prima, será uno de los espacios públicos de mayor interés en Lisboa; Un lugar privilegiado que sin duda atraerá a la población y brindará a la Fundación oportunidades para una mayor difusión de sus actividades culturales. (...) el tamaño del parque, así como el papel urbano crucial que ha desempeñado como uno de los pulmones de la ciudad de Lisboa, condicionan el uso de la tierra para obtener la máxima liberación posible" (Tostões, 2006) ⁷.

⁵Texto Original en portugués:

"lagos, erguem-se coretos e viveiros, são abertas alamedas de árvores exóticas especialmente importadas para o efeito."
TOSTÕES, Ana. Os edifícios, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa p. 31, 2006

⁶Texto Original en portugués:

"o carácter de parque paisajista idealizado por Jacob Weiss permanecia quando o conselho de administração da Fundação Calouste Gulbenkian decide adquirir parte dele para aí concretizar o desejo do fundador."
CARAPINHA, Aurora. O Jardim. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.18, 2006



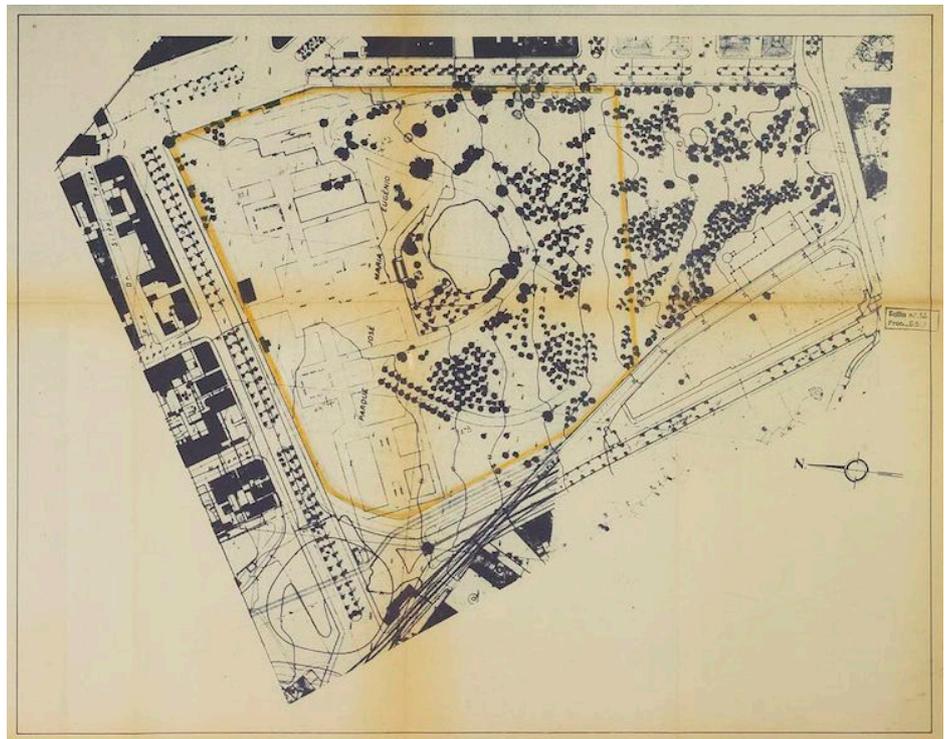
[11] Posibles emplazamientos de la Fundación.

I-Parque Santa Gertrudes II-Terreno libre próximo al Hotel Aviz III-Terreno del Cuartel de Artillería IV- Antigo Matadero de Lisboa V-Terreno libre en Campo Grande

7 Texto Original en portugués:

“O Parque de Santa Gertrudes, devidamente restaurado na pujança da sua vegetação, constituirá um dos espaços livres públicos de maior interesse de Lisboa; local privilegiado que certamente atrairá a população e proporcionará à Fundação possibilidades de maior divulgação das suas atividades culturais. (...) a dimensão do Parque, assim como a necessidade imperiosa de prever a continuidade da função urbanística que agora tem desempenhado, visto tratar-se de um dos pulmões da cidade de Lisboa, torna o aproveitamento do terreno condicionado, no sentido de prever a máxima libertação possível.”

TOSTÕES, Ana. Os edifícios, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 36, 2006



[12] Parcela del Parque de Santa Gertrude. 1959

03. El proceso del concurso

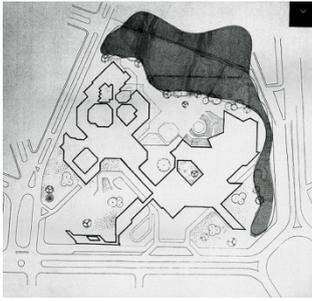
Para entender las pretensiones iniciales del diseño, se debe conocer el concepto en el que se inspiraron. “*Genius loci*” es una expresión griega que reconoce que cada paisaje tiene su propio carácter que lo hace diferenciarse de cualquier otro paisaje. Se refiere, por lo tanto, a los elementos definitorios de su historia, forma y función. En cuanto a la historia, hay que destacar las relaciones entre los diferentes componentes ecológicos y el relieve, que definen una espacialidad característica a partir de la cual se puede definir un programa y construir su futuro. Uno de los pilares básicos es la forma trapezoidal del emplazamiento y la función cambiante que tuvo a lo largo de varias décadas. El concurso tenía el objetivo de generar un proyecto cuya intención era ser más que un simple espacio de exhibición, buscando funcionar como un centro cultural capaz de abarcar diversas artes, además de desempeñar un papel crucial en la sociedad y la cultura de Lisboa.

Después de la adquisición del terreno del Parque de Santa Gertrudes, se negoció con el Ayuntamiento de Lisboa las pautas que deberían seguir, donde parte del terreno estaría ocupada por la construcción de la sede de la Fundación y el área restante debía ser un parque, que, a pesar de ser de dominio privado, estaría abierto al público. Posteriormente, se presentó un informe geotécnico acerca de las características de la tierra, cuya evaluación se tradujo en la presentación del programa a desarrollar. *“El Programa de Instalaciones de la Sede y del Museo: considera que el Parque de Santa Gertrudes, debidamente restaurado en la fuerza de su vegetación, constituirá uno de los espacios públicos abiertos más interesantes de Lisboa; Un lugar privilegiado que sin duda atraerá a la población y brindará a la Fundación posibilidades para una mayor difusión de sus actividades culturales. Y, por lo tanto, (...) También se tuvieron en cuenta las limitaciones del área del parque en relación con sus funciones relevantes de espacio verde urbano, que se utilizaron para mejorar y enmarcar el conjunto de edificios que se construirán”* (Tostões, 2006) ⁸.

⁸Texto Original en portugués:

“O Programa das Instalações da Sede e Museu: considera que O Parque de Santa Gertrudes, devidamente restaurado na pujança da sua vegetação, constituirá um dos espaços livres públicos de maior interesse de Lisboa; local privilegiado que certamente atrairá a população e proporcionará à Fundação possibilidades de maior divulgação das suas actividades culturais. E, assim sendo, (...) Também se tiveram em conta as limitações da área do parque em relação às suas funções relevantes de espaço verde urbano, aproveitadas para a valorização e o enquadramento do conjunto das edificações a construir.”
TOSTÕES, Ana. Os edifícios, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 40, 2006

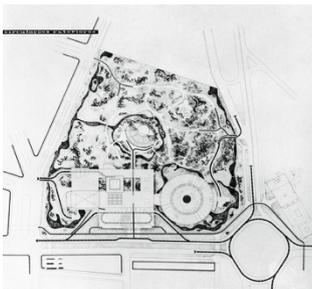
Se presenta, de esta forma, en 1959 un concurso cerrado compuesto por tres grupos de arquitectos nacionales, cada uno de ellos partícipes de una tendencia internacional, con el objetivo de encontrar una arquitectura moderna que resolviera la crisis de identidad que el Estado Novo había impuesto. Los grupos serían los siguientes: El grupo A, conformado por Alberto Pessoa, Ruy d’Authouguia y Pedro Cid; el grupo B compuesto por Arménio, Losa, Luís Padua Ramos y Formosinho Sánchez; y el grupo C, integrado por Arnaldo Araújo, Frederico Jorge y Manuel Laginha.



[13] Propuesta de implantación. Grupo C



[14] Maqueta propuesta Grupo C



[15] Propuesta de implantación. Grupo B



[16] Maqueta propuesta Grupo B



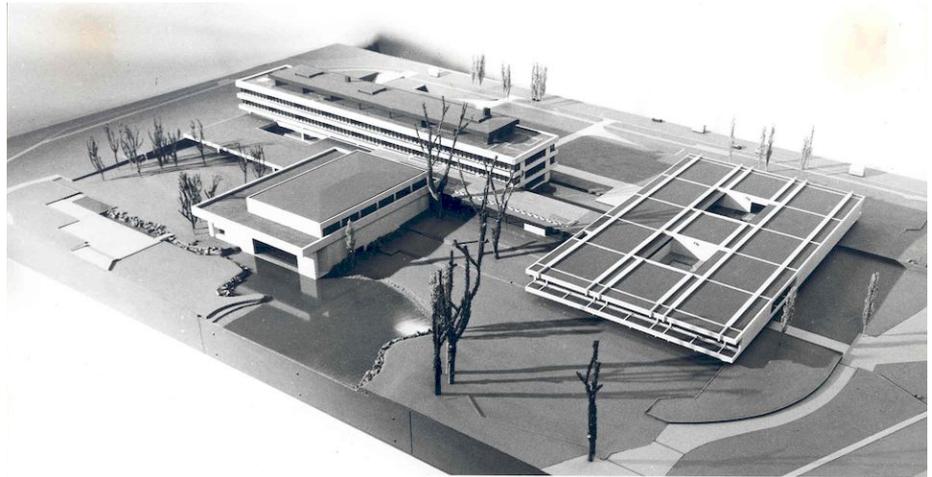
[17] Propuesta ganadora Grupo A

Este último, presentó una propuesta basada en una tendencia orgánica y expresionista, trabajando varios volúmenes interconectados entre sí, que, a pesar de no olvidar la relación de la construcción con la naturaleza, ocupaban gran parte del parque [13] [14]. Las otras dos opciones estaban inclinadas hacia un lenguaje diferente y más racionalista, con un ímpetu más funcionalista. El grupo B presenta una propuesta basada en tres volúmenes articulados, una torre, correspondiente a la sede, otro cuerpo rectangular con la entrada y los auditorios y un cuerpo circular que integraba el museo. El problema era que el edificio tenía poco que ver con el parque, además de presentar una escala y monumentalidad que destacaban demasiado en la escala urbana de la ciudad [15] [16].

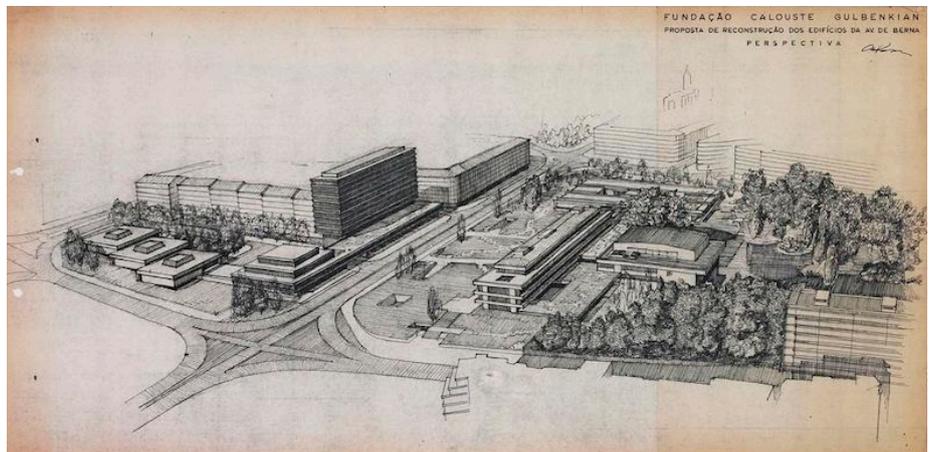
La propuesta elegida resultó ser la de los arquitectos Alberto Pessoa, Ruy d'Atouguia y Pedro Cid, que básicamente representaban los principios del Movimiento Moderno en Portugal. Este proyecto era el que mejor respondía a los desafíos propuestos, logrando una buena articulación entre el programa y el volumen, y entre el edificio y el jardín, ocupando solo el 13% del área de construcción del parque [17] [18].

Una de las grandes ventajas que tuvieron fue la colaboración desde el inicio del arquitecto paisajista António Viana Barreto, quien ayudó a encontrar una solución arquitectónica muy integrada en el paisaje, aprovechando los aspectos potenciales del parque. Cuando el jurado aprobó este proyecto, el arquitecto paisajista Gonçalo Ribeiro Telles también fue elegido para formar parte del equipo ganador, debido a que desde 1958, había estado trabajando en la recuperación de las especies del parque. "El jurado del Concurso que decidió en 1959 el equipo ganador expresa muy bien, a través de la voz de su presidente, cómo el edificio debía en sus líneas generales manifestar los trazos fundamentales del carácter enérgico, la fuerza creadora y la sencillez de vida de su fundador. Traducido en términos arquitectónicos quiere decir prioridad a la funcionalidad para responder al objetivo cultural, sobriedad formal y la máxima calidad constructiva" (Trovato, 2006) 9.

La implantación de los edificios se realizó lejos de las carreteras principales, en la zona norte, que contaba con mayor elevación, generando de esta forma, una atmósfera más modesta del bullicio de la ciudad, disfrutando de una relativa autonomía. La disposición de vegetación circundante también ayudó en ese aspecto, además de resaltar que fueron asumidos como elementos estructurales del proyecto una serie de árboles de gran tamaño ya existentes [19].



[18] Maqueta propuesta ganadora. Grupo



[19] Perspectiva a mano de la propuesta ganadora. Grupo A

⁹ TROVATO, Graziella, Cincuentenario del edificio de la Fundación Gulbenkian en Lisboa. Revista Arquitectura, Madrid Nr 344, p.118. 2006

04. La obra. Composición y descripción



[20] Plano del conjunto tras la revisión de 1966



[22] Patio Museo Fundador



[23] Museo del Fundador y Gran Auditorio

La Fundación surge como resultado de una arquitectura racional, con toques de brutalismo y monumentalidad, herencia de la arquitectura portuguesa de la época, aunque siempre teniendo presente que la forma sigue a la función. Consiste en un juego de tres piezas (museo y biblioteca, auditorios y oficinas), cada una de ellas con un carácter propio, que se unen a través de un cuerpo bajo cambiante, destinado a exposiciones temporales. Todos estos volúmenes horizontales están envueltos en un jardín que busca integrarse, no solo con lo edificado, sino también con el tejido urbano, consiguiendo atraer al espectador con su red de caminos sinuosos a través de terrenos que se van moldeando, con el fin de alcanzar el corazón del conjunto [20].

El acceso principal se ubica en la Avenida de Berna, en la parte norte del terreno, donde una plataforma del jardín inclinada da paso a los volúmenes de la sede y del museo. Esta plataforma ajardinada sirve como cubierta del aparcamiento subterráneo, siendo una estrategia que se va repitiendo en las cubiertas de los edificios, buscando una extensión del jardín, o en otras ocasiones, convirtiéndose en la continuación de los espacios interiores [21]. La horizontalidad de los volúmenes contrasta con la verticalidad de los árboles, además de generar una relación de complicidad y cercanía entre los espacios exteriores e interiores, pensados desde las perspectivas que generan al ser visitadas. La relación interior/exterior la encontramos también en los patios interiores, que acercan la vegetación al interior, a pesar de ser espacios meramente utilizados para su contemplación, haciéndonos recordar a Mies Van Der Rohe [22].

La "levitación" del jardín en las terrazas se consigue a través del retranqueo de la estructura, siendo una interpretación del uso de pilotis del Movimiento Moderno ⁹ [23].



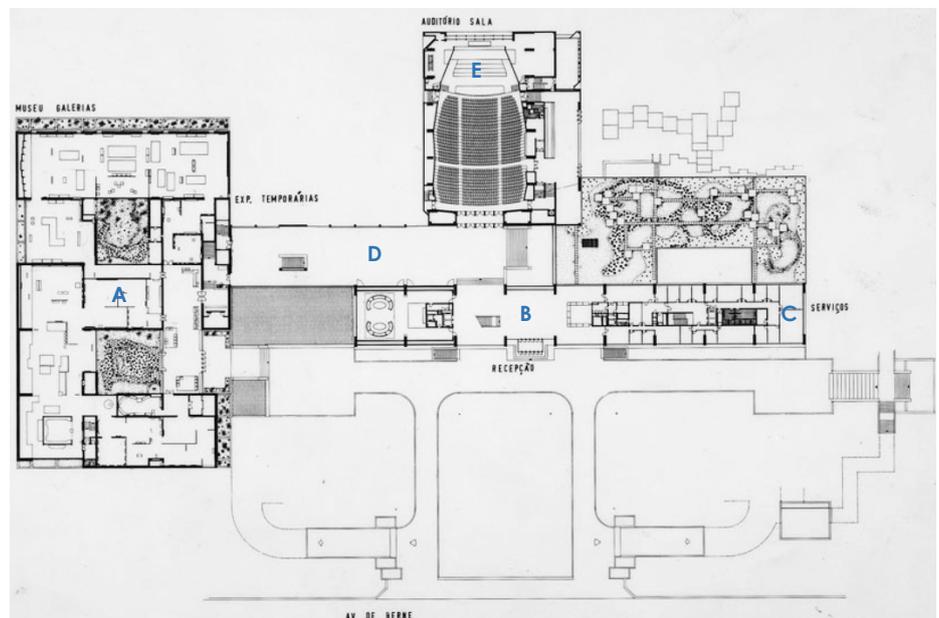
[21] Vista aérea del conjunto, 1969

⁹ DO AMARAL, C. O. modernismo na Arquitetura e na arquitetura paisagista em Portugal. FAUP. p.198, 2012



[25] Vista del Edificio Sede

Los volúmenes se articulan de una forma simple y clara, sin olvidar su jerarquía, separando los accesos del público del acceso del personal, que se realiza a través de la planta del aparcamiento, donde se encuentran los núcleos de conexión [24]. Es recurrente el uso de la distribución de espacios mediante la modulación estructural, estando presente en el edificio central, que permite una diferenciación entre espacios servidos y servidores, siendo estos últimos concentrados en la parte central, permitiendo una flexible organización de las oficinas [25]. El módulo utilizado de 13,60 metros se expresa a su vez en la fachada donde de acuerdo con las palabras de Alberto Pessoa, Ruy d'Áthouguia y Pedro Cid se puede describir como: "la expresión plástica del conjunto de edificios refleja naturalmente una gran simplicidad estructural, lo que le da, a pesar del propósito diverso de sus elementos, la necesaria unidad de expresión arquitectónica" ¹⁰.



[24] Planta Baja del conjunto [+0,00m] A. Museu Fundador B. Vestíbulo Edifício Sede C. Oficinas y Administración D. Exposiciones Temporales | Atrio E. Gran Auditorio

¹⁰Texto original en portugués:

"a expressão plástica do conjunto das edificações reflecte com naturalidade uma grande simplicidade estrutural, que lhe confere a pesar da diversa finalidade dos elementos que a compõem, a necessária unidade da expressão arquitectónica."

TOSTÕES, Ana. Os edifícios, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 117, 2006

¹¹Texto original en portugués:

"Espaço de sinal democrático, introduz um valor monumental e simbólico de ritual cerimonial, e anuncia a liberdade civilizada, o tom sereno, laborioso e tranquilo da Fundação."

TOSTÕES, Ana. Os edifícios, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 127, 2006

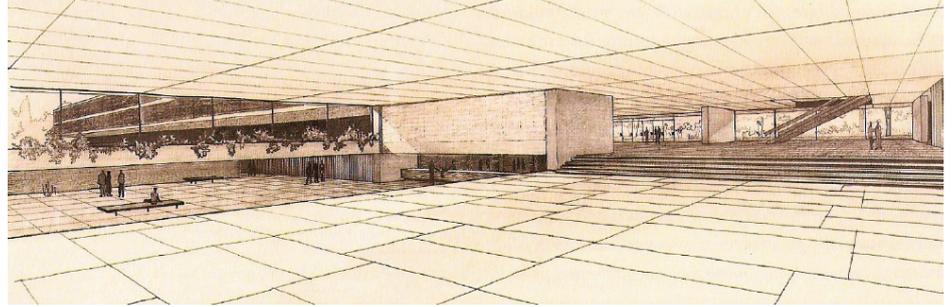
La preocupación por la continuidad y fluidez del espacio, permitiendo el desarrollo de actividades diferentes, alcanza su esplendor en el atrio que conecta los auditorios, las exposiciones temporales y el edificio de la sede. Los atrios interiores de la sede, comprimidos pero luminosos, articulados a través de las escaleras, dan paso a un espacio que se expande y sorprende al espectador. La escala, el control de la iluminación, la materialidad y la relación con el exterior que mantiene, conforman su riqueza espacial. "Un espacio de signo democrático, introduce un valor monumental y simbólico del ritual ceremonial y anuncia la libertad civilizada, el tono sereno, trabajador y tranquilo de la Fundación" ¹¹ [26].



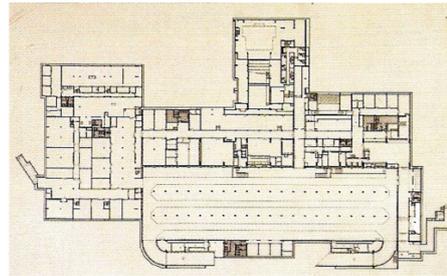
[27] Vista del Gran Auditorio desde el lago central



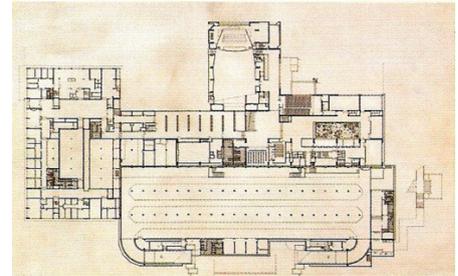
[28] Vista del Gran Auditorio desde la cubierta del Edificio Sede



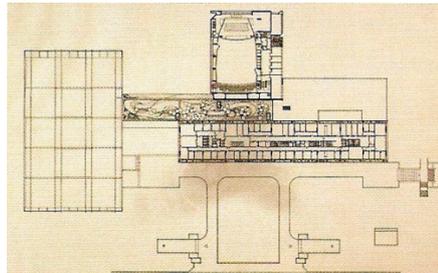
[26] Perspectiva a mano del atrio



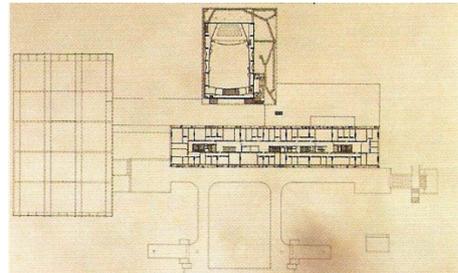
[29] Planta Inferior II del conjunto [-8,00m]



[30] Planta Inferior I del conjunto [-4,00m]



[31] Planta Primera del conjunto [+4,00m]



[32] Planta Segunda del conjunto [+8,00m]

En la parte sur, se ubica el volumen destinado a los Auditorios, protegido del ruido al estar implantado en el jardín [27] [28]. Una gran cubierta quebrada en forma de caparazón se retranquea con el fin de aumentar y controlar la altura del edificio, consiguiendo de esta forma solucionar el problema de escala existente. Además, permite una conexión visual directa entre el espacio interior del auditorio y el lago, utilizando un paño compuesto por vidrio estructural, aumentando la horizontalidad del volumen.

Se dispone de una "tela" sobre el escenario, que junto a un sistema de plataformas que se elevan, el graderío suspendido respecto al escenario y paredes giratorias, permiten generar un espacio versátil y dinámico destinado, tanto a actividades musicales, como a espectáculos de danza y teatro, reproducción de películas, charlas...

Su materialidad, compuesta por tablas verticales, un suelo de moqueta y el techo chapeado, junto a una geometría pura que se va moldeando permiten obtener un espacio con una acústica magnífica.



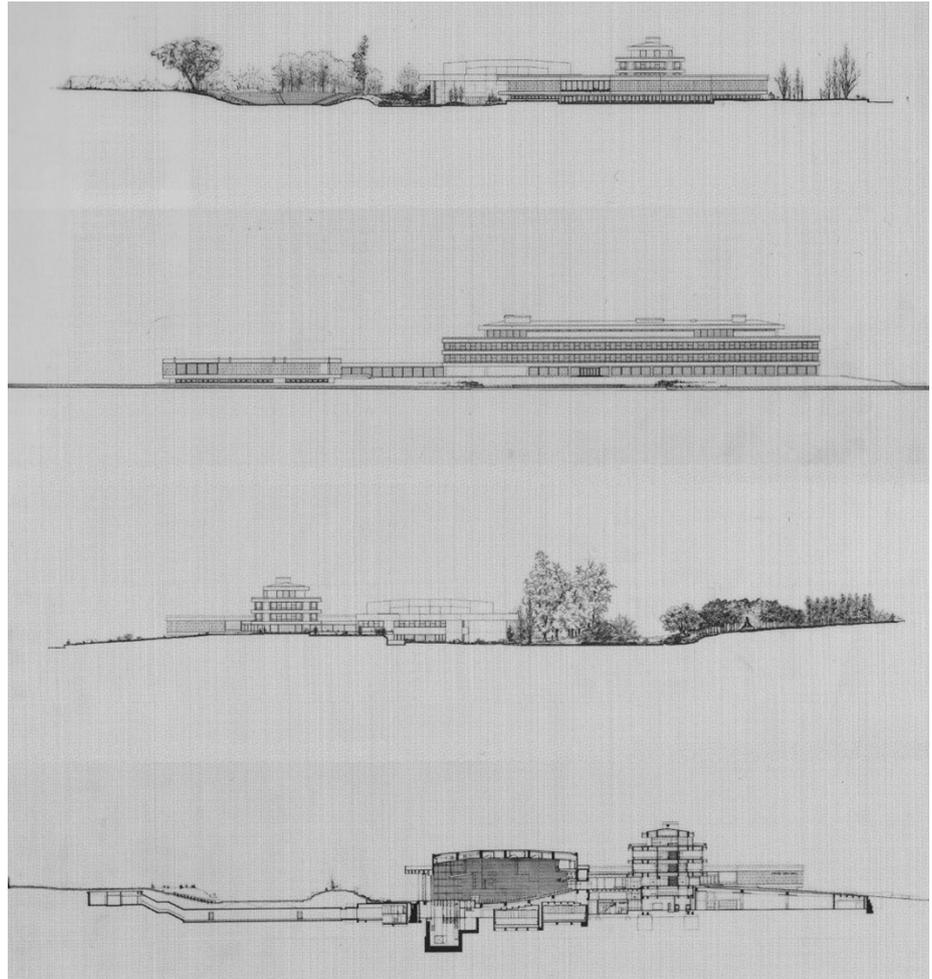
[33] Vista del Museo Fundador desde el lago central



[34] Vista del Museo Fundador en relación con el Edificio Sede



[35] Vista del Museo Fundador desde el lado este



[36] Secciones longitudinales, transversales y Alzado principal del conjunto

La parte este se colmata con el volumen destinado al Museo, presentado como un macizo rectangular de dos pisos, donde el uso de hormigón y el revestimiento de granito revela un equilibrio cromático contenido, además de establecer una relación armónica con el entorno.

Sigue estando presente la preocupación por la generación de un espacio fluido, y la aplicación de una modulación estructural para la definición de espacios, aunque incorpora una estrategia de iluminación totalmente contraria al conjunto. Los paños de vidrio que buscan un diálogo constante con el exterior se concentran en el museo entorno a dos patios, que pretenden ser una continuación del jardín, además de conseguir una iluminación más controlada y contenida.

Las diferentes galerías se articulan entorno a dichos patios, siendo una sistematización cronológica y geográfica, la generadora de dos circuitos independientes, que permiten la circulación de una forma simple y eficiente. En la parte inferior se ubica la Biblioteca y el Archivo, cuyo acceso se realiza de forma independiente [33] [34] [35].

04.1 Materialidad



[37] Vista de la fachada norte del Edificio Sede

El proyecto presenta un carácter austero y simple basado en el uso de un número acotado de materiales. Encontramos en la horizontalidad de la fachada unos planos continuos compuestos por losas de hormigón, acompañados por una segunda línea de vidrio reflectante que permiten la inclusión de vegetación, generando terrazas que marcan una linealidad, potenciando el efecto de las sombras y la ausencia de material. La utilización del vidrio tintado tiene como función el control de la radiación solar, pero dota al edificio de un lenguaje único y característico al estar combinado con el hormigón y el latón envejecido, que sirve como carpintería [37].

El uso de hormigón en bruto permitió aprovechar sus capacidades técnicas y estéticas, dotando al conjunto de claridad y veracidad estructural. El tercer, y definitivo material, se trata del granito, el cual se dispone como revestimiento en la parte exterior del museo. Hay que destacar la continuación de los planos de la losa de hormigón creando así una diferenciación de colores y texturas con los otros volúmenes, enfatizando una veracidad estructural ¹² [38].

El lenguaje arquitectónico está despojado de ornamentación, siendo sobrio y discreto, destacando los elementos esenciales de la arquitectura. Los materiales se combinan perfectamente, teniendo en cuenta la poética del lugar. "La simplicidad revelada en la elección y el uso de El material parece penetrar el deseo de inspiración en el lugar, el respeto por la naturaleza del sitio, la intimidad dialógica entre el interior y el exterior, la búsqueda de los valores más secretos, la elección de los árboles más bellos como referencias para mejorar el diálogo con los preexistentes y, a su alrededor, trabajando para encontrar una comprensión sensible del contexto ". (Tostões, 2006) ¹³.

En el interior se mantiene esa sencillez y sensibilidad en cuanto a la elección de los materiales, aprovechando el confort que produce la madera, la piedra dura, e incluso, el cuero [39] [40].

¹² JUNCO COFIÑO, V. El paisaje de la arquitectura contemporánea. La Fundación Calouste Gulbenkian. ETSA Valladolid. p.21, 2015

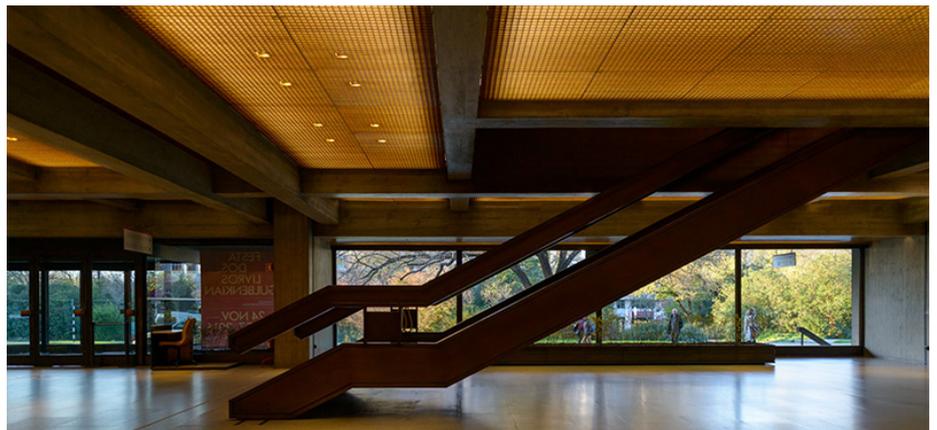
¹³ Texto original en portugués: "a simplicidade revelada na escolha e utilização dos materiais parece penetrar no desejo de inspiração no local, no respeito pela natureza do sítio, na intimidade dialogante entre interior e exterior, buscando os valores mais secretos, escolhendo as mais belas árvores como referências potenciadoras do diálogo com o preexistente e, à volta delas, trabalhando na procura de um entendimento sensível com o contexto." TOSTÕES, Ana. Os edifícios, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 143, 2006



[38] Acceso principal Museo Fundador



[39] Sala interior del Museo Fundador



[40] Escalera del vestíbulo interior del Edificio Sede

04.2 Jardín



[41] Vista aérea del lago central

El proyecto del jardín responde a la necesidad de dotar una nueva forma de vida al centro de Lisboa, a través de un jardín naturalista. Su riqueza espacial se consigue trabajando sobre un espacio tridimensional que no descuida la relación interior/exterior, y donde se promueve la agrupación de especies vegetales con el fin de crear diferentes visiones. Es importante recalcar el uso de novedosas técnicas de construcción, tales como el sistema de construcción del lago, las soluciones de drenaje y captación de agua, la generación de un ecosistema húmedo artificial en sus márgenes, y las técnicas utilizadas para la plantación y protección de árboles, entre otros.

“La concepción del parque, en un sentido perfectamente actual, se basa en el naturalismo y responde a una serie de funciones programadas que son típicas de nuestro tiempo. Los elementos construidos en el parque, como las losas de hormigón que sirven de camino para los peatones, descansan en el suelo tratando de mejorar ese concepto naturalista y contribuyen a este aspecto para la integración del parque en la estructura de los edificios”. (Gonçalo Ribeiro Telles y António Viana Barreto en *Arquitectura* nº111) ¹⁴ [41] [42].

¹⁴ Texto original en portugués:

“A concepção do Parque, de sentido perfeitamente actual, é de base naturalista e responde a uma serie de funções programadas que são próprias do nosso tempo. Os elementos construídos do Parque, tais como as lajes de betão que servem de caminho aos peões, apoiamse sobre o solo tentando valorizar aquela concepção naturalista e concorrem sobre esse aspecto para a integração do Parque na estrutura dos edifícios.”
RIBEIRO TELLES, Gonçalo.
Revista Arquitectura nr. 111, p 217, Lisboa, 1971



[42] Vista del lago Central y el Centro de Interpretación

Otro de los aspectos más relevantes es que el nuevo paisaje se basa en la memoria del lugar, donde la verticalidad de especies existentes ha condicionado la implantación de los edificios, y el uso de horizontalidad aporta cierta armonía espacial. La relación entre la estructura existente y la nueva propuesta consiguió transmitir una sensación de consenso equilibrado del espacio, volviéndose fluido, coherente y agradable. El mantenimiento del antiguo eje de composición del Parque de Santa Gertrudes fue una de las estrategias iniciales que los arquitectos tuvieron en cuenta para abordar la presencia de lugar original.

“El eje visual principal sería el que iba en dirección al lago hasta el elemento escultórico del fundador, al mismo tiempo implantado en la colina superior y cuyo eje se perdió en el claro que se anticipó a través de la baranda que separaba el jardín del Gulbenkian del jardín privado de los Condes de Vilalva. Este eje principal del conjunto fue, además, más tarde destruido”. (António Viana Barreto citado por Carapinha, 2006) ¹⁵.



[43] Vista de los caminos y el Museo del Fundador

¹⁵ Texto original en portugués:

“O eixo visual principal seria o que seguía na direcção do lago até ao elemento escultórico do fundador, ao tempo implantado na colina superior e cujo eixo se perdia na clareira que se antevia a través do gradeamento que separava o jardim da Gulbenkian do jardim privado dos Condes Vilalva. Este eixo principal do conjunto foi aliás posteriormente destruído.”

CARAPINHA, Aurora. O Jardim. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.94, 2006

¹⁶ CARAPINHA, Aurora. O Jardim. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.98, 2006

Entender la vegetación como “*un gran constructor de espacios*” (Carapinha, 2006) ¹⁶ hizo posible la protección del edificio respecto a su entorno y los ruidos producidos, y junto al moldeado del terreno se consiguió la mitigación de vientos predominantes y el descenso de inundaciones. Para ello, se basaron en dicotomías como la luz /sombra, alternando claros masivos con áreas de mayor densidad, donde aparecían o se ocultaban perspectivas, y la vegetación nativa daba paso a la recuperación de especies exóticas [43].



[46] Vista ambiente zona sur con camino sinuoso y vegetación tropical



[47] Vista ambiente zona sur con camino geométrico y vegetación frondosa

Es interesante observar que entre los espacios cerrados y abiertos se van generando espacios intermedios y fronterizos, que proporcionan nuevos entornos y suponen una sorpresa para el espectador. Ejemplos de ello, el anfiteatro al aire libre, o el jardín de rosas diseñado entre el volumen de la sede y el auditorio.

“La vegetación, la fisiografía, la hidrología y el clima generan tres condiciones generales del paisaje: la costa, el bosque y el campo abierto o el claro. Los proyectos de Cabral y, por lo tanto, los de sus alumnos, como Ribeiro Telles, aceptaron estos tres tipos, casi como datos adquiridos, y de ellos estructuran el diseño del Jardim Gulbenkian, que se construye desde el centro de un claro, que cierra y protege de un bosque y una costa”. (Marc Treib citado por Carapinha, 2006) ¹⁷ [44].



[44] Vista del anfiteatro exterior



[45] Vista de un espacio libre abierto

Es importante recalcar, que los arquitectos entendieron el parque como una continuidad formal, funcional y estética de los edificios, buscando una solución global del conjunto. De esta forma, el espacio deja de ser un escenario, y se convierte en un entorno interactivo, que vive y cambia conforme las personas que lo habitan, las estaciones y el tiempo. Se definieron tres áreas de intervención: una primera, en la zona norte, que buscaba dar protección a la Fundación respecto de la calle, una segunda, en la parte sur de los volúmenes, donde se generan las zonas de transición y, finalmente, la implantación de un bosque en la zona sur del emplazamiento. Es interesante observar la diferencia de ambientes entre el norte y el sur. Mientras que, en el norte, el terreno se forma más a través de plataformas geométricas y regulares, en el sur existe un entorno más complejo y sinuoso, con una topografía más modelada. En el norte se presenta un espacio de mayor claridad, ideal para socializar, en el sur el espacio es más íntimo, donde la vegetación densa permite aislarse de la realidad [45] [46] [47].

Todos estos espacios tienen sus propias características y juegan diferentes roles, sin embargo, compiten por conseguir una unidad. A pesar de que el jardín sea un espacio abierto para la población, termina teniendo un carácter más íntimo, funcionando más como un refugio, que conduce a la contemplación.

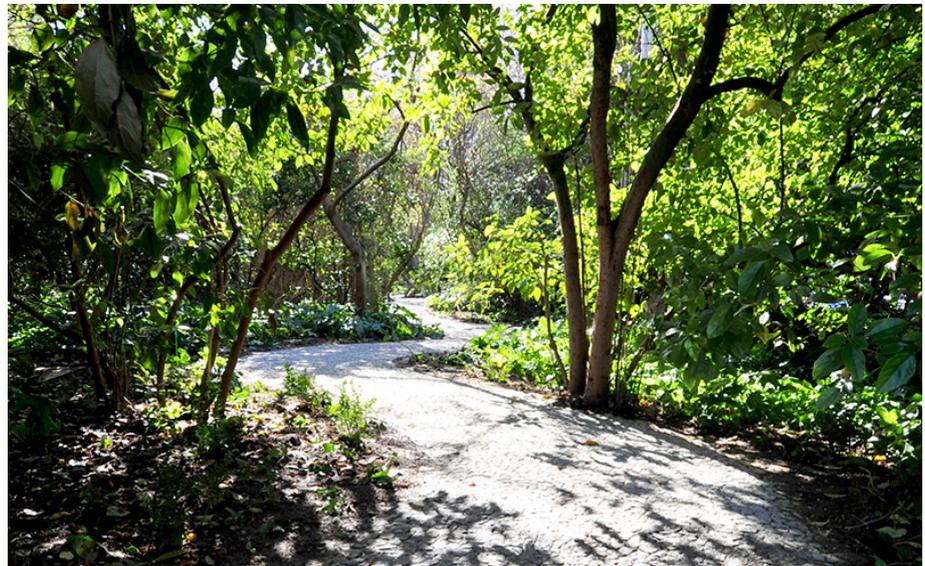
¹⁷ Texto original en portugués: “A vegetação, a fisiografia, a hidrologia e o clima geram três condições gerais de paisagem: a orla, a mata e o campo aberto ou a clareira. Os projectos de Cabral e, por conseguinte, os dos seus estudantes, como Ribeiro Telles, aceitaram estas três tipologias, quase como dados adquiridos, e a partir delas estrutura o desenho do Jardim Gulbenkian, que se constrói a partir de um centro de uma clareira, que se fecha e protege a partir de uma mata e de uma orla” CARAPINHA, Aurora. O Jardim. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.157, 2006



[48] Vista camino geométrico

Lo senderos, se reducen al mínimo, para introducir un nuevo estilo de vida, conduciendo a las personas a una mayor utilización del césped. En la zona norte, tienen un carácter más funcional, conectando la calle con el museo, mientras que, en el resto del jardín, principalmente hacia el sur, son más sinuosos y tienen un carácter más transitable. Este sistema de caminos, realizado a través de la sucesión de grandes losas geométricas de hormigón, nace de los diferentes ambientes creados por el jardín y no busca el carácter funcional de conectar un espacio con otro. Es normal encontrar pequeños rincones que se separan de los caminos para convertirse en espacios vitales.

"... No es una línea curva continua que escanea todo el espacio. Es una continuidad de momentos, de descansos, donde el Jardín nos visita con tacto y visualmente. Que están interconectados por otros momentos, no de pausa, sino de movimiento". (Carapinha, 2006) ¹⁸ [48] [49].



[49] Vista de camino sinuoso entre los Jardines

18 Texto original en portugués:

"... não é um alinhaa curvilínea continua que perscruta todo o espaço. É uma continuidade de comentos de pausas, onde o Jardim nos visita táctil e visualmente. Os quais se interligaam por outros momentos, não de pausa, maas de movimento." CARAPINHA, Aurora. O Jardim. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.135, 2006

19 Texto original en portugués:

"O perímetro da superfície de água desenha-se em espacialidades cóncavas e convexas que proporcionam uma cadencia e uma sequência de espaços e de pontos de vista, que ora se escondem ora se revelam num jogo de descoberta constante, onde a luz e a vegetação desempenham um papel fundamental." CARAPINHA, Aurora. O Jardim. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.93, 2006

Para entender el jardín en su totalidad, hay que recalcar la importancia del lago, y su estrecha relación con el anfiteatro, resultado del modelado de los márgenes del lago con un sentido escultórico y ecológico. "El perímetro de la superficie del agua se dibuja en espacios cóncavos y convexas que proporcionan una cadencia y una secuencia de espacios y puntos de vista, que a veces se esconden y a veces se revelan en un juego de descubrimiento constante, donde la luz y la vegetación juegan un papel fundamental". (Carapinha, 2006) ¹⁹.

La propuesta recoge la herencia del lago diseñado por Jacob Weiss, y lo transforma a través de una topografía moldeada y la incorporación de vegetación adecuada para humedales, generando un espacio natural que se aleja del carácter inerte de lo construido. Su importancia radica en la apertura de perspectivas y búsqueda de diferentes puntos de vista, donde el contraste entre luz y sombra, cerrado y abierto, se muestra a los

espectadores desde dentro y fuera de los edificios. Además de ser una forma para organizar el espacio, hay que añadirle su función como medio técnico para gestionar el agua de lluvia [50] [51] [52].



[50] Vista del lago desde el margen sur



[51] Vista del lago en marzo de 1959



[52] Vista del lago en junio de 1959

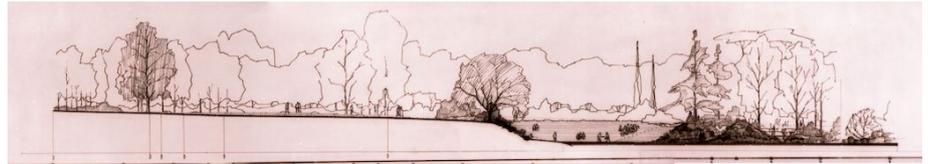
20 Texto original en portugués:

"O Parque Gulbenkian vai portanto viver, crescer e renovar-se permanentemente. Com o decorrer das estações apresentará aspectos sempre diferentes. Mas muitas das ideias de composição, proporção, caracterização de espaços e volumes, só poderão surgir em toda a sua plenitude dentro de algum tempo. Durante a execução dos trabalhos algumas soluções encontradas tiveraam de ser adaptadas ao desenvolvimento do programa inicial, mas julgamos não se terem perdido os objetivos expressos na concepção inicial."

BARRETO, Antonio. Fundação Calouste Gulbenkian: cinquenta anos: 1956-2006, Lisboa, p.214, 2007

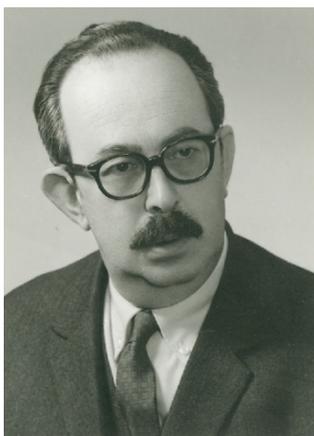
Respecto al anfiteatro, se dispone de forma excavada en la ladera, donde las filas de bancos individuales culminan en el escenario. Inicialmente estaba proyectado para ser construido sobre hierba, pero se modificó para ser el resultado más expresivo de la articulación entre lo construido y el paisaje [53].

Por lo tanto, todos estos espacios y características contribuyen al desarrollo de cierto "misterio", donde cada vez que nos involucramos con el parque se nos presenta de una forma diferente. "El Parque Gulbenkian vivirá, crecerá y se renovará permanentemente. A medida que pasan las estaciones, siempre presentará diferentes aspectos. Pero muchas de las ideas de composición, proporción, caracterización de espacios y volúmenes, solo pueden surgir en toda su plenitud dentro de un tiempo. Durante la ejecución de los trabajos, algunas soluciones encontradas tuvieron que adaptarse al desarrollo del programa inicial, pero creemos que los objetivos expresados en el diseño inicial no se han perdido". (Barreto, 2007) ²⁰.



[53] Sección longitudinal por el Anfiteatro al aire libre

05. Biografía arquitectos



[54] Alberto Pessoa



[57] Pedro Cid

Alberto Pessoa [54] (Figueira da Foz, 1919-1985, Lisboa). Arquitecto diplomado por la Escuela de Bellas-Artes de Lisboa en 1943, colabora entre 1947-50 con Keil do Amaral en la elaboración de equipamientos para los parques de Lisboa. Su primer proyecto se realiza en 1949, siendo el primer bloque en altura en Lisboa según los criterios del Estilo Internacional: un edificio de oficinas con un centro comercial en el medio adaptando la circulación peatonal a la topografía lisboeta. Posteriormente, entre 1952-55 proyecta el Conjunto de la Av. Infante Santo, una gran plataforma suspendida y separada de la vía rodada donde se asientan bloques residenciales [55]. Compagina su vida profesional con la docencia, siendo profesor de la Escuela de Bellas Artes de Lisboa, entre 1950 y 1960, además de ser director de la Revista Arquitectura. Entre sus obras más destacadas se encuentran la asociación Académica y el Teatro Gil Vicente en Coimbra [1961] [56], Auto-Silo de Porto [1961] y la Fundación Gulbenkian [1959-69] junto a Pedro Cid y Ruy d'Albuquerque. Su obra fue consagrada con el Premio Valmor²¹ en dos ocasiones, en 1949 y 1975.



[55] Bloque Residencial en Av. Infante Santo



[56] Teatro Gil Vicente, Coimbra

Pedro Cid [57] (Lisboa, 1925-1983, Lisboa). Arquitecto formado por la Escuela de Bellas Artes de Lisboa en 1952. Participa en la renovación de Lisboa en los años 50 a través de obra residencial, como el Bloque habitacional en Av. Estados Unidos [1955-57] [58]. En 1958 gana el concurso para representar a Portugal en la exposición Internacional de Bruselas 1958, [59] destacando la simplicidad, pureza y economía del pabellón. En los años 60 se dedica principalmente al desarrollo de la Fundación Gulbenkian [1959-69] Junto a Alberto Pessoa y Ruy d'Albuquerque. En 1975 ingresa al Ministerio de Administración Interna, implementando el programa de Gabinete de Apoyo Técnico [GAT], asumiendo en 1978 su dirección. Otras obras de interés son los bloques residenciales en Olivais Norte, Lisboa [1963], o el Edificio Jean Monnet en Lisboa [1974].

²¹Premio cuya finalidad es premiar la calidad arquitectónica de la nueva obra en Lisboa. Es gestionado por la Cámara Municipal de Lisboa y se entrega desde su creación en 1898



[60] Ruy d'Athouguia



[58] Pabellón Portugal en la Exposición Internacional 1958, Bruselas



[59] Bloque Residencial en Av. Estados Unidos

Ruy d'Athouguia [60] (Macao, 1917-2006, Cascais). Arquitecto formado por la Escuela de Bellas Artes de Porto en 1948, inicia su actividad en 1949 junto a Formosinho Sanchez con el proyecto del "Bairro das Estacas", [61] [62] el primer conjunto urbano lisboeta donde se aplican los principios de la Carta de Atenas. Proyecta en la década posterior la Escuela de San Miguel en Lisboa [1950-53], [63] donde implementaba los valores pertenecientes al Movimiento Moderno, la Escuela Teixeira de Pascoaes en Lisboa [1956-60], formada por pabellones de gran pureza y abstracción poética, y el Liceo Padre António Vieira en Lisboa [1959], siguiendo los valores racionalistas. En la década de los 60 proyecta junto a Alberto Pessoa y Pedro Cid la Fundación Gulbenkian. Fue condecorado con el Premio Valmor en 1975.



[61] Bloque perteneciente al "Bairro das Estacas"



[62] "Bairro das Estacas"



[63] Escuela en São Miguel, Lisboa

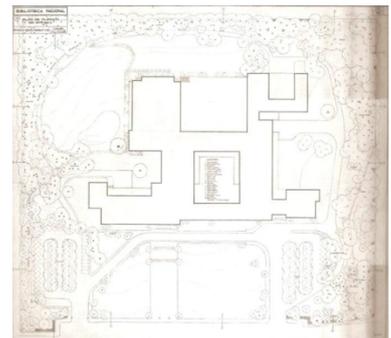


[64] António Barreto

António Barreto [64] (Lisboa, 1924-2012, Lisboa). Paisajista y silvicultor diplomado por el Instituto Superior de Agronomía de Lisboa en 1952. Se incorpora en 1953 a la Dirección General de Servicios en Urbanización, donde ocupa varios cargos de dirección en diferentes departamentos destacando la Dirección General de Planeamiento Urbano entre 1973 y 1978, el Ministerio de Obra Pública entre 1979 y 1981 o el Director General de Ordenación entre 1981 y 1987. De forma paralela se desenvuelve en la docencia siendo profesor invitado en varias universidades portuguesas [Universidad Técnica de Lisboa, Universidad de Évora e Instituto Superior de Agronomía], además de la actividad profesional, desarrollando proyectos a diferente escala. Entre 1959 y 1969 diseña junto a Gonçalo Ribeiro Telles el Jardín de la Fundación Gulbenkian. Otras obras para destacar son el encuadre de la Torre de Belém, Lisboa [1953-58], [65] el encuadre de la Ciudad Universitaria en Lisboa [1955] y el Estadio Universitario [1956] junto a Álvaro Dentinho e Ilídio de Araujo, el encuadre de la Biblioteca Nacional, Lisboa [1956], [66] el Plan de Ordenación Paisajístico del Algarve [1969] el Parque Quinta das Conchas, Lisboa [1980] [67] o el Plan Parcial de la Península de Troia [2002-2012], entre otros. En 2009 recibe el Prémio Quecus, y en 2012 es galardonado con el premio “Personalidad de la Arquitectura Paisajística Portuguesa”.



[65] Encuadre de la Torre de Belém



[66] Planta Biblioteca Nacional



[67] Plano General Parque Quinta das Conchas



[68] Gonçalo Ribeiro Telles

Gonçalo Ribeiro Telles [68] (Lisboa, 1922). Arquitecto paisajista por el Instituto Superior de Agronomía en 1950. A lo largo de su vida desempeñó diversos cargos políticos, destacando su cargo como secretario del Estado de Ambiente entre 1974 y 1976, y Ministro de Calidad de Vida entre 1981 y 1983, además de participar en la fundación de instituciones culturales nacionales, como el Centro Nacional de la Cultura en 1945. Fue figura determinante en la definición de una política del medioambiente y el paisaje dentro del Gobierno, a través de la creación de la Reserva Agrícola Nacional y la Reserva Ecológica Nacional, además de la generación de numerosas leyes ambientales y urbanísticas. De forma paralela a la política desempeña actividad docente y profesional. Junto a otros arquitectos paisajísticos funda en 1975 la licenciatura en Arquitectura Paisajística de la Universidad de Évora, donde sería catedrático entre 1976 y 1992, y nombrado Doctor Honoris Causa y Profesor Emérito en 1994. Referente a la actividad profesional, desarrolla un conjunto de proyectos a diversas escalas. Destacan el encuadre del Castelo de São Jorge en Alfama, Lisboa [1953-59], el Estudio Paisajístico en Alges, Lisboa [1967], o el corredor verde de Lisboa [1986], [69] entre otros. Junto a Antonio Barrero, diseña el Jardín de la Fundación Gulbenkian entre 1959 y 1969. A lo largo de su vida, publica varios libros y artículos donde expresa su innovador pensamiento. Todo su trabajo ha sido reconocido a nivel nacional e internacional con la concesión de numerosos premios y condecoraciones.

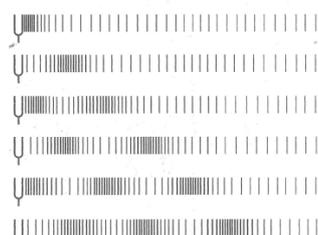


[69] Corredor verde de Lisboa

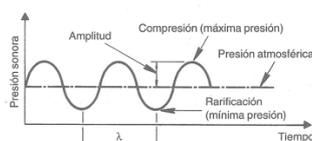
BLOQUE II: PRINCIPIOS EN ACÚSTICA



01. Introducción de los fenómenos acústicos



[1] Propagación de una perturbación en un medio elástico



[2] Movimiento armónico simple

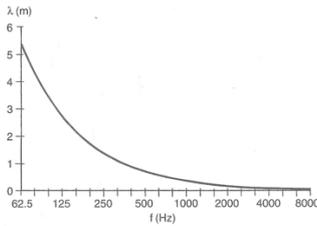
Definimos como acústica arquitectónica a la parte de la física que estudia los fenómenos vinculados a la propagación del sonido en un recinto, ya bien sea una sala de conciertos o una sala de reuniones. Se debe destacar la diferencia entre aislamiento y acondicionamiento acústico. El primero, es el nivel de atenuación sonora producida entre dos salas contiguas, bien sea entre dos salas interiores, o el interior y el exterior. El segundo, que es el cuál estudiaremos en este trabajo, es la capacidad que tiene una sala para ofrecer un confort acústico, es decir, obtener una mejor claridad sonora, calidad de la música o disminución del nivel de emisión sonora, entre otros. Por ello, es conveniente conocer las propiedades del sonido, y cómo se comportan en un recinto.

El **sonido** es una vibración dentro de un medio elástico [1], donde las partículas de aire al estar sometidas a la vibración varían de posición de forma infinitesimal de un lado a otro, generando una perturbación que denominaremos **onda**, y se propaga por el espacio a una velocidad constante. Higiní Arau comenta en su libro "ABC de la acústica arquitectónica" ¹ que mientras las partículas de aire se encuentren excitadas, se dice que se encuentran en estado de vibración o **fase**, el cual normalmente se asemeja a un movimiento armónico simple. En dicho movimiento, las partículas prosiguen una dirección, generando de forma periódica unas compresiones del medio fluido, siendo éste el momento de máxima presión, y al volver a la posición de equilibrio generan unas depresiones llamadas ramificaciones [2].

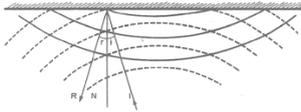
La distancia existente entre dos compresiones o ramificaciones se denomina **longitud de onda** $[\lambda]$. La superficie esférica envolvente de todas las compresiones y ramificaciones que se establecen en un fluido después de un tiempo de producirse la excitación se denomina **frente de onda**. A su vez, es relevante conocer el concepto de **periodo** de onda, que consiste en el intervalo de tiempo que transcurre entre dos compresiones o ramificaciones consecutivas $[T]$. Se mide en segundos, pero también podemos conocer el número de ciclos que realiza la onda por segundo, o bien conocido como **frecuencia** $[f]$, medida en hercios. A continuación, se observa la relación existente entre ellos:

$$\lambda = cT ; \lambda f = c ; f = 1/T [3]$$

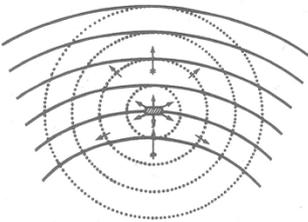
¹ ARAU Higiní "ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p. 8, 1999



[3] Relación entre la frecuencia y la longitud de onda



[4] Reflexión del sonido sobre una pared



[5] Difracción generada por un pilar

Se puede deducir que al ser la velocidad del sonido constante ² a menor frecuencia se obtiene una mayor longitud de onda, y de forma inversa se produce cuando la frecuencia es alta.

01.1 Fenómenos de onda

El conocimiento de la onda nos permite entender su comportamiento al entrar en contacto con superficie, por lo que vamos a definir los fenómenos de onda más frecuentes.

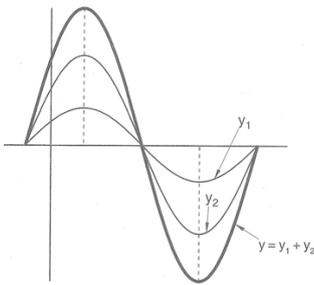
Higini Arau define en su libro "ABC de la acústica arquitectónica"³ la **reflexión** como un fenómeno por el cual la onda acústica es devuelta por una superficie, con un ángulo de reflexión equivalente al de incidencia. Cuando menor sea la longitud de onda se reflejará de forma más sencilla, como si de un rayo sonoro se tratase (entendido en el sentido geométrico). Se puede entender como la flecha perpendicular al frente de onda, indicando la dirección y velocidad de propagación. En la figura [4] se puede observar el esquema de reflexión de una onda sonora al colisionar con una pared, indicando el rayo de incidencia y de reflexión (cumpliendo la ley de Snell, que propone que tienen que ser de igual valor). Este fenómeno es propenso en superficies, pero cuando existen obstáculos de un tamaño similar o inferior a la longitud de onda, los rayos sonoros desvían su dirección y se curvan, generando el fenómeno conocido como **difracción**.

Al producirse, las ondas se doblan sobrepasando el obstáculo y propagándose detrás de este, como si de una "sombra" se tratase. En este tipo de propagación no es necesario hablar de direccionalidad del campo sonoro puesto que el sonido puede proceder de varias direcciones, en función de la geometría del obstáculo. Dicha flexión de la onda, conocida como **dispersión**, es más pronunciada en determinadas frecuencias y relieves del obstáculo [5].

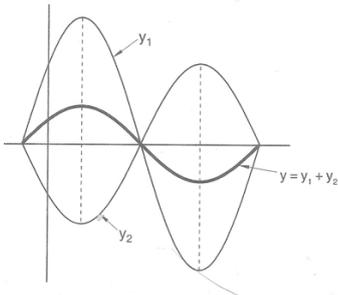
Por consiguiente, la cantidad de difracción depende de la naturaleza de la onda, su longitud de onda y el tamaño del obstáculo, además de estar presente en la incisión sobre superficies huecas, tales como ventanas, aparte de condicionar la arquitectura de salas donde se quiera obtener una calidad sonora.

² Higini Arau en su libro "ABC de la acústica arquitectónica" utiliza $c=340$ m/s

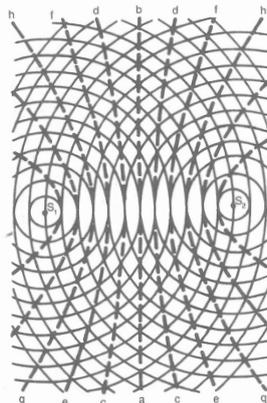
³ ARAU, Higini "ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p. 10, 1999



[6] Interferencia constructiva



[7] Interferencia destructiva



[8] Interferencia de ondas de dos focos

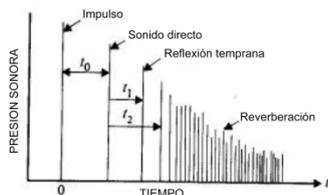
A su vez, es importante conocer el fenómeno de **interferencia**, el cual Higiní Arau define como la superposición de dos o más ondas que comparten misma frecuencia, pero con distinta fase o dirección de propagación.

Distinguimos la **interferencia constructiva** [6], que se establece al estar las partículas de aire en el mismo estado de vibración, donde la amplitud resultante es la suma de ambas, y la **interferencia destructiva** [7], generada cuando la fase de las ondas difiere 180 grados, dando como resultado una amplitud que disminuye, pudiendo ser cero si ambas tienen la misma amplitud. Normalmente dicho fenómeno se utiliza para reducir el ruido, a través de la absorción activa ⁴.

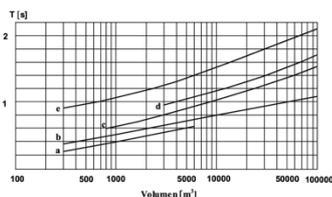
Por último, es interesante conocer la **interferencia estacionaria**, que se produce al tener dos sistemas que emiten el sonido con la misma frecuencia y amplitud, pero de sentido contrario. Como podemos observar en la figura [8], las amplitudes aumentan en los puntos que comparten la misma fase, y en aquellos puntos que la fase difiere 180 grados, no se producirá ningún tipo de vibración. Estos primeros se conocen como vientres (puntos de máxima vibración) y los segundos como nodos (puntos de vibración nula).

⁴ El fenómeno de absorción se explica en mayor profundidad en el apartado 03

01.2 Fenómenos acústicos



[9] Sonido directo, reflexiones tempranas y reverberación



[10] Tiempo de reverberación óptimo según la actividad:
a- Estudio de voz
b- Sala de conferencias
c- Estudio radiofónico
d- Sala de conciertos
e- Iglesia

Al entrar en contacto con una superficie reflectora, se puede producir una única reflexión que retorna al foco sonoro inicial, conocido como el fenómeno del **eco**. Suele generarse aproximadamente 100 ms tras haberse emitido el sonido ⁵ y depende intrínsecamente de la distancia entre fuente y superficie, d , y la velocidad del sonido, c .

$$t = \frac{2d}{c}$$

Existe una fuente sonora emisora del sonido directo con dirección a un receptor. Generalmente en el entorno existen superficies que reflejan el sonido, generando unas reflexiones que se encuentran separadas temporalmente de forma breve, sin llegar a percibirse como eco, que se denominan **reflexiones tempranas**. Después de estas, siguen apareciendo una sucesión de reflexiones que de forma paulatina van disminuyendo en intensidad [9].

A esta permanencia de sonido se la conoce como **reverberación**. La disminución se debe a que cada reflexión al impactar en la superficie, parte de su energía es absorbida y la otra parte se refleja y continúa propagándose. Para conocer el tiempo que tarda en desaparecer el sonido, se utiliza el concepto de tiempo de reverberación, definido como el número de segundos necesarios para que la intensidad del sonido establecido por una fuente sonora decaiga 60 decibelios o hasta que es inaudible. Se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$T = 0.161 \frac{V}{\alpha S} \text{ [s]}^6$$

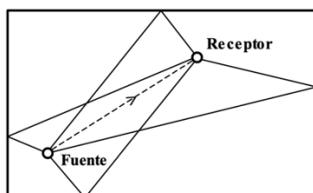
V = Volumen habitación [m^3]
 S =Superficie interior [m^2]
 α = coeficiente absorción

En la actualidad gracias a numerosas investigaciones que han evaluado la acústica de multitud de salas, se ha logrado obtener el tiempo de reverberación óptimo dependiendo del volumen y actividad de la propia sala [10].

⁵ Si existen superficies paralelas distantes se puede generar un eco repetitivo o flotante

⁶ Es la primera propuesta de fórmula y la más extendida en la actualidad

02. Geometría en la acústica



[11] En línea discontinua se indica el sonido directo y en línea continua las reflexiones

La consecución de un diseño óptimo en un recinto se realiza a través del conocimiento completo del comportamiento del sonido. Para enfrentarse a este problema se han desarrollado tres métodos de pensamiento: **la acústica geométrica, estadística y ondulatoria.**

La primera consiste en la asociación de los rayos de propagación de la onda sonora desde la fuente sonora, los cuales se extienden con una dirección determinada. No tienen entidad física, sino que se tratan de líneas conceptuales que ayudan a simplificar el comportamiento sonoro. El método impone una serie de restricciones para un correcto funcionamiento: se establecen longitudes de onda inferiores a las dimensiones de la sala y los obstáculos ⁷ y la impedancia ⁸ del medio ha de ser muy inferior respecto a la impedancia de las paredes reflectoras.

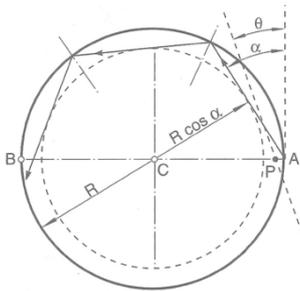
Además, se aplica la ley de reflexión, determinando que los ángulos de incidencia y reflexión sonora son los mismos, permitiéndonos suponer que una fuente sonora situada frente a un plano de reflexión producirá una fuente imagen a una distancia simétrica que emanará en la dirección de los rayos reflejados. Este método es conocido como reflexión especular, y se empleará de forma posterior en el análisis de la Fundación Gulbenkian [11].

Los otros métodos están enfocados a un estudio matemático e informático del sonido y no se entrará en detalle debido a la complejidad de estos y la falta de recursos materiales para llevarlas a cabo.

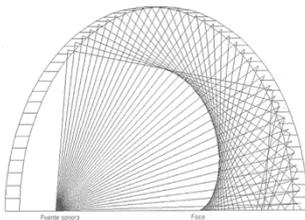
⁷ Para evitar la difracción del sonido

⁸ Se define impedancia como la resistencia que opone un medio en la propagación de ondas sonoras
Sociedad Española de Acústica. Glosario de términos acústicos, Temas de acústica vol. 3, Madrid. p. 37, 2012

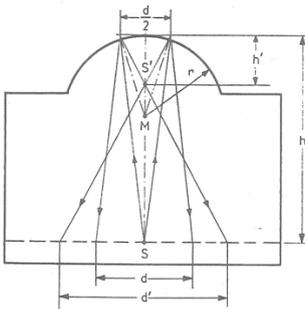
02.1 Fenómenos acústicos a evitar en salas



[12] Propagación de un rayo sonoro en una sala circular



[13] Formación de concentraciones sonoras en una sala hemisférica



[14] Reflexión sobre una cúpula

Existen factores que pueden impedir que la acústica de un recinto sea la idónea, ya bien sea por la aparición de fenómenos acústicos no deseados o por el uso de formas geométricas que los generan.

Uno de los principales fenómenos a evitar es el eco, dado que supone la repetición del sonido original producido con 0,1 segundos de retardo. Cuando las paredes del recinto están dispuestas de forma paralela se genera el eco flotante, siendo la solución la desigualdad entre las mismas. Otro de los fenómenos más chocantes en la propagación del sonido son los susurros. Se tratan de sonidos débiles con un alto contenido de frecuencias altas y una longitud de onda pequeña que facilita su propagación. Los recintos donde se producen una concentración de estos se denominan “susurros de galerías”, normalmente asociados a espacios curvos o abovedados, debido a la sencillez de reflexión que permite su geometría, como se puede observar en la figura [12]. El otro problema de los recintos curvos es la concentración energética del sonido de forma puntual, impidiendo una distribución homogénea, como se observa en la figura [13], donde el recinto con forma cóncava genera una curva cáustica ⁹.

A su vez, las superficies curvas tienden a aumentar la energía reflejada si es comparado con un techo plano. En el ejemplo de la figura [14], se observa una fuente sonora S, emisora de los rayos sonoros que cubren la distancia $d/2$. Al reflejarse en la cúpula, convergen en S' ¹⁰ y alcanzan el suelo abarcando una distancia $d'/2$. Las mismas reflexiones en un techo plano estarían comprendidas en el interior de la distancia d . El único caso donde las reflexiones son más débiles es aquellas en las que el radio de la cúpula es superior a $h/2$ ¹¹.

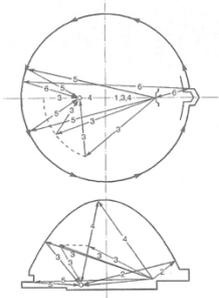
Las formas catenarias suelen provocar asimismo reflexiones indeseables dependiendo de la posición del foco sonoro, como se puede observar en la iglesia “The Church of Tomorrow” en Oklahoma, EE. UU. [15].

Respecto a las cúpulas abovedadas, reflejan los rayos sonoros de forma casi paralela sobre el suelo, siendo una opción válida cuando los techos disponen de poca profundidad, puesto que de esta forma alejan el sonido del origen [16].

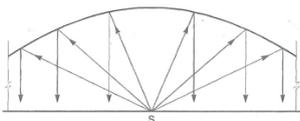
⁹ Se define como el lugar geométrico donde convergen las reflexiones producidas por un techo hemisférico

¹⁰ Foco simétrico

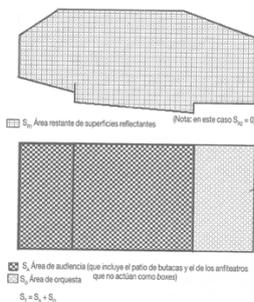
¹¹ Altura del recinto



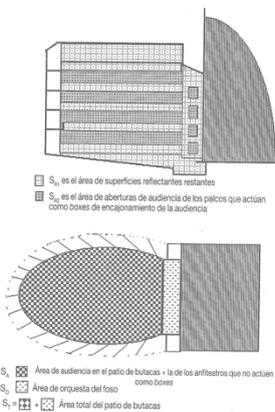
[15] Diagrama sonoro The Church of Tomorrow, Oklahoma, EEUU



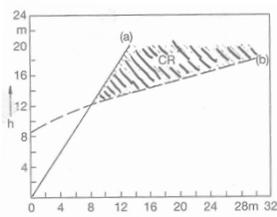
[16] Reflexiones en un techo abovedado



[17] Caso normal



[18] Caso general



[19] Relación entre altura h y profundidad r de una sala. La parte sombreada representa la región crítica de generación de eco

Aun así, es conveniente tener precaución con estas formas, ya que si la curvatura es superior a $h/2$ el sonido reflejado en el suelo retornará al techo focalizándose en el punto original. Las elipses tampoco son recomendables en la acústica. Hay que destacar que las formas convexas son las únicas que funcionan adecuadamente gracias a la correcta difusión del sonido.

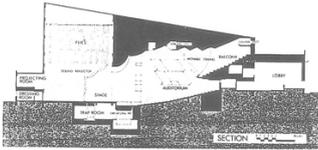
02.2 Dimensiones y proporciones de un recinto

Desde el punto de vista de la acústica asociamos el techo como elemento principal debido a que es la mayor superficie con capacidad para transmitir el sonido, además de definir la altura de la sala que condicionará el volumen de esta y por ende la condición acústica.

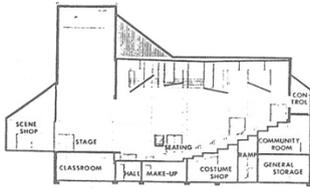
En el diseño es importante establecer de antemano la actividad principal de la sala ya que será determinante en las variaciones necesarias en la sección del conjunto para conseguir el volumen que permita obtener el tiempo de reverberación óptimo. A su vez, otro factor imprescindible en las primeras fases del diseño es el aforo máximo del recinto. Un recinto está considerado bien dimensionado si existe una correcta relación entre volumen y audiencia, teniendo en cuenta únicamente el efecto de absorción acústica de la audiencia en la consecución del tiempo de reverberación.

Los recintos se pueden agrupar en dos casos, el normal y el general. En el primero, gran parte de la audiencia está situada en un patio de butacas y únicamente una ínfima parte se dispone en un anfiteatro poco profundo y a gran distancia del techo [17]. En el segundo, una parte del aforo se dispone en un patio de butacas y la otra parte se reparte a través de palcos a distinta altura, generando de esta forma un encajonamiento de la audiencia ¹² [18]. El caso normal es frecuente en salas de conferencias, mientras que el caso general se observa en salas de ópera y teatro.

Respecto a la propia forma del techo, cada caso necesita de un diseño particular, aunque el objetivo a cumplir es el mismo: la obtención de una difusión homogénea del sonido, evitando los defectos anteriormente descritos. Generalmente la forma utilizada se asemeja a una pendiente inclinada de forma ascendente hacia el fondo de la sala, puesto que se trata de la situación idónea para evitar generaciones de eco o



[20] Hachinohe Public Hall, Japón



[21] David Douglas Performing Arts Center, Oregón, EE.UU.



[22] Filarmónica Berlín, Alemania



[23] Ejemplo de nube acústica en el Aula Magna de la Univ. Caracas, Venezuela



[24] Perfil de audiencia con un ángulo constante

12 El cálculo del caso general se puede simplificar al normal haciendo desaparecer los huecos de la audiencia y reemplazarlo por paredes

13 Fue necesaria la colocación de paneles reflectores adicionales en la zona de la orquesta

14 Mínimo 10 centímetros entre las líneas de visión.

zonificaciones donde la reverberación es excesiva. En la figura [19] se puede apreciar la relación entre la altura y la profundidad de la sala.

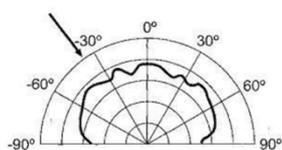
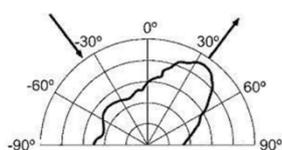
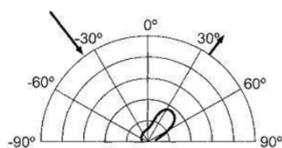
Asimismo, es necesario conseguir una equipotencialidad del techo a través de su diseño, pudiendo asegurar que tanto el sonido directo como el reflejado es constante en la integridad de la sala. Es por ello por lo que se observan roturas en el techo, como en *Hachinohe Public Hall* en Japón [20] o están formada por una serie de paneles reflectores, como en *David Douglas Performing Arts Center* en Oregón [21]. De forma menos frecuente son aquellas salas configuradas por formas convexas como apreciamos en la Filarmónica de Berlín ¹³ [22].

En última estancia, otros elementos que componen el diseño acústico son las nubes acústicas, tratándose de grandes superficies reflectoras cuyo objetivo es reforzar el sonido directo a través del incremento de reflexiones de los mismo, contribuyendo a mejorar el campo sonoro de ciertas frecuencias [23].

En el caso de la existencia de terrazas, es imprescindible tener en cuenta la reflexión generada por las paredes del fondo, debido a que pueden afectar de forma considerable a la audiencia que se encuentra delante del muro. Finalmente, el tratamiento del suelo ha de ser preciso para limitar la atenuación del sonido generado por la difracción que existe sobre la cabeza de los oyentes. La adecuada separación entre las líneas de los asientos ¹⁴ y una elevación del suelo bajo un ángulo constante dotan al recinto de una disposición geométrica óptima [24].

03. Materialidad en la acústica

La materialidad de las superficies de un recinto juega un papel determinante en la consecución de un funcionamiento sonoro óptimo, apoyando las decisiones geométricas tomadas. Se pueden englobar los materiales en tres grupos principales, dependiendo del tratamiento del sonido que realizan: **absorbentes, reflectores y difusores del sonido** [25].



[25] Relación entre las coberturas de absorción

- a- Absorbente
- b- Reflector
- c- Difusor

15 El mecanismo que origina el proceso de absorción tiene en cuenta una serie de factores: las irregularidades de la superficie del material, los efectos de difracción de la onda incidente dado los accidentes superficiales del material, el efecto de conducción térmica entre fibras y aire y el efecto de viscosidad por fricción de la vibra.

16 Consecuencia del principio de conservación de la energía

17 De sus siglas en inglés, Noise Reducción Coeficiente

18 ARAU, Higiní "ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p. 178, 1999

19 Las frecuencias graves oscilan entre 125-250 Hz, las intermedias entre 500-1 000 hz y las agudas entre 2 000-4 000 Hz.

03.1 Absorbentes acústicos

Una parte de la energía sonora emitida por un frente de ondas, al chocar con una frontera que separa dos medios se refleja de forma especular, mientras que la otra parte se transmite. Una porción de la misma gracias a mecanismos **15** se convierte en energía calorífica, denominando a este proceso como absorción acústica [26]. El proceso se entiende a través de la siguiente fórmula:

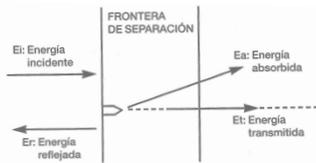
$$E_i = E_\alpha + E_r + E_t ; 1 = \alpha + r + t ;^{16}$$

Siendo $\alpha = \frac{E_\alpha}{E_i}$ [coef. absorción]; $r = \frac{E_r}{E_i}$ [coef. reflexión]; $t = \frac{E_t}{E_i}$ [coef. transmisión]

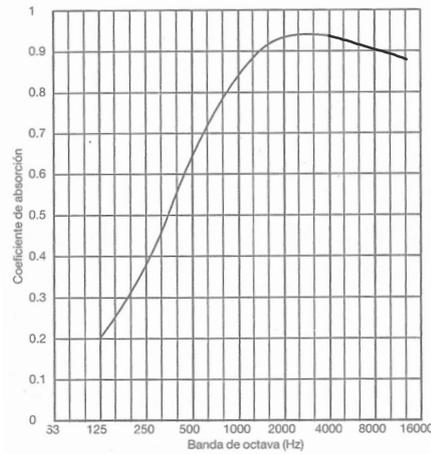
No hay que confundir la absorción con el aislamiento, debido a que los materiales absorbentes tienden a ser poco aislantes del sonido. Hay que tener en cuenta que el coeficiente de absorción varía en función de la frecuencia, oscilando entre los 125 y 4 000 Hz. Se trata de un valor adimensional que tiene un rango entre 0 y 1. Otro parámetro de interés es el coeficiente de reducción sonora o NRC **17**, que consiste en la media de coeficientes de absorción en frecuencias de 250, 500, 1 000 y 2 000 Hz, denominadas bandas de octavas, necesario para determinar la aplicación del material.

Referente a los materiales, Higiní Arau en su libro "ABC de la acústica arquitectónica" **18** los engloba en cuatro grupos principales. En el primero encontramos aquellos materiales porosos, flexibles y no flexibles como pueden ser los yesos acústicos, bloques de hormigón, fibras de vidrio... capaces de absorber de forma idónea frecuencias agudas e intermedias **19** **20** [27].

En segundo lugar, se encuentran aquellos materiales flexibles cubiertos por una superficie no porosa ligera, de tal manera que

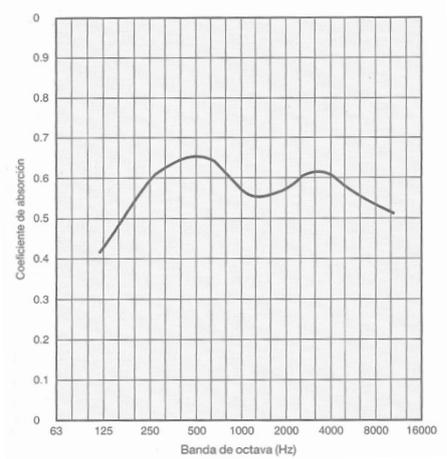


[26] Proceso de absorción en el balance energético



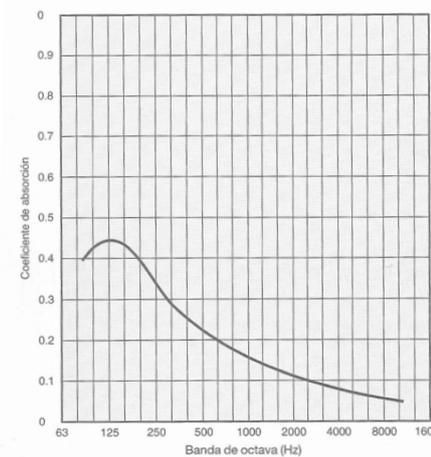
[27] Curva absorción grupo 1

Destaca por un alto rendimiento en frecuencias intermedias (500-1 000 Hz) y cercano a 1 en frecuencias a partir de 1 000 hz.



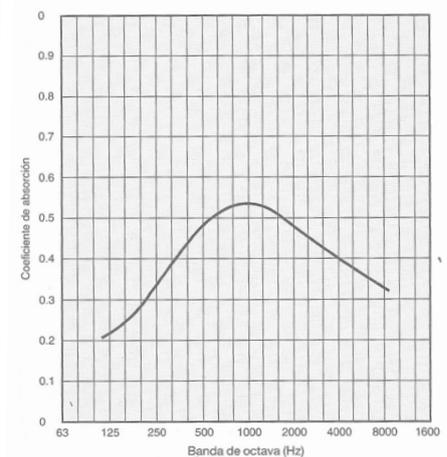
[28] Curva absorción grupo 2

Destaca por un rendimiento razonable en los tres rangos de frecuencias, con una mejora en las frecuencias intermedias (500-1 000 Hz).



[29] Curva absorción grupo 3

Destaca por un buen rendimiento en frecuencias muy graves (100-250 Hz), mientras que en el resto de los rangos de frecuencias decae considerablemente.



[30] Curva absorción grupo 4

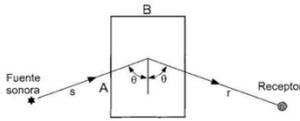
Destaca por un rendimiento razonable en los rangos de frecuencias intermedias y altas (500-2 000 Hz).

20 Los materiales porosos son idóneos para la absorción acústica debido a su estructura interna formada por agujeros en forma de túneles o tramos, de tal forma que, al incidir la onda sonora, la estructura comienza a vibrar y parte de la energía se convierte en calor gracias a la fricción y la viscosidad del aire

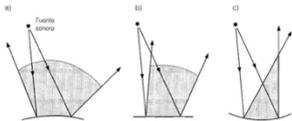
21 El mecanismo de absorción es distinto a los anteriores dado que la frecuencia de resonancia se sincroniza con la onda sonora incidente produciendo una fricción interna por amortiguamiento, similar a un muelle.

absorben cualquier frecuencia con un coeficiente de absorción intermedio [28]. En otro grupo se engloban los paneles membrana o ligeros, siendo aquellos paneles que se montan de forma separada a la superficie rígida, generando una cavidad de aire que se rellena con material absorbente poroso ²¹. Es idóneo su uso para frecuencias graves [29]. Finalmente se distinguen los resonadores de Helmholtz, conformado por láminas rígidas perforadas revestidas en el interior por un material poroso. Permiten un mayor control de las frecuencias de resonancia gracias a la posible variación de la geometría y tamaño de las incisiones [30].

03.2 Reflectores acústicos



[31] Reflexión en un plano



[32] Zona de cobertura de los diferentes reflectores

- a- Superficie convexa
- b- Superficie plana
- c- Superficie cóncava

El uso de materiales reflectores en el diseño de salas acústicas permite la aparición de reflexiones útiles en zonas que, en caso de no utilizar estos elementos, no tendrían acceso a ellos, como por ejemplo la zona del público. Se considera reflexión útil, ²² aquella que consigue alcanzar el receptor en los primeros ochenta metros desde la llegada del sonido directo. Por norma general, cualquier material liso, no poroso y rígido tiene la capacidad de reflejar la mayor parte de la energía incidente, a pesar de seguir condicionado por el grado de absorción del propio material. Se puede recordar que el fenómeno de reflexión sólo se produce si la superficie tiene unas dimensiones superiores a la longitud de onda incidente, ya que de forma contraria se considera un obstáculo, generando un efecto de difracción de la onda sonora.

Es posible clasificar los reflectores en base a su forma geométrica. Los reflectores planos son aquellos que reflejan la onda acústica en una dirección determinada. En la figura [31] se puede observar el fenómeno de reflexión que se produce en un plano. Se ha de considerar que al ser un elemento finito al alcanzar frecuencia inferior a 500 Hz aparecerá la difracción del sonido, dado que el nivel de presión sonora asociado a la reflexión disminuye de forma progresiva respecto a la frecuencia de la onda. Normalmente se desaconseja su uso en grandes superficies debido a ciertas anomalías que se producen, como puede ser el desplazamiento de la fuente sonora ²³ o la coloración del sonido ²⁴.

Respecto a los reflectores curvos, se dividen entre perfil convexo y perfil cóncavo. Los primeros consiguen dispersar el sonido abarcando una mayor zona de cobertura, aunque el nivel de sonido reflejado es menor. Su funcionamiento óptimo se consigue con un radio de curvatura superior a cinco metros, dado que sino el elemento pasará a comportarse como un difusor. En cambio, los segundos logran obtener un efecto de localización del sonido reflejado con un nivel sonoro aumentado en una determinada dirección. El problema de estos elementos es que la energía reflejada supera a la energía del sonido directo, evitando su uso. En la figura [32] es posible observar las zonas de cobertura de los diferentes reflectores.

²² Solo se cumple en grandes salas

²³ La procedencia del sonido se ve afectada, dando la sensación de que procede de la superficie reflectada en lugar del escenario, produciendo un efecto de falsa localización de la fuente sonora

²⁴ Se habla de coloración sonora cuando se realzan o atenúan frecuencias determinadas del sonido al combinarse las frecuencias del sonido directo con las del sonido reflejado

03.3 Difusores acústicos

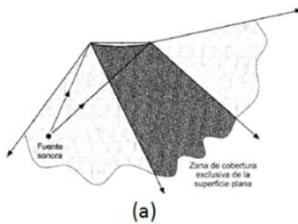
A diferencia de los reflectores, en los difusores acústicos la energía reflejada se reparte de forma uniforme en todas las direcciones, generando de esta forma un sonido envolvente que consigue aumentar el grado de impresión espacial ²⁵.

Asimismo, puede utilizarse como corrector de anomalías sonoras como la coloración del sonido o el desplazamiento de la fuente, anteriormente descritas. Aun así, el funcionamiento óptimo se desenvuelve en ciertas bandas de frecuencias que dependen de las dimensiones del difusor. Respecto a su disposición en grandes salas, se colocan generalmente en los asientos, a pesar de que su eficacia es menor debido al grado de absorción de los materiales. De tal forma que es necesario la disposición complementaria en paredes o el propio techo.

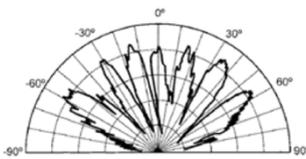
Podemos agrupar los difusores en cuatro grupos principales: ²⁶ Los difusores policilíndricos están compuestos por superficies lisas convexas con una curvatura de radio inferior a cinco metros [33]. Los difusores MLS son aquellos cuya superficie se compone por secuencias dentadas de forma periódica [34].

Respecto a los difusores QRD, están formados por superficies que disponen de ranuras de igual tamaño, pero a diferente profundidad y separados por divisores finos y rígidos. Pueden ser unidireccionales, donde las ranuras se disponen en forma de bandas, o bidireccionales, cuyas ranuras son cuadrados [35].

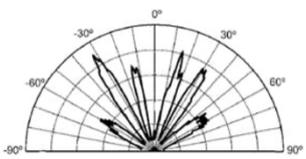
Finalmente, los difusores PRD son muy similares a los anteriores, con la única diferencia que la profundidad de las ranuras es obtenida por una secuencia diferente [36].



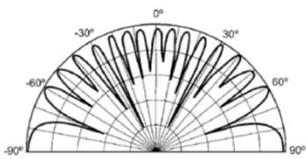
[33] Cobertura de un difusor policilíndrico



[34] Cobertura de un difusor MLS



[35] Cobertura de un difusor QRD unidireccional



[36] Cobertura de un difusor PRD

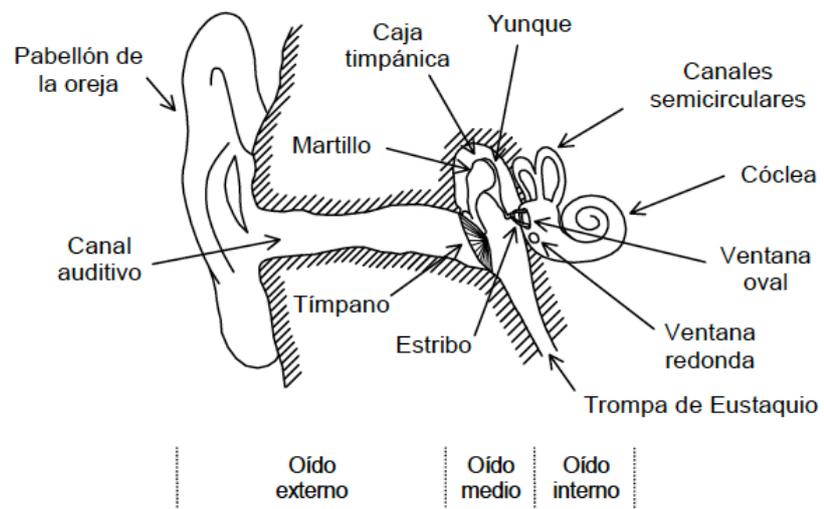
²⁵ Cuanto mayor es el grado de impresión, mejor es la valoración de la calidad acústica del recinto

²⁶ BONGIOVANNI, P., & CASCINO, M. Análisis y diseño de difusores acústicos. p.2, 2011

04. Psicoacústica

La audición humana [37] es un proceso complejo que consiste en un tratamiento sensitivo y perceptivo de la propagación de onda, donde el oído humano ayuda a la transformación de la onda acústica en impulsos eléctricos neurológicos percibidos por el cerebro de forma posterior. La psicoacústica es la ciencia que estudia las relaciones existentes entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que el ser humano realiza a partir de las mismas.

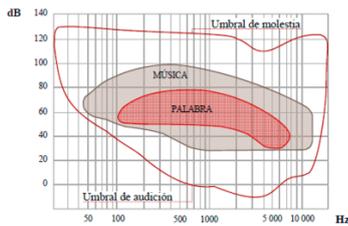
Sus principales objetivos consisten en caracterizar la capacidad de respuesta del sistema auditivo, conocer los umbrales de audición y de estímulo, y la capacidad de comprensión acerca de la variación en el tiempo de la sensación producida por el estímulo. Al tratarse de una disciplina empírica, la obtención de los resultados se realiza de forma estadística, en base a resultados concretos de experimentos que expresan cierta similitud.



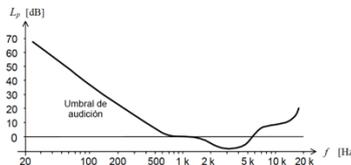
[37] Esquema del aparato auditivo

04.1 Umbral psicológico y umbral de audición

Ante la aparición de un estímulo el organismo reacciona de forma acorde a la intensidad de este, originando una sensación que puede ser evaluada a través del informe de un estudio. Aún así, existe una subjetividad en el efecto producido, dado que puede verse influido por circunstancias tales como la edad, cultura, hábitos... de cada individuo, de manera que los resultados son fiables en contextos sociogeográficos concretos.



[38] Rango de audición



[39] Diferencia perceptible para el nivel de presión sonora en función de nivel de presión a 1 kHz

Los umbrales psicológicos son aquellos donde se puede medir de forma sencilla la reacción que produce un determinado estímulo. Según Federico Miraya en su libro "Acústica y Sistemas de sonido" ²⁷, existen dos tipos de umbrales: absolutos y diferenciales.

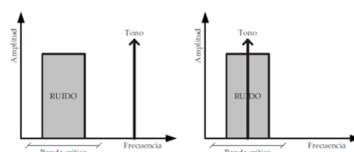
El primero consiste en la mínima intensidad para la cual la mitad de los intentos considera que el estímulo está presente. Es importante especificar las condiciones del ensayo para determinar el umbral. Se utilizan dos metodologías para determinar el umbral absoluto. El método de mínimos cambios, consiste en la aproximación gradual desde abajo y desde arriba, hasta que el sujeto percibe el estímulo, y la obtención del promedio de ambos valores. En cambio, el método de estímulos constantes se fundamenta en la exposición de estímulos de intensidades fijas alrededor del posible umbral, repitiéndose de forma aleatoria. Se declara válido si el sujeto lo detecta en la mitad de las ocasiones.

El umbral diferencial responde a la mínima intensidad por la cuál un estímulo excede a otro, siendo reconocido como diferente en la mitad de los intentos. Se pueden aplicar las metodologías precedentes, pero destaca el método del error promedio. En éste, el sujeto tiene el control de la intensidad de un estímulo y su objetivo es igualarlo a uno que se encuentra fijo, obteniéndose el umbral a partir del error promedio cometido. Hay que recalcar que los valores de los umbrales no están perfectamente determinados, debido a que una misma metodología puede variar dependiendo de su aplicación, ya que el sujeto puede cansarse o, por el contrario, agudizar la percepción.

Referente al umbral de audición, se define como el nivel de presión sonora correspondiente al umbral de intensidad. Es decir, el rango de amplitudes y frecuencias en las que el ser humano es capaz de detectar el sonido. En condiciones óptimas, el ser humano puede percibir los sonidos en un rango entre 20 y 20 000 Hz, como se puede apreciar en la figura [38], aunque debido a la composición del aparato auditivo, existen frecuencias que se perciben de una forma más débil que otras. La resonancia del canal auditivo está entorno a 3 000 Hz, de forma que el umbral de esa banda de frecuencias es inferior a otras. En la figura [39] se muestra la presión sonora, L_p en función de la frecuencia.

²⁷ MIRAYA, F. Acústica y Sistemas de Sonido. UNR Editorial, Rosario, Argentina p.79, 2006

04.2 Enmascaramiento sonoro y bandas críticas



[40] Diagrama explicativo de las bandas críticas

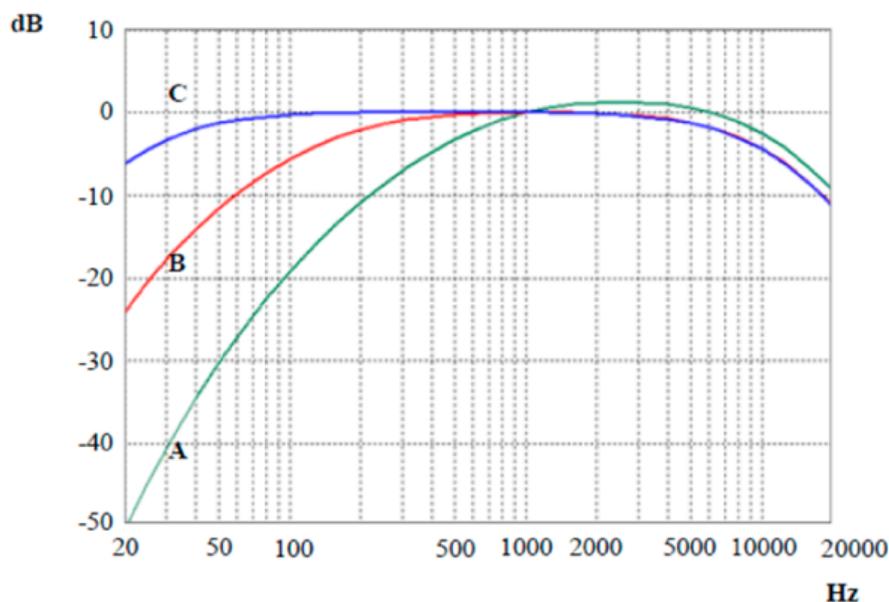
El enmascaramiento sonoro se define como el proceso por el cual el umbral de audición de un sonido aumenta debido a la presencia de otro sonido, impidiendo la percepción de este. Es un fenómeno apreciable con frecuencia en el ámbito urbano, poniendo como ejemplo la conversación de dos personas que se ve afectada por el ruido urbano de forma parcial o total. El enmascaramiento depende del nivel de presión entre el sonido enmascarante y el enmascarado y la separación de frecuencia y de tiempo entre estas. Se puede producir de forma simultánea o no simultánea. El primero se presenta cuando ambos sonidos coinciden temporalmente, mientras que en el segundo el efecto se produce de forma anterior (pre-enmascaramiento) o posterior (post-enmascaramiento). Para medir este efecto, se utiliza el umbral de enmascaramiento, que se entiende como el nivel de presión sonora de un sonido de prueba necesario para que este sea apenas audible en presencia de un sonido enmascarante.

Éste fenómeno también se emplea de forma positiva cuando, por ejemplo, en una sala de espera de un dentista para obtener una sensación sonora de tranquilidad, se utiliza un sonido de enmascaramiento (la música de fondo) con la finalidad de mitigar la falta de aislamiento acústico.

Las bandas críticas consisten en los rangos de frecuencia donde un tono bloquea la percepción de otro, como se puede observar en la figura [40]. En el caso de la izquierda, se observa que el tono no está enmascarado por el ruido, de tal forma que su umbral de enmascaramiento es el mismo independientemente del nivel sonoro del ruido. En cambio, en el caso de la derecha, el tono está enmascarado por el ruido, y su umbral de enmascaramiento variará en función del ancho de banda del ruido, aunque existe un punto crítico a partir del cual ya no se produce un cambio en el umbral de enmascaramiento, siendo el ancho de banda crítico. Se puede establecer de esta forma, que la banda crítica determina la capacidad de resolución del sistema auditivo frente a dos o más frecuencias simultáneas.

04.3 Sonoridad

La sonoridad es el parámetro perceptivo sonoro por el cual se ordenan los sonidos en base a su intensidad ²⁸ de menor a mayor. Está relacionada con el nivel de presión sonora, una escala de tipo logarítmica que comprime el rango de la presión sonora generada, pero también está influida por la frecuencia del sonido, su ancho de banda o la duración de este, entre otros. Los instrumentos que se utilizan para medir el nivel de presión sonora son los sonómetros, los cuales tienen unos filtros de ponderación, con el objetivo de imitar la respuesta del oído humano, acentuando las frecuencias donde el oído es más sensible y atenuando aquellas en las que es menos sensible. De esta forma, se puede obtener la corrección que hay que aplicar al nivel de presión sonora de un tono en una determinada frecuencia para obtener su nivel sonoro. En la figura [41] se observan las curvas de los filtros de ponderación, siendo el filtro A para sonidos débiles, el filtro B para sonidos intermedios, y el filtro C para sonidos intensos, donde se refleja la corrección anteriormente descrita.



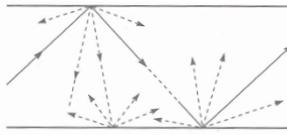
[41] Curvas de los filtros de ponderación

²⁸ La intensidad sonora se define como la potencia que atraviesa la unidad de área normal a la dirección de propagación de onda. MIRAYA, F. Introducción a la Psicoacústica p. 25, 2011

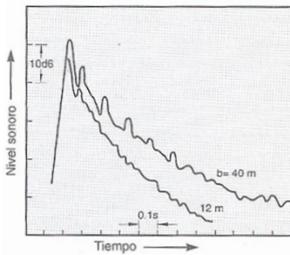
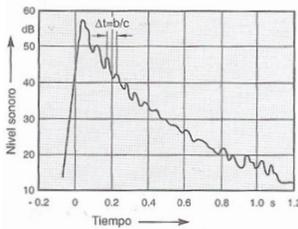
BLOQUE III: ANÁLISIS ACÚSTICO



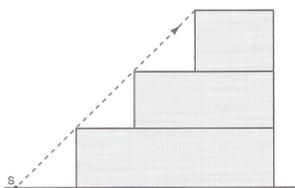
01. La Fundación y su entorno



[1] Esquema de reflexión entre edificios



[2] Curvas de reverberación en calles
b: anchura entre edificios



[3] Apantallamiento por desplazamiento de los volúmenes

1 MONTOYA PÁRRAGA, L. C. La forma, la acústica y el revestimiento de materiales en el auditorio León de Greiff. Universidad Piloto de Colombia. 2018
La metodología aplicada en este trabajo es similar a la tesis.

2 ROBLES, M. D. C., MARTÍNEZ, C. F., & BOSCHI, C. Green spaces as mitigation strategy to control sound pollution. Assegment and analysis of O'Higgins park in Mendoza City, Argentina. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 35(4) p.90, 2019

Una vez presentados los principios acústicos básicos, se precede a su aplicación en el análisis acústico de la Fundación. El estudio se divide en tres partes: La Fundación y su entorno urbano próximo, el anfiteatro al aire libre y el Gran Auditorio, donde se procede a una descripción gráfica de la geometría y la materialidad de cada espacio, acompañados de los estudios gráficos pertinentes para entender el comportamiento acústico¹.

01.1 Acústica en el entorno urbano

En el entorno urbano se puede apreciar una transmisión acústica proveniente de reflexiones procedentes de distintos focos sonoros, tales como vehículos, personas o animales, y a la dispersión de las ondas al incidir en las fachadas de los edificios o los numerosos obstáculos urbanos. Estas reflexiones se propagan en forma de campos sonoros reverberantes, a los cuales se suman los campos sonoros directos [1].

Los principales factores involucrados son las alturas de los edificios y la distancia existente entre los edificios. El comportamiento del nivel de presión sonora se puede apreciar en la figura [2] donde se observa una curva que se va atenuando en el tiempo (la inclinación depende de la anchura de la calle) donde van apareciendo pequeños picos generados por las reflexiones posteriores. La energía sonora incidente se dispersa al cielo, de tal manera que la altura de los edificios influye al dificultar la eliminación de dicha energía. Además, se añade que la composición de las fachadas suelen ser superficies duras que reflejan el sonido, teniendo una absorción nula o insignificante.

El exceso de reverberaciones puede producir un clima sonoro que imposibilite la inteligibilidad de las conversaciones en el espacio exterior, pudiendo llegar a interferir en espacios interiores colindantes. Ante esta adversidad, la solución podría residir en el propio diseño formal de los edificios, ya bien sea por un tratamiento acústico en la fachada o la disposición formal, como se puede observar en la figura [3], donde el desplazamiento volumétrico constituido por terrazas disminuye la propagación sonora.

El uso de vegetación es otra estrategia adoptada como solución a esta problemática en las últimas décadas, implantándose en la propia calle, generando una mitigación del tráfico que puede generar una reducción de la contaminación acústica una tercera parte de su valor original ², o bien como jardines verticales, que funcionan como absorbentes acústicos, especialmente en frecuencias entre 250-3 000 Hz ³, pudiendo



[4] Vista aérea de la zona norte de la Fundación Gulbenkian



[5] Vista terrazas vegetales



[6] Vista interior del atrio de acceso



[7] Vista interior del Museo del Fundador

³ DAVID, M. J. M., TENPIERIK, M.J., RAMÍREZ, F.R., & PÉREZ, M. More than a Green Facade: The sound absorption properties of a vertical garden with and without plants. *Building and Environment* 116, p.70, 2017

⁴ POSADA, M. I., ARROYAVE, M. P. & FERNÁNDEZ, Influencia de la vegetación en los niveles de ruido urbano. *Revista EIA* n.12, Medellín, Colombia, p.83, 2009

⁵ El sustrato vegetal debe tener un espesor mínimo de 8-10 cm y no estar saturado o con un alto contenido de agua para funcionar de forma correcta como absorbente

tener un coeficiente de absorción cercano a 1. Aún así, la disposición de árboles en las vías urbanas no permite una reducción drástica de la intensidad sonora, pero puede reducir el tiempo de reverberación. Para considerar que la vegetación funciona como una barrera sonora, es necesaria la disposición de hileras de árboles con una anchura mínima de veinte metros, con gruesos troncos, de hoja perenne y una altura mínima de catorce metros ⁴. En los demás casos, el uso de vegetación tendrá meramente un efecto psicológico sobre los usuarios, al pensar que las fuentes sonoras se encuentran más lejos debido a que funciona como un obstáculo visual.

01.2 La acústica del conjunto

Ante estas premisas, es más sencillo entender que la disposición de la Fundación Gulbenkian dentro de la ciudad de Lisboa es un ejemplo magnífico para la creación de un espacio público que evade la problemática acústica de su entorno.

El acceso principal se produce por el lado norte a través de la Avenida Berna, una de las vías principales de Lisboa, donde se observa una gran predominancia del tráfico rodado, traduciéndose en una intensidad sonora elevada ^[4]. La principal estrategia del conjunto reside en alejarse del límite de la parcela, pudiendo obtener el espacio suficiente para introducir una gran masa de vegetación que cumple las condiciones anteriormente descritas para funcionar como una barrera sonora. Dado que el tráfico rodado en el interior está restringido únicamente al acceso, los jardines asociados a los volúmenes edificados conforman un oasis sonoro dentro del caos urbano, permitiendo que el acercamiento de los viandantes al conjunto se perciba como una sensación agradable de tranquilidad, enfatizando la experiencia al recorrer la fundación.

Los volúmenes presentan una piel exterior de hormigón revestida de granito, que reflejan las ondas acústicas dado que se trata de un material duro y liso. Como elemento característico del conjunto se encuentra el uso de terrazas vegetales, que a pesar de haber comentado con anterioridad que el uso de balcones puede acrecentar los tiempos de reverberación, el uso de sustrato vegetal ⁵ actúa como absorbente del sonido y mejora la atenuación de este ^[5].

En el interior de los diferentes volúmenes del conjunto, el único tratamiento sonoro (sin considerar los espacios tratados que comentaremos más adelante) reside en la disposición en los techos de paneles rígidos perforados de madera de Mussibi en los puntos de mayor concentración de personas, tales como el atrio de acceso del edificio Sede o las salas del Museo, como absorbentes acústicos (En el caso del atrio, los paneles están perforados para un mayor rendimiento) ^[6] ^[7].

01.3 Estudio gráfico

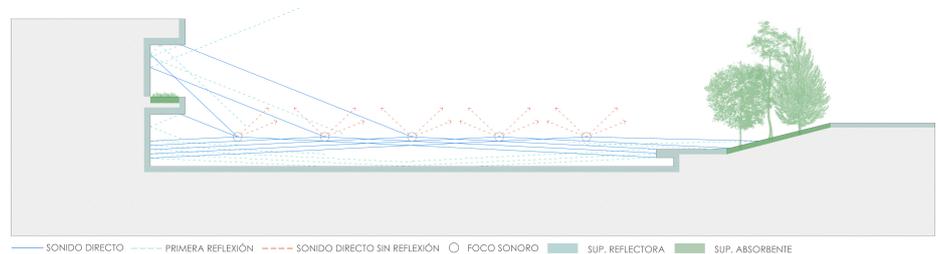


[9] Vista acceso Biblioteca
Sección A



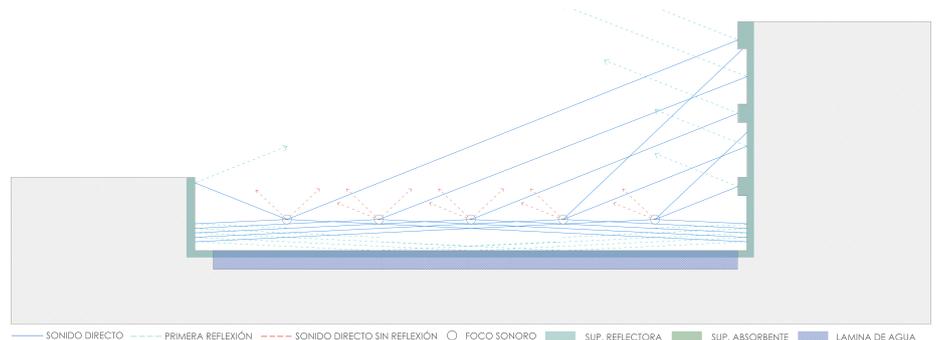
[11] Vista lamina de agua y
acceso Museo Fundador
Sección B

A continuación, se presenta un estudio acústico gráfico basado en el comportamiento de los rayos sonoros, considerando las secciones entre los edificios del conjunto (Secciones A, B y C) y secciones en relación con los edificios de la Avenida Berna (Secciones D y E). Como hipótesis, se han considerado focos sonoros separados cinco metros entre cada uno, y considerando únicamente seis rayos sonoros por foco, la primera reflexión generada por éstos y la inclusión de la vegetación existente. El objetivo es ver de forma clara la intensidad sonora del entorno de los edificios. En líneas generales he de comentar que se han escogido los puntos más desfavorables para comentar las diferentes situaciones que se generan.



[8] Sección A (leyenda en la fig. 17)

La figura [8] corresponde a la entrada a la Biblioteca por el lado este del conjunto [9]. Normalmente es una entrada donde existe poca concentración de personas, pero en la peor de las hipótesis se observa que gran parte del sonido directo no produce reflexiones, y aunque la existencia de balcones pueda generar el encajonamiento del sonido, solo es producido en las inmediaciones al acceso.



[10] Sección B (leyenda en la fig. 17)

La figura [10] responde a la lámina de agua entre el Museo y el edificio Sede [11]. Es una zona con una predominancia de materiales reflectores tanto en las fachadas de los edificios como el suelo, conformado por la lámina de agua. En la hipótesis de que existieran focos sonoros en esa sección, se convertiría en aquella con mayor intensidad sonora.

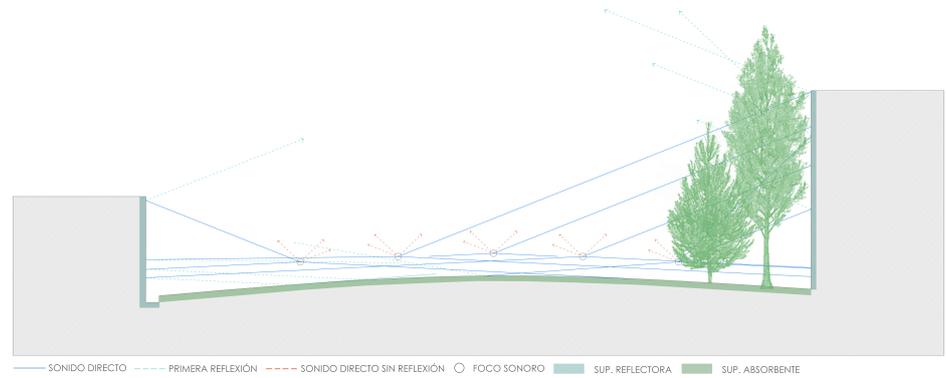


[13] Vista zona verde entre el Museo Fundador y el Gran Auditorio. Sección C



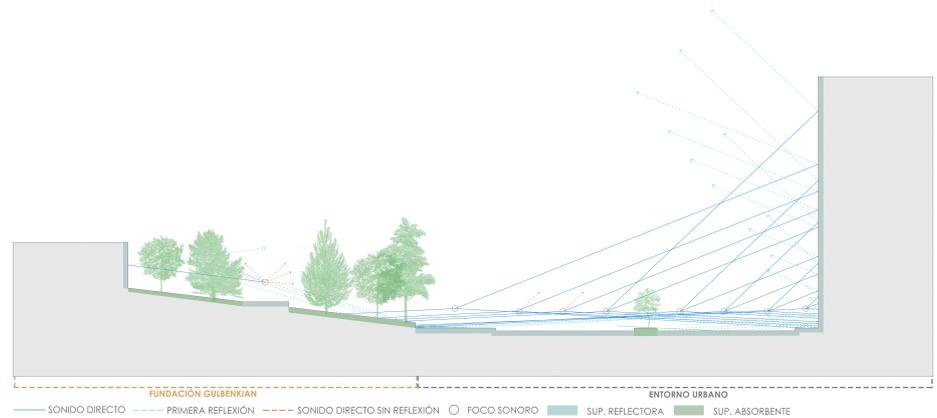
[16] Vista del acceso principal a la Fundación Gulbenkian desde la Av. Berna

Se desconoce si la estrategia de colocar la lámina de agua fue una decisión para solucionar este problema o responde a otros principios proyectuales del conjunto.



[12] Sección C (leyenda en la fig. 17)

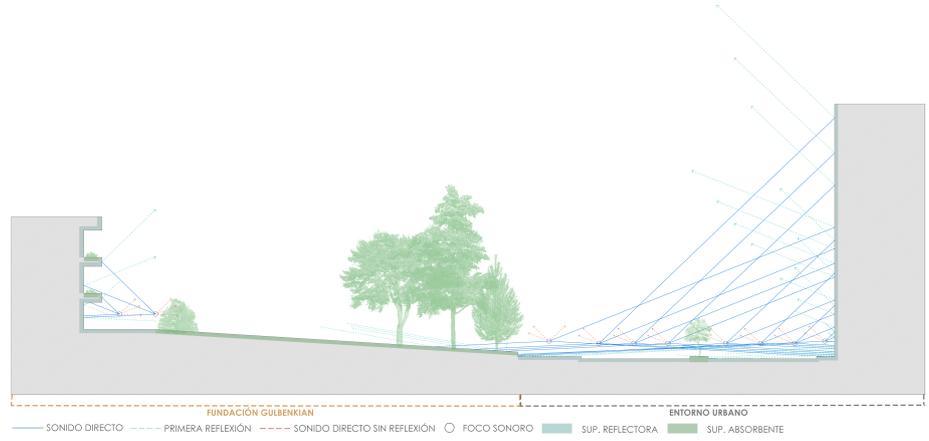
La figura [12] corresponde a un espacio verde entre el museo y el Gran Auditorio [13]. Al tratarse de un terreno vegetal de sección cambiante, es más sencillo absorber las reflexiones tempranas, mientras que en las inmediaciones del volumen del Gran Auditorio se colocaron árboles de gran altura para impedir que el sonido alcance la pared exterior, siendo el objetivo probablemente el no interferir en la acústica interior de la sala de conciertos.



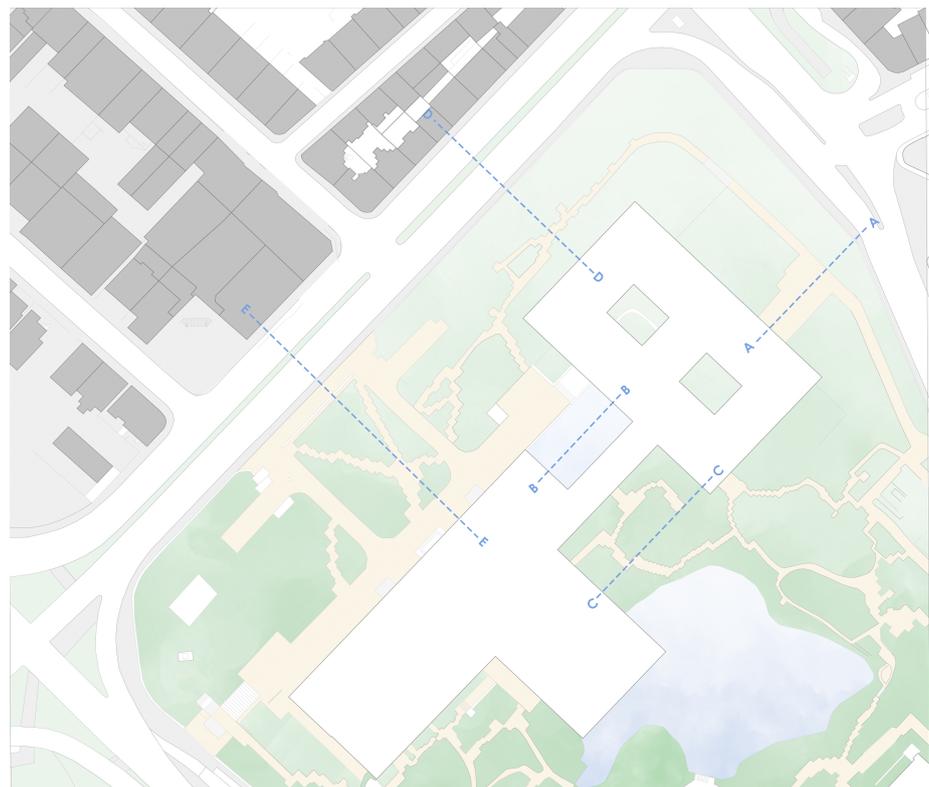
[14] Sección D (leyenda en la fig. 17)

Las figuras [14] y [15] nos muestran la relación del Museo y el edificio Sede, respectivamente, con la Avenida Berna, dónde se puede apreciar con claridad que el distanciamiento de los volúmenes beneficia la calidad sonora, evitando la llegada de la reverberación del sonido producido en la avenida [16]. La decisión de colocar árboles de gran porte permite un distanciamiento visual con el entorno urbano, aumentando los beneficios acústicos nombrados e implementando un confort psicológico en las personas.

Se observa de forma clara la diferencia de intensidad acústica existente en las aproximaciones de la Fundación Gulbenkian respecto al entorno urbano colindante, aunque en el acceso al edificio Sede vuelve a aparecer el problema de las terrazas vegetales y el posible encajonamiento del sonido.

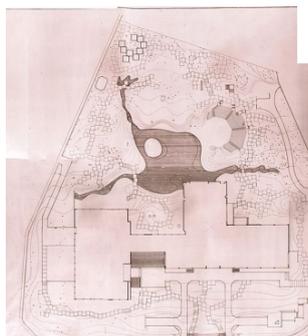


[15] Sección E (leyenda en la fig. 17)



[17] Leyenda Secciones

02. Anfiteatro al aire libre

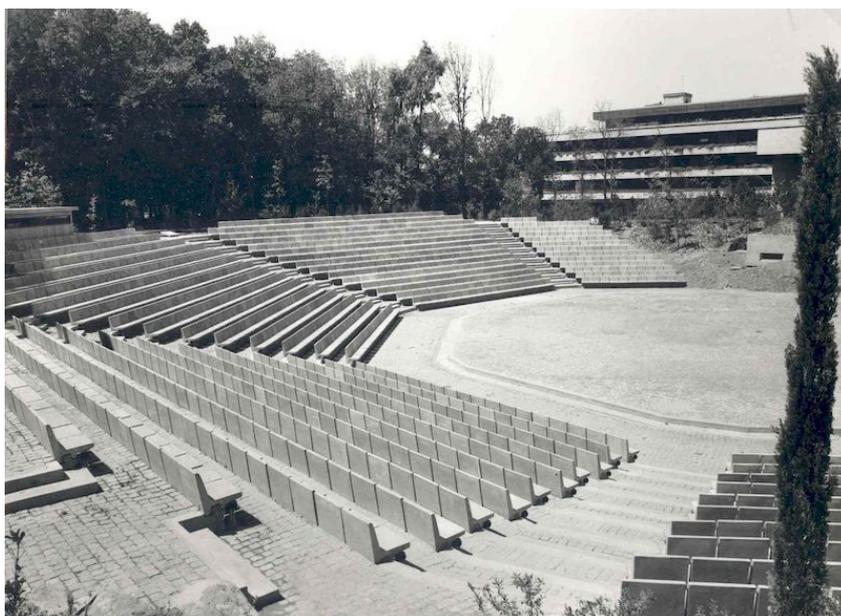


[18] Plano de situación

La idea de generar espacios exteriores destinados a espectáculos para el disfrute de la población se remonta al siglo V a.C con la construcción de los teatros griegos. En una época donde la tecnología era inexistente, el uso de las matemáticas permitió dotar de una visibilidad y acústica excepcionales a estos espacios donde podían aglomerarse hasta 18 000 personas. Sus características principales residen en la disposición en zonas alejadas para la existencia de poco ruido de fondo, la disposición de una construcción detrás de la escena con la finalidad de reflejar el sonido, la utilización de piedra para enfatizar la propagación del sonido e inclinaciones entre el 20 y el 34 % de las gradas, situadas sobre el propio terreno ⁶.

02.1 Espacio y función

Tomando este ejemplo como preámbulo, podemos ver similitudes en el anfiteatro al aire libre que se encuentra insertado en los jardines, situado a un margen del lago central [18]. Consiste en un espacio destinado principalmente para espectáculos estacionales durante la primavera y el verano, aunque también busca ser un espacio de lectura y descanso temporal para los viandantes. En la figura [19] se observa el estado original en la inauguración de 1959, donde un espacio octogonal de ocho metros de lado, ligeramente elevado servía como escenario, y las gradas se expandían siguiendo la dirección de éste asentándose sobre el terreno.



[19] Vista del anfiteatro al aire libre en su inauguración. 1959

⁶www.ancient-greece.org



[20] Vista del anfiteatro desde el Centro de Arte Moderno



[21] Vista de la iluminación y los paneles reflectores



[23] Vista nocturna de un espectáculo
Se pueden apreciar los reflectores en la parte posterior del escenario

La escala del anfiteatro de la fundación tiene una escala inferior a su antecesor griego, con un aforo de 1 059 espectadores divididos en 12 filas que se asientan en el terreno con una pendiente del 13 % ⁷, donde predomina el uso de materiales duros para favorecer la reflexión del sonido, en un espacio dominado por la vegetación y la inexistencia de ruido.

En 2006, la arquitecta Teresa Nunes da Ponte ⁸ realiza una intervención donde se instala una cubierta de estructura de cerchas metálicas con revestimiento textil, con el fin de soportar las instalaciones de luces, y unos paneles reflectores que intensificaran el sonido hacia el público, y una nueva escena de madera [20] [21].

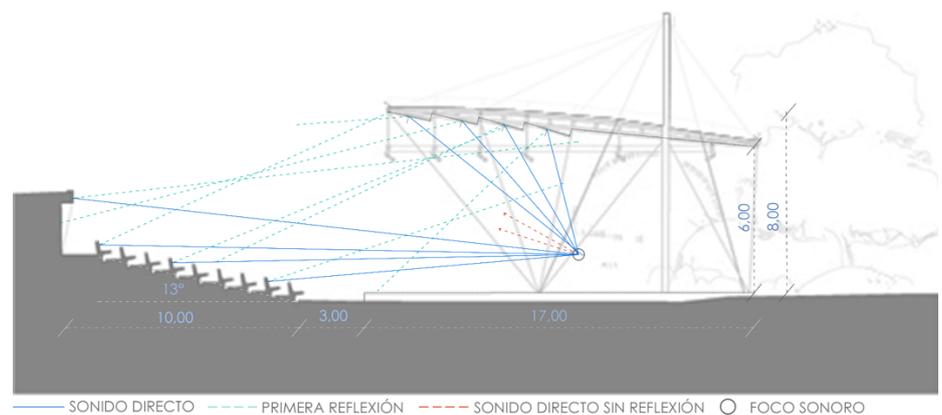
02.2 Geometría y estudio gráfico

A pesar de contar con unas condiciones que permitan una calidad acústica aceptable, se propuso esta opción para mejorar la intensidad del sonido, a través de la implementación de paneles reflectores que aumentasen la reverberación del sonido, y tener un mayor control de éste sin depender de las condiciones atmosféricas. En la figura [22] se puede observar un estudio de los rayos sonoros y sus primeras reflexiones, donde queda demostrado que la implantación de paneles reflectores que están dispuestos con una ligera inclinación permite que una gran cantidad de rayos directos produzcan unas reflexiones tempranas, y de esta forma mejorar la calidad del sonido en la zona del público que está al descubierto.

Además, en ciertos espectáculos, existe la posibilidad de colocar paneles reflectores en la parte trasera del escenario, con el mismo objetivo de acentuar las reflexiones tempranas del sonido [23].

⁷ No era necesaria una pendiente mayor, debido a que de esta forma se obtenían 20 cms. entre líneas de visión, parámetro óptimo para un confort visual y acústico

⁸ Teresa Nunes da Ponte es una arquitecta lisboeta que trabaja desde 1978 en la restauración y rehabilitación de obras pertenecientes al Patrimonio de Portugal. Es colaboradora habitual de la Fundación Gulbenkian



[22] Comportamiento de los rayos sonoros. Sección anfiteatro al aire libre

02.3 Materialidad

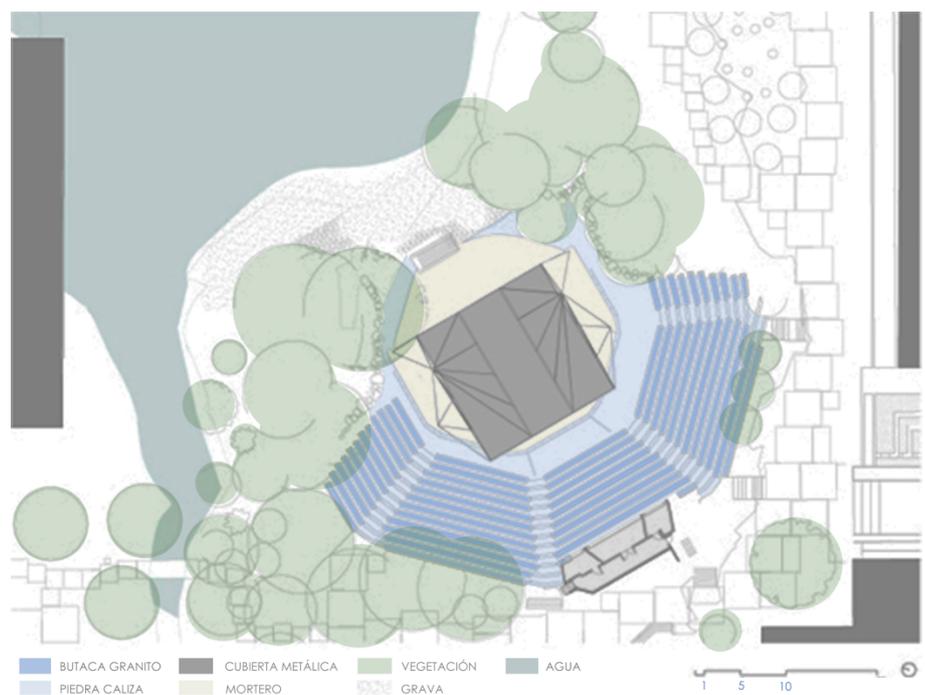


[24] Aproximación al anfiteatro al aire libre

En cuanto a la materialidad del espacio, destaca el uso de materiales duros con el fin de favorecer la reverberación del sonido. Las butacas estaban inicialmente pensadas para ser de césped, pero se acabó instalando una estructura de hormigón para las gradas con revestimiento de granito para las butacas individuales [24]. El suelo sigue la misma estructura que las calles de Lisboa, donde se van alternando piezas irregulares de piedra caliza y basalto. La escena se eleva cuarenta centímetros y tiene un acabado de mortero pulido.

Desde 2006 cuenta de forma adicional con una tarima de madera que ayuda a absorber las frecuencias graves. La cubierta está compuesta por cerchas metálicas sujetadas a través de tirantes metálicos, donde se instala un cuadro de iluminaciones móvil, y unos paneles reflectores también de madera, que refleja las frecuencias medias y altas.

Como contrapunto acústico, el propio entorno compuesto por una gran variedad de vegetación, que abraza el anfiteatro, y los sustratos vegetales de las inmediaciones, actúan como absorbentes, impidiendo la propagación del sonido más allá del espacio tratado [25].



[25] Materialidad del anfiteatro al aire libre

03. Gran Auditorio

“El Auditorio principal es una obra de un valor arquitectónico inigualable, marcado al mismo tiempo por una belleza en el carácter y una atmósfera íntima. La lógica estructural, el rigor constructivo y la síntesis programática contribuyen a una lectura clara del espacio y la armonía del ambiente”. (Tostões, 2018) ⁹.

03.1 Espacio y función

El Auditorio Principal o Gran Auditorio es el espacio de mayor calidad acústica dentro de la Fundación, dispuesto en el volumen arquitectónico más apegado al jardín. Su uso principal se destina a espectáculos donde intervienen coros y orquestas sinfónicas, aunque hay que destacar la gran flexibilidad del escenario, pudiéndose modificar y albergar actividades tales como obras de teatro, danza, cine...

En el nivel inferior se encuentra el escenario con unas dimensiones de 21x12,5 metros para los espectáculos principales, pudiéndose reducir el escenario a través de un conjunto de plateas móviles a unas dimensiones de 15x12,5 metros. La superficie restante de la sala corresponde a un patio de butacas con unas dimensiones de 25x35 metros en los lados de mayor amplitud, que se encuentra dividido en dos zonas que albergan 651 y 416 espectadores, respectivamente [26]. En el nivel superior se puede encontrar un palco que tiene 6 metros de profundidad y una capacidad máxima de 161 asientos [27].

Dispone a su vez de un proyector cinematográfico y una pantalla de 16x7 metros para el uso de la sala como sala de conferencias [28]. Los espacios adyacentes a la sala principal están destinadas a salas de apoyo técnico, espacios administrativos y espacios para albergar las instalaciones. El acceso principal se encuentra en la parte oriental de la sala, precedido por un gran atrio que permite la conexión con las exposiciones temporales y el volumen administrativo. La parte sur de la sala da acceso a un lobby secundario destinado para la espera de los espectadores entre las pausas de los eventos o la finalización de estos [29][30].

Junto al escenario y en el nivel superior se encuentran los camerinos y cuatro salas de ensayo que disponen de piano de cola y servicios privados [31] [32].

⁹Texto Original en portugués:
“O Auditório Principal é uma obra de valor arquitectónico inigualável, marcado ao mesmo tempo por uma beleza de carácter e uma atmosfera íntima. A lógica estrutural, o rigor construtivo e a síntese programática contribuem para uma leitura clara do espaço e para a harmonia do ambiente.”
TOSTÕES, Ana. Resiliência e Transformação: um compromisso social com o legado do Movimento Moderno. Revista Docomomo Brasil, Rio de Janeiro, n. 2, p. 9-21, dez. 2018



[28] Escenario dispuesto para conferencias



[29] Lobby secundario. Vista principal



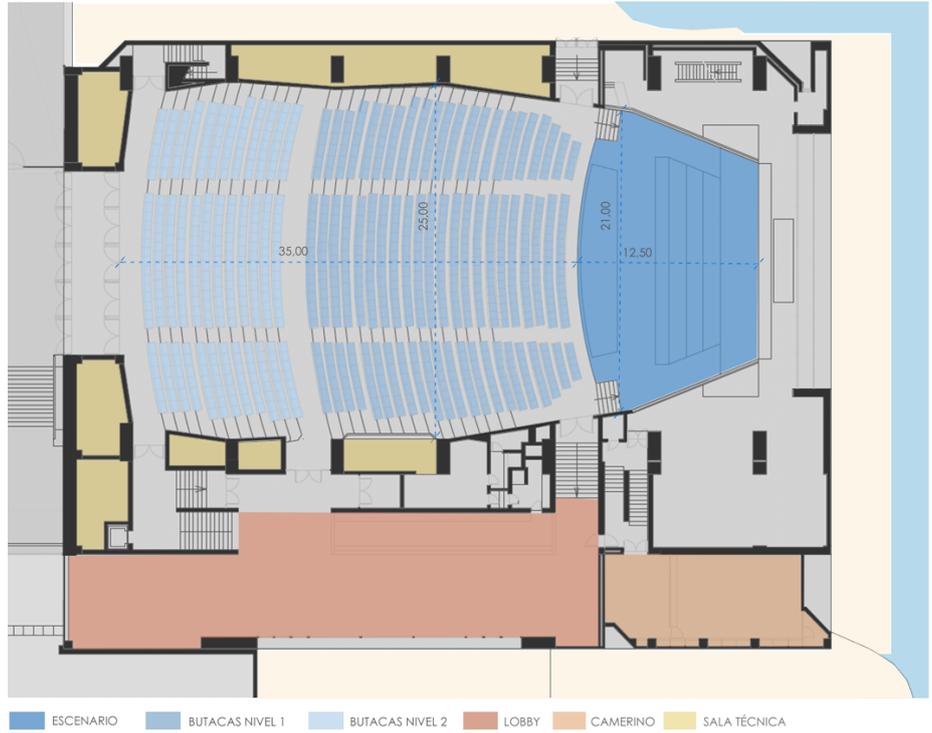
[30] Lobby secundario. Vista lado oeste



[31] Sala de ensayos para orquesta



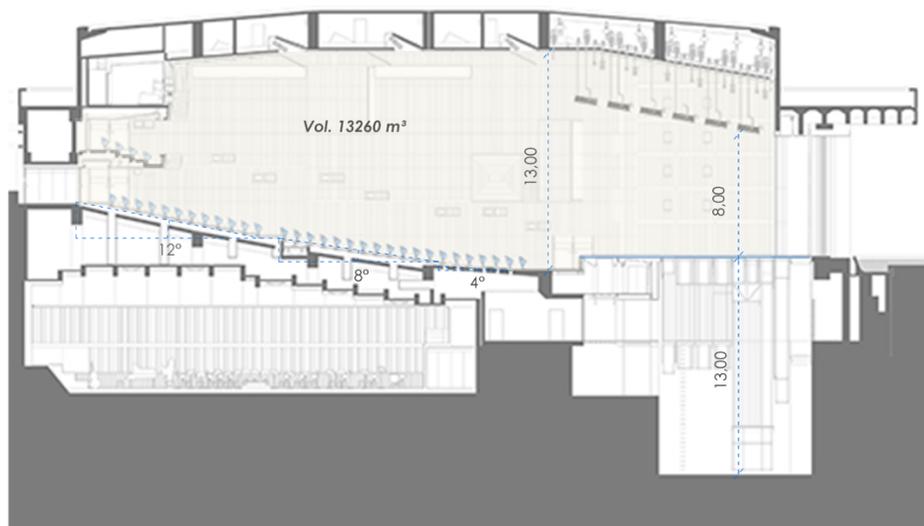
[32] Sala de ensayos para coro



[26] Planta Nivel Inferior del Gran Auditorio



[27] Planta Nivel Superior del Gran Auditorio



[33] Sección general del Gran Auditorio

Hay que remarcar que entre los años 2013 y 2014 se realizó una renovación del Gran Auditorio debido a la presencia de signos de deterioro producidos por el desgaste de los revestimientos de los materiales y la necesidad de mejora de las instalaciones para cumplir los parámetros de seguridad presentes. El proyecto fue llevado a cabo por el estudio de Teresa Nunes da Ponte, arquitecta que ya había colaborado previamente con la Fundación Gulbenkian.

03.2 Geometría y estudio gráfico

La geometría de la sala es el factor más determinante para la consecución de una calidad acústica óptima. En el caso del Gran Auditorio se contemplan soluciones geométricas aparentemente sencillas, pero que observaremos que son estrategias muy eficaces para conseguir un excelente resultado. En líneas generales, la forma del volumen se asemeja a un caparazón, presentando quiebros bastante continuos, tanto en planta como en la sección, [33] ocultando una estructura compuesta por pórticos de hormigón armado de gran tamaño, dado que las vigas tenían que soportar unas luces de 25 metros. La altura de la sala es bastante constante alcanzando una altura máxima de 13 metros que va variando en el patio de butacas debido a la elevación del suelo que sigue una curva logarítmica.

Se puede observar que en la parte más cercana al escenario la inclinación es inferior que en la parte superior, permitiendo que exista una separación entre las líneas de visión de los asientos de 15 centímetros ¹⁰ [34].

¹⁰ La importancia de un tratamiento adecuado del suelo se explica en el apartado 02.2 del bloque II



[34] Vista patio de butacas y balcón



[35] Vista escenario en formación de orquesta y coro y paneles reflectores inclinados



[36] Vista patio de butacas y techo



[37] Vista lateral derecho de la sala

En la parte del escenario la altura mínima es de 8 metros debido a la disposición de seis paneles reflectores que se encuentran ligeramente inclinados [35], además se encuentra un foso de 13 metros donde se albergan los mecanismos de las diferentes plateas móviles. Referente al techo, está formado por paneles de bronce fijos que pretenden dar una continuidad al recinto, aunque puntualmente se localizan paneles móviles que albergan la iluminación de la sala, como se puede observar en la figura [36].

Las paredes laterales presentan una disposición asimétrica con el fin de evitar la aparición de ecos flotantes ¹¹. En el nivel inferior los quiebros son bastante continuos expandiéndose a medida que avanza la sala. Sin embargo, en el nivel superior sí que vemos la aparición de unos quiebros más marcados, [37] cuyo objetivo es focalizar ciertos rayos sonoros a determinadas zonas del patio de butacas, además de ocultar al espectador los equipos de grabación en video.

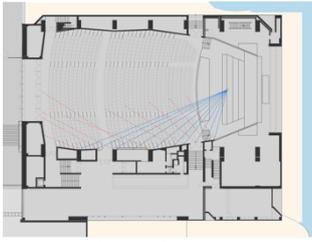
En el bloque anterior se han explicado brevemente los parámetros que pueden dotar a una sala de una acústica excelente, pero bien es cierto que no existe ningún parámetro que sea definitorio para el diseño de la sala. Existen en la actualidad variadas metodologías que determinan unos resultados en base al estudio de una combinación de parámetros diferentes. En este caso dado que no se disponen de los medios tecnológicos necesarios, el estudio será de forma gráfica a través del comportamiento de los rayos sonoros en la sala, con el fin de observar el alcance y calidad de la sonoridad emitida desde el escenario.

Para ello se imagina un foco inicial sonoro que emite rayos en todas las direcciones, y al chocar con las paredes se reflejan con el mismo ángulo de incidencia ¹². Se toma en cuenta la primera y segunda reflexiones, puesto que pertenecen a las reflexiones tempranas del sonido.

En la figura [38] se observa cómo los rayos sonoros inciden en el margen izquierdo y al alcanzar el elemento perimetral son devueltos a la zona adyacente, permitiendo un comportamiento sonoro adecuado. Simultáneamente en la figura [39] se vislumbra un resultado semejante, debido a la forma del perímetro compuesta por quiebros poco marcados.

¹¹ Concepto explicado en el apartado 02.1 del Bloque II

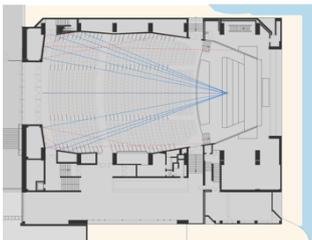
¹² Ley de Snell explicada en el apartado 01.1 del Bloque II



[38] Comportamiento rayos sonoros margen izquierdo de la sala. Primer Nivel del Gran Auditorio



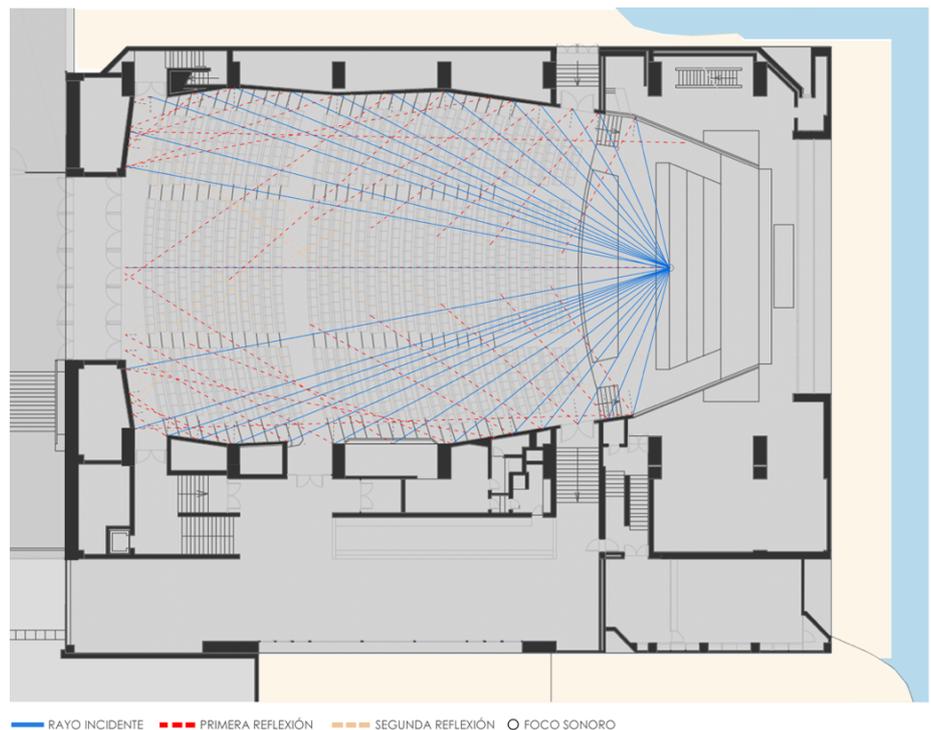
[39] Comportamiento rayos sonoros margen derecho de la sala. Primer Nivel del Gran Auditorio



[40] Comportamiento rayos sonoros fondo de la sala. Primer Nivel del Gran Auditorio

Hay que recalcar que en estas zonas predominan las primeras reflexiones. En la figura [40] se observa el comportamiento de la zona posterior de la sala. A diferencia de los laterales, sí que se observa una simetría y hay una mayor existencia de segundas reflexiones, mayoritariamente detectados en el encuentro entre el perímetro y la pared del fondo. Estas segundas reflexiones van dirigidas especialmente a la zona central del segundo patio de butacas.

Finalmente, en la figura [41] se muestra el trazado de rayos de la sala completa, donde se puede recalcar que, sí que existe una distribución bastante homogénea del sonido, aunque hay que comentar que en las zonas laterales existe una mayor concentración de sonido directo y reflejado, mientras que en la zona central esta concentración es inferior (no obstante, en el segundo patio de butacas se concentran más reflexiones segundas que en el primero).



[41] Comportamiento general de rayos sonoros. Primer Nivel del Gran Auditorio

Asimismo, se aplica la misma metodología en el nivel superior donde la forma de la sala varía ligeramente debido a la existencia de una serie de quiebros en las paredes laterales. Los resultados son semejantes a los del nivel inferior, con la diferencia que la propia forma de los quiebros direcciona los rayos reflejados hacia el fondo de la sala, siendo de esta forma una estrategia adecuada dado que se encuentra el balcón, y al ser



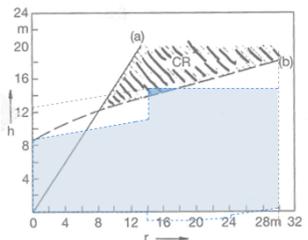
[42] Comportamiento rayos sonoros margen izquierdo de la sala. Segundo Nivel del Gran Auditorio



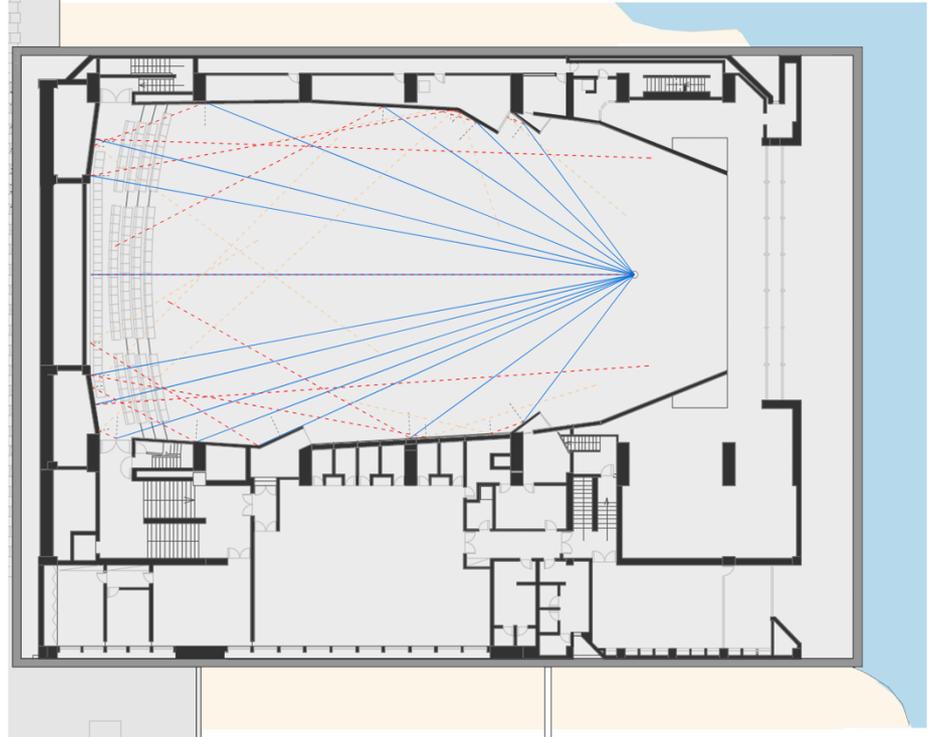
[43] Comportamiento rayos sonoros margen derecho de la sala. Segundo Nivel del Gran Auditorio



[44] Comportamiento rayos sonoros fondo de la sala. Segundo Nivel del Gran Auditorio



[47] Relación entre altura y longitud del recinto y región crítica en generación de eco¹³. Caso de estudio en color azul



— RAYO INCIDENTE — PRIMERA REFLEXIÓN — SEGUNDA REFLEXIÓN ○ FOCO SONORO

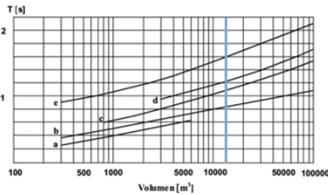
[45] Comportamiento general de rayos sonoros. Segundo Nivel del Gran Auditorio

un espacio bastante encajonado, el aumento de rayos sonoros sugiere una mejor calidad acústica [42] [43] [44] [45].

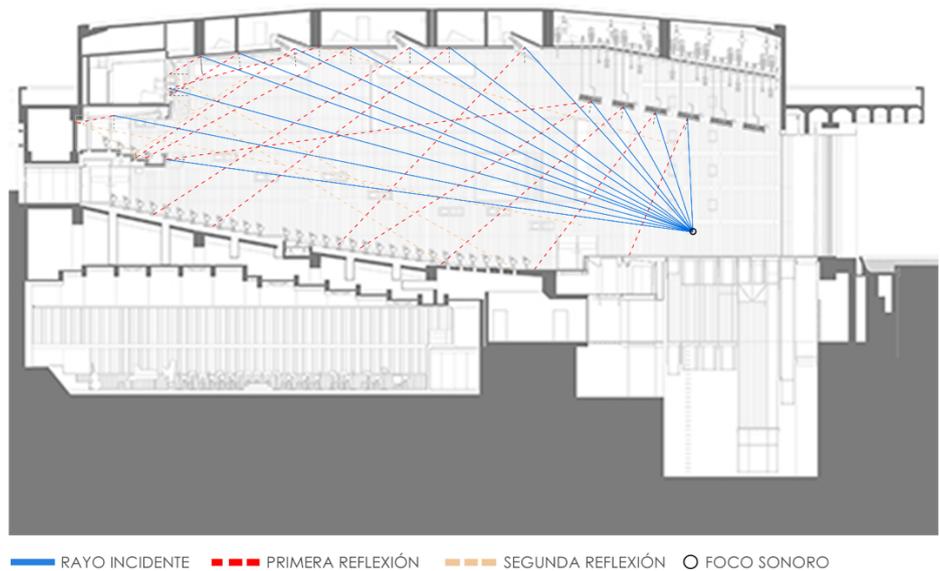
En última instancia se analiza el comportamiento de los rayos sonoros en la incidencia del techo. En la figura [46] podemos observar que sí que existe una distribución en general de forma equipotencial, y la inclusión de los paneles reflectores dirige los rayos sonoros más cercanos al escenario al primer patio de butacas, donde antes se ha comentado que había una disminución de rayos reflejados. De esta forma podemos afirmar que se trata de una solución adecuada. Hay que destacar que los rayos que inciden directamente sobre el palco son dirigidos a la zona superior de la sala principal, pudiendo aparecer eco en la zona de butacas. La figura [47] muestra la relación entre la altura [h] y longitud [r] de la sala, y señala la zona crítica entre ambas dimensiones donde aparecía eco [CR].

Se observa que únicamente una parte ínfima del techo podría causar ese efecto, aunque en la sección se observa que ninguna reflexión alcanza ese punto crítico. Se puede afirmar con esta metodología que las decisiones geométricas de la sala son acertadas y permiten una distribución sonora homogénea en la totalidad de la sala.

¹³ El diagrama base corresponde a la figura 19 del bloque II



[48] Tiempos de reverberación óptimos según uso¹⁴. Caso de estudio en color azul



[46] Sección general del Gran Auditorio

Otro de los factores más importantes es el cálculo adecuado del tiempo de reverberación. El volumen del recinto y la materialidad empleada en la sala es determinante en la obtención del tiempo de reverberación óptimo. De forma aproximada se ha obtenido que el volumen del recinto es de 13 260 m³, y si en la figura [48] se observa que para uso de conciertos y espectáculos el valor idóneo es de 1,2 segundos, mientras que para conferencias sería de 0,85 segundos¹⁵.

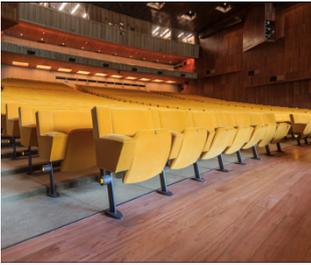
03.3 Materialidad

Referente a la materialidad, la simplicidad en la elección de los elementos facilita la comprensión del espacio para el espectador [49] [50]. Se distinguen dos grandes grupos de elementos: los materiales absorbentes y los reflectores. Perteneciente al primer grupo se encuentra la moqueta de color gris que recubre toda la superficie destinada a los patios de butacas y el balcón, ofreciendo un buen rendimiento en la absorción de frecuencias altas (2 000- 4 000 Hz). Las butacas son los principales elementos absorbentes, conformados por bloques de espuma de poliuretano de célula absorbente con bastidor de madera, ofreciendo una buena capacidad absorbente, particularmente en frecuencias intermedias (500-1 000 Hz) [51].

La envolvente vertical del conjunto se encuentra recubierta por tablas de fresno barnizadas, fijadas a la pared con una cámara de aire intermedia. Existe cierta ambigüedad en su clasificación, puesto que actúa como absorbente en frecuencias bajas, mientras que refleja las frecuencias medias y altas. Además, el uso generalizado de madera en toda la sala está influenciando por la gran capacidad de aislamiento acústico del material [52].

¹⁴ El diagrama base corresponde a la figura 10 del bloque II

¹⁵ Los valores mencionados son de forma teórica los más idóneos, pero se desconocen los reales debido a la inexistencia de datos de medición.



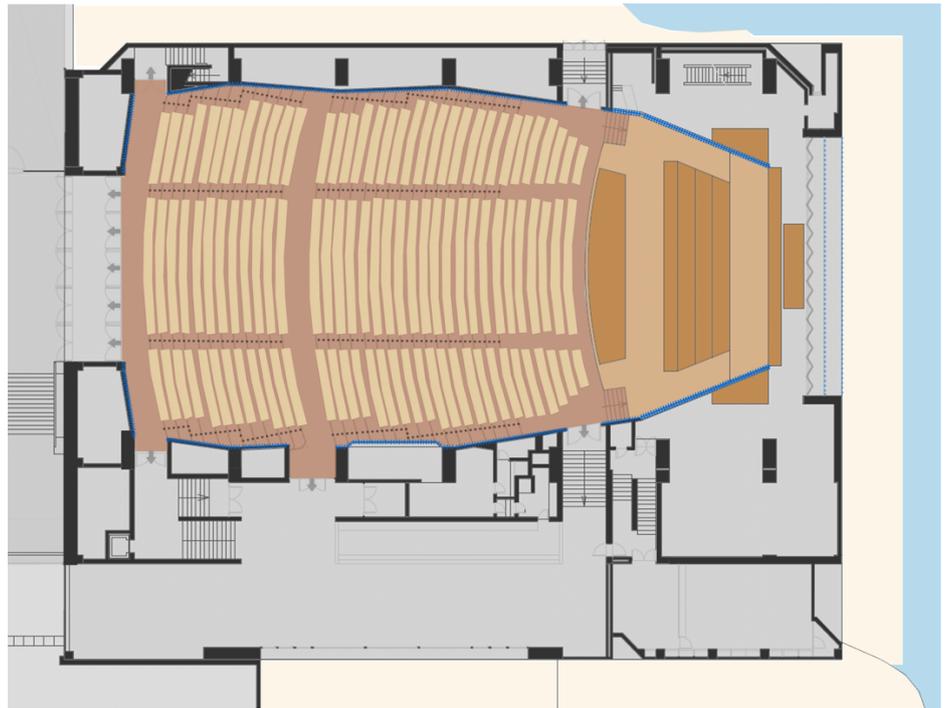
[51] Vista interior butacas



[52] Vista desde el lateral del escenario. En el lateral se observa el revestimiento con tablas de fresno barnizado

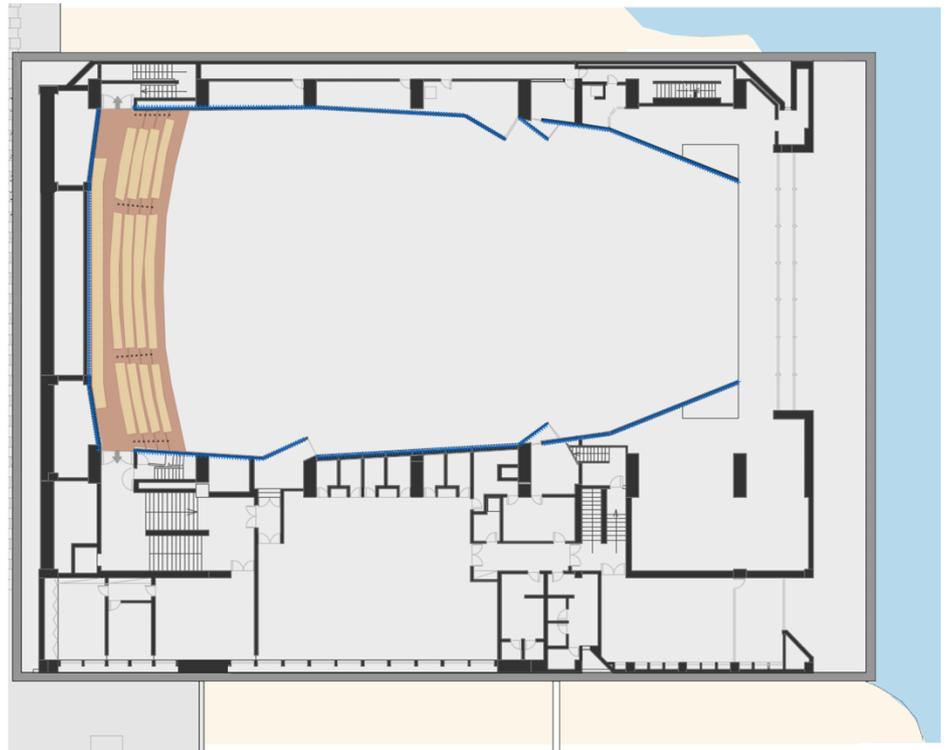


[53] Vista escenario con tela acústica



■ TABLAS MADERA
 ■ CORTINA
 ■ VIDRIO
 ■ BUTACA
 ■ MOQUETA
 ■ ESCENARIO MADERA
 ■ ELEMENTOS MÓVILES

[49] Materialidad de los elementos. Primer Nivel del Gran Auditorio

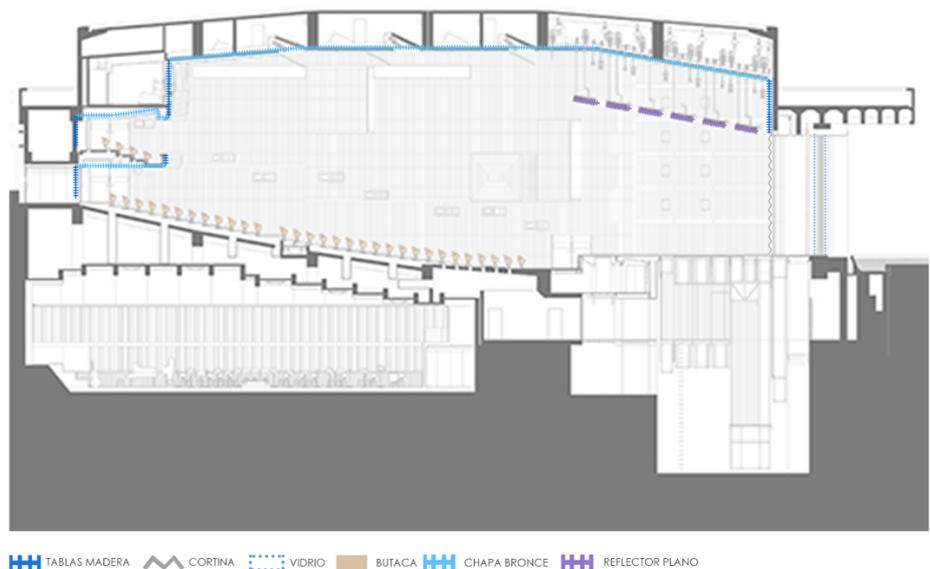


■ TABLAS MADERA
 ■ BUTACA
 ■ MOQUETA

[50] Materialidad de los elementos. Segundo Nivel del Gran Auditorio

Se desconoce si en la cámara de aire se ha rellenado con material absorbente poroso, siendo su efecto la mejora de los coeficientes de absorción. Por último, se puede distinguir al fondo del escenario la posibilidad de utilizar una tela acústica de fruncido doble que tiene una alta absorción en frecuencias de 1 000 y 2 000 Hz. Se suele emplear en espectáculos de menor índole o conferencias, para rebajar la reverberación del recinto, pudiéndose recoger cuando no sea necesario [53].

En cuanto a los elementos reflectores, predominan los tableros revestidos de chapa de bronce ubicados en el techo, potenciando la generación de reflexiones, además de dar una continuidad en todo el conjunto al ser el material empleado en las carpinterías del conjunto. Así mismo, el vidrio ubicado detrás del escenario funciona prácticamente como un reflector debido a su alta capacidad reflectante. Como elementos más característicos de este grupo están los seis paneles de madera maciza dispuestos sobre el escenario [54].



[54] Materialidad de los elementos. Sección del Gran Auditorio

En la figura [55] se engloban los valores de coeficiente de absorción de los materiales empleados, donde existe un equilibrio en el tratamiento de las diferentes bandas de octavas, dando como resultado una calidad de sonido homogénea.

Las medidas y cálculos teóricos se realizan con la condición de ausencia de espectadores y considerando simplemente la absorción de los materiales utilizados, pero la realidad es que se tratan de espacios vivos que alcanzan su máximo esplendor cuando son utilizados. En el caso del Gran Auditorio su aspiración engloba usos diferentes con necesidades acústicas ligeramente distintas.



[56] Imágenes de las diferentes disposiciones del escenario.

- 1 | Elevación palco nr.2 y nr.7 para Coro y Orquesta
- 2 | Elevación palco nr.7
- 3 | Disposición habitual con cortina
- 4 | Elevación palco en arco nr.5 sin cortina para música de cámara
- 5 | Elevación palco en arco nr.5 y nr.7 para música de cámara

Por ello la solución adoptada es un escenario híbrido, compuesto por una parte fija y siete plateas móviles que se disponen en favor al tipo de actividad que se desarrolle. Es una solución que permite una flexibilidad espacial que favorece la acotación de la acústica, pudiendo ofrecer la misma calidad [56].

Otro factor dinámico es la asistencia de espectadores. El recinto tiene una capacidad máxima de 1 228 personas, siendo importante su distribución en la sala debido a que las personas actúan como absorbentes acústicos. En la figura [57] se observa una comparativa entre la variación de los coeficientes de absorción cuando se toma en cuenta a la audiencia. En frecuencias bajas no existe una gran variación, pero en altas frecuencias se observan un aumento de hasta un 20 % del valor inicial, pudiendo llegar a ser un factor que influya de forma considerablemente.

Por lo general, en recintos que inicialmente están diseñados de forma adecuada este hecho es perceptible únicamente desde el escenario, sin modificar la experiencia desde el punto de vista del espectador.

| Material | Tipo | 125 hz | 250 hz | 500 hz | 1000 hz | 2000 hz | 4000 hz |
|------------------------------------|------------|------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Moqueta | Absorbente | 0.02 | 0.06 | 0.14 | 0.37 | 0.60 | 0.65 |
| Butaca | Absorbente | 0.49 | 0.66 | 0.80 | 0.88 | 0.82 | 0.70 |
| Tela Acústica | Absorbente | 0.18 | 0.36 | 0.71 | 0.79 | 0.82 | 0.85 |
| Tablilla Fresno con cámara de aire | Absorbente | 0.25 | 0.34 | 0.18 | 0.10 | 0.10 | 0.07 |
| Chapa Bronce | Reflector | Valores no disponibles | | | | | |
| Vidrio | Reflector | 0.18 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.18 |
| Reflector madera | Reflector | 0.01 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |

[55] Coeficientes de absorción de los materiales ¹⁶

| Material | Tipo | 125 hz | 250 hz | 500 hz | 1000 hz | 2000 hz | 4000 hz |
|-----------------------|--------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Butaca | Absorbente | 0.49 | 0.66 | 0.80 | 0.88 | 0.82 | 0.70 |
| Butaca con espectador | Absorbente | 0.52 | 0.68 | 0.85 | 0.98 | 0.93 | 0.85 |
| | Variación(%) | 6,12 | 3,03 | 6,25 | 11,36 | 13,41 | 21,43 |

[57] Gráfico comparativa coeficiente absorción ¹⁶

¹⁶ Los valores se han obtenido del libro "El ABC de la Acústica Arquitectónica" de Higinio Arau

CONCLUSIONES

Una vez entendida la importancia de la Fundación en la arquitectura moderna portuguesa y explicados de forma teórica los principales fenómenos acústicos que se deben tener en cuenta para que el diseño arquitectónico genere un confort acústico, se ha pretendido ver la aplicación de estas estrategias en la Fundación Gulbenkian. En base a un análisis acústico gráfico, y la identificación y estudio de la geometría y la materialidad, se han podido identificar las diferentes soluciones que corroboran la calidad acústica que presentan los espacios destinados a actividades musicales y artísticas (tanto en espacios interiores como exteriores). Se puede afirmar, de esta forma, su uso como ejemplo para entender los principios básicos de la acústica arquitectónica.

En primer lugar, la diferente volumetría del conjunto se coloca a cierta distancia del entorno urbano, donde numerosos focos sonoros producen un ambiente sonoro caótico, los frentes sonoros se dispersan debido a los obstáculos existentes y los ruidos del tráfico tienden a enmascarar el resto de los sonidos. El uso de vegetación en los perímetros favorece el desvanecimiento de dicho ambiente sonoro a medida que te acercas al recinto, además de psicológicamente introducirte en un ambiente mucho más tranquilo que el caótico alrededor. Se identifica un uso predominante de materiales duros y poco porosos en suelos y fachadas, actuando como reflectores acústicos, además de la implementación de terrazas que pueden generar el encajonamiento del sonido. De nuevo, el uso de sustrato vegetal como absorbente acústico, permite reducir la intensidad sonora en los puntos más críticos del conjunto.

La alta densidad vegetal también actúa como un telón absorbente en las inmediaciones del anfiteatro al aire libre. Esta masa vegetal tiene una doble función: por su disposición envolvente, tiene la función de absorber los sonidos producidos en el anfiteatro y reducir la reverberación, dotando al espacio de un confort acústico, mientras que, por otro lado, esta masa actúa como una barrera que impide la propagación del sonido más allá de los límites naturales. La colocación de un techo con paneles reflectores y la inserción de una tarima de madera fueron estrategias adecuadas para la mejorar la intensidad del sonido (ya que facilitan las reflexiones tempranas dirigidas a los asientos del público) en el espacio exterior.

Por último, el Gran Auditorio es un gran ejemplo para observar que se pueden conseguir excelentes resultados en base a soluciones geométricas sencillas. El techo con forma de caparazón, acompañado por los reflectores de madera macizos colocados en el escenario, permiten una distribución homogénea del sonido. La relación entre la altura y la longitud

de la sala es la correcta para que no se generen zonas con excesiva reverberación, y la inclinación del suelo es óptima para tener una línea de visión que impida la difracción del sonido. Respecto a las paredes laterales, presentan ligeros quiebros que evitan los ecos flotantes, además de complementar la generación de reflexiones tempranas. No se han identificado elementos difusores, puesto que la sala no parece presentar problemas de uniformidad de sonido ni anomalías y, por lo tanto, no se considera necesario su uso. El auditorio presenta un equilibrio material entre absorbentes y reflectores acústicos, además de incorporar diferentes elementos móviles en el escenario, siendo una gran decisión para la adecuación sonora dependiendo de la actividad que se va a realizar en el escenario.

Para finalizar, me gustaría añadir que la línea de investigación futura respecto a estos espacios puede consistir en la medición exhaustiva utilizando equipos profesionales (necesitando un presupuesto y la aprobación de la propia Fundación para su estudio), para corroborar que se cumplen los parámetros acústicos estudiados, e incorporar metodologías de acústica estadística y ondulatoria, que completen una investigación que hoy en día se encuentra escasa de documentación.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona

Barreto, António. [2007]. Fundação Calouste Gulbenkian: cinquenta anos: 1956-2006; vol.2, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa

Carapinha, Aurora; Treib, Marc. [2006]. O Jardim. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa

Miraya, Federico. [2006]. Acústica y Sistemas de Sonido. UNR Editoria, Rosario, Argentina

Sociedad Española de Acústica. [2012]. Glosario de términos acústicos, Temas de acústica vol. 3. Madrid

Tostões, Ana. [2015]. Fundação Calouste Gulbenkian: restauro e renovação do Grande Auditório, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa

Tostões, Ana. [2006]. Os Edifícios. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa

ARTÍCULOS Y REVISTAS

Arau, H. [2014] La arquitectura del sonido en la geometría de los espacios. Conferencia Cersaie, Bologna

Brites, J. C. [2017]. Estado Novo, Arquitetura E "Renascimento Nacional." Risco Revista de Pesquisa Em Arquitetura e Urbanismo (Online), 15(1), Lisboa, p.100–113

Carapinha, A. [2007]. O Jardim da Fundação Calouste Gulbenkian. A poética da materialidade. Revista Philosophica, 29, Lisboa, p.115–123

Henrique, A., & Vieira, R. [2007]. A climatic study of an urban green space: the Gulbenkian Park in Lisbon (Portugal). Finisterra: Revista Portuguesa de Geografia, 42, Lisboa

Posada, M. I., Arroyave, M. P. & Fernández, C. [2009] Influencia de la vegetación en los niveles de ruido urbano. Revista EIA n.12, Medellín, Colombia, p.79-89

Telles, Gonçalo Ribeiro. [1971]. Integração paisagística e conjuntos Industriais. Revista Arquitectura nº 111, Lisboa

Tostões, Ana. [2018]. Resiliência e Transformação: um compromisso social com o legado do Movimento Moderno. Revista Docomomo Brasil nr.2, Rio de Janeiro, p.9-21

Trovato, G., & Moya, Y. L. [2006]. Cincuentenario del edificio de la Fundación Gulbenkian en Lisboa. Revista Arquitectura Nr 344, Madrid, p.118–119

TESIS

Barreto, F. M. M. D. A. S. [2011]. Contributo para a história da arquitectura paisagista em Portugal: arquitecto paisagista António Facco Vianna Barreto, Instituto Superior Agronomia, Universidade de Lisboa

Do Amaral, C. [2012]. O modernismo na Arquitetura e na arquitetura paisagista em Portugal. FAUP

Junco Cofiño, V. [2015]. El paisaje de la arquitectura contemporánea. La fundación Calouste Gulbenkian. ETSA Valladolid

Marina, M.; André, P. [2019]. Português Suave e Arquitectura Doce. ISCTE, Instituto Universitário de Lisboa

Montoya Párraga, L. C. [2018]. La forma, la acústica y el revestimiento de materiales en el auditorio León de Greiff. Universidad Piloto de Colombia

Ros, J. E. [2020]. Análisis gráfico del proyecto, el sistema constructivo y la estructura de la Fundación Calouste Gulbenkian. ETSA Valencia

WEBGRAFÍA

Bongiovanni, P., & Cascino, M. [2011]. Análisis y diseño de difusores acústicos.12 | Disponible en:

http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentos_deacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0311E1-Bongiovanni-Cascino-Sanso.pdf [Consulta 13 agosto 2020]

Cerdá, S., Segura, J., Giménez, A., & Cibrian, R. [2013]. Calidad de sala para música clásica. Informes de la Construcción 65, p.435-442 | Disponible en:

<https://doi.org/10.3989/ic.12.079> [Consulta 27 septiembre 2020]

David, M. J. M., Tenpierik, M.J.,Ramírez, F.R., & Pérez, M. [2017]. More than a Green Facade: The sound absorption properties of a vertical garden with and without plants. *Building and Environment* 116, p.64-72 | Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.010> [Consulta 21 septiembre 2020]

Fundação Calouste Gulbenkian [2020]. | Disponible en <https://gulbenkian.pt> [Consulta 11 octubre 2020]

Miraya, F. [2011]. Introducción a la Psicoacústica. | Disponible en:

<https://www.analfatecnicos.net/archivos/04.IntroduccionPsicoacusticaFedericoMiyara.pdf> [Consulta 31 octubre 2020]

Pagina web de la arquitecta Teresa Nunes da Ponte [2020]. Disponible en <https://tnp.pt> [Consulta 10 octubre 2020]

Robles, M. D. C., Martínez, C. F., & Boschi, C. [2019]. Green spaces as mitigation strategy to control sound pollution. Assesment and analysis of O´Higgins park in Mendozaa City, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4) 889-904 | Disponible en:

<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.09> [Consulta 30 septiembre 2020]

ÍNDICE DE IMÁGENES

Bloque I

Portada Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[1] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[2] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[3] Fuente: <https://restosdecoleccion.blogspot.com>

[4] Fuente: Marina, M.; André, P. [2019]. Português Suave e Arquitectura Doce. ISCTE, Instituto Universitário de Lisboa, p. 76

[5] Fuente: Marina, M.; André, P. [2019]. Português Suave e Arquitectura Doce. ISCTE, Instituto Universitário de Lisboa, p. 57

[6] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[7] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[8] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[9] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[10] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[11] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[12] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[13] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[14] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[15] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[16] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[17] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[18] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[19] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[20] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[21] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[22] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[23] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[24] Fuente: Ros, J. E. [2020]. Análisis gráfico del proyecto, el sistema constructivo y la estructura de la Fundación Calouste Gulbenkian. ETSA Valencia, p.74

[25] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[26] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[27] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[28] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[29] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[30] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[31] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[32] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[33] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[34] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[35] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[36] Fuente: Ros, J. E. [2020]. Análisis gráfico del proyecto, el sistema constructivo y la estructura de la Fundación Calouste Gulbenkian. ETSA Valencia, p.55

[37] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[38] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[39] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[40] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[41] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[42] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[43] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[44] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[45] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[46] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[47] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

- [48] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [49] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [50] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [51] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [52] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [53] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [54] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [55] Fuente: <https://www.wikipedia.pt>
- [56] Fuente: <https://www.pinterest.com>
- [57] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [58] Fuente: <https://www.rud.udc.es>
- [59] Fuente: <https://www.upcommons.upc.edu>
- [60] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [61] Fuente: <https://www.docomomoiberico.com>
- [62] Fuente: <https://www.docomomoiberico.com>
- [63] Fuente: <https://www.juanrodriguezphotography.com>
- [64] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [65] Fuente: <https://www.repository.utl.pt>
- [66] Fuente: <https://www.repository.utl.pt>
- [67] Fuente: <https://www.repository.utl.pt>
- [68] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>
- [69] Fuente: <https://www.metalocus.es>

Bloque II

Portada Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[1] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.9

[2] Ídem

[3] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.11

[4] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.18

[5] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.19

[6] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.20

[7] Ídem

[8] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.21

[9] Fuente: Arau, H. [2014] La arquitectura del sonido en la geometría de los espacios. Conferencia Cersaie, Bologna, p.10

[10] Fuente: Miraya, Federico. [2006]. Acústica y Sistemas de Sonido.UNR Editoria, Rosario, Argentina, p.49

[11] Fuente: Miraya, Federico. [2006]. Acústica y Sistemas de Sonido.UNR Editoria, Rosario, Argentina, p.45

[12] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.245

[13] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.246

[14] Ídem

[15] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.248

[16] Ídem

[17] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.250

[18] Ídem

[19] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.253

[20] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.254

[21] Ídem

[22] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.255

[23] Fuente: <https://www.upv.vu>

[24] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.257

[25] Fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>

[26] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.175

[27] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.178

[28] Ídem

[29] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.179

[30] Ídem

[31] Fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>

[32] Fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>

[33] Fuente: <https://www.aislacustic.com>

[34] Fuente: <https://www.aislacustic.com>

[35] Fuente: <https://www.aislacustic.com>

[36] Fuente: <https://www.aislacustic.com>

[37] Fuente: <https://www.analfatecnicos.net>

[38] Fuente: <https://www.analfatecnicos.net>

[39] Fuente: <https://www.analfatecnicos.net>

[40] Fuente: <https://www.analfatecnicos.net>

[41] Fuente: <https://www.analfatecnicos.net>

Bloque III

Portada Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[1] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.315

[2] ídem

[3] Fuente: Arau, Higini. [1999]. ABC de la acústica arquitectónica. Ediciones CEAC, Barcelona, p.319

[4] Fuente: <https://www.maps.google.com>

[5] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[6] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[7] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[8] Fuente: Elaboración propia

[9] Fuente: <https://www.es.foursquare.com>

[10] Fuente: Elaboración propia

[11] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[12] Fuente: Elaboración propia

[13] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[14] Fuente: Elaboración propia

[15] Fuente: Elaboración propia

[16] Fuente: <https://www.maps.google.com>

[17] Fuente: Elaboración propia

[18] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[19] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[20] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[21] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[22] Fuente: Elaboración propia

[23] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[24] Fuente: <https://www.es.foursquare.com>

[25] Fuente: Elaboración propia

[26] Fuente: Elaboración propia

[27] Fuente: Elaboración propia

[28] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[29] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[30] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[31] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[32] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[33] Fuente: Elaboración propia

[34] Fuente: <https://www.es.foursquare.com>

[35] Fuente: <https://www.es.foursquare.com>

[36] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[37] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[38] Fuente: Elaboración propia

[39] Fuente: Elaboración propia

[40] Fuente: Elaboración propia

[41] Fuente: Elaboración propia

[42] Fuente: Elaboración propia

[43] Fuente: Elaboración propia

[44] Fuente: Elaboración propia

[45] Fuente: Elaboración propia

[46] Fuente: Elaboración propia

[47] Fuente: Elaboración propia

[48] Fuente: Elaboración propia

[49] Fuente: Elaboración propia

[50] Fuente: Elaboración propia

[51] Fuente: <https://www.tnp.pt>

[52] Fuente: <https://www.es.foursquare.com>

[53] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[54] Fuente: Elaboración propia

[55] Fuente: Elaboración propia

[56] Fuente: <https://www.gulbenkian.pt>

[57] Fuente: Elaboración propia