

IMPACTO DE MATERIALES RECICLADOS COMO ABSORBENTES ACÚSTICOS
EN AUDITORIOS. ANÁLISIS MEDIANTE HERRAMIENTAS PARAMÉTRICAS.

IMPACTO DE MATERIALES RECICLADOS COMO ABSORBENTES ACÚSTICOS EN AUDITORIOS. ANÁLISIS MEDIANTE HERRAMIENTAS PARAMÉTRICAS.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE SEVILLA (ETSAS)
TFG GRUPO H
CURSO 2020/21

ALUMNA: M.CARMEN CRESPO PÉREZ
TUTORA: GLADYS NARBONA REINA
EQUIPO DOCENTE: PALOMA RUBIO DE HITTA, ENRIQUE DOMINGO FERNÁNDEZ NIETO Y DIEGO FRUSTALGIA



RESUMEN

Palabras clave: Grasshopper, Rhinoceros, Pachyderm, complemento, diseño paramétrico, acústica, materiales, reciclaje, plástico.

En este trabajo se analizará mediante el uso de herramientas de diseño paramétrico el resultado del uso de materiales reciclados como componentes fundamentales de paneles de absorción acústica. Para ello, se utilizarán como base los resultados obtenidos en anteriores trabajos fin de grado realizados por alumnos de este mismo grupo cuyo objetivo principal era el de proponer nuevos materiales con un componente de reciclaje importante para diferentes elementos constructivos. En particular consideramos dos de estos trabajos donde se propusieron la reutilización de las colillas de tabaco [Propuesta de un panel realizado a base de residuos de colillas de cigarrillos, como alternativa ecoeficiente, en la ejecución de techos acústicos] y las cápsulas de café [Propuesta de un producto absorbente acústico para falsos techos compuesto por placas de yeso con perforaciones cónicas mediante la incorporación de cápsulas de café de polipropileno recicladas], como soluciones para placas de absorción acústica.

Se utilizará el programa Rhinoceros 3D y su complemento Grasshopper como motor de simulación y cálculo del efecto de estos paneles en un caso real, en particular se ha elegido el Auditorio Kresger, además de por tratarse de un edificio emblemático para la transmisión del conocimiento hablado, por lo interesante de su sistema de aislamiento sonoro para la simulación de la efectividad de nuevos materiales como soluciones acústicas.

Se medirá, como dato más relevante del estudio, el tiempo de reverberación en la sala para distintos ensayos, mostrando los resultados obtenidos en comparación con los establecidos en el rango de validez según la norma UNE EN ISO 3382 y CTE-DB-HR.

El contenido de las secciones 3.1 a 3.3 corresponde al contenido del trabajo realizado en grupo, junto con mi compañera Elena Sánchez Zamorano.

ABSTRACT

Key words: Grasshopper, Rhinoceros, Pachyderm, plugin, parametric design, acoustic, material, recycling, plastic.

This Project will analyse, using parametric design tools, the results of the use of recycled materials as fundamental components of acoustic absorption panels. To this end, we will use as a basis results obtained in previous final degree projects carried out by students of this same group whose main goal was to propose new materials with an important recycling component for different construction elements. In particular, we consider two of these works where the reuse of cigarette butts [Proposal for a panel made from cigarette butt waste, as an eco-efficient alternative in the execution of acoustic ceilings] and coffee capsules [Proposal for an acoustic absorbent product for false ceilings composed of gypsum board plates with conical perforations incorporating recycled polypropylene coffee capsules] were proposed as solutions for acoustic absorption panels.

The Rhinoceros 3D software and its plugin Grasshopper will be used as a simulation and calculation engine for the effect of these panels in a real case, in particular Kresge auditorium was chosen, not only because it is an emblematic building for the transmission of spoken knowledge, but also because of its interesting sound insulation system and its usefulness for the simulation of the effectiveness of new materials as acoustic solutions.

As the most relevant data of the study, the room reverberation time will be measured for different test, showing the results obtained in comparison with those established in the range of validity according to the UNE EN ISO 3382 and CTE-DB-HR standards.

The content of sections 3.1 to 3.3 corresponds to the content of the project carried out together with my colleague Elena Sánchez Zamorano.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Gladys Narbona Reina, por toda la ayuda que me ha brindado, su interés y dedicación.

A mi compañera de trabajo y viaje Elena Sánchez García Zamorano, por acompañarme y ayudarme desde el primer momento.

A mi amigo Diego Benítez García, por sus innumerables correcciones sobre este texto.

A mi familia, por el apoyo incondicional desde que comencé mis estudio.

ÍNDICE

1. Introducción	00
2. Objetivos	01-03
2.1. Objetivos generales	01
2.2 Objetivos específicos	03
3. Estado de la cuestión	05-55
3.1 Conceptos previos	05-13
3.1.1. ¿Qué es el diseño paramétrico?	05
3.1.2. Origen: Gaudí.....	06
3.1.3. Primer programa: Sketchpad.....	07
3.1.4. Scripting Language y Visual Programming Language	08-10
3.1.5. Arquitectura y diseño paramétrico.....	11
3.2 Grasshopper y Rhinoceros	13-23
3.2.1 ¿Qué es Grasshopper?.....	13-14
3.2.2 ¿Dónde y cómo trabaja Grasshopper?	15-19
3.2.3 3 Referencias de innovaciones actuales en arquitectura y acústica utilizando Grasshopper.....	13-23

3.3 Grasshopper y sus complementos	25-27
3.3.1 ¿Qué es un complementos?.....	25
3.3.2 Principales complementos del programa.....	26-27
3.4. Pachyderm Acoustical Simulation	29-43
3.4.1 Definición de sus componentes en Grasshopper.....	29-30
3.3.2 Definición de sus pantallas en Rhinoceros 3d.....	31-33
3.3.3 Ejemplo de simulación y cálculo a pequeña escala	34-39
3.3.4 Referencias de salas de conciertos proyectadas con simulaciones acústicas.....	40-43
3.5 Materiales de estudio	45-52
3.4.1 Plástico, consumo actual y problemática ecológica.....	45-46
3.4.2 Reciclaje.....	47
3.4.3 Descripción de los residuos.....	48-49
3.4.4 Características del producto propuesto.....	50-52
3.6 Normativa de aplicación	54-55

4. Caso de estudio	57-78
4.1 Auditorio Kresge	57-60
4.1.1. Contexto histórico	57-58
4.1.2 Geometría y acústica	59-60
4.2 Proceso de modelado	62-67
4.2.1. Parámetros geométricos.....	62-63
4.2.2 Cubierta y aleros	64
4.2.3 Cerramientos exteriores	65
4.2.4 Interior del auditorio.....	66
4.2.5 Paneles acústicos.....	67
4.3 Aplicación de materiales al modelo.....	69-71
4.4 Simulación, cálculos y análisis de los resultados.....	73-78
5. Conclusiones	80-81
6. Posibles líneas de investigación futura	83
7. Referencias y figuras	85-94
8. Material complementario descargable	96

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en el ámbito profesional de la arquitectura, cada vez son más los equipos que trabajan apoyados por herramientas de diseño paramétrico. Esta tecnología crece incesantemente en este campo y cada vez son más los arquitectos y diseñadores que deciden aprender a utilizarlas.

Además, las posibilidades de parametrización que ofrecen estas herramientas cada vez abarcan más ramas del conocimiento. Ya es posible realizar con ellas estudios de soleamiento, tramitación térmica, estructura, acústica, etc.

En este caso, se tuvo un primer acercamiento a ellas en la optativa *TÉCNICAS NUMÉRICAS PARA EL CÁLCULO Y EL DISEÑO EN ARQUITECTURA. DISEÑO PARAMÉTRICO*, cuyo aprendizaje es la base de este documento.

El estudio que se va a realizar abarca desde la profundización en el conocimiento teórico de dichas herramientas hasta la elaboración de un modelo tridimensional de un caso real, como es el auditorio Kresge, hasta un análisis acústico de este donde se apliquen nuevos productos elaborados a partir de residuos reciclados.

Este último dato es esencial para el desarrollo de este ensayo ya que, en los últimos años cada vez es más evidente el gran problema que suponen los residuos que día a día se generan por la sociedad en cantidades desmesuradas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos generales

2.2. Objetivos específicos

2.1 OBJETIVOS GENERALES

El objetivo principal que persigue este trabajo es el de **analizar las cualidades acústicas de materiales reciclados estudiados previamente en distintos Trabajos Fin de Grado de esta rama en edificios reales con un alto interés en su comportamiento acústico.**

Mediante el estudio de estos materiales y de los nuevos programas informáticos que permiten analizarlos, se pretende:

- Estudiar la viabilidad de uso de distintos materiales reciclados, en particular para soluciones constructivas acústicas, exponiendo a su vez la actual problemática medioambiental en torno a los desechos plásticos y su impacto climático en nuestro planeta.
- Adquirir conocimientos sobre las herramientas de diseño paramétrico, su uso, origen y aplicaciones actuales en el mundo del diseño y la arquitectura, y más específicamente en el análisis acústico de edificios.
- Conseguir mediante este estudio dar una continuidad a los trabajos realizados anteriormente donde se proponían innovadores materiales de construcción reciclados, para así ver su viabilidad y adecuación en la construcción mediante el análisis de las simulaciones realizadas por ordenador.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos generales

2.2 Objetivos específicos

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tras este estudio e investigación sobre las herramientas y materiales escogidos, se buscará alcanzar los siguientes objetivos:

- Estudio y aplicación de diferentes complementos específicos en el ámbito del análisis acústico de edificios para la herramienta Grasshopper, principalmente Pachyderm, ampliando así los conocimientos ya adquiridos en la asignatura optativa “Técnicas numéricas para el cálculo y el diseño en Arquitectura. Diseño paramétrico”.
- Volcado de los datos de materiales reciclados obtenidos en años anteriores en el laboratorio de construcción sobre dichas herramientas y revisión de los resultados obtenidos.
- Modelado de un edificio de uso público aplicando el diseño paramétrico con Grasshopper, y aplicación de los datos de materiales reciclados obtenidos previamente a dicho modelo para su análisis acústico.
- Análisis del comportamiento acústico del edificio. Gracias al potencial de las herramientas paramétricas, que permiten obtener en tiempo casi inmediato la simulación de diferentes soluciones, se analizará la influencia en el resultado de la simulación de los siguientes aspectos: la geometría interior de la sala, el material y la geometría de los paneles acústicos, y la temperatura ambiental. Todo ello para dos ensayos de uso diferente, una conferencia y un debate a seis.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 Conceptos previos

3.1.1. ¿Qué es el diseño paramétrico?

3.1.2. Origen: Gaudí

3.1.3. Primer programa: Sketchpad

3.1.4. Scripting Language y Visual Programming Language

3.1.5. Arquitectura y diseño paramétrico

3.1 CONCEPTOS PREVIOS

3.1.1 ¿QUÉ ES EL DISEÑO PARAMÉTRICO?

Se trata de una innovadora rama del diseño digital cada vez más utilizada en la actualidad en diferentes ámbitos. Esta avanzada técnica permite al usuario obtener un modelo paramétrico de su proyecto. Como su propio nombre indica estos diseños se basan en parámetros marcados por el usuario (dimensiones, material, formas, etc.) que ofrecen la posibilidad de modificar en tiempo real el proyecto de una forma sencilla y rápida. Los parámetros controlan distancias, espesores, localización, ángulo de giro y prácticamente cualquier factor que el diseñador estime oportuno.

Los modelos paramétricos están fuertemente relacionados con las matemáticas y por ende con la geometría ya que se basan en variables. Esto permite crear formas mucho más precisas que con cualquier otro programa de modelado digital. Son diseños más dinámicos y adaptables a los cambios que conllevan los procesos de ideación de los proyectos.

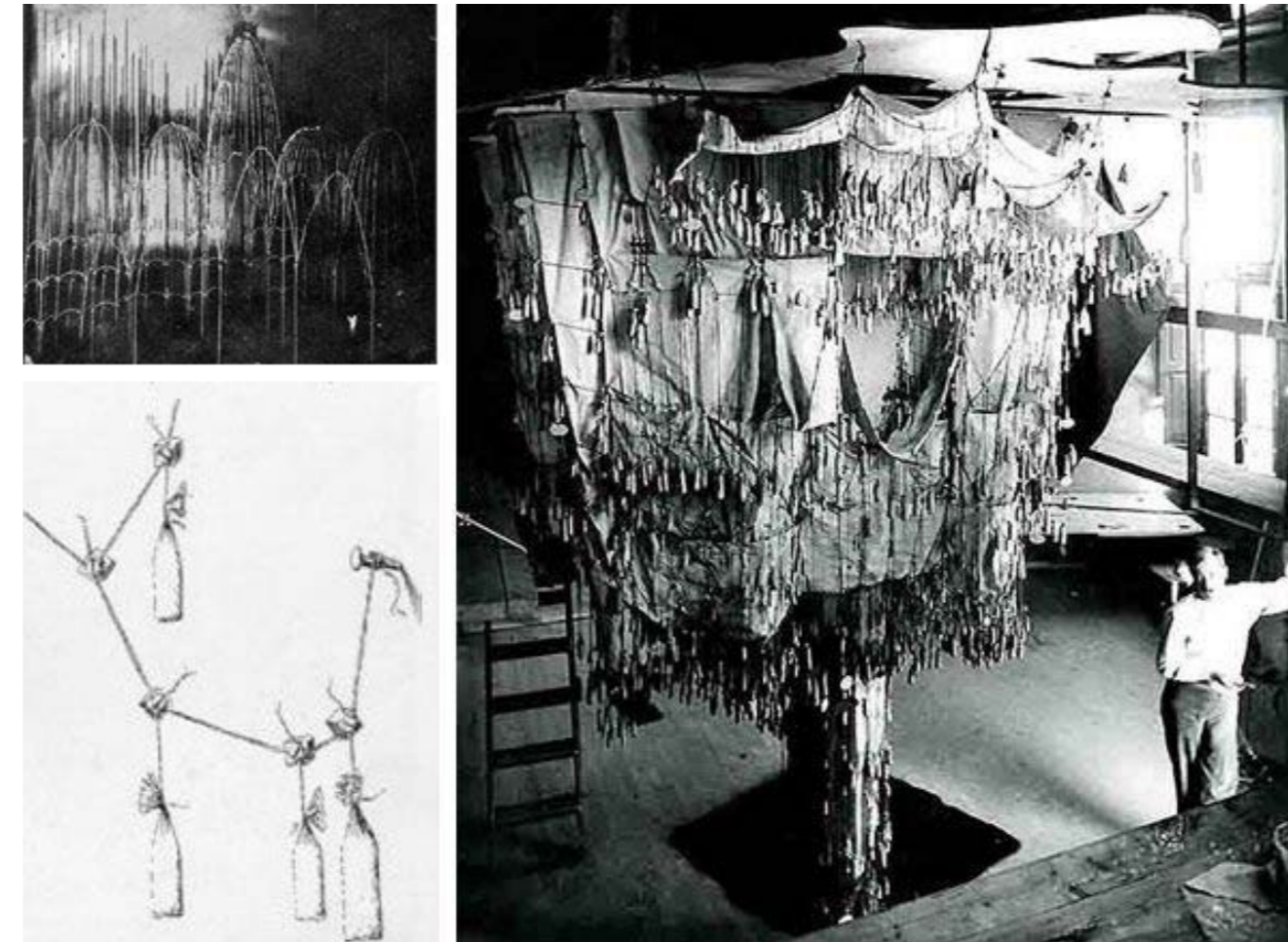


Fig.01_ Gaudí con la maqueta original y el sistema de bolsas de pesos y cuerdas, 1897.



Fig.02_ Réplica de la Maqueta Funicular de Gaudí.



Fig.03_ Réplica de la Maqueta Funicular de Gaudí.

3.1.2 ORIGEN: GAUDÍ

El primer referente que tenemos de arquitectura paramétrica analógica y diseño paramétrico como tal es Antoni Gaudí, arquitecto modernista, quien en 1898 empleó una técnica bastante innovadora para diseñar la Cripta de la Colonia Güell que consistía en construir maquetas invertidas o funiculares a escala 1:15, partiendo de ellas, realizar el diseño arquitectónico del edificio.

Las maquetas estaban compuestas de cuerdas cargadas con bolsas de perdigones, mediante ajustes en el posicionamiento y el peso de esas bolsas, así como de la longitud de las cuerdas, Gaudí conseguía generar las curvas que posteriormente describirían los techos abovedados y los arcos de la cripta. También este método le permitía analizar las relaciones de unos arcos con otros y como el hecho de modificar uno, podía afectar a los que estaban conectados.

Una vez realizado el trabajo, procedía a fotografiar la maqueta funicular y a estudiar las ecuaciones de las curvas catenarias generadas. Las maquetas se asemejan a lo que ahora llamaríamos modelo paramétrico, por lo que el peso y posicionamiento de las bolsas y las longitudes de las cuerdas serían los parámetros de partida, con los que se obtienen los vértices de los puntos de las cuerdas, permitiendo a su vez obtener la localización de los diferentes elementos estructurales. Al ser maquetas invertidas, los resultados están basados en las leyes de movimiento de Newton y la gravedad, lo cual facilitaba el proceso de estudio.

3.1.3 PRIMER PROGRAMA: SKETCHPAD

En 1963, Ivan Sutherland, considerado el padre de la computación gráfica, desarrolló el que sería el primer programa de diseño asistido por ordenador, Sketchpad. Este programa permitía una interacción persona-ordenador, permitiendo convertir a este último en una herramienta más para el diseño, en lugar de una mera herramienta técnica. El desarrollo de Sketchpad formaba parte de la tesis doctoral de Sutherland, Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communications System, por la que en 1988 recibiría el Premio Turing de la Association for Computing Machinery y el Kyoto Prize en 2012.

El ordenador empleado por Sutherland para su tesis fue el Lincoln TX-2, inventado en 1956, el cual contaba con una CRT de 9 pulgadas y un lápiz óptico, dichos elementos inspiraron al programador y le dieron un objetivo claro, el usuario debería de ser capaz de dibujar en el ordenador. Sketchpad permitía al usuario, mediante un lápiz óptico del Lincoln TX-2, dibujar líneas y arcos que podían relacionarse

entre ellos con una serie de restricciones que derivan de las propiedades de las ecuaciones paramétricas. El programador se basó en el procedimiento empleado por Gaudí pero aprovechando el potencial aportado por los ordenadores.¹

Este programa ha sido considerado como el pionero en desarrollo de dibujo CAD, siendo por lo tanto, el punto de partida u origen de todo programa CAD actual, tales como ArchiCAD y AutoCAD.

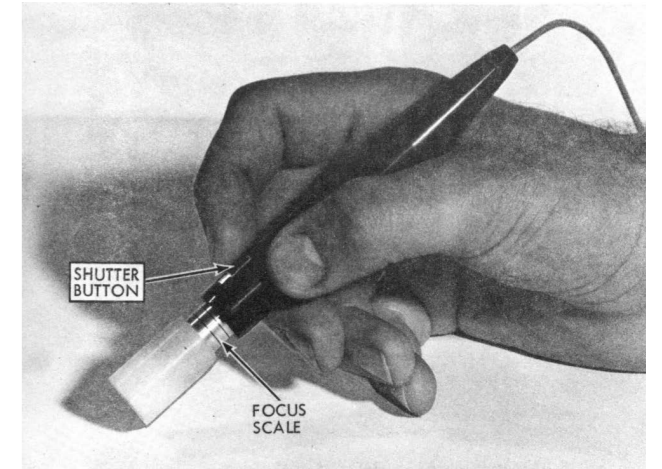


Fig.04_ Lápiz óptico del ordenador Lincoln TX-2.



Fig.05_ Ivan Sutherland probando Sketchpad en el ordenador Lincoln TX-2, 1963.

1. Sutherland, Ivan Edward (1963). Sketchpad : A man-machine graphical communication system (2003). Technical Report Number 574, University of Cambridge, Computer Laboratory.

3.1.4 SCRIPTING LANGUAGE Y VISUAL PROGRAMMING LANGUAGE

La base de todo programa de ordenador es la programación, la cual se sirve del Lenguaje de programación. El lenguaje de programación es un lenguaje formal que el programador emplea para escribir secuencias de algoritmos que le darán al sistema informático varios patrones de comportamiento para ejecutar tareas u obtener datos, esta secuencia de órdenes mediante algoritmos recibe el nombre de programa informático. Dentro de este lenguaje existen varias categorías, aunque de la que deriva el programa que se emplea es el *Scripting Language*, también llamado guion o secuencia de comandos, que se emplean para realizar operaciones mas simples. Cada programa de diseño asistido por ordenador dispone de su propio programa de script, incluso en algunas ocasiones como es el caso de Rhinoceros, permite emplear varios programas de script diferentes para modelar en su interfaz.

A continuación se citarán algunos de los principales programas de diseño asistido por or-

denador y sus programas script:

- **Rhinoceros:** Permite modelar mediante dos scripts, *PythonScript* lanzado en 1991 y *RhinoScript* incluido en 1993.
- **AutoCAD:** Tiene un solo script llamado AutoLISP lanzado en 1986.
- **SketchUp:** Tiene un solo script llamado Ruby lanzado en 1995.
- **3Ds Max:** Cuenta con un script llamado MaxScript y fue lanzado en 1992.
- **Maya:** Cuenta con un script llamado Maya Embedded Language, lanzado en 1998.

Existen otros programas matemáticos que se pueden emplear para modelar formas mas simples basadas en la geometría, como Geogebra lanzado en 2002 o Wolfram Mathematica de 1988.

Dentro del lenguaje de programación, existe otra rama llamada *Visual Programming Language* o VPL cuya principal diferencia con el *Scripting Language* consiste en que el usua-

rio o programador manipula de forma gráfica los elementos dentro del programa, mientras que en el caso anterior, los programadores tenían que desarrollarlo de forma textual.

El VPL está basado en el concepto “cajas y flechas”, es decir, visualmente los objetos o comandos que el usuario utiliza se representan mediante pequeñas cajas con símbolos representativos o palabras, a su vez, estas cajas se conectan entre sí a través de flechas, cables o líneas. Los VPL se pueden clasificar de varias formas, según el tipo y la expresión gráfica que se utilice, esta última puede expresarse mediante un lenguaje de diagramas, un lenguaje basado en formas o lenguaje basado en iconos. Los usuarios pueden manipular de forma interactiva la construcción del programa.

2. M. Burnett, Margaret (1999). “Visual Programming” in *Encyclopedia of Electrical Engineering* (John G. Webster,ed). *Oregon State University, School of Electrical Engineering and Computer Science*

El principal objetivo de los VPL es acercar la programación a los usuarios de una forma mas sencilla e intuitiva y de forma facilitar a los programadores mas nóveles la interacción con el programa.

Existen varias categorías de enfoque de los programas:

Tipo Educativo:

- **Scratch:** Es el programa mas utilizado dentro de esta categoría, fue desarrollado en 2012 por el Grupo Lifelong Kindergarten del MIT Media Lab de la Facultad de Arquitectura y Planificación del Instituto de Tecnología de Massachusetts.
- **ASU VIPLE:** Es un programa lanzado en 2014 por la Universidad del Estado de Arizona
- **Alice 3:** Es un programa desarrollado en 1997 por la Universidad Cornegie Mellon

en colaboración con EA, empresa desarrolladora de toda la saga de videojuegos de Los Sims.

- **Snap!:** Se trata de un programa online desarrollado en 2011 por la Universidad de California en Berkeley.

Tipo Multimedia:

- **Grasshopper 3D:** Fue desarrollado en 2007 por parte de Rhinoceros. Es el programa que más se utiliza actualmente, siendo el objeto principal de estudio en este documento, por lo cual se desarrollará su explicación de forma más extensa en siguientes puntos.
- **Dynamo Studio:** Pertenece a Autodesk y fue desarrollado para Revit en 2011. Es uno de los programas utilizados.
- **Max Creation Graph:** Pertenece a Autodesk y fue desarrollado para el programa 3ds Max en 2016, antes de él el programa que se empleaba para complementar al 3ds Max era el Para 3d.
- **Generative Components:** Desarrollado por Bentley en 2003 aunque fue lanzado al mercado en 2007.

Tipo Videojuegos:

- **Unity:** Se trata de uno de los principales programas de desarrollo de videojuegos, pertenece a la Unity Technologies y fue lanzado en 2005.
- **Unreal Engine 5:** Se trata de otro de los grandes programas de diseño de videojuegos, lanzado en 1998 por Epic Games.
- **Kudo Games:** Es un programa desarrollado para un público infantil, a modo de introducción en el diseño de videojuegos. Fue lanzado en 2009 por Microsoft Corporation.

3.1.5 ARQUITECTURA Y DISEÑO PARAMÉTRICO

La arquitectura y esta nueva herramienta llevan unidas desde hace más de un siglo aunque cabe señalar que no es hasta las últimas dos décadas que esta relación se ha hecho más estrecha. Primero con la llegada de programas CAD como ArchiCAD y AutoCAD se introdujo el dibujo vectorial y no fue hasta 1999 cuando los primeros programas de modelado 3D salieron al mercado, Rhinoceros y Revit, provocando una auténtica revolución a la hora de diseñar. Por último, el diseño paramétrico como herramienta no llega hasta 2008 de forma oficial con Grasshopper como complemento de Rhinoceros 4.0.

La aparición de programas informáticos adecuados y eficientes como Revit o Rhinoceros, ha permitido que los estudios de arquitectura tengan herramientas de diseño únicas, antes no vistas, que les permiten materializar ideas y formas menos ortodoxas y tradicionales. Edificios con formas más orgánicas y fluidas que gracias a la geometría y los cálculos de estos programas pueden ser llevados a cabo.

Hay firmas arquitectónicas que han convertido este tipo de arquitectura en su sello personal, permitiendo hacer totalmente reconocibles sus edificios al público.

Además del diseño, estas herramientas ofrecen la posibilidad de parametrizar cuestiones fundamentales para la arquitectura, como son la eficiencia energética, cálculos estructurales, optimización urbanística y, por supuesto, el tema principal de este trabajo, el comportamiento acústico.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.2 Grasshopper y Rhinoceros

3.2.1 ¿Qué es Grasshopper?

3.2.2 ¿Dónde y cómo trabaja Grasshopper?

3.2.3 Ejemplos de innovaciones actuales en arquitectura utilizando Grasshopper

3.2.4 Ejemplos de arquitectura proyectada con Grasshopper

3.2.5 Ejemplos de la asignatura Técnicas numéricas para el cálculo y el diseño en Arquitectura. Diseño paramétrico

3.2 GRASSHOPPER Y RHINOCEROS

3.2.1 ¿QUÉ ES GRASSHOPPER?

“Un editor de algoritmos gráficos estrechamente integrado con las herramientas de modelado 3D de Rhino. A diferencia de RhinoScript, Grasshopper no requiere conocimientos de programación o secuencias de comandos, pero aún permite a los diseñadores construir generadores de formularios desde lo simple hasta lo impresionante.”^[1]



Fig.06_ Logo de Grasshopper.

1. Scott Davidson (2021) Grasshopper. Algorithmic modeling for rhino. Último acceso 10/04/2021 <https://www.grasshopper3d.com/>

2. Tedeschi, Arturo. (2010). Architettura Parametrica : Introduzione a Grasshopper (2a ed.). Le Penseur.

El complemento Grasshopper es un editor de algoritmos gráficos, aunque también puede definirse como un lenguaje de programación o editor visual de scripts, integrado en el programa CAD Rhinoceros 3D. Este plugin ofrece la posibilidad de arrastrar componentes al área de trabajo y que, por medio de nodos de entrada y salida, sean conectados para crear y manipular modelos tridimensionales paramétricos, basados en curvas y superficies NURBS (*non-uniform rational B-spline*), las cuales serán visualizadas en tiempo real en Rhinoceros 3D.

Esta herramienta gratuita y de código abierto, creada por el programador finlandés David Rutten para la empresa Robert McNeel & Associates (también encargada de desarrollar Rhinoceros 3D y Food4Rhino) fue lanzada de forma definitiva en septiembre de 2007 bajo el nombre de Explicit History.^[2]

Ya desde su inicio, destacó por aportar un nuevo enfoque en los procesos de modelado a través de la programación, ofreciendo a los arquitectos y diseñadores nuevas formas de expresión y control sobre sus proyectos, tal como explica Arturo Tedeschi en su obra (*Architettura Parametrica*) sobre arquitectura paramétrica, estos son:

- Automatización de procedimientos.
- Definición de geometrías utilizando funciones matemáticas.
- Generación de modelos paramétricos que permiten variaciones rápidas y profundas de las geometrías iniciales.
- Posibilidad de obtener rápidamente formas altamente complejas a través de elementos geométricos reiterados.

El desarrollo tanto de este complemento como de otros que trabajan de la misma forma, cómo Dynamo para Revit, ha acercado a los usuarios nuevas posibilidades de diseño a través de la creación de modelos generativos

y de representaciones de formas NURBS que se producen y manipulan fácilmente. Desde el uso de software de animación a principios de los noventa hasta el uso del CAD asociativo más complejo, el impacto revolucionario que la tecnología paramétrica ha tenido en el lenguaje arquitectónico contemporáneo es irrefutable.^[3] Grasshopper ofrece una interfaz sencilla, dónde la necesidad de poseer un determinado conocimiento sobre programación con scripts es reemplazada por un nuevo lenguaje de programación visual, mucho más intuitivo y amable para los diseñadores sin conocimientos previos de programación.

Hasta ahora, los flujos de trabajo tradicionales para diseños detallados habían obligado a los arquitectos y especialistas a generar distintos modelos independientes, haciendo que la coordinación de estos modelos y de la documentación que generaban se presentase como un proceso lento y tedioso. Pero, gracias al creciente desarrollo de la metodología BIM, la utilización de un solo modelo que per-

3. Flavio Wirz (2010). Prólogo del libro *Architettura Parametrica* : Introduzione a Grasshopper (2a ed.). Le Penseur.

mite albergar información de múltiples disciplinas se está difundiendo cada vez más entre diseñadores y estudiantes. Estos modelos generativos, permiten considerar y evaluar una amplia variedad de alternativas y que, a su vez, estas sean compartidas inmediatamente con el resto de colaboradores del proyecto, minimizando así la necesidad de una coordinación manual de información.^[4] ^[5]

Por estas razones, el diseño paramétrico se está convirtiendo en una fuerte tendencia del diseño contemporáneo tanto en el ámbito práctico como en el educativo⁴. Incluso ya hay quién habla de un estilo arquitectónico contemporáneo marcado por esta estética que enfatiza formas complejas y continuamente diferenciadas, así lo ilustra Flavio Wirz, miembro del estudio de Zaha Hadid Architects, en el prólogo del libro *Architettura paramétrica* (2010).

4. Mirtschin, Jonathan (2011) *Engaging Generative BIM Workflows*. Collaborative Design of Lightweight Structures - LSAA 2011

5. Lagios, Kera; Niemasz, Jeff; Reinhart F, Christoph (2010). *Animated Building Performance Simulation (Abps) - Linking Rhinoceros / Grasshopper With Radiance / Daysim*. Conference proceedings of SimBuild 2010

6. Soporte de Rhinoceros 3D, B-Spline racional no uniforme (NURBS). Último acceso 02/05/21 http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/es-es/information/nurbs_about

7. Pino, M. Suffo Pino; Carrilero, M. Sánchez; Gómez Ortiz, R.; Alvarez Alcón, M.; Sánchez Sola, J.M. y Marcos Bárcena, M. (2015) *Metodologías de Diseño en Construcción Naval basada en Superficies NURBS*. Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz.

3.2.2 ¿DÓNDE Y CÓMO TRABAJA GRASSHOPPER?

Cómo ya se ha comentado, Grasshopper es un complemento que trabaja en el entorno de Rhinoceros 3D, software de modelado de objetos en tres dimensiones cuyas geometrías se basan en el modelo matemático NURBS.

Este modelo matemático comenzó a desarrollarse en los años 50 con los ingenieros franceses Pierre Bézier y Paul de Casteljau, quienes trabajaban para las firmas automovilísticas Renault y Citroën, respectivamente. Esta industria, impulsada por las innovaciones tecnológicas de la época, buscaba mejorar sus productos capacitándolos de mayor velocidad y ligereza. Para ello, eran necesarias nuevas técnicas de diseño de formas complejas con una gran precisión, por lo que Bézier desarrolló el sistema de las conocidas Bézier-Splines (o B-Splines en la actualidad), un método matemático para describir curvas a través de sus puntos de control.^[6] ^[7]

Paralelamente, Paul de Casteljau desarrolló un algoritmo con su mismo nombre, con el

que desarrollar y evaluar numéricamente las curvas de Bezier. Diez años después, en los 60, gracias a estas dos líneas de investigación, se desarrollan finalmente las NURBS, resultado de la generalización de las curvas de Bezier, utilizadas actualmente por una gran cantidad de softwares de diseño vectorial, gráfico y asistido por computadora, como son Adobe Illustrator, Photoshop o CorelDraw, además de ser utilizadas para modelar cualquier cosa, desde cascos de barcos y automóviles hasta figuras animadas en largometrajes.

“Las curvas NURBS, a partir de este momento, se convierten en herramientas poderosas para el diseño geométrico de cualquier modelo. Sus propiedades matemáticas y algorítmicas, combinadas con las infinitas aplicaciones industriales de las curvas NURBS, contribuyeron a su enorme popularidad desde los años 1970” (Piegl & Tiller, 2012).

En conclusión, las NURBS son ecuaciones matemáticas usadas para definir de forma

paramétrica curvas y superficies.^[8] Como se ha descrito, este es un modelo muy utilizado actualmente en la representación gráfica asistida y se basa en determinar las curvas a través de cuatro elementos: grados, puntos de control, nodos y reglas de cálculo; lo que permite generar con precisión cualquier tipo forma.

Aclarado el sistema matemático en el que se basa, Rhinoceros 3D es un software de diseño geométrico asistido por ordenador (CAGD) creado por Robert McNeel & Associates, nacido en origen como un agregado de Autodesk AutoCAD, pero desarrollado finalmente de manera independiente y lanzado en 1993.^[9] Este programa puede crear, editar, analizar, documentar, renderizar, animar y traducir curvas NURBS, superficies y sólidos, geometría de subdivisión (SubD), nubes de puntos y mallas poligonales.^[10]

En general, una de las mayores cualidades de este método de trabajo es la amplia variedad de aplicaciones, desarrolladas tanto por los propios programadores como por otros usuarios gracias a su licencia de código abierto. Como veremos más adelante, esta lista de nuevas aplicaciones para Grasshopper es cada vez más numerosa y atiende cada vez a necesidades específicas de los modeladores.

Para presentar una pequeña introducción al uso de Grasshopper, primero se ofrece una explicación de la interfaz predefinida que muestra Rhinoceros 3D. Como se ilustra en la figura 08, dicha pantalla se divide en seis áreas:

- **Barra de menú:** Acceso a propiedades del archivo, comandos (curvas, superficies, sólidos, etc.), opciones, plugins y ayuda.

8. Ibid pág. 13, referencia 7.

9. McNeelWiki, La historia de Rhino. Último acceso 02/02/2021 <https://wiki.mcneel.com/rhino/rhinohistory>

10. Soporte de Rhinoceros 3D, Características. Último acceso 02/05/21 <https://www.rhino3d.com/features/>

- **Barra de herramientas (Toolbar):** Acceso rápido a los comandos, se divide a su vez en quince ventanas: estándar, planosC, definir vistas, visualización, seleccionar, disposición de las vistas, visibilidad, transformar, curvas, superficies, sólidos, mallas, renderizado, dibujo y novedades.

- **Área gráfica:** Visualización del modelo de trabajo, por defecto se muestran cuatro vistas (planta, alzado frontal, alzado derecho y perspectiva) aunque se pueden configurar y personalizar.

- **Línea de comandos:** Los comandos pueden ser ejecutados de forma escrita a través de esta barra.

- **Barra de estado:** En ella aparecen las coordenadas del cursor, el estado del modelo, las opciones y los interruptores para activar y desactivar comandos de referencia.

- **Accesos rápidos:** Esta pestaña es también personalizable según las preferencias del usuario. Por defecto nos encontraremos las propiedades de las capas, las texturas, etc.

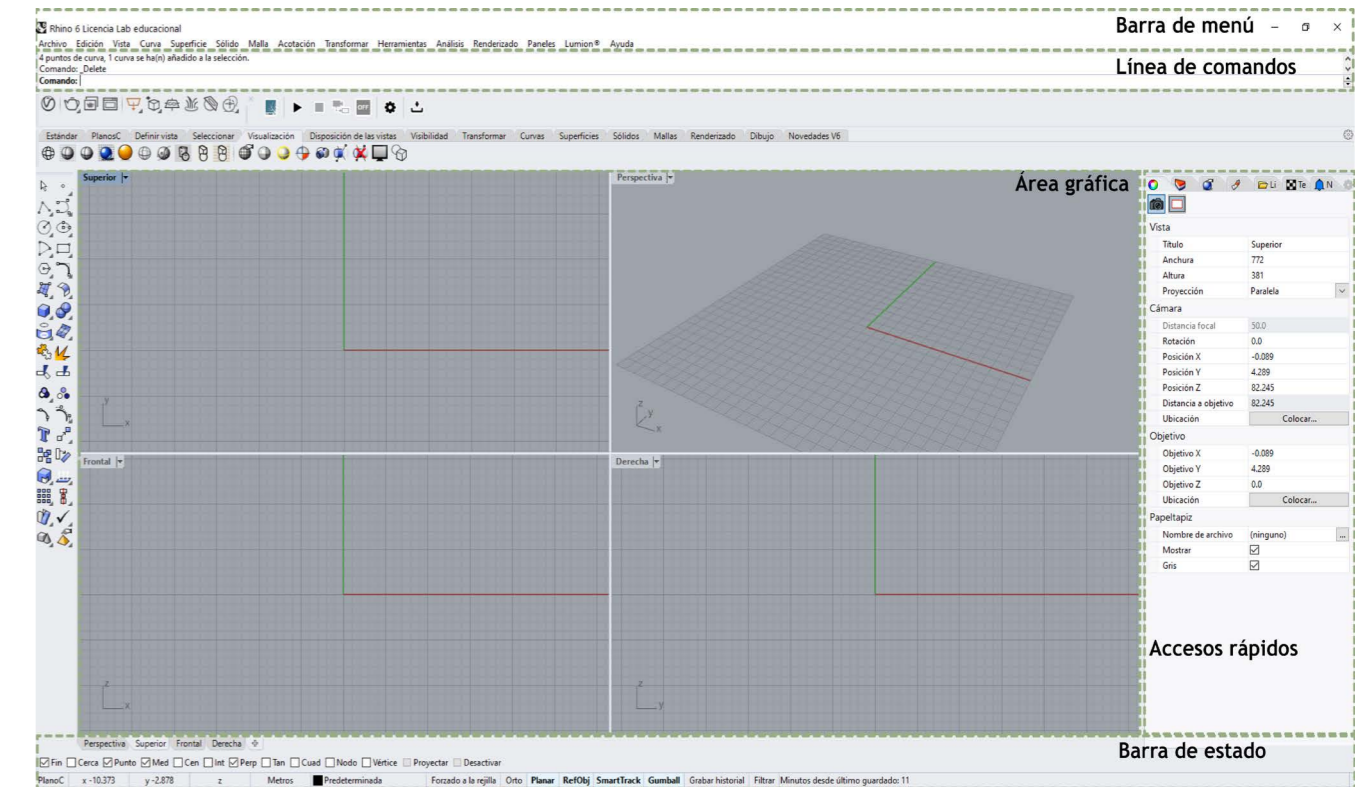


Fig.08_Captura de la interfaz de Rhinoceros 3d 6.0 con anotaciones sobre sus áreas de trabajo. Elaboración propia

paramétrica curvas y superficies.^[8] Como se ha descrito, este es un modelo muy utilizado actualmente en la representación gráfica asistida y se basa en determinar las curvas a través de cuatro elementos: grados, puntos de control, nodos y reglas de cálculo; lo que permite generar con precisión cualquier tipo forma.

Aclarado el sistema matemático en el que se basa, Rhinoceros 3D es un software de diseño geométrico asistido por ordenador (CAGD) creado por Robert McNeel & Associates, nacido en origen como un agregado de Autodesk AutoCAD, pero desarrollado finalmente de manera independiente y lanzado en 1993.^[9] Este programa puede crear, editar, analizar, documentar, renderizar, animar y traducir curvas NURBS, superficies y sólidos, geometría de subdivisión (SubD), nubes de puntos y mallas poligonales.^[10]

En general, una de las mayores cualidades de este método de trabajo es la amplia variedad de aplicaciones, desarrolladas tanto por los propios programadores como por otros usuarios gracias a su licencia de código abierto. Como veremos más adelante, esta lista de nuevas aplicaciones para Grasshopper es cada vez más numerosa y atiende cada vez a necesidades específicas de los modeladores.

Para presentar una pequeña introducción al uso de Grasshopper, primero se ofrece una explicación de la interfaz predefinida que muestra Rhinoceros 3D. Como se ilustra en la figura 08, dicha pantalla se divide en seis áreas:

- **Barra de menú:** Acceso a propiedades del archivo, comandos (curvas, superficies, sólidos, etc.), opciones, plugins y ayuda.

8. Ibid pág. 13, referencia 7.

9. McNeelWiki, La historia de Rhino. Último acceso 02/02/2021 <https://wiki.mcneel.com/rhino/rhinohistory>

10. Soporte de Rhinoceros 3D, Características. Último acceso 02/05/21 <https://www.rhino3d.com/features/>

- **Barra de herramientas (Toolbar):** Acceso rápido a los comandos, se divide a su vez en quince ventanas: estándar, planosC, definir vistas, visualización, seleccionar, disposición de las vistas, visibilidad, transformar, curvas, superficies, sólidos, mallas, renderizado, dibujo y novedades.

- **Área gráfica:** Visualización del modelo de trabajo, por defecto se muestran cuatro vistas (planta, alzado frontal, alzado derecho y perspectiva) aunque se pueden configurar y personalizar.

- **Línea de comandos:** Los comandos pueden ser ejecutados de forma escrita a través de esta barra.

- **Barra de estado:** En ella aparecen las coordenadas del cursor, el estado del modelo, las opciones y los interruptores para activar y desactivar comandos de referencia.

- **Accesos rápidos:** Esta pestaña es también personalizable según las preferencias del usuario. Por defecto nos encontraremos las propiedades de las capas, las texturas, etc.

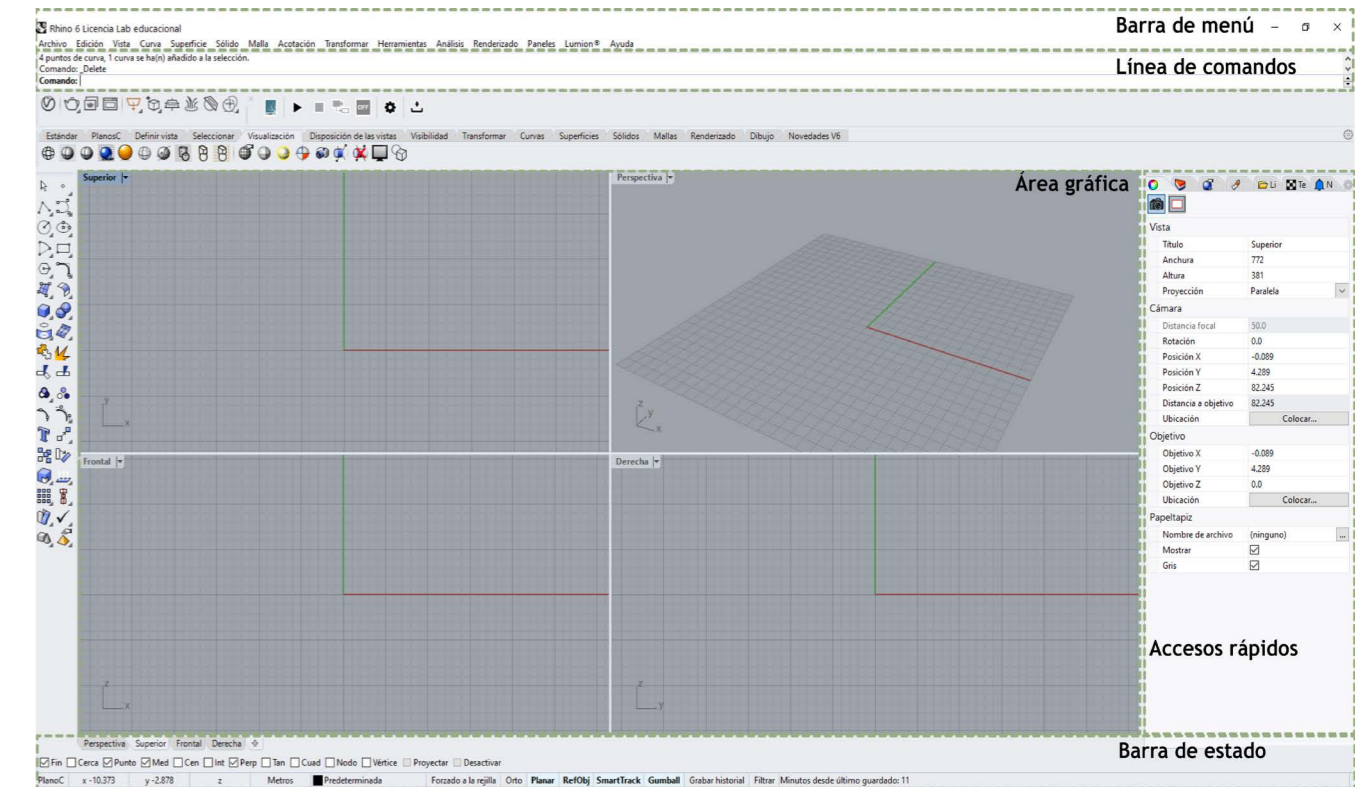


Fig.08_Captura de la interfaz de Rhinoceros 3d 6.0 con anotaciones sobre sus áreas de trabajo. Elaboración propia

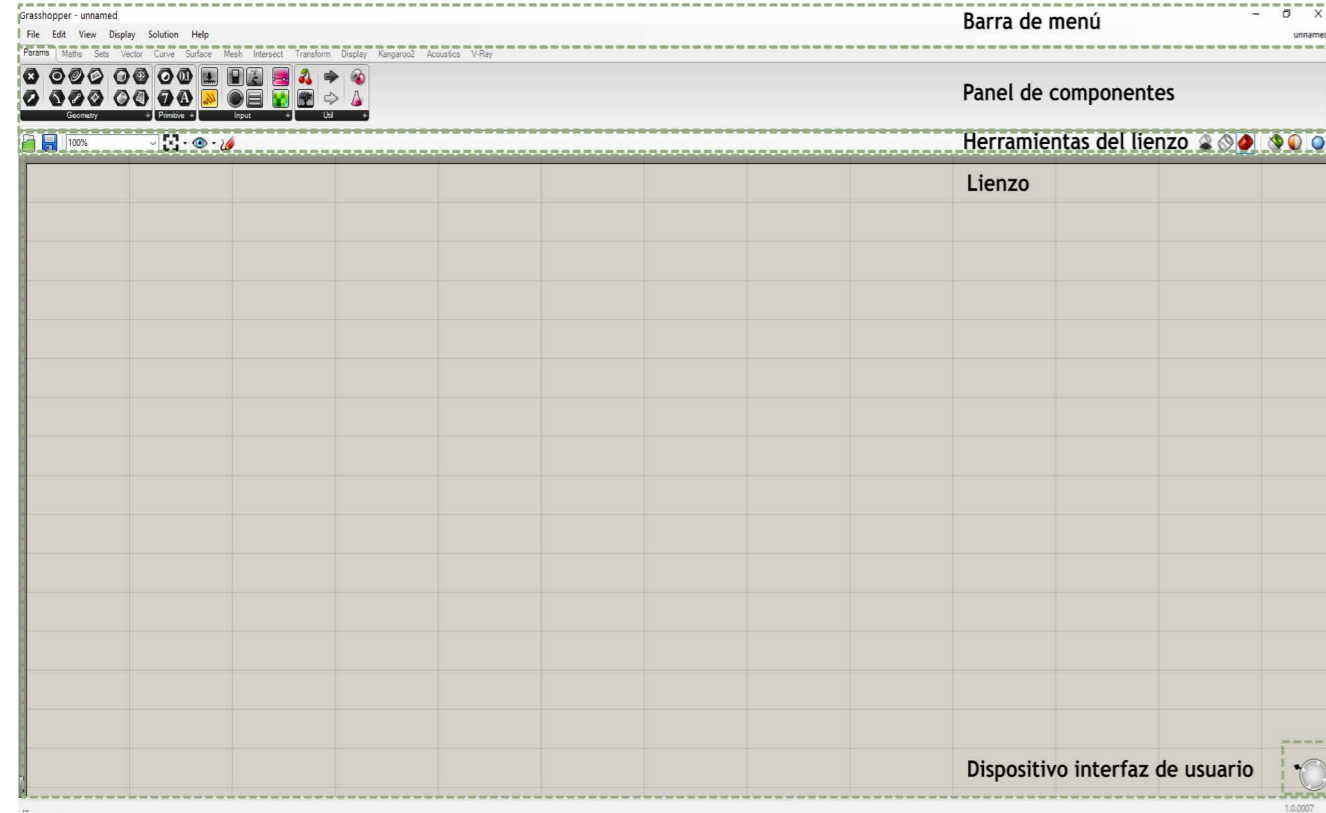


Fig.09_Captura de la interfaz de Grasshopper en Rhinoceros 3d 6.0 con anotaciones sobre sus áreas de trabajo. Elaboración propia

A la herramienta Grasshopper se accede desde la barra de menú, en la pestaña plugins o escribiendo el nombre de este en la línea de comandos. Una vez ejecutado, la interfaz que muestra Grasshopper se divide en seis áreas:

- **Barra de menú:** Da acceso a las propiedades del archivo, vistas, visualización, opciones, y ayuda.
- **Panel de componentes:** Estos se presentan agrupados en familias (Parámetros, Matemáticas, Sets, Vector, Curva, Superficie, Malla, Intersección y Transformación). Si hay instalado algún plugin también aparecerá una nueva familia con sus componentes agrupados.
- **Lienzo:** Es la zona de trabajo dónde se colocan los parámetros y componentes
- **Herramientas de lienzo:** Está formado por un conjunto de accesos rápidos a funciones de visualización de uso muy frecuente.
- **Dispositivo interfaz de usuario:** Herramienta para facilitar la navegación gráfica por el lienzo.
- **Dispositivo interfaz de usuario:** Herramienta para facilitar la navegación gráfica por el lienzo.

Para el manejo y uso de Grasshopper es primordial conocer la definición de los conceptos componentes, parámetros y nodos. Los dos primeros son los objetos principales que definen al plugin, mientras que los nodos son el medio de unión entre ellos, a través de los cuales se crea una secuencia de instrucciones válidas.

Los parámetros almacenan los datos necesarios (coordenadas, valores numéricos, puntos, etc.) para la definición de la programación, y los encontramos en su propia pestaña dentro del panel de componentes (ver fig.10). Las conexiones de este a través de sus nodos izquierdos muestran que el parámetro tiene



Fig.10_Captura de los componentes parámetros de Grasshopper en Rhinoceros 3d 6.0. Elaboración propia

dependencias heredadas, lo que quiere decir que la información que contiene ha sido especificada en un paso anterior del código. Por otro lado, los componentes realizan acciones sobre estos datos (representación geométrica, unión, rotación, creación de curvas y superficies, etc.).

La diferencia entre estas dos “pastillas” también se encuentra en su presentación gráfica, mientras que los componentes están representados por un icono con un número variable de nodos a ambos lados, los parámetros solo tienen un nodo de entrada y otro de salida, como se ilustra en la figura 11.^[11]

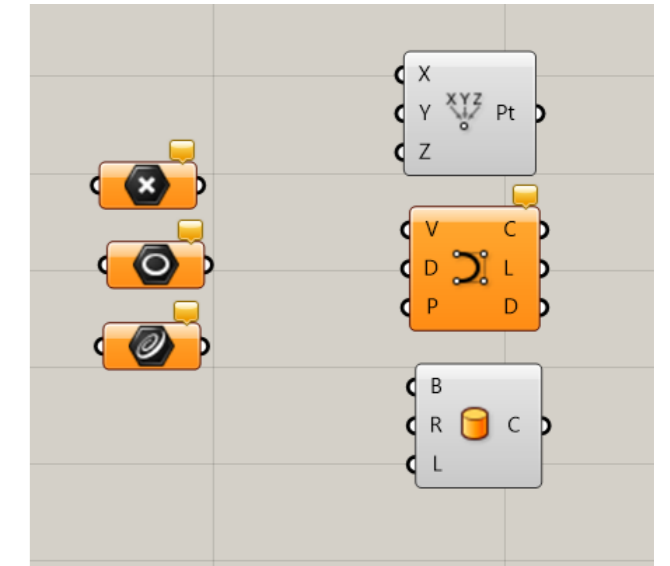


Fig.11_Captura de los componentes punto, círculo, curva (parámetros, en la izquierda), punto desde coordenadas, curva NURBS y cilindro (a la derecha) de Grasshopper en Rhinoceros 3d 6.0. Elaboración propia

11. Gómez González, S., & Torné Ribé, J. (2016). Grasshopper para Rhinoceros e impresión 3D . Marcombo.

3.2.3 REFERENCIAS DE INNOVACIONES ACTUALES EN ARQUITECTURA Y ACÚSTICA UTILIZANDO GRASSHOPPER

- Diseño paramétrico de un almacén acústico al aire libre

Este escrito tiene como objetivo desarrollar una herramienta de diseño computacional para generar formas acústicas reflectantes, además de investigar las cualidades acústicas de superficies complejas de doble curvatura a través del análisis paramétrico. El parámetro principal es el Nivel de Sonido Relativo Total y está basado en la distancia del receptor a la fuente. Al final del estudio, se emplea el complemento de simulación acústica Pachyderm para validar las superficies propuestas con referencia a los valores de el Nivel de Sonido Relativo Total.^[12]

- Optimización multiobjetivo en el diseño acústico de aulas

En esta investigación se desarrolla una herramienta que sirve de apoyo a los profesionales del diseño, con la cual identificar las mejores soluciones para el tratamiento acústico de un aula docente. El algoritmo de dicha herramienta se ha desarrollado en Grasshopper a través de distintos plugings, basándose en las indicaciones de la norma italiana UNI 11532-2: 2020: Características acústicas internas de espacios confinados. Métodos de diseño y técnicas de evaluación. Parte 2: Sector escolar.^[13]

- Simulación animada del rendimiento de edificios vinculando Rhinoceros-Grasshopper con Radiance-Daysim

En el siguiente artículo, se describe la vinculación del programa Rhinoceros 3d con simulaciones avanzadas de luz diurna, a través de Radiance y Daysim. Se estudia así, un nuevo flujo de trabajo altamente efectivo en Rhinoceros, que puede exportar directamente geometrías de escena, propiedades de materiales y cuadrículas de sensores, mientras que Radiance-Daysim calcula una serie de indicadores de rendimiento entorno a la eficiencia energética. Mientras, los parámetros claves del modelo, como la altura o el tamaño de las ventanas, pueden ser modificados y obtener los nuevos resultados de los indicadores simultáneamente (fig.14).^[14]

- Involucrar flujos de trabajo BIM generativos

En este estudio se presenta una recopilación de distintas soluciones que la herramienta de diseño generativo Grasshopper ofrece a los arquitectos, las cuales además pueden coordinarse rápidamente para maximizar el tiempo de diseño y ejecución. Estas soluciones albergan, entre otras, cálculo de estructuras, instalaciones, características medioambientales, simulaciones físicas, programación de la ejecución y evaluación de costos.^[15]

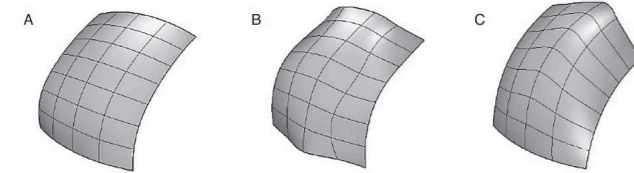


Fig. 12_Perspectiva de la morfología de las superficies A, B y C respectivamente

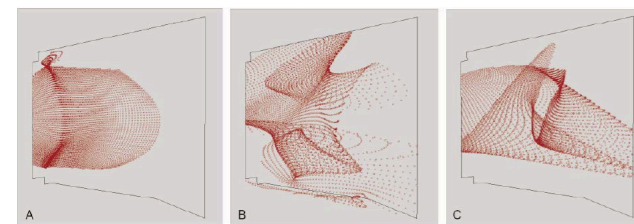


Fig.13_Planta de las tres opciones de superficies reflejando los rayos de sonido sobre la audiencia (opciones A, B y C)

12. Palma, Marco; Sarotto, Maddalena ;Echenagucia, Tomás; Sassone, Mario; Astolfi, Arianna; Sound-strength driven parametric design of an acoustic shell in a free field environment; Building Acoustics (2014)

13. Emma, Giuseppina; L 'ottimizzazione multi-obiettivo nella progettazione acustica delle aule scolastiche; Politecnico Di Torino Repository Istituzionale (2020)

14. Lagios, Kera; Niemasz, Jeff; Reinhart F, Christoph (2010). Animated Building Performance Simulation (Abps) - Linking Rhinoceros / Grasshopper With Radiance / Daysim. Conference proceedings of SimBuild 2010

15. Mirtschin, Jonathan (2011). Engaging Generative BIM Workflows. Collaborative Design of Lightweight Structures - LSAA 2011

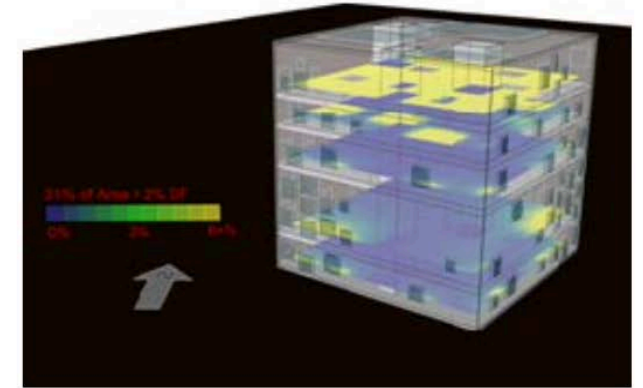
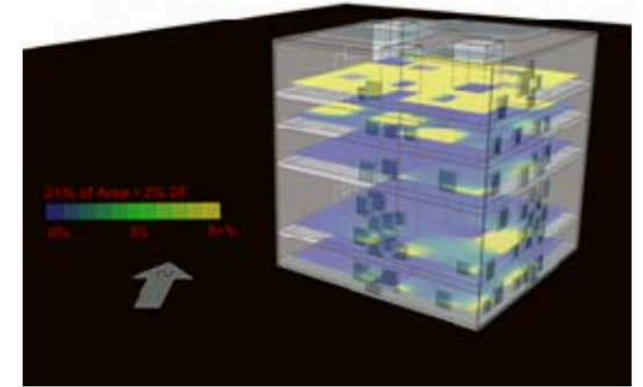
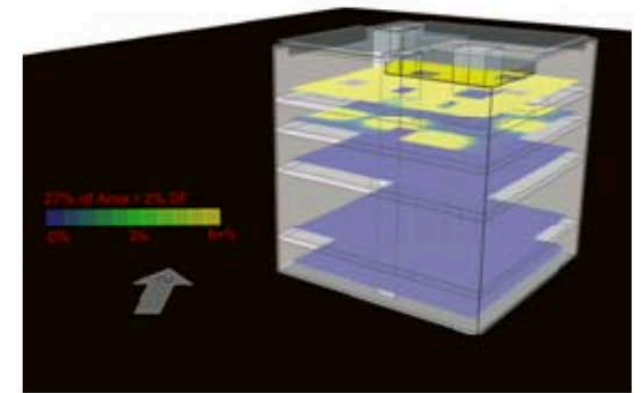


Fig. 14_Serie de imágenes de un estudio de la iluminación natural paramétrica de la Zollverein de Essen

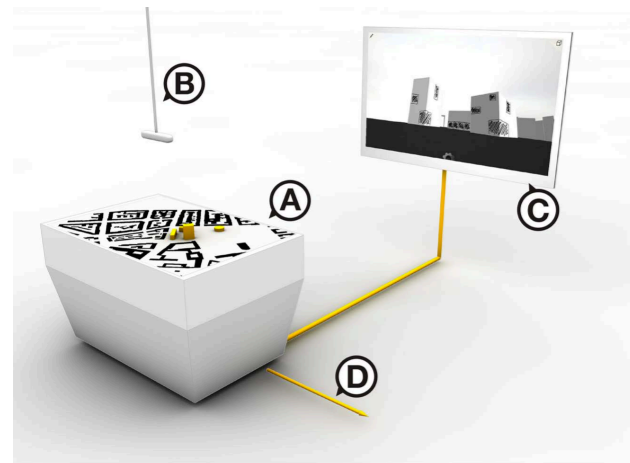


Fig.15_ Configuración del sistema. A: Mesa multitáctil B: Cámara de profundidad 3D montada en la parte superior C: Vista en perspectiva de la escena del diseño D: Extensión flexible a través de un protocolo de red.

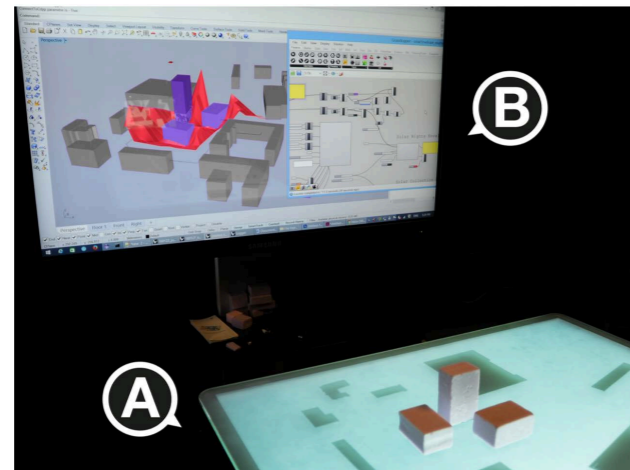


Fig.16_ Configuración del sistema. A: Plataforma de diseño: modelos físicos colocados en la mesa de la Plataforma de diseño (bloques de poliestireno) con reconstrucción de objetos 3D integrada, B: Componente Grasshopper3D personalizado que ejecuta y visualiza simulaciones.

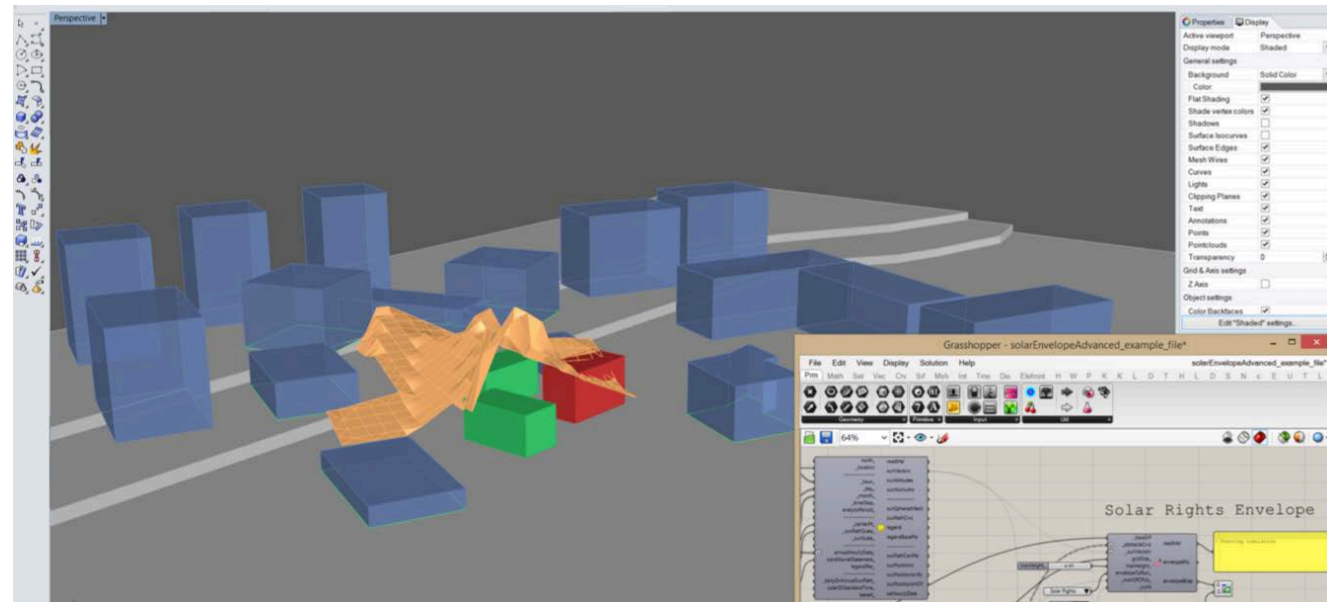


Fig.17_ Un componente de simulación de envoltorio de derechos solares personalizado en Grasshopper

- Un método para combinar modelos físicos con herramientas generativas y paramétricas

Este último documento que nos sirve de ejemplo, busca dar solución a la coordinación simultánea entre herramientas físicas y digitales. Este novedoso sistema de trabajo busca enlazar ambas metodologías y proporcionar un diseño intuitivo, visual y colaborativo. Para ello, ha desarrollado una plataforma de diseño que conecta los modelos físicos de forma libre, datos de geolocalización y la herramienta Grasshopper. La plataforma de diseño es capaz de reconstruir digitalmente piezas físicas que se coloquen sobre ella, cargando los nuevos datos en Grasshopper. Todas las simulaciones producidas son visualizadas en tiempo real, respaldando el proceso de diseño intuitivo e interactivo.^[16]

16. Plotnikov, Boris; Schubert, Gerhard; Petzold, Frank (2016) Tangible Grasshopper: A method to combine physical models with generative, parametric tools. CDESIGN TOOLS | Evaluations - Volume 2 - eCAADe

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.3 Grasshopper y sus complementos

3.3.1 ¿Qué es un complemento?

3.3.2 Principales complementos del programa

3.3 GRASSHOPPER Y SUS COMPLEMENTOS

3.3.1 ¿QUÉ ES UN COMPLEMENTO?

Un complemento o plugin es un programa que se relaciona con otro ampliando la funcionalidad de éste y agregándole nuevas características. Las aplicaciones que están basadas en complementos ofrecen varios beneficios, como permitir que los desarrolladores externos amplíen la aplicación en función de sus necesidades.^[1]



Fig.18_Logos Rhinoceros, Grasshopper y foo4Rhino.

1. Nguyen, Hung Viet; Kästne, Christian y Nguyen, Tien N. (2005) Exploring Variability-Aware Execution for Testing Plugin-Based Web Applications. Proceedings - International Conference on Software Engineering.

- Aerospace (18)
- Analysis & Simulation (150)
- Animation (27)
- Architecture (334)
- BIM (60)
- CAM (33)
- Civil Engineering (53)
- Dental (2)
- Drafting & Illustration (50)
- Environmental Design (38)
- Footwear (12)
- Games (18)
- General (171)
- Import & Export (69)
- Interface (35)
- Jewelry Design (45)
- Landscape (20)
- Manufacturing & Fabrication (92)
- Marine (28)
- Mathematics (72)
- Mechanical Design (39)
- Medical (1)
- Meshes & Sub-d (37)
- Modeling (144)
- Paneling & Rationalization (18)
- Physics (35)
- Programming Tools (32)
- Prototyping (26)
- Rendering & Visualization (54)
- Robots (25)
- Scanning & Reverse Engineering (17)
- Structural Engineering (71)
- Viewers (31)

3.3.2 PRINCIPALES COMPLEMENTOS DEL PROGRAMA

Grasshopper, a pesar de tratarse en sí de un complemento del programa Rhinoceros 3D, cuenta a su vez con una amplia variedad de plugins complementarios. Algunos de ellos han sido creados por los propios programadores, aunque la gran mayoría son creados por usuarios ajenos a la compañía.

Existe una web llamada Food4Rhino que pone a disposición de los usuarios todos los complementos existentes para Rhinoceros y Grasshopper, además de contar con una amplia comunidad y un foro de apoyo donde realizar cualquier consulta relacionada con estos complementos o con sus programas base.

Las 715 aplicaciones que existen actualmente en la web de food4Rhino, se dividen en 34 categorías (Fig. 19). De todas estas aplicacio-

Fig.19_Categorías según uso de las aplicaciones de la web food4rhino.

nes las seis más descargadas según la página (Fig.20), son:

- **LunchBox** (desarrollada por Nathan Miller): es un complemento de Grasshopper para explorar formas matemáticas, paneles, estructuras y flujo de trabajo.
- **Kangaroo physics** (desarrollada por Daniel Piker): es un motor de *Live Physics* para simulación interactiva, búsqueda de formas, optimización y resolución de restricciones. Actualmente, se incluye con la versión de Rhinoceros 3D 6.0 y 7.0.
- **Ladybug tools** (desarrollada por Ladybug Tools): permite importar y analizar datos meteorológicos estándar en Grasshopper; dibujar diagramas como cartas solares, rosa de los vientos, diagramas de radiación, además de, estudios de sombras y análisis de vistas.

- **Ghpython** (desarrollada por giulio@mcneel.com): incluido con Rhinoceros a partir de la versión 6.0, este es un componente de interpretación de Python para Grasshopper que permite ejecutar scripts dinámicos de cualquier tipo.

- **Elk** (desarrollada por tlogan): es un conjunto de herramientas para generar mapas y superficies topográficas utilizando datos de código abierto de OpenStreetMap.org y USGS.

- **Panelingtools for Rhino and Grasshopper** (desarrollada por Rajaa Issa): ampliamente utilizado por diseñadores, arquitectos y profesionales de la construcción, este plugin admite el diseño intuitivo de conceptos de paneles y ayuda a racionalizar la geometría compleja en un formato adecuado para el análisis y la fabricación. ^[2]

2. Toda la información ha sido tomada de las descripciones que las propias aplicaciones han compartido en la web food4rhino.



Fig.20_ Los logos de las seis aplicaciones más descargadas en la web food4Rhino. 1.LunckBox, 2.Kangaroo Physics, 3.LadyBug Tools, 4.Ghython, 5.Elk y 6.Panelingtools.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.4. Pachyderm Acoustical Simulation

3.4.1 Definición de sus componentes en Grasshopper

3.4.2 Definición de sus pantallas en Rhinoceros 3d

3.4.3 Ejemplo de simulación y cálculo a pequeña escala

3.4.4 Referencias de salas de conciertos proyectadas con simulaciones acústicas

3.4 PACHYDERM ACOUSTICAL SIMULATION



Fig.21_Logo de Pachyderm

Este complemento integrado en el ámbito de Rhinoceros 3D es una colección de algoritmos de simulación acústica numérica y geométrica, y fue desarrollado por Arthur Van der Harden en ORASE, acrónimo de *Open Research in Acoustical Science and Education 3D*, organización sin ánimo de lucro dedicada a hacer que el conocimiento de la acústica, el sonido y el ruido sea accesible para todos. Pachyderm incluye visualización de trazado de rayos y fuente emisora, predicción y visualización del coeficiente de dispersión (basada en el método de volúmenes finitos), y cálculo de absorción acústica para aplicarlos a la simulación.^[1]

1. Open Research in Acoustical Science and Education
Último acceso 22/05/2021 <https://www.orase.org/>

El desarrollo de esta herramienta tuvo como objetivo proporcionar un entorno flexible para la simulación acústica y, desde su creación, se ha utilizado tanto para análisis acústicos en modelos reducidos como para experimentos de diseños geométricos personalizados en los campos de algoritmos genéticos [2] y parámetros experimentales. [3]

La aplicación tiene interfaces diferenciadas para Rhinoceros y Grasshopper, ambas serán analizadas en los siguientes apartados. La simulación es visualizada en Rhinoceros, pudiendo ser recuperados los resultados del análisis en esta misma aplicación o directamente en Grasshopper, esto permite un intercambio fluido de datos entre las variaciones geométricas, materiales, y su impacto en el rendimiento acústico; y ofrece versatilidad en su uso según los conocimientos de las interfaces que posea cada usuario. Lo que diferencia a Pachyderm de otras herramientas de tratamiento acústico es que este expone su código fuente para que los usuarios puedan personalizar las simulaciones, ya sea en el C# nativo del complemento o utilizando la interfaz de scripting IronPython de Rhino. [4]

[5]

Como inconveniente a señalar, la mayoría de los usuarios y análisis consultados coinciden en que el flujo de datos del programa resulta lento, requiriendo de varias horas para llevar a cabo los cálculos pertinentes, por lo que se recomienda simplificar los modelos para reducir este tiempo.

El caso de estudio que ocupa a este trabajo se centrará en crear una visualización de trazado de rayos desde una fuente emisora y calcular el tiempo de reverberación del sonido que esta produce. Se llevará a cabo utilizando una parte de las interfaces que Pachyderm ofrece en Rhinoceros para personalizar parámetros como el coeficiente de absorción de los materiales, las cualidades del aire o del emisor del sonido; Así, programando con los componentes que ofrece en Grasshopper, podrán obtenerse las simulaciones y los datos sobre el tiempo de reverberación. Para tener un conocimiento más amplio de cómo realizar este proceso, se ha llevado a cabo, previo al caso de estudio, un ejemplo de geometría simple a pequeña escala que se describe en el apartado 3.4.3.

3.4.1 DEFINICIÓN DE SUS COMPONENTES EN GRASSHOPPER

Los 36 componentes disponibles en la herramienta Pachyderm se dividen en las siguientes categorías: análisis, audio, cálculo, modelo, utilidad, y visualización (Fig. 23).

A continuación, se definen los componentes que serán utilizados tanto en el ejemplo a pequeña escala como en el caso práctico, así como los datos que precisan.

- **Geodesic Source:** Se emplea para establecer el punto emisor del sonido en el estudio (*Source*). Precisa de los siguientes datos de entrada: localización física de un punto (*Origin*), potencia acústica (*Power*) y

un posible retraso que tenga el emisor (*Delay*).

- **Polygon Scene:** Se emplea para introducir la geometría del objeto de estudio (auditorio, sala, pared, etc.). Precisa de la geometría física del objeto en Rhinoceros (*Rhino Geometry*) o una geometría física del objeto desarrollado en Grasshopper (*Grasshopper Geometry*). Hay que indicar todas las capas del modelo de Grasshopper (*Grasshopper Layers*), donde hay que separar los materiales que componen el objeto según su materialidad y cualidades de absorción acústica. Este componente da lugar al objeto de estudio (*Scene*).



Fig. 23_Componentes de Pachyderm Acoustical Simulation disponibles en la interfaz de Grasshopper

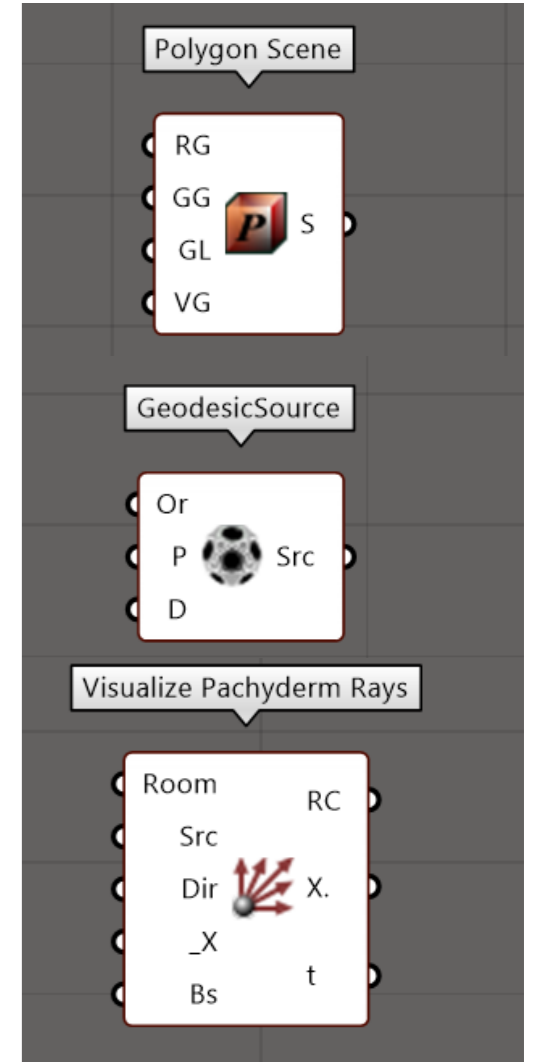


Fig. 24_Componentes Polygon Scene, Geodesic Source y Visualize Pachyderm Rays

Fig.22_ Imágen de simulación acústica realizada con Pachyderm Acoustical Simulation y expuesta en la página web de ORASE

2. Tomás Mendez, Arianna Astolfi, Mario Sassone, Louena Shtrepi and Arthur van der Harten, *Esplorazione Multi Obiettivo nella Progettazione Acustica Architettónica*, 39 Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustic, Rome, 4-6 July, 2012.

3. Arthur van der Harten, *Customized Room Acoustics Simulations Using Scripting Interfaces*, Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA), Vol 12, June 2011.

4. Parigi, Dario; Svidt, Kjeld; Molin, Erik; Bard, Delphine; *Parametric Room Acoustic workflows Review and future perspectives*; eCAADe (2017) Volumen 35.

5. Van Der Harten, Arthur; *Pachyderm acoustical simulation: Towards open-source sound analysis*; Architectural Design (2013) Volume 2.

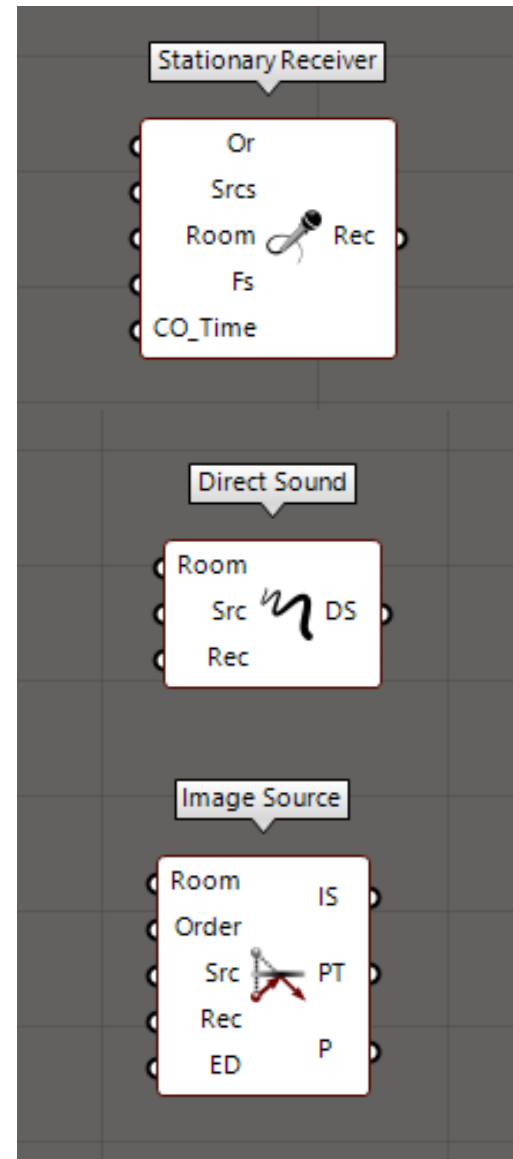


Fig. 25 Componentes Stationary Receiver, Direct Sound e Image Source

- **Visualize Pachyderm Rays:** Su función consiste en representar las ondas de sonido que emite el punto emisor. Precisa de *Room Model* (*Scene* o caso de estudio), un punto emisor (*Source*), la dirección de los vectores que representan las ondas de sonido (*Ray Directions*) y el número de rebotes de los rayos (*Number of bounces*). Da lugar a las ondas (*Ray Curves*), los *End Points* y el *Arrival Time Delay*, el delay que tiene cada punto.

- **Stationary Receiver:** Se utiliza como un objeto receptor fijo que recoge las ondas de sonido que emite el punto emisor. Precisa de un punto de origen (localización física del receptor), un punto emisor (*Source*) y una geometría física del recinto en Rhinoceros (*Geometry*). El dato que devuelve este componente es la grabación recogida por el receptor.

- **Direct Sound:** Se emplea para el cálculo del sonido directo, este parámetro es establecido por el programa como una lista de datos necesaria para el cálculo de la simulación, serían: una geometría física del recinto en Rhinoceros (*Geometry*), un punto emisor (*Source*) y los datos de un recep-

tor (*Stationary Receiver*). Como resultado, ofrecería a una lista con los datos del sonido directo (*Direct Source Data*).

- **Image Source:** Este componente realiza los cálculos relativos a la Ley de Snell en un modelo. Los parámetros que precisa son una geometría física del recinto en Rhinoceros (*Geometry*), un número que marque la reflexión máxima posible de obtener sin ser nunca mayor que 1 (*Order*), un punto emisor (*Source*) y los datos de un receptor (*Stationary Receiver*). De este componente se obtiene una lista con los datos del sonido que capta el receptor (*Image Source Data*) y otra lista con las curvas de reflexión que recorre el sonido según la Ley de Snell (*Reflection*).

- **Ray Tracing:** Su función es calcular los rayos trazados por el sonido del emisor y qué parte de su energía es absorbida, reflejada o difundida tras su colisión con la geometría especificada. Los datos de entrada son una geometría física del recinto en Rhinoceros (*Geometry*), el número de rayos que precisamos de calcular (*RayCt*), el tiempo en milisegundos que queremos que se calculen (*CO_Time*), un número que marque la reflexión máxima posible de obtener

sin ser nunca mayor que 1 (*Order*), un punto emisor (*Source*), los datos de un receptor (*Stationary Receiver*) y el dominio de las octavas sobre las que se precisa calcular, que por defecto serán 62,5Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz (*Oct*). Da lugar a una lista de datos sobre el trazado de rayos ejecutado por Pachyderm (*Ray Tracing Data*).

- **Energy Time Curve:** Gracias a este componente se crea la curva de energía-tiempo del sonido emitido a partir de los resultados de la simulación. Precisa de los datos del sonido directo (*Direct Source Data*), datos del sonido captado por el receptor (*Image Source Data*), datos sobre el trazado de rayos ejecutado por Pachyderm (*Ray Tracing Data*) y, por último, el dominio de las octavas sobre las que se precisa calcular (*Oct*).

- **Reverberation Time:** Se emplea para calcular el tiempo de reverberación a partir de la curva de energía-tiempo. Los parámetros de entrada son la curva de energía tiempo (*Energy Time Curve*) y el rango de descenso de densidad de energía acústica media una vez que la emisión de la fuente ha cesado, que tiene un valor predefinido de 30, haciendo que el resultado obtenido

corresponda al parámetro T30 recogido por la norma UNE-EN ISO 3382-2 (*Decay index*). Daría como resultado una lista con los datos del tiempo de reverberación ordenados según el dominio de octavas preestablecido (*Reverberation Time*).

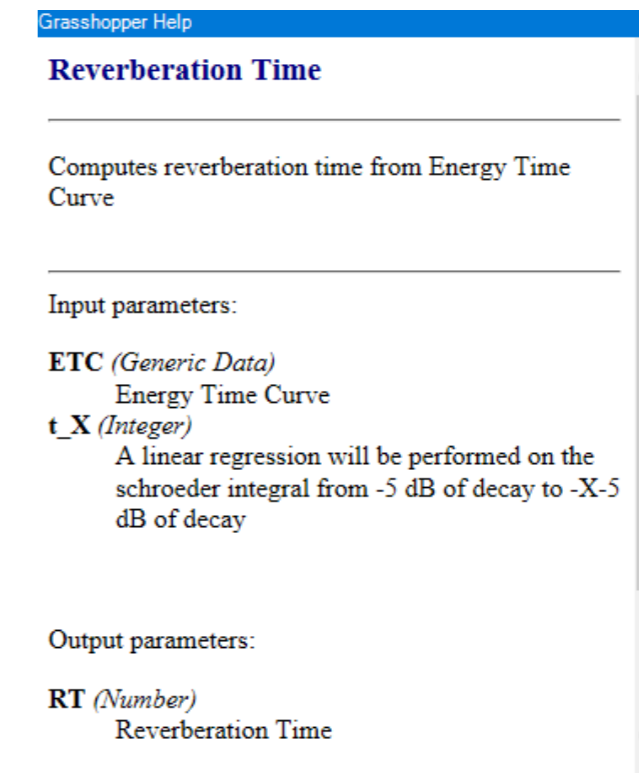


Fig. 26 Ayuda del componente Reverberation Time

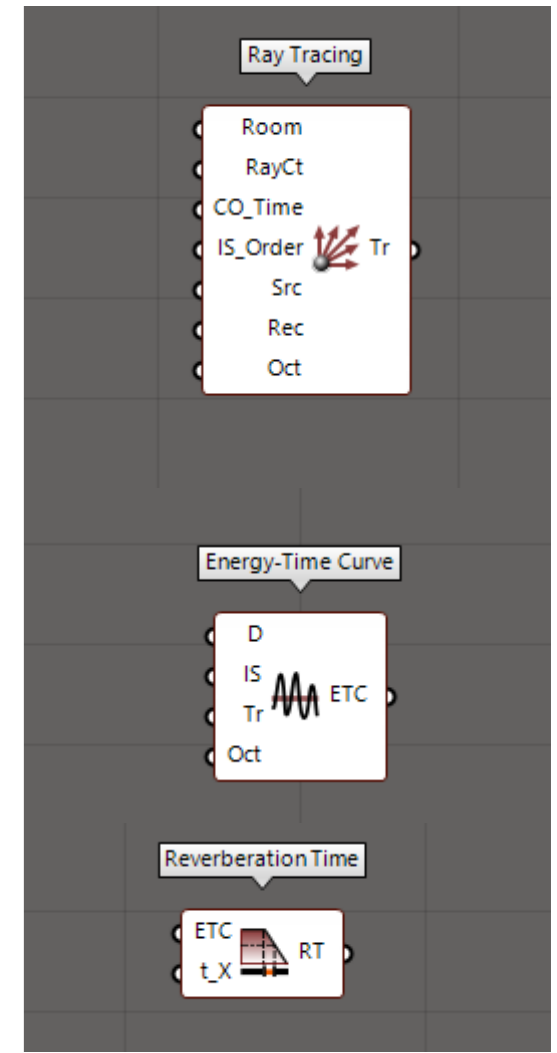


Fig. 27 Componentes Ray TRacing, Energy-Time Curva y Reverberation Time

3.4.2 DEFINICIÓN DE SUS PANTALLAS EN RHINOCEROS 3D

Como ya se ha comentado, parte de las funciones descritas en el apartado anterior podrían ser ejecutadas también en Rhinoceros; por ejemplo, también sería posible obtener los datos relativos al tiempo de reverberación a través de la pantalla Pachyderm_Acoustic en la pestaña análisis, si previamente hemos definido los parámetros necesarios en esta aplicación. Sin embargo, para el presente trabajo se ha optado por una simulación en Grasshopper para aprovechar esta herramienta paramétrica combinando parámetros geométricos y acústicos. Es por eso por lo que a continuación se definen únicamente las pantallas en Rhinoceros necesarias para llevar a cabo el caso de estudio que se describe en el apartado 4.

- **Pachyderm_Acoustic (Impulse/Material/Analysis) - Material Designer**

En esta pantalla es posible asignar materiales a las distintas capas del modelo. Además, a estos materiales se les asigna su coeficiente de absorción, en porcentaje, de cada frecuencia preestablecida de la octava.

- **Pachyderm_Acoustic (Impulse/Material/Analysis) - Impulse**

A través de la parte inferior de esta pantalla es posible definir las características del medio en el que se desea hacer el cálculo de la simulación, además del método de atenuación deseado.

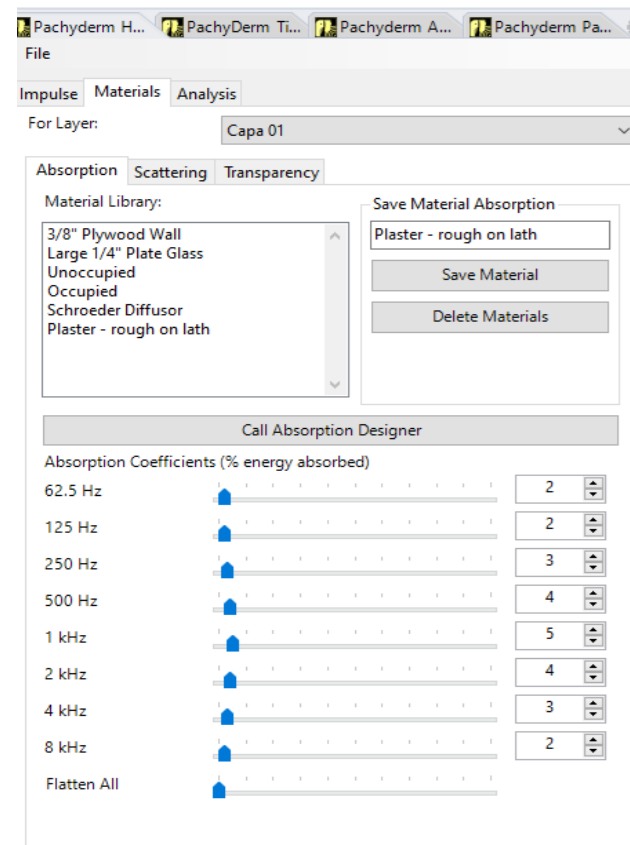


Fig. 28_Pestaña Material Designer de la pantalla Pachyderm_Acoustic

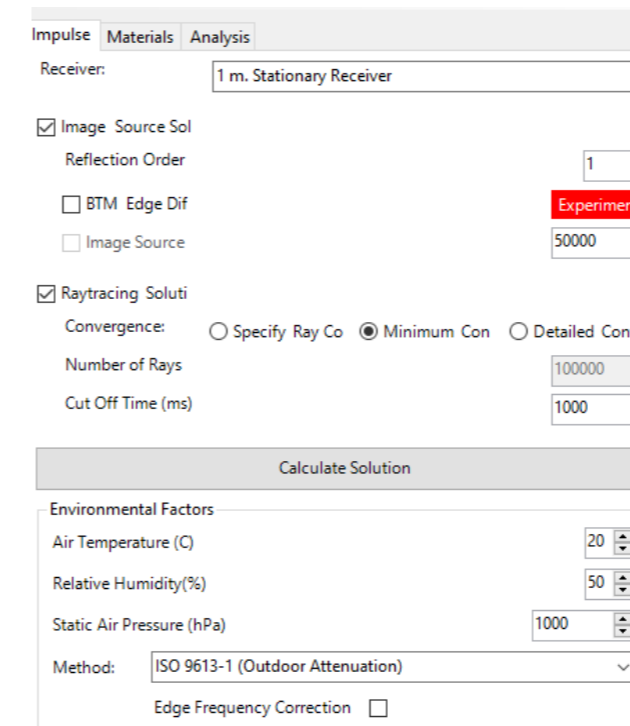


Fig. 29_Pestaña Impulse de la pantalla Pachyderm_Acoustic

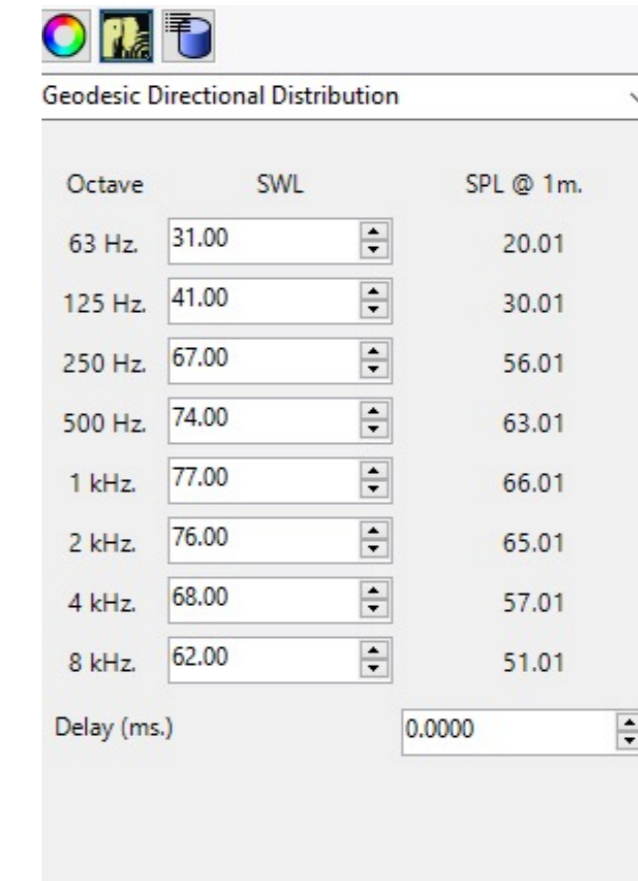


Fig. 30_Pestaña Source de la pantalla Pachyderm_Acoustic

- **Pachyderm_Acoustic_Source**

Gracias al comando *Insert Speaking Person*, podemos acceder a los datos de los niveles de fuerza del sonido (*SWL, sound power level*) emitido por una persona hablando. Es posible especificar si el emisor será una mujer, un niño o un hombre, y precisar si estará conversando, dando una conferencia, debatiendo, cantando o gritando. Los valores del nivel de presión del sonido (*SPL, sound pressure level*) variarán en relación a estas especificaciones.

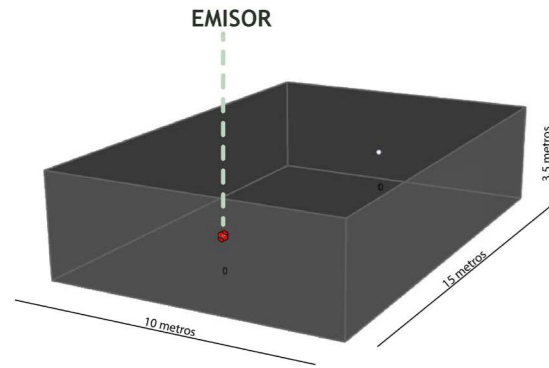


Fig. 31_Habitación modelada en Rhinoceros 3d para ejecutar el ejemplo de simulación y cálculo

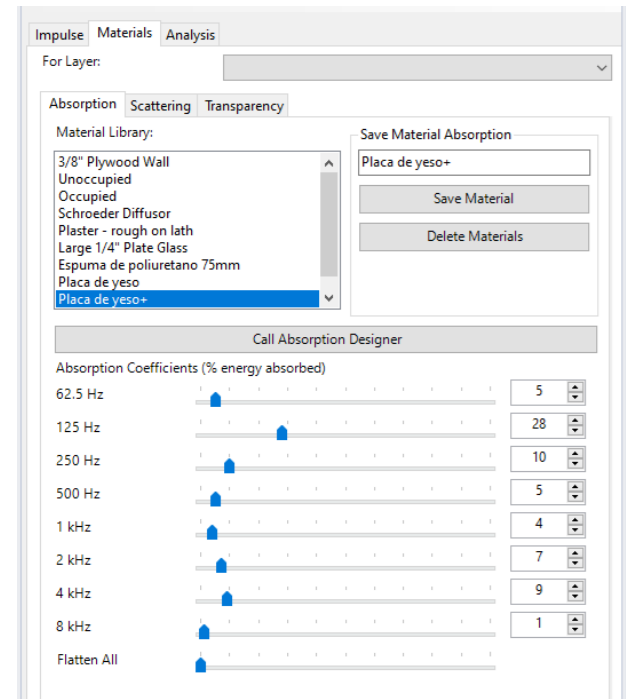


Fig. 32_Configuración de los valores del coeficiente de absorción en % para el material Placa de yeso de 2cm

3.4.3 SIMULACIÓN Y CÁLCULO A PEQUEÑA ESCALA

Para profundizar más en la aplicación y su uso previo al análisis del caso práctico, se presenta un ejemplo de una habitación, de 10x15 metros en su planta y 3.5 metros de altura, donde analizaremos las posibilidades de cálculo y visualización de la herramienta.

En primer lugar, se ha desarrollado una simulación acústica de cómo un impulso sonoro persiste en la sala después de que la fuente haya dejado de emitir sonido, es decir, su reverberación, y cómo estas partículas de sonido lanzadas en todas las direcciones se disipan a medida que colapsan con el cerramiento, donde parte de su energía es absorbida y parte reflejada.^[6]

Para construir esta simulación, el primer paso

6. Temario de la asignatura Fundamentos Físicos de la arquitectura II impartida en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, Tema 9: Acústica Arquitectónica.

será crear el modelo de la habitación en Rhinoceros, a través del comando Caja (figura 31), para después poder definir en la pantalla *Pachyderm_Acoustics_Materials* el material de esta caja así como su coeficiente de absorción. Para este primer ejemplo, utilizaremos un material con una absorción acústica baja, como puede ser una placa de yeso (figura 32). Además, en la pestaña *Impulse* de la misma pantalla, es posible describir las características del aire por el que se propagará el sonido, aunque para este ejemplo dejaremos los valores medios que se establecen por defecto.

Tras esto, ya en el ámbito de Grasshopper, se deben definir las características del emisor, en este caso se ha optado por un emisor oral cuyos datos serán cargados en el componente *Geodesic Source*. Para su posición, se ha definido un punto en uno de los extremos de la habitación a 1,6 metros de altura, y para su potencia acústica nos basaremos en los datos aportado por Rhinoceros para simular a una

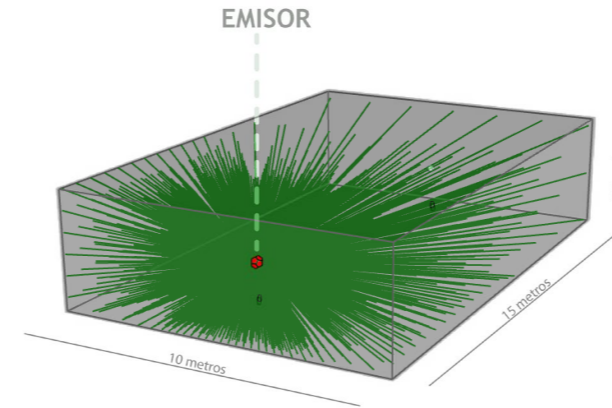


Fig. 33_Ejemplo de simulación y cálculo con los rayos de sonido en habitación modelada en Rhinoceros 3D

mujer hablando en una conferencia (figura 33). El sonido producido se propagará de igual forma en todas las direcciones. Estos últimos datos no serán relevantes para la simulación, pero sí para el cálculo posterior del tiempo de reverberación. A continuación, cargamos la habitación definida en el componente *Polygon Scene* para así poder conectar su salida y la del componente anterior en los datos de entrada del componente *Visualize Pachyderm Rays*. El último dato que debemos aportar es el número de rebotes que queremos que las partículas tengan en la simulación. Se han escogido seis rebotes para hacer más apreciable el recorrido de estas partículas. Con estos tres componentes conectados y funcionando, ya podemos producir la simulación.

Fig. 34_Captura del inicio del clip de la simulación a pequeña escala

Fig. 35_Captura de mitad del clip de la simulación a pequeña escala

Para cada una de ellas se mostrarán capturas de la simulación en varios tiempos concretos, los videos con la simulación completa pueden descargarse como material complementario (figuras de 34 a 36).

La segunda parte del ejemplo trata del desarrollo de un algoritmo cuya función es el cálculo del tiempo de reverberación de esta pequeña habitación. Para ello, es necesario volver a tomar los componentes *Geodesic Source* y *Polygon Scene*, con los datos ya definidos, además del nuevo componente *Stationary Receiver* que, conectado a los anteriores, recogerá los parámetros del sonido emitido. Los nodos de salida de estos tres componentes serán conectados, a los nodos

Fig. 36_Captura del final del clip de la simulación a pequeña escala

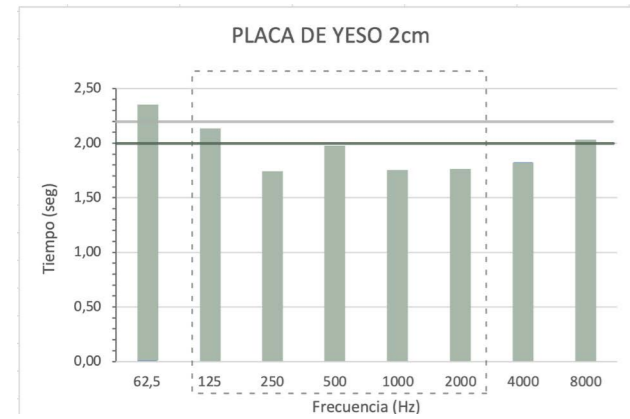


Fig. 37_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para placa de yeso de 2cm

de entrada de los siguientes tres componentes: *Direct Sound*, *Image Source* y *Ray Tracing*. A su vez, los parámetros de salida de estos componentes generan los datos necesarios para utilizar la pastilla de cálculo *Energy Time Curve*, gracias a la cual se obtienen los datos de la curva de energía-tiempo del sonido emitido a partir de los resultados de la simulación.

Una vez obtenidos los datos de la curva de energía-tiempo, es posible utilizar la mayoría de los componentes de la pestaña análisis, que aportan datos de cálculo como la claridad o el nivel de presión del aire entre otros. Este

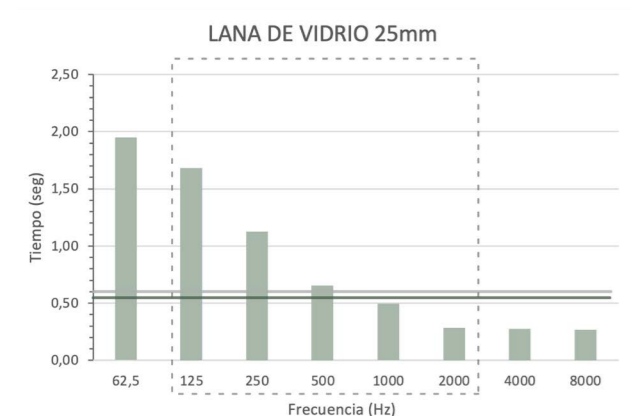


Fig. 38_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para lana de vidrio de 25mm

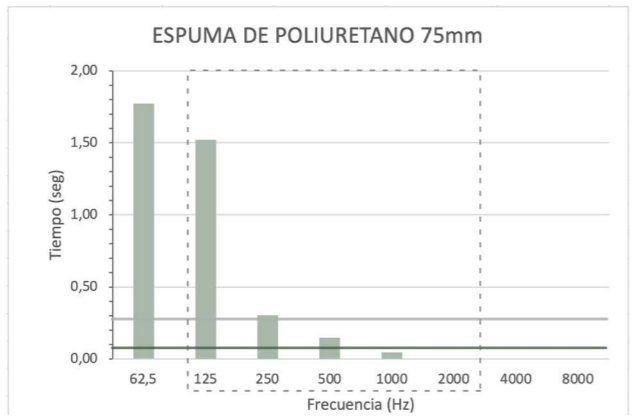


Fig. 39_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para espuma de poliuretano de 75mm

trabajo se centrará únicamente en el estudio del tiempo de reverberación, por lo que sólo se utilizarán los datos del componente *Reverberation Time*, aunque se han consultado también los datos relativos a otros parámetros para asegurar una adecuada correlación de datos. Gracias al uso de *Reverberation Time*, se obtienen los datos del tiempo de reverberación en una lista, ordenados según el dominio de octavas preestablecido, desde 62,5 Hz hasta 8000 Hz. Con ellos, es posible dibujar el diagrama de tiempo de reverberación calculado según la metodología T30 (el cálculo del tiempo de reverberación está basado en los valores de decrecimiento de 5 y 35 dB por debajo del nivel inicial según norma UNE-EN ISO 3382-2), de gran utilidad para analizar qué tipo de frecuencias se disipan más rápidamente en el espacio determinado y cuales siguen resonando durante un tiempo mayor al deseado.

Por último, se presentan los diagramas del tiempo de reverberación a lo largo de la frecuencia de tres materiales distintos, placas de yeso de 2cm (figura 37), lana de vidrio de 25mm de espesor (figura 38) y espuma de poliuretano de 75mm (figura 39). En ellas se

observa cómo los materiales absorbentes escogidos tienen un tiempo de reverberación menor en función de su espesor, y aunque para frecuencias muy bajas no son tan efectivos, estos valores de frecuencia no son reseñables a la hora de aplicar la normativa vigente ya que esta contempla valores entre 250 y 4000 Hz, por lo que sólo será esta franja de valores, marcada por la línea punteada, la que se tenga en cuenta a la hora de estudiar el caso práctico. Adicionalmente, se presentan en

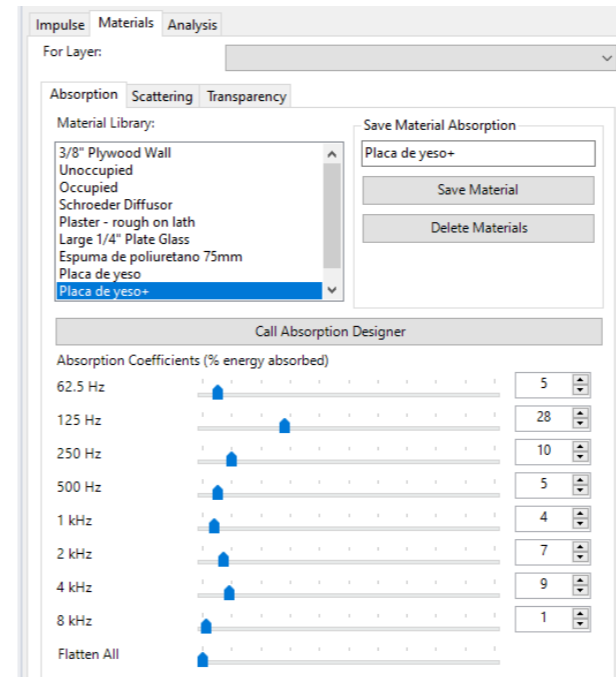


Fig. 40_Coeficientes acústicos en porcentaje para placa de yeso de 2cm

el gráfico dos líneas que marcan diferentes resultados promediados. La primera de ellas representa el tiempo de reverberación que se obtiene al promediar el valor del coeficiente de absorción de los materiales en todas las frecuencias. La segunda, con el objetivo de obtener un resultado medio acorde con las recomendaciones de la normativa vigente, se ha obtenido promediando el coeficiente de absorción únicamente para las frecuencias 500 Hz y 1000 Hz, como se recomienda en la

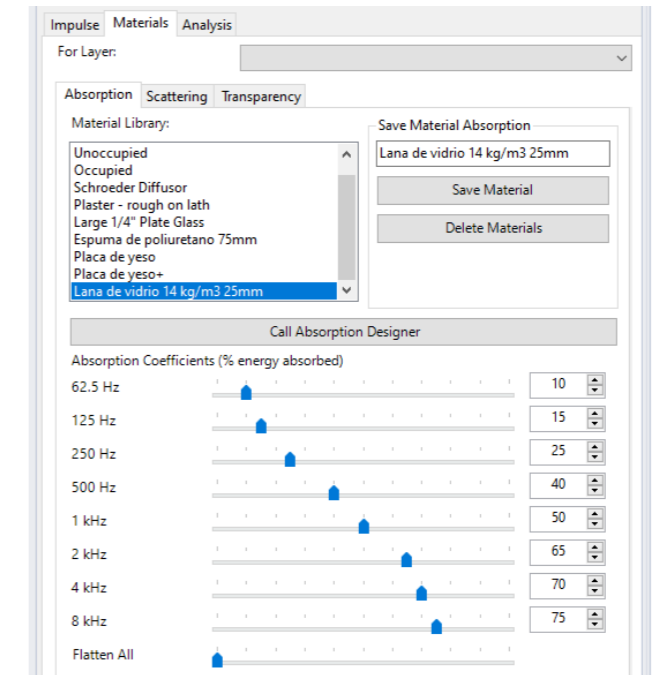


Fig. 41_Coeficientes acústicos en porcentaje para lana de vidrio de 25mm

norma ISO 3382 (apartado 3.6).

Los coeficientes de absorción de estos materiales han sido tomados del catálogo de la empresa de soluciones acústicas Sonoflex (<https://sonoflex.com/>) y volcados al algoritmo de cálculo a través de la pantalla Pachyderm_Acoustic en la pestaña Material Designer, como se ve en las figuras 38, 39 y 40.

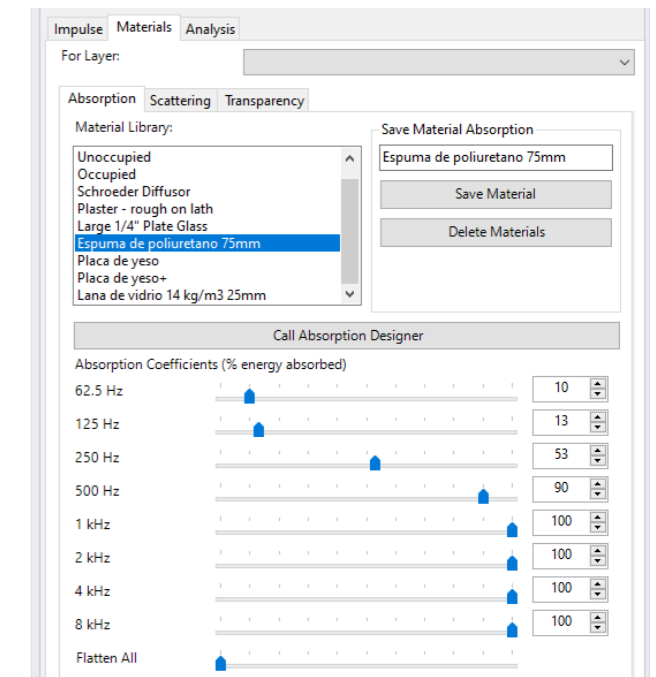


Fig. 42_Coeficientes acústicos en porcentaje para espuma de poliuretano de 75mm

• ANNELIESE BROST MUSIC FORUM



Bochum, Alemania_Arq. Bez + Kock Architekten _Acoustic. Kahle Acoustics, Müller-BBM (2016)

Este proyecto se desarrolló utilizando modelos paramétricos creados en Grasshopper y analizados a través de las herramientas integradas que ofrece. Gracias a esta simulación, se optimizaron las dimensiones y la forma geométrica de los balcones (en los laterales) para que proporcionasen reflejos acústicos beneficiosos, mejorando así la claridad y la envolvente acústica. De igual forma, se optimizaron las formas de los paneles de fibra de yeso superiores para mejorar la difusión de los sonidos de la percusión.^[6]

7. Mommertz, Eckard; Kahle, Eckhard; The bochum concert hall-The challenge of small concert halls for large orchestras on low budgets; Proceedings of the Institute of Acoustics (2018) Volume 40

3.4.4 REFERENCIAS DE SALAS DE CONCIERTOS PROYECTADAS CON SIMULACIONES ACÚSTICAS

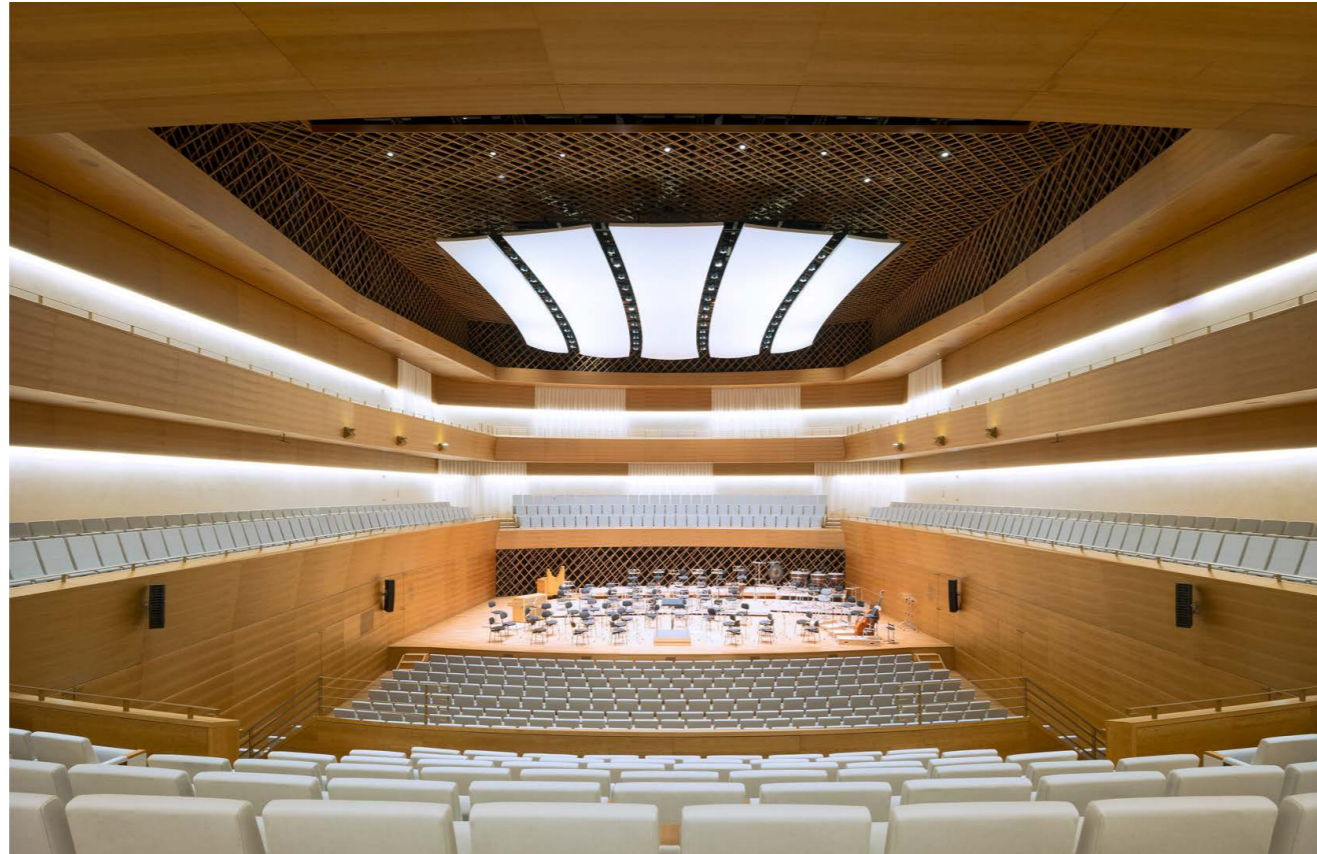


Fig. 43_Interior del Anneliese Brost Music Forum

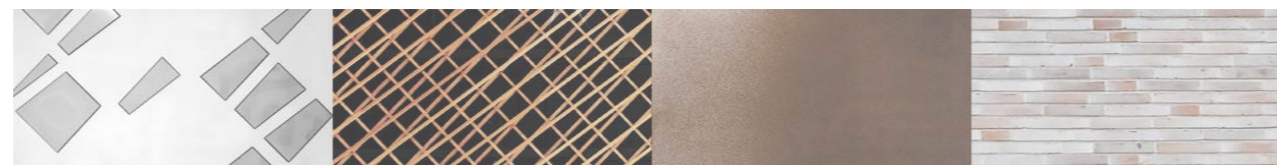


Fig. 44_Detalles de los distintos acabados y tratamientos

• SALA DE CONCIERTOS DEL CENTRO CULTURAL URESHINO



Ureshino, Japón_Arq. AnS Studio, SUEP Architects _Acoustic. Nagata Acoustics (2014)

La forma del techo de este edificio es el resultado de un diseño interactivo, cuya primera fase es el resultado de un software paramétrico capaz de generar diferentes patrones de plegados basados en las reglas de origami. Cada solución obtenida de este software, fue analizada por el programa de simulación acústica, con respecto a los valores de propagación del sonido y la distribuciones del sonido con respecto a las posiciones de la audiencia.^[7]

8. Takenaka, Tsukasa; Okabe, Aya; A Computational Method for Integrating Parametric Origami Design and Acoustic Engineering; 31st International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe); (2012) Volume 2



Fig. 45_Interior de la sala de conciertos del Centro Cultural Ureshino

• SALA DE CONCIERTOS
ELBPILHARMONIE



Hamburgo, Alemania_Arq. Herzog y de Meuron _Acoustic. Nagata Acoustics (2017)

El diseño de la sala principal de conciertos de la Elbphilharmonie cuenta con 10.000 paneles difusores acústicos de diseño único, que recubren el techo, las paredes y las balaustradas. El patrón de estos paneles se definió a través de un proceso de diseño y modelado paramétrico con Rhinoceros 3D, además de una herramienta de simulación acústica y sistemas de optimización.^[8]

9. Badino, Elena; Shtrepi, Louena; Astolfi, Arianna; Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice; Acoustic Journal (2020) Volume 2

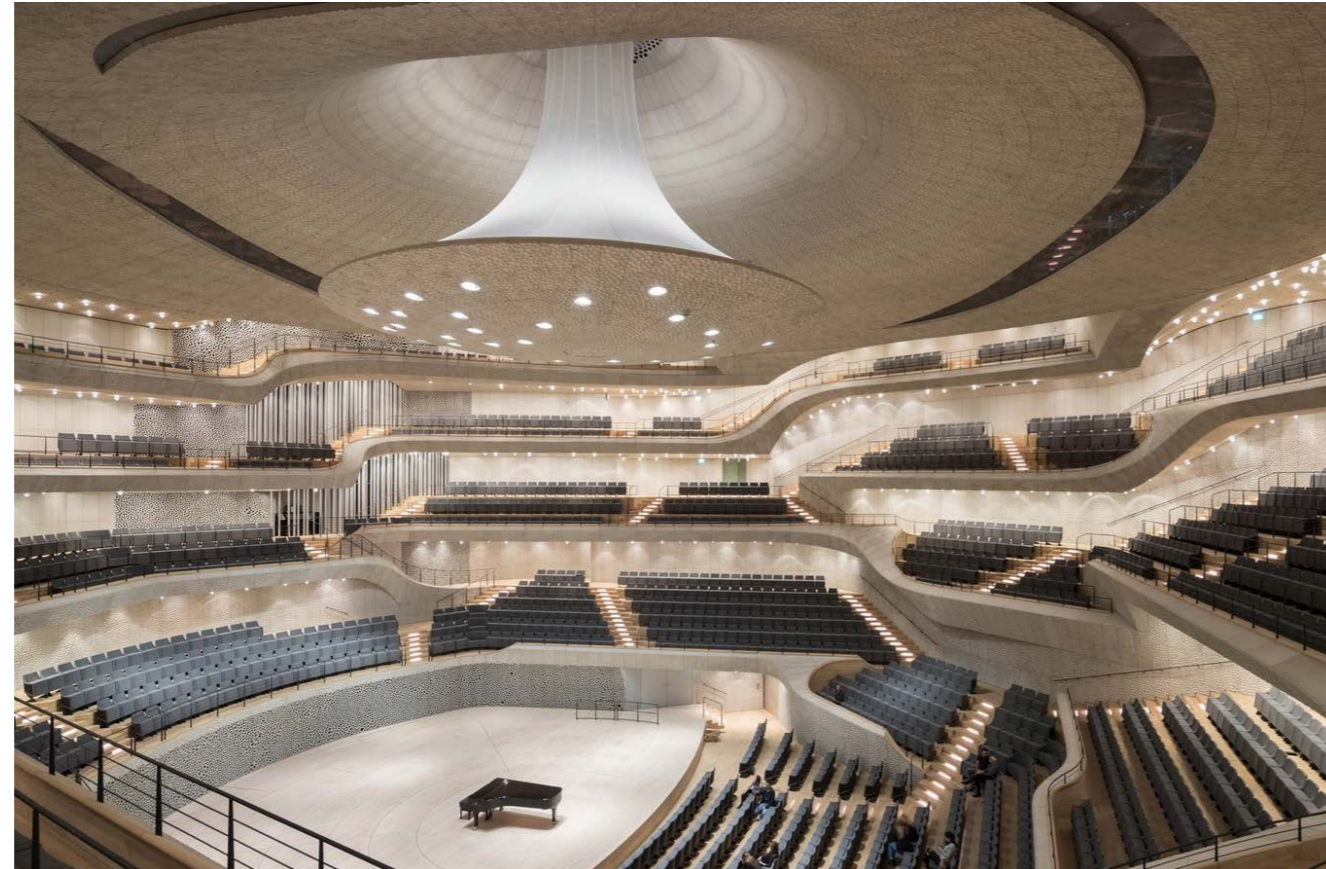


Fig. 46_Interior de la sala de conciertos Elbphilharmonie

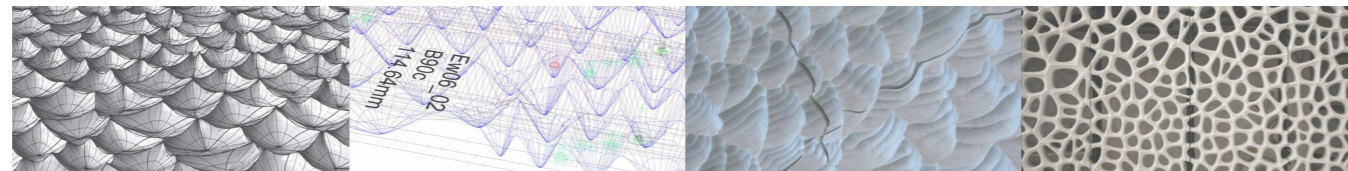


Fig. 47_Detalle del proceso de modelado, cálculo y construcción de los paneles

• LA FILARMÓNICA DE PARÍS



París, Francia_Arq. Ateliers Jean Nouvel, Brigitte Métra Associés _Acoustic. Marshall Day Acoustics, Nagata Acoustics, Studio DAP, Kahle Acoustics, Altia Acoustique, Jean-Paul Lamoureux y ASC (2015)

Su diseño acústico se inició con el estudio de los reflejos sonoros mediante medidas láser en modelos a escala y continuó con el apoyo de herramientas de modelado paramétrico y simulación acústica, utilizando Grasshopper, Maya* y Odeon. La solución final, está formada por dos cámaras anidadas que equilibran los reflejos tempranos y tardíos: el interior proporciona claridad acústica e intimidad visual mientras que el exterior proporciona una alta reverberación.^[9]

10. Day, Christopher; Marshall, Harold; Scelo, Thomas; Valentine, Joanne; Exton, Peter; The philharmonie de Paris - Acoustic design and commissioning; 2nd Australasian Acoustical Societies Conference, (2016) Volume 1



Fig. 48_Interior de la filarmónica de París

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.5 Materiales de estudio

3.5.1 Plástico, consumo actual y problemática ecológica

3.5.2 Reciclaje

3.5.3 Descripción de los residuos

3.5.4 Características del producto propuesto

3.5 MATERIALES DE ESTUDIO

3.5.1 EL PLÁSTICO, CONSUMO ACTUAL Y PROBLEMÁTICA ECOLÓGICA

El concepto del plástico engloba una gama de materiales sintéticos o semisintéticos cuyo consumo y producción a nivel mundial ha sufrido en los últimos años un aumento exponencial. La principal razón de que se haya experimentado tal aumento son sus convenientes cualidades físicas (como la impermeabilidad, aislamiento eléctrico y el aislamiento acústico) y la versatilidad de formas, colores, texturas, etc., que puede recrear.^[1]

Es esta problemática contemporánea la que ha motivado la elección de materiales reciclados para su posterior aplicación en herramientas de diseño paramétrico.

Este material es producido a partir de combustibles fósiles o recursos de origen biológico, tales como la celulosa, el carbón, el gas natural, la sal y el petróleo. La extensa varie-

dad de plásticos actuales pueden ser clasificada tanto por su origen, según los materiales anteriormente mencionados, o según su reacción al calor. Esta segunda clasificación, termoplásticos o plásticos termoestables, es la más utilizada ya que también nos indica cuáles de ellos pueden volver a ser fundidos y tener un nuevo uso (figura 49).

En cuanto a la problemática ecológica que general la forma de consumo actual de los plásticos en nuestra sociedad, los datos recogidos en 2018 por Grupo de Estudios de Mercado de PlasticsEurope (PEMRG) y Conversio Market & Strategy GmbH, muestran que durante ese año el consumo de plástico mundial fue de 359 millones de toneladas. Esto significa, según la revista Iberoamericana de Polímeros, que el consumo mundial de este material tenga una subida estimada en un 4% anual, lo que conlleva un cambio en el consumo mundial de 10 millones de toneladas en el año 1978, a 60 millones de toneladas en el año 2000.^[2]



Termoplásticos

son una familia de plásticos que pueden fundirse cuando se calientan y endurecerse cuando se enfrían. Estas características, de las cuales deriva su nombre, son reversibles. Es decir, se pueden recalentar, moldear y enfriar varias veces.

Polietileno (PE)	Policarbonato (PC)
Polipropileno (PP)	Polimetacrilato de metilo (PMMA)
Policloruro de vinilo (PVC)	Elastómeros termoplásticos (TPE)
Polietileno tereftalato (PET)	Poliarilsulfona (PSU)
Poliestireno (PS)	Fluoropolímeros
Poliestireno expandido (EPS)	PEEK
ABS	POM
SAN	PBT
Poliámidas (PA)	EVOH
	Etc.



Termoestables

son una familia de plásticos que experimentan un cambio químico cuando se calientan, creando una red tridimensional. Una vez calentados y moldeados, no se pueden volver a fundir y cambiar de forma.

Poliuretano (PUR)	Silicona
Poliésteres insaturados	Resinas fenol - formaldehído
Resinas epoxi	Resinas urea - formaldehído
Resina de melamina	Resinas fenólicas
Ésteres de vinilo	Resinas acrílicas
	Etc.

Fig. 49_Las dos categorías de plásticos.

1. Información obtenida en la web de la asociación empresarial PlasticEurope, en el apartado “What are plastic”. Último accseo 03/04/2021 <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics>

2. Arandes, JM; Bilbao, Javier y López, DV (2004) *Reciclado de residuos plásticos*. Revista Iberoamericana de polímeros.

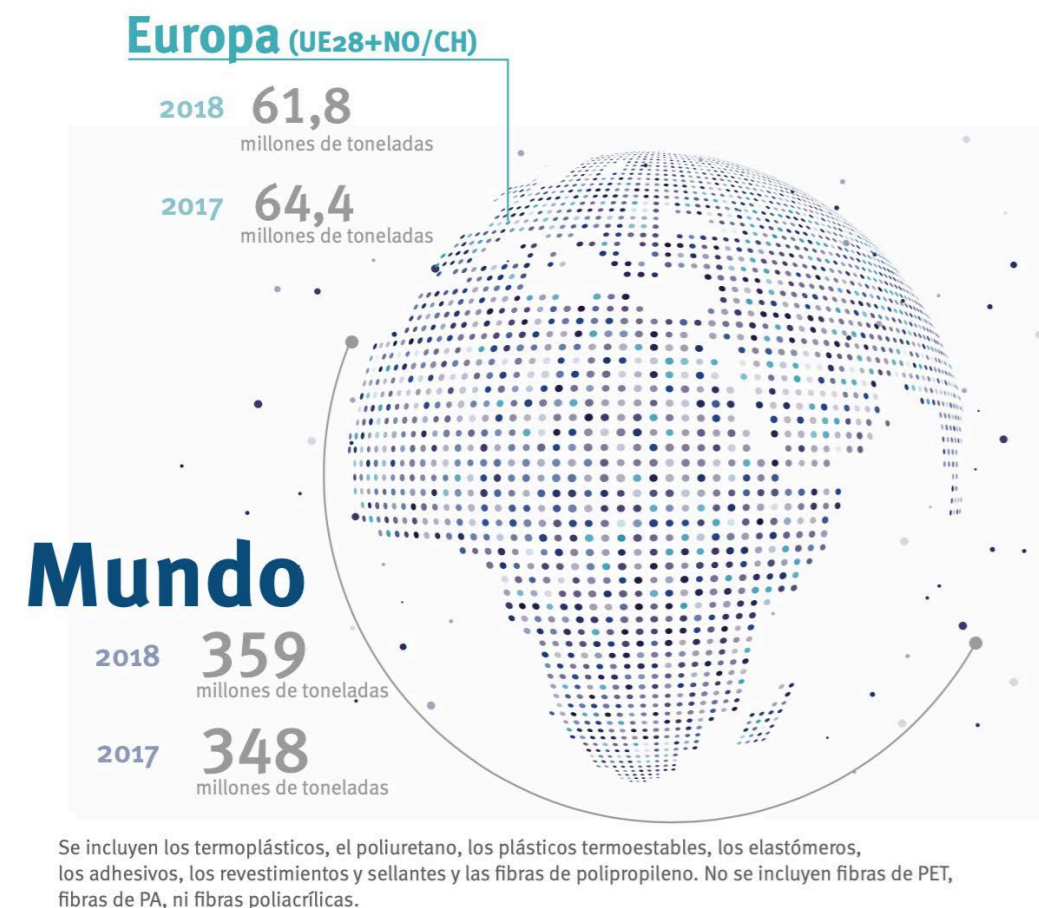


Fig. 50_Datos sobre el consumo de plástico durante el año 2018 en el mundo y la Unión Europea.

El evidente problema que, además genera este material, son los residuos, en su mayoría de un solo uso, con una gestión de recogida limitada ya que estos no son debidamente depositados a la hora de reciclarse y además, necesitan un largo periodo de tiempo para biodegradarse. Además del plástico que no llega a ser reciclado porque son depositados en el contenedor orgánico, hay otros que también terminan en el vertedero por ser envases complejos que mezclan diferentes materiales que en algunas ocasiones imposibilitan su reciclaje.

Por suerte, tras conocer los datos de la Comisión Europea de que más del 80% de la basura hallada en el mar es plástico, cada vez estamos más concienciados con este problema y las instituciones se están haciendo eco de ello, como el Parlamento Europeo, que en que el Parlamento aprobó el día 27 de marzo de 2019 a partir del 2021 los plásticos de un solo uso (platos, cubiertos, pajitas, y bastoncillos) estarán prohibidos en la Unión Europea. [3]

3. Parlamento Europeo (2019). Los plásticos de un solo uso, prohibidos a partir de 2021. Publicado en su página web.



Fig. 51_ Demanda de plásticos para su transformación por segmento y tipo de polímero en 2018. Total 51,2 M t

4. Gutiérrez Ojeda, Alba (2020) Propuesta de un producto absorbente acústico para falsos techos compuesto por placas de yeso con perforaciones cónicas mediante la incorporación de cápsulas de café de polipropileno recicladas. Universidad de Sevilla.

3.5.2 RECICLAJE

El camino a seguir para paliar los datos mostrados en el punto exterior pasa sin duda por conseguir cerrar el ciclo de vida de los plásticos, reutilizándolos para que estos dejen de llegar a vertederos, mares y naturaleza. Fomentando una economía circular frente a la tradicional, se busca conseguir el máximo aprovechamiento del producto durante toda su vida útil, favoreciendo así la eficiencia de los recursos y disminuyendo la cantidad de residuos generados. [4]

Según PlasticEurope, en 2018 en Europa se demandaron 51,2 millones de toneladas de plásticos para su transformación, aunque estos datos siguen sin ser equiparables a los de la producción y los residuos ya acumulados. De estos residuos demandados para su reutilización (mayoritariamente para envases y para la industria de la construcción y edificación), el más solicitado es el Polipropileno (PP), con un 19,3% de la demanda total de plásticos en Europa en el año 2018, seguido por el LDPE / LLDPE, con un 17,5% de la demanda.

3.5.3 DESCRIPCIÓN DE LOS RESIDUOS

Para el estudio y recopilación de los datos mostrados en este punto y el siguiente, se han tomado como referencia dos trabajos de fin de grado del curso 2019-2020: **Propuesta de un producto absorbente acústico para falsos techos compuesto por placas de yeso con perforaciones cónicas mediante la incorporación de cápsulas de café de polipropileno recicladas** por Alba Gutiérrez Ojeda con Begoña Blandón González como tutora. En segundo lugar, **Propuesta de un panel realizado a base de residuos de colillas de cigarrillos, como alternativa ecoeficiente, en la ejecución de techos acústicos** por Fátima Heras Saldaña con Enrique D. Fernández Nieto como tutor. Debido a la irregular situación generada por la Covid-19, ninguno de los trabajos del presente curso ha podido ir acompañado de estudios en el laboratorio, por lo que entre todos los compañeros se optó por basarse en estudios previos relacionados con dichos materiales y sus capacidades físicas.



Fig. 52_ Colillas de cigarrillos desechadas en la naturaleza.

COLILLAS DE CIGARRILLOS

Este tipo de residuo, inventado en los años 50, es el más habitualmente se encuentra en los ecosistemas naturales. Está compuesto de acetato de celulosa, un termoplástico, que es fotodegradable pero no biodegradable, y tarda en descomponerse entre 8 y 12 años. Además de esto, el filtro es la parte donde se retiene gran parte de los componentes más nocivos del tabaco, según el Comité Nacional para la Prevención del Tabaquismo, que son liberados en contacto con el agua, teniendo consecuencias nefastas en todos los seres vivos.

Conforme al estudio “Un proyecto europeo analiza los efectos de los residuos generados por el turismo en las islas del Mediterráneo”, del que forma parte el Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales de la Universidad Autónoma de Barcelona (ICTA-UAB), realizado

en las playas de siete islas del Mediterráneo en 2018, los residuos acumulados en las costas se componen principalmente de un 36,8% de plásticos y un 30,6% de colillas de cigarrillos.

Este es un residuo poroso y de baja densidad, con una buena capacidad acústica demostrada en varios estudios y propuestas de reciclaje aplicadas al ámbito de la construcción. Aun que en cuanto a propiedades mecánicas (flexión y compresión), en los nuevos materiales presentados en estos estudios, suelen verse reducidas. [5] [6]

5. V. G. Escobar, G. R. Gozalo, and C. J. Pérez (2019) Variability and performance study of the sound absorption of used cigarette butts. *Materials* (Basel), vol. 12, no.

6. A. Abdul Kadir and A. Mohajerani (2015) Effect of heating rate on gas emissions and properties of fired clay bricks and fired clay bricks incorporated with cigarette butts, *Appl. Clay Sci.*, vol. 104.

CÁPSULAS DE CAFÉ

Las primeras cápsulas de café fueron creadas por la marca Nespresso, de Nestlé, en 1986, para la nueva cafetera desarrollada por Luigi Bezzera para esta misma marca y con este mismo nombre. *4 <https://nestle-nespresso.com/our-history> Debido a su popularidad en el mercado más máquinas de este tipo fueron poniéndose a la venta cada vez a precios menores. En 2001 se lanza Senseo de Phillips, en 2006 DolceGusto, también de Nestlé, y por último, en 2014 Tassimo. [7]

Este ritmo de lanzamientos se ve acompañado por los datos de consumo del producto, que según el estudio de Cafés Novell se encontraba en el 70% de los hogares españoles en 2017. [8] Los datos del consumo y de los residuos generados han ido aumentando con el paso de los años, llegando a los vertederos hasta 40.000 toneladas al año. Las cápsulas de café tienen además una dificultad añadida

a la hora de ser recicladas como es la gran variedad de materiales que utilizan las distintas marcas y la superposición de materiales en capas en cada uno de los tipos de cápsulas. Actualmente los tipos que se comercializan según sus materiales son: de aluminio, de papel, de plástico (PP) y compostables (desarrolladas por Cafés Novell estas cápsulas de biodegradan tras el contacto prolongado con la basura orgánica).



Fig. 53_ Cápsulas de café

7. Ibid. pág 43, referencia 4.

8. Cafés Novell; Residuo cero. Último acceso 25/03/2021 <https://cafesnovell.com/residuoce-ro/>

3.5.4 CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO PROPUESTO

A continuación se describen las soluciones propuestas en los trabajos fin de grado citados.

- **PANEL A BASE DE COLILLAS RECICLADAS PARA TECHOS ACÚSTICOS**

La propuesta del producto está basada en los estudios realizados por los investigadores de la Universidad de Extremadura, Valentín Gómez Escobar y Rubén Maderuelo-Sanz, en la cual se utilizaron colillas de cigarrillo ahumadas colocadas de forma vertical sin ningún

tipo de aglutinante en un tubo de impedancia. En el trabajo, se asumen estos datos para poder llevar a cabo la propuesta, de tal manera que se toman los datos relativos a una muestra de dimensiones más similares, 8mm de diámetro y 20mm de largo, con la misma forma de compactación. Analizando los datos gráficos del estudio referente a esta muestra, concluyen que el sistema alcanza el mayor coeficiente de absorción a una frecuencia de 2000 Hz con un valor de 0.95.

En el producto propuesto, las colillas estarán unidas unas a otras mediante la utilización de ligante o adhesivo natural, y se dispondrán como núcleo entre dos velos de fibra de vidrio mediante el uso de aglutinante también natural para así proveer de rigidez al panel (fig 54). En este trabajo, se encuentran definidos en una tabla los datos de absorción acústica del producto propuesto, por lo que no será necesario tratar los datos (Tabla 02).

- **PLACAS DE YESO CON PERFORACIONES CÓNICAS MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE CÁPSULAS DE CAFÉ DE POLIPROPILENO RECICLADAS**

Como base para la propuesta de este producto y sus características en cuanto a la absorción acústica, se utilizó la publicación de Vigran de 2004 “Conical apertures in panels; Sound transmission and enhanced absorption in resonator systems. Acta Acustica United with Acustica,”. En él, se determina que las perforaciones cónicas tienen mayor capaci-

MUESTRA	CARACTERÍSTICAS	
10 colillas usadas	Longitud (mm)	21,1 ± 0,5
	Diámetro (mm)	7,2 ± 0,4
	Densidad (Kg/m³)	112 ± 3
	Porosidad	0,943

Tabla 01_Características de una muestra de medida.

PROPIEDADES	PANEL COLILLAS							
<i>Frecuencia (Hz)</i>	62,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Coefficiente de absorción acústica (%)</i>	-	-	-	20	70	95	90	-

Tabla 02_Propiedades del panel de colillas recicladas propuesto

PROPIEDADES	PLACAS DE YESO CAPSULAS DE CAFÉ							
<i>Frecuencia (Hz)</i>	62,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Coefficiente de absorción acústica (%)</i>	55	90	100	100	50	25	0	0

Tabla 03_Propiedades del panel de colillas recicladas propuesto

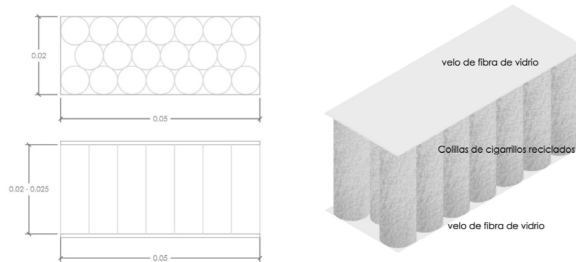


Fig. 54_ Modelo muestra del panel de colillas recicladas.

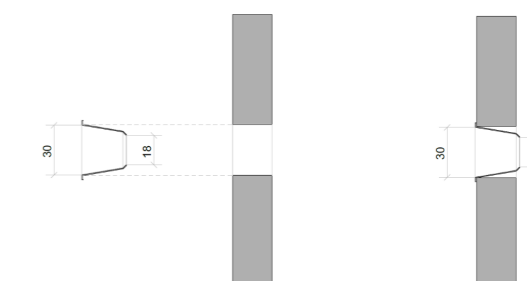
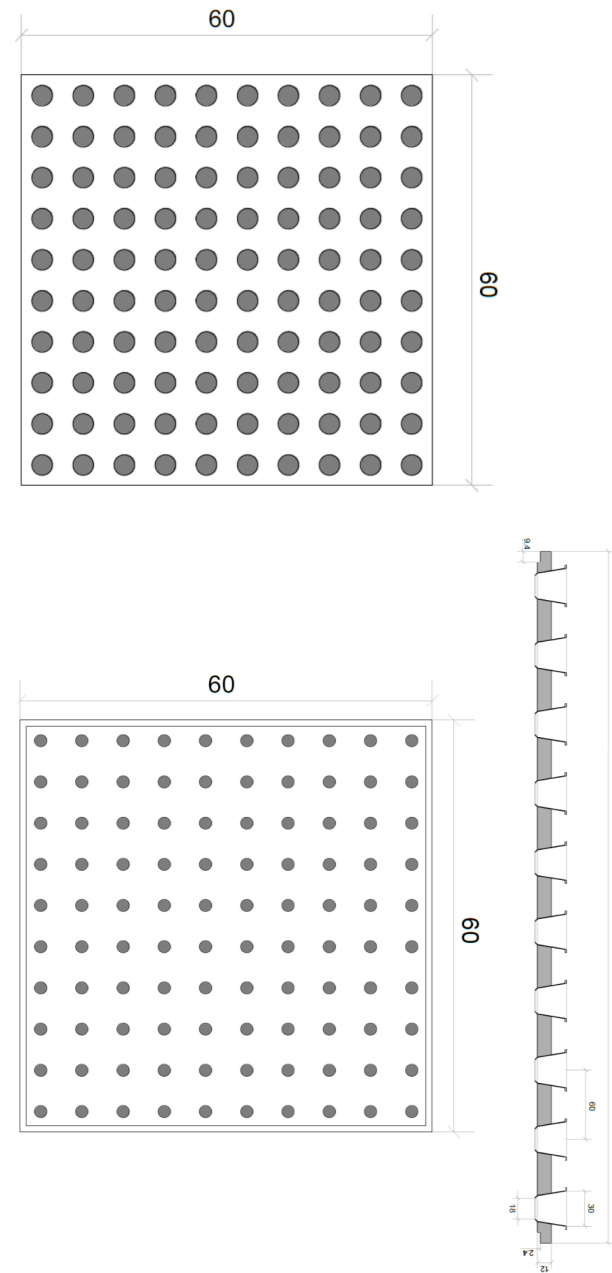


Fig. 55_ Medidas muestra del panel de cápsulas de café recicladas.



dad de transmisión del sonido que las cilíndricas, aumentando además dicha transmisión cuanto mayor es el orificio de salida, por lo que los orificios de menor tamaño tienen mayor capacidad de absorción que los orificios de mayor tamaño. Es por esto que los autores del trabajo concluyeron que el orificio de menor tamaño iría orientado hacia el interior de la sala, como se muestra en la figura 55.

También queda expuesto en el estudio de Vigran que, con los resonadores de Helmholtz, es necesaria la colocación de un absorbente poroso entre el panel y la cámara de aire. Además, con este sistema combinado de cámara y absorbente poroso, los paneles con perforaciones cónica absorben frecuencias ligeramente superiores frente a los paneles con perforaciones cilíndricas.

Basándose en estas conclusiones y datos de la publicación de Vigran, en las características del residuo estudiado, el cálculo de la frecuencia de resonancia según la disposición de las cápsulas y en varias simulaciones en

el simulador acousticmodelling.com, el estudio define las características formales que se muestran en la figura 56 para el producto propuesto.

Para obtener los datos relativos a los coeficientes de absorción del producto resultante, se ha tomado una de las gráficas obtenidas del simulador, y se han interpolado sus datos a través de la aplicación WebPlotDigitizer, para construir así la siguiente tabla de valores de coeficiente de absorción acústica en relación con las frecuencias, tal y como se precisan para su introducción en el programa Pachyderm.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.6 Normativa de aplicación

Fig. 56_ Medidas del producto a base de cápsulas de café recicladas

3.6 NORMATIVA DE APLICACIÓN

Aunque ya se ha hecho referencia a ellas en este trabajo, a continuación, se detalla pormenorizadamente la normativa vigente aplicable al caso de estudio para asegurar su confort acústico en cuanto al tiempo de reverberación. Las normas consultadas para ello son las siguientes:

- DB-HR Protección contra el ruido y su guía de aplicación
- UNE EN ISO 3382-1 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.
- UNE EN ISO 3382-2 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Tiempo de reverberación en recintos ordinarios.

Recinto ⁴	Tiempo de reverberación
Aulas y salas de conferencias vacías	$T \leq 0,7$ s
Aulas y salas de conferencias vacías, pero con butacas fijas	$T \leq 0,5$ s
Comedores y restaurantes	$T \leq 0,9$ s

⁴ Las aulas y salas de conferencias se consideran vacías, sin mobiliario, ocupación, objetos, mantelerías, etc. Sólo se considera el mobiliario fijo, como las butacas fijas en las salas de conferencias.

En la primera de ellas, parte de la normativa de obligado cumplimiento en España, detalla los requisitos básicos que deben cumplir los edificios para satisfacer que los niveles de ruido no generen molestias o enfermedades a sus habitantes. Las limitaciones que establece para el tiempo de reverberación, y que por tanto son aplicables al estudio que ocupa a este trabajo, vienen recogidas en la siguiente tabla, obtenida de su guía de aplicación (tabla 04)

En cuanto a las normas internacionales, en su primera parte se especifican los métodos de medición del tiempo de reverberación y de otros parámetros acústicos en salas de espectáculos, mientras que la segunda parte se centra en el mismo tipo estudio, pero en recintos ordinarios. En ella se nos define el tiempo de reverberación como la duración requerida para que la densidad de la energía acústica media de un recinto decrezca en 60 dB. A veces este cálculo no es posible llevarlo

a cabo en la práctica ya que supondría partir de un emisor de al menos 65dB. Es por ello, que tal como indica la norma en su Nota 2, se puede evaluar un decrecimiento a un rango inferior, por ejemplo entre 5dB y 35dB extrapolando el resultado al decrecimiento de 60dB que marca la definición. Este método se denomina T30 y es el utilizado en particular en Rhinoceros-Grasshopper, pero también en otros programas específicos de acústica, como por ejemplo REW (<https://www.roomeqwizard.com/>), obteniendo la mejor aproximación. Dicha normativa también establece el número de receptores necesarios para hacer mediciones precisas del tiempo de reverberación, siguiendo lo indicado en la siguiente tabla (tabla 05).

Además, ofrece un rango de estudio para las frecuencias, como se ha comentado anteriormente, que va desde 125 Hz hasta 4000 Hz, mientras que para obtener un valor único de T30 propone calcularlo promediando en las bandas de octava de 500 Hz y 1000 Hz. Sin embargo, parece más razonable promediar el coeficiente de absorción en estas bandas de frecuencias y con este dato calcular un tiempo de reverberación representativo ya que el

coeficiente de absorción caracteriza un proceso de transferencia energética y la energía es una cantidad extensiva, por lo que estos procedimientos no serían equivalentes ya que el tiempo de reverberación y el coeficiente de absorción son inversamente proporcionales.

Finalmente, se calcula el tiempo de reverberación óptimo según la fórmula empírica presentada en los apuntes del temario de la asignatura Fundamentos Físicos de la Arquitectura II impartida la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. En ella el coeficiente K incorpora la dependencia de la frecuencia, u viene dado por el uso del local y el coeficiente i tiene en cuenta la existencia de apoyo electro acústico, para el uso de la palabra. Los valores de estos coeficientes se muestran en la tabla XXX.

3.5 tiempo de reverberación, T:

<Parámetros acústicos de un recinto> Duración requerida para que la densidad de la energía acústica media en un recinto decrezca en 60 dB una vez que la emisión de la fuente ha cesado.

NOTA 1 El tiempo de reverberación se expresa en segundos.

NOTA 2 T se puede evaluar basándose en un rango dinámico inferior a 60 dB y extrapolado a un tiempo de decrecimiento de 60 dB. A continuación se denomina en consecuencia. De esta forma, si T se deriva del tiempo en el que la curva de decrecimiento alcanza primero 5 dB y 25 dB por debajo del nivel inicial, se anota como T₂₀. Si se utilizan valores de decrecimiento entre 5 dB y 35 dB por debajo del nivel inicial, se anota como T₃₀.

Figura 58_Extracto de la norma UNE EN ISO 3382-1

Tabla A.2 – Número mínimo de posiciones del receptor en función del tamaño del auditorio

Número de asientos	Número mínimo de posiciones de micrófono
500	6
1 000	8
2 000	10

Tabla 05_Número mínimo de posiciones del receptor en función del tamaño del auditorio

$$T_R = k \cdot u \cdot i \cdot \sqrt[3]{V}$$

Frecuencia central banda de octava (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
k	1.30	1.15	1.0	0.9	0.9	0.9
u	Palabra 0.075					
	Música 0.08 < u < 0.1					
i	CON apoyo electroacústico 0.85					
	SIN apoyo electroacústico 1					

Tabla 06_Propuesta para determinar el tiempo de reverberación óptimo a partir de la ecuación

4. CASO DE ESTUDIO

4.1 Auditorio Kresge

4.1.1. Contexto histórico

4.1.2. Geometría y acústica

4.1 AUDITORIO KRESGE

4.1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

“A mi criterio, la arquitectura no es sólo un edificio, sino que comprende a éste en relación con su entorno, se trate de la naturaleza o del medio creado por el hombre. Estoy firmemente convencido de que cada edificio debe estar cuidadosamente relacionado con el conjunto, en el espacio exterior que crea. Su masa, su escala y materiales deben llegar a constituir un elemento de realce, dentro del medio global.”^[1]



Figura 59_Eeron Saarinen con la maqueta de otro de sus icónicos proyectos, el Arco Gateway en San Luis, Misuri.

Este auditorio fue construido en 1954 por el reconocido arquitecto estadounidense Eero Saarinen (1910-1961) (fig 59) y está situado en el recinto del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) en Cambridge, Massachusetts, como iniciativa de la fundación Kresge, de donde obtiene su nombre. Junto con la capilla contigua, diseñada por el mismo arquitecto, estas construcciones se disponen frente al río Charles, próximos al edificio habitacional diseñado por Alvar Aalto en 1947, el Baker House (fig 60). La ampliación del recinto estudiantil debía transmitir coherencia con el contexto urbano con el que colindaba, además de transformarlo acogiendo actos académicos y culturales, como conferencias y conciertos.

1. Eero Saarinen en Dickinson College, 01 diciembre 1959, recogido en el número de octubre de 1963, de la revista Mississippi Architect.

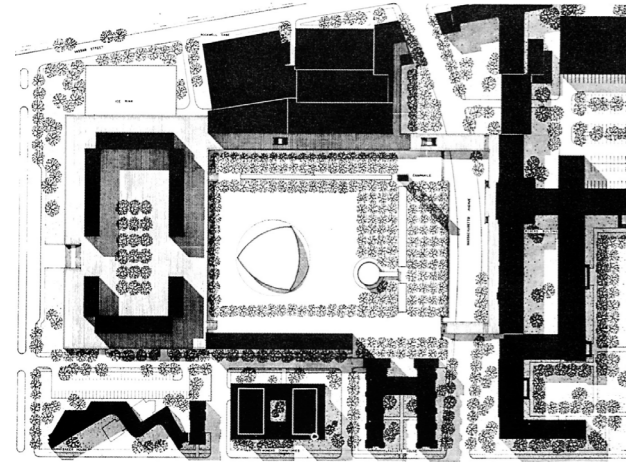


Figura 60 Plano de situación del auditorio y la capilla. En la esquina inferior izquierda también aparece la Baker House.



Figura 61 Fotografía del auditorio y la capilla en el campus del MIT.

Ambos edificios, el auditorio y la capilla, se encuentran dispuestos sobre un plano horizontal de césped que da continuidad a los campos de deporte del campus, aunque están contruidos con materiales distintos. En la capilla se utiliza un ladrillo visto marrón oscuro, muy parecido al que había utilizado Alvar Aalto en la Baker House, mientras que en el Auditorio Kresge se utilizan vidrio y hormigón como los materiales principales, aunque en 1979 sufrió una remodelación que buscaba resolver los problemas de filtración de agua que presentaba la cubierta, por lo que se le añadió un acabado con láminas de cobre verdoso.^[2]

En el diseño de esta obra, el arquitecto Saarinen muestra una plenitud creativa derivada de su evolución en la profesión, condensando los conceptos que había desarrollado en obras anteriores como el Teatro Lírico para el Festival de Música de Berkshire, en Tanglewood Park, Lenox, Massachusetts, construido en 1941 o la carpa para concierto al aire libre encargada por el *Goethe Bicentennial Convocation and Music Festival*, en As-

pen, Colorado, construido en 1949. En estos proyectos anteriores, Saarinen propuso una serie de innovaciones técnicas que se limitaban al uso de los materiales, mientras que en este proyecto su gran avance y aportación fue respecto a la estructura.

El auditorio causó un gran impacto en la sociedad desde el inicio de su construcción, este fue ampliamente publicado y debatido por haber desafiado el pensamiento del momento y por haber iniciado un replanteamiento fundamental en la arquitectura y en la construcción. Toda esta controversia y antítesis de pensamientos queda recogida y explicada en el artículo Banham versus Rowe Saarinen en el Campus del MIT, del profesor del departamento de Proyectos Arquitectónicos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, Luis Rojo de Castro, publicado en la revista Cuadernos De Proyectos Arquitectónicos.

2. Ignacio G. Pedrosa; Una bóveda celeste en el Auditorio Kresge; Revista Europea de Investigación en Arquitectura (2018)

4.1.2 GEOMETRÍA Y ACÚSTICA

Este edificio esférico se sitúa en el centro de un círculo de 60 metros de diámetro que está sutilmente elevado. La cúpula de planta triangular se apoya directamente en tres puntos, correspondientes a los vértices de un triángulo equilátero, que producen tres alzados de arcos acristalados de planta ligeramente curva. Bajo esta cúpula, se acoge todo el programa correspondiente a un auditorio: sala principal, vestíbulos, circulaciones, etc. En todos estos espacios la forma esférica de la cúpula está presente, aunque de manera distinta. Mientras que en la sala principal genera un espacio sereno gracias a su curvatura y proporciones, los vestíbulos presentan un espacio más vertical dónde el sutil encuentro de la cubierta con el suelo se vuelve protagonista.

La forma de esta cúpula responde a una delgada cáscara de hormigón esférica, dividida por dos planos de corte que pasan tanto por los puntos de apoyo como por el centro de la esfera, resultando en un octavo de esta. El espesor máximo de esta cubierta es de 13,5 centímetros, que se reduce a un mínimo de 8 centímetros en la cúspide, y que cubre una superficie de 2.000 metros cuadrados y se eleva 15 metros. La sala principal que se genera bajo esta envolvente tiene capacidad para 1.238 espectadores, 250 músicos en el foso de orquesta y 75 puestos más en un coro lateral enfrentado al órgano.

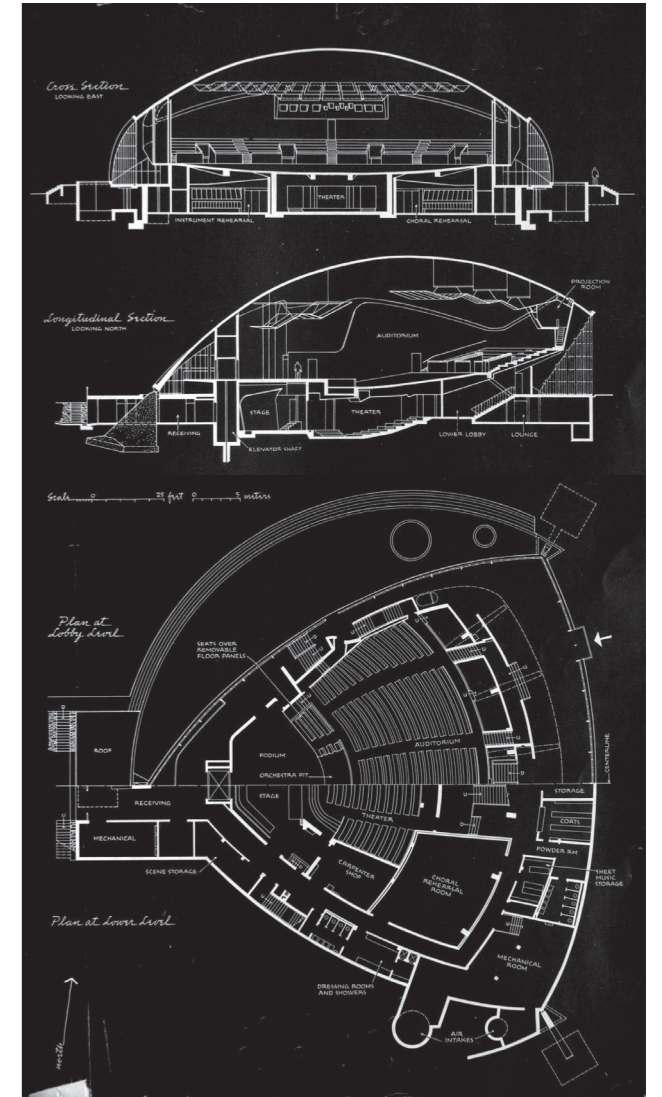
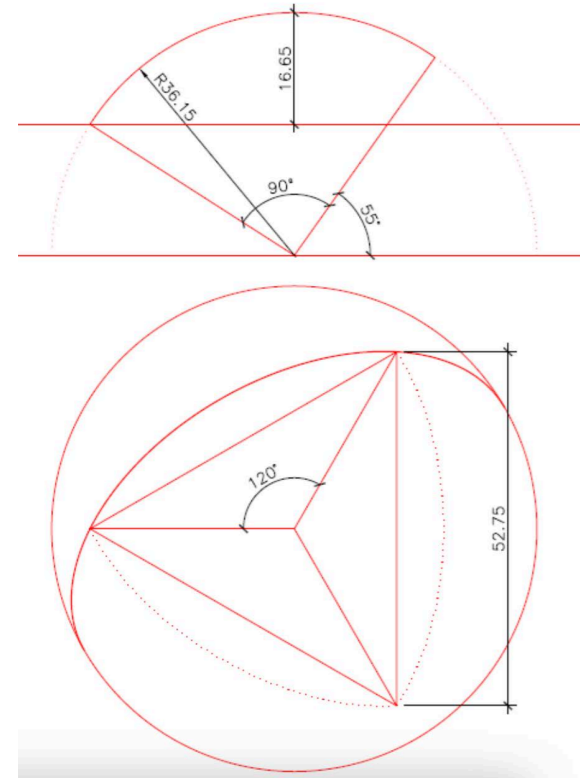


Figura 62 Planimetría del auditorio Kresge, secciones y planta respectivamente.



El programa también incluye un pequeño teatro en la planta semisótano con capacidad para 250 espectadores. En la planta principal hay a su vez oficinas, guardarropa, salas de ensayo, una biblioteca de partituras, una sala de descanso para los músicos, vestuarios, una sala para almacenar instrumentos y un ascensor.

La consultora a cargo del estudio acústico del auditorio fue la firma Bol, Beranek y Newman. Esta diseñó los paneles que se suspenden bajo la cúpula que cubre la sala, para compensar su forma cóncava y la pared trasera curva, formas que no son óptimas para la calidad del sonido. Son también estos paneles acústicos los que incorporan las instalaciones de iluminación y climatización, permitiendo dejar vista la estructura de la cubierta. Los problemas que presentaba la forma de bóveda cóncava de la cubierta fueron difíciles de resolver ya desde las etapas de diseño y cálculo, pero estos habían sido ya resueltos en proyectos anteriores al auditorio de Kresge. Por ejemplo, la sala Estudio 1 de la Radiohuset de Copenhague (1945), proyectada por el arquitecto Vilhem Lauritzen, que fue ampliamente divulgada en la época; o el Aula Magna

de la Universidad de Caracas (1953), obra de Carlos Raúl Villanueva (1900-1975), donde trabajaron también los ingenieros Bolt, Beranek y Newman.

Con el propósito de reducir las consecuencias acústicas de la geometría de la cúpula, además de preservar su apariencia de bóveda, los ingenieros en colaboración con el arquitecto diseñaron estos paneles reflectores de yeso en suspensión (fig.64). Asimismo, se determinó un material fono absorbente para la gran pared trasera curva, con el que poder controlar el tiempo de reverberación resultado de la forma de esta superficie. El resultado es un espacio con una acústica satisfactoria para muchos tipos de música y para la voz, que garantiza la correcta distribución del sonido y la disipación del eco sobre las superficies absorbentes.



Figura 64_Fotografía del interior de la sala.

4. CASO DE ESTUDIO

4.2 Proceso de modelado

4.2.1 Parámetros geométricos

4.2.2 Cubierta y aleros

4.2.3 Cerramientos exteriores

4.2.4 Interior del auditorio

4.2.5 Paneles acústicos

Figura 63_Descripción de la geometría del auditorio Kresge.



Figura 65_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría de la cubierta.

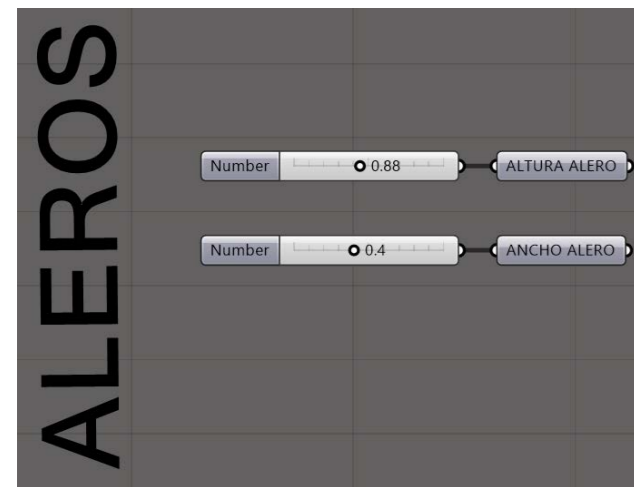


Figura 66_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría de los aleros de la cubierta.

4.2 PROCESO DE MODELADO

4.2.1 PÁMETROS ACÚSTICOS

Tras el estudio de las formas geométricas características del auditorio, es posible comenzar a establecer los parámetros geométricos en los que se basará el posterior algoritmo para modelar el edificio. El más inmediato y primordial que se observa es el valor del radio de la esfera que define la cubierta. De este parámetro dependerán los valores de ancho y profundidad del recinto, aunque la altura se fijará como un parámetro independiente para posibilitar la disminución o aumento de esta.

Como se ha comentado, la cubierta del auditorio se define, además de por esta esfera, por tres planos de corte, los cuales contienen, cada uno de ellos, dos de los apoyos de dicha cubierta y el centro de la esfera, en forma de prisma de base triangular. Estos planos, en su intersección con la esfera, lo que generan son tres curvas, es por esto que, con el objetivo de optimizar el proceso de modelado, se ha optado por generar estas curvas de forma directa en vez de hacerlo a través de los planos de corte, como se verá a conti-

nuación. Para terminar de describir estas curvas de corte que conformarán las aristas de la cubierta, es muy importante definir el ángulo de inclinación de los planos de corte que la contienen, por lo que dicho ángulo será el siguiente parámetro a tener en cuenta en el modelo (fig.65).

También sería posible parametrizar el número de aristas que conforman la cubierta, pudiéndosele otorgar nuevas formas. De hecho, el algoritmo programado así lo permite, pero por cuestiones de tiempo y de sensibilidad con la obra, por ahora este parámetro permanecerá siendo un dato numérico (3) invariable.

Los siguientes parámetros, relativos al ancho y alto del alero que circunda la cubierta, son únicamente relativos a la estética y nada decisivos para el confort acústico del recinto. Del mismo modo, se definen los parámetros relativos a los perfiles del cerramiento exterior para completar el modelo, aunque no

vayan a ser relevantes para la simulación y el cálculo (fig.66).

En cuanto a al cerramiento interior del edificio, el primer parámetro que se establecerá es el ancho de la zona que lo circunscribe, correspondiente a las zonas de acceso circulación y gestión del edificio. Se parametriza también el fondo del auditorio, correspondiente a la separación que tiene este del vértice de la curva principal. De la distancia a este centro también dependerá el parámetro del ancho del escenario y el ancho de la primera zona de butacas. A las zonas de las butacas uno y dos se les asigna también un parámetro para controlar la altura y la inclinación de cada una (fig.68).

Finalmente, para definir los paneles también se establecen dos parámetros relativos al largo que lo define, además de su ancho y espesor. Seguidamente se fijan el número de paneles deseado y la separación que habrá entre ellos (fig.69).

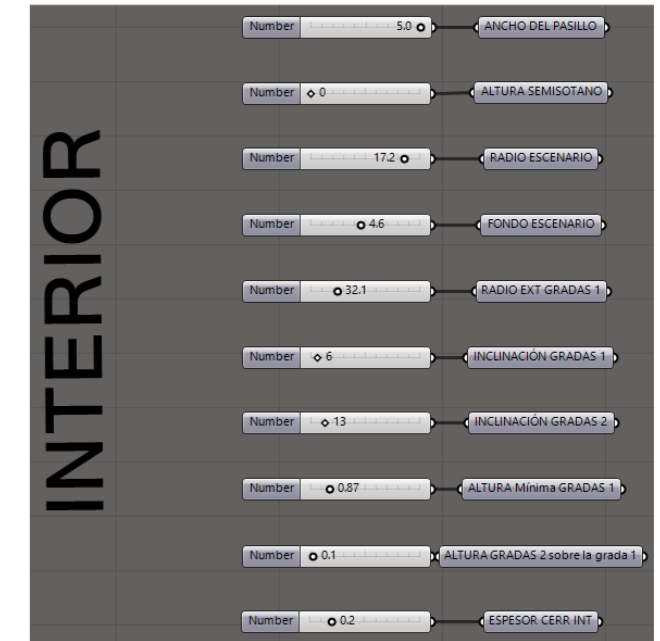


Figura 68_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría del interior de la sala.



Figura 67_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría del cerramiento exterior.



Figura 69_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría de los paneles acústicos.

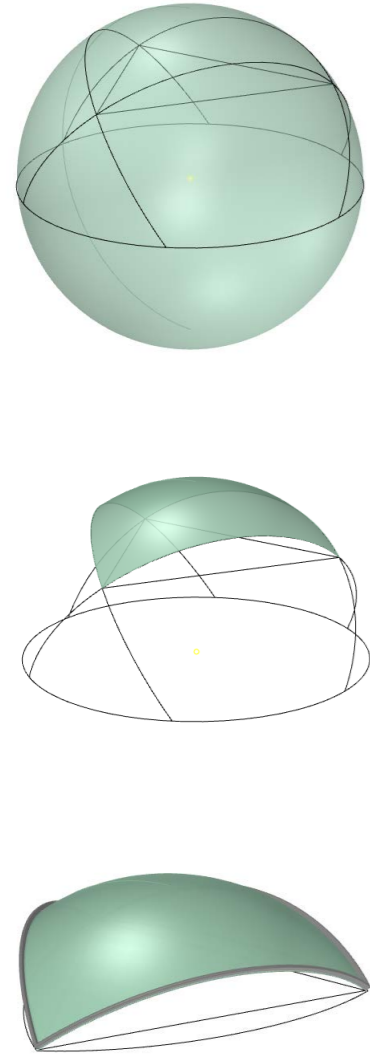


Figura 70_Proceso de modelado de la cubierta y los aleros.

4.2.2 CUBIERTA Y ALEROS

La geometría de la cubierta del auditorio Kresge está definida por una esfera la cual, al ser dividida por tres planos de corte, genera una superficie curvada con tres puntos de apoyo. Para generar esta cubierta en la aplicación Grasshopper se seguirán los siguientes pasos:

- En primer lugar, se define la esfera base a través de un punto y una componente numérica variable (Number Slider) que contendrá el valor del radio. Con estos datos también será posible dibujar su círculo base en el plano XY.
- A continuación, se divide ese círculo base en dos y al semicírculo resultante se le asocia un valor variable de inclinación respecto al eje X.
- El semicírculo inclinado resultante será uno de los datos de entrada para generar una matriz polar (Polar Array) además del número de elementos que generará la matriz. En este caso este número se corresponde con el número de aristas que tendrá la cubierta, que como ya se ha comentado,

será un valor fijo de 3 para este caso en particular, pero el código y el componente permiten que se pueda variar.

- Tras esto se obtienen los puntos de intersección de estas tres curvas para poder seleccionar únicamente la parte de estas curvas semicirculares que se corresponden con las aristas de la cubierta.
- Una vez determinadas estas aristas con las que seccionar la esfera base, es posible obtener la superficie de la cubierta.
- Para completar el proceso de modelado de la cubierta, únicamente será necesario extrudir la superficie obtenida según el espesor que se le quiera dar a la cubierta y trasladarla para que los puntos de apoyo generados se posicionen sobre el plano XY.
- Para el detalle del alero de la cubierta, únicamente habrá que desplazar las curvas de las aristas en el eje Z según su altura y escalarlas en el plano XY. Las cuatro curvas resultantes se combinan para crear la superficie correspondiente al alero.

4.2.3 CERRAMIENTO EXTERIOR

Los cerramientos exteriores de este edificio corresponden a unas cristalerías, curvas en planta gracias a sus divisiones horizontales y verticales, que recorren desde el alero hasta el plano del suelo. Para modelarlos será necesario:

- En primer lugar, se proyecta una línea que recorre el centro del alero sobre el plano XY, con las cuales se construye una superficie la cual es posible doblar en función del espesor que se desee.
- Para modelar los perfiles verticales, se divide la línea del contorno inferior de la cristalería anteriormente modelada y se divide en el número deseado de perfiles. Tomando estos puntos de referencia, se construyen sobre ellos unos prismas de base rectangular que terminen en su intersección con el alero.
- En cuanto a los perfiles horizontales, surgen de la intersección de la cristalería con unas cajas construidas en el plano XY y se desplazan en el eje Z según el número de perfiles horizontales deseados.

Ninguno de los parámetros ni geometrías establecidos en este apartado serán relevantes para la acústica del auditorio, pero se han establecido para recrear la estética del edificio.

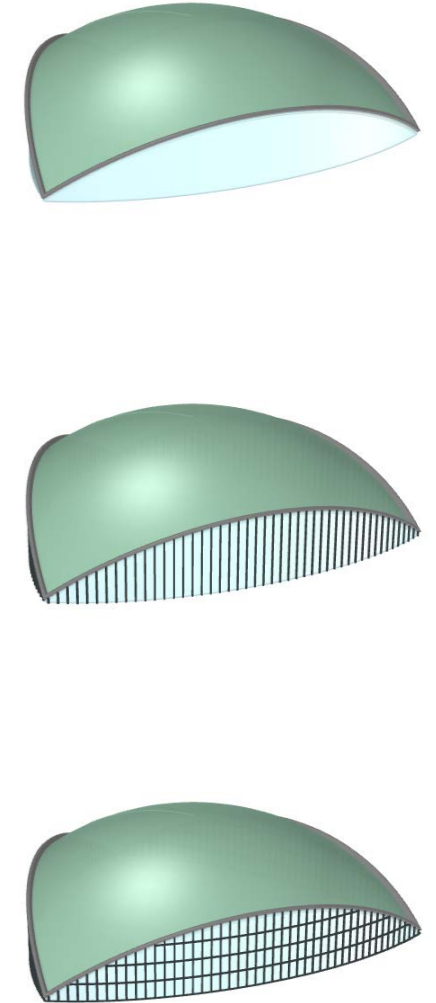


Figura 71_Proceso de modelado del cerramiento exterior y sus perfiles.

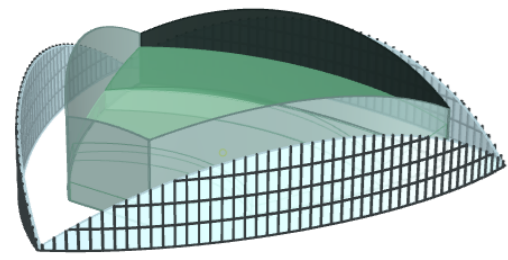
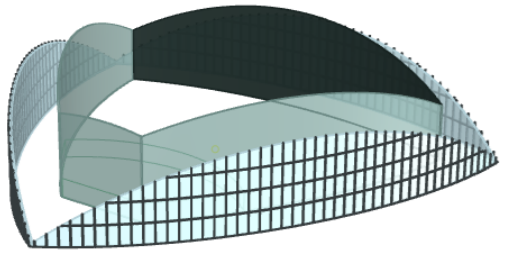
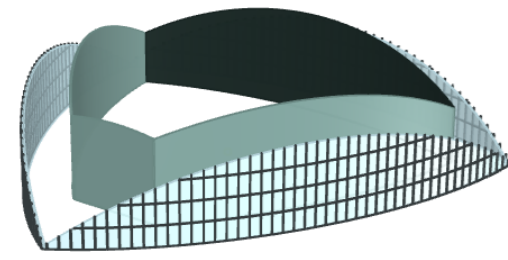


Figura 71_Proceso de modelado del interior de la sala.

4.2.4 INTERIOR DEL AUDITORIO

El interior del auditorio ha sido simplificado para su óptimo desarrollo y cálculo posterior, puesto que el modelo totalmente detallado en su forma podría suponer un gran tiempo de cálculo para el programa. Es por esto que la geometría de las dos zonas de butacas y sus pasillos de acceso han sido sintetizadas en dos geometrías semicirculares que son seccionadas por el escenario y el cerramiento interior.

- Tomando de nuevo la curva en el plano XY correspondiente al cerramiento exterior y estableciendo un ancho para el acceso, el pasillo y la zona destinada al resto de usos del edificio, es posible desfasar esta curva para obtener una primera curva delimitadora de la sala del auditorio que se estudiará a continuación.
- Posteriormente, tomando como centro el vértice correspondiente al fondo del escenario, se genera una circunferencia con un radio variable, que limitada por su intersección con la curva del cerramiento y extruida en el eje Z también con una altura

variable, constituyen el cuerpo del escenario. Sin embargo, el fondo del escenario está limitado por un plano y no por una esquina como el resultado obtenido, por lo que se divide esta superficie por un plano que también nos servirá como parte del cerramiento interior.

- Para completar la compartimentación de la sala además del fondo del escenario plano, se desplaza la curva del cerramiento obtenida en el primer paso a través del eje Z generando una superficie cuya limitación sea su intersección con la cubierta. **También es necesario para la aplicación de materiales, excluir la pared del fondo del resto de cerramientos y colocarla en un grupo y capa distintos, ya que sobre esta fue aplicado un material fono absorbente con el que solucionar los ecos producidos por la forma cóncava que posee.**

- El último elemento a modelar serán los palcos de butacas, aunque para ello se abstraerá y simplificará el espacio que ocupan tanto estas como las zonas de circulación que le dan acceso. Para ello se dividirá el espacio interior restante a través de una circunferencia que comparta centro con la geometría del escenario. Las curvas resultantes de esta división se desplazarán por el eje Z y girarán respecto al plano YZ para construir las dos geometrías.

4.2.5 PANELES ACÚSTICOS

Tal y como se comentó en la descripción del edificio, la forma de la sala de este auditorio conlleva una serie de deficiencias en el confort acústico por lo que se optó por el diseño de unos paneles acústicos que ayudasen a resolver estos problemas, además del material absorbente de la pared trasera. Para recrearlos tridimensionalmente se seguirán los siguientes pasos:

- Se divide la curva que define la pared del fondo para obtener una subcurva de ésta alineada en su centro y a la vez unir estos puntos con el mismo centro tomado para construir el escenario.
- Esta línea, se vuelve a dividir para obtener las dos líneas relativas al conjunto de paneles que sobrevuelan las primeras y las segundas gradas respectivamente.
- Seguidamente, se dividen las líneas resultantes en varios puntos a los cuales se les hará variar su valor de Z para unirlos y construir las curvas que definan los paneles.

- Por último, se establece un número variable de divisiones para esta superficie, con las que se podrá definir un dominio bidimensional para recortar la superficie resultante del punto anterior.

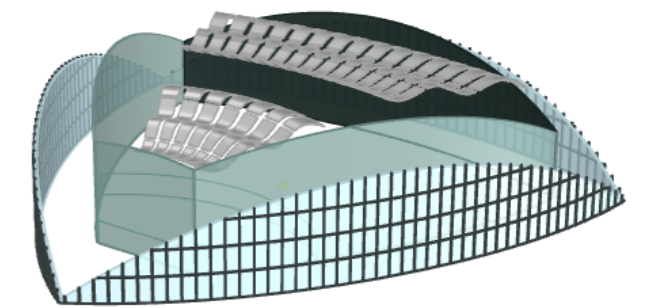


Figura 72_Resultado del proceso de modelado de los paneles acústicos.

4. CASO DE ESTUDIO

4.3 Aplicación de materiales al modelo

4.3 APLICACIÓN DE MATERIALES AL MODELO

Una vez completado el proceso de modelado con el plugging Grasshopper, y habiendo solidificado estas geometrías resultantes en Rhinoceros 3d, dichas geometrías serán organizadas por capas. Esta organización se hará según los materiales que se desean aplicar a cada elemento. Los materiales que se utilizarán y aplicarán para el cálculo son se detallan a continuación, junto con los valores de absorción acústica en porcentaje. Los coeficientes de absorción de los materiales genéricos han sido tomados del catálogo de la empresa de soluciones acústicas Sonoflex (<https://sonoflex.com/>), mientras que los datos de los materiales reciclados fueron presentados en el apartado 3.5.4. Ambos serán vinculados al algoritmo de cálculo a través de la pantalla *Pachyderm_Acoustic* en la pestaña *Material Designer*, como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 73_Datos sobre la absorción acústica del hormigón pintado. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz.

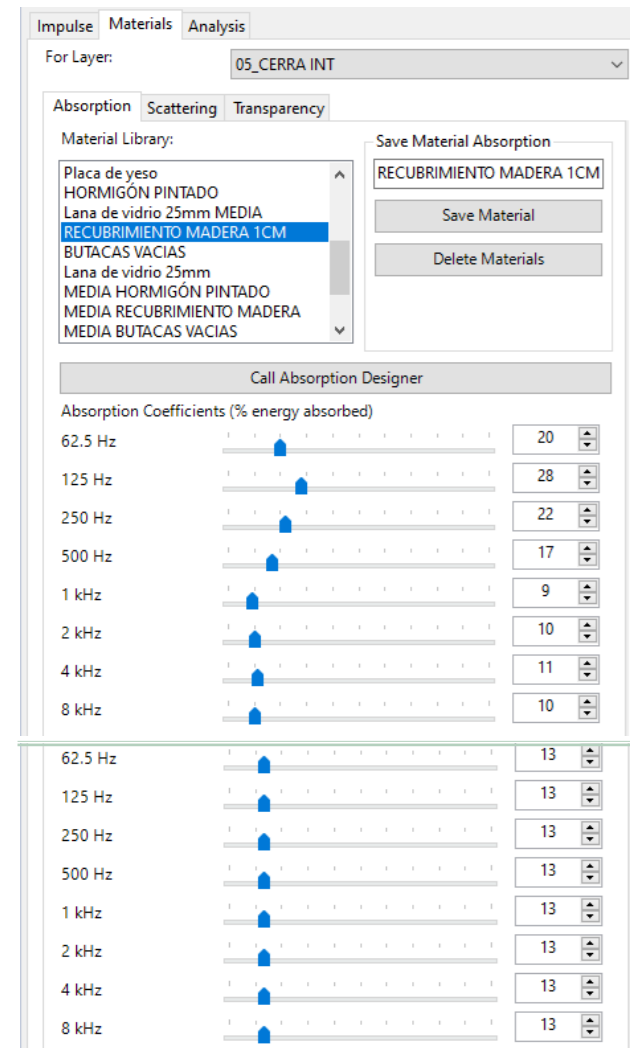
- Hormigón pintado para la cubierta

The screenshot shows the 'Call Absorption Designer' window with the following data:

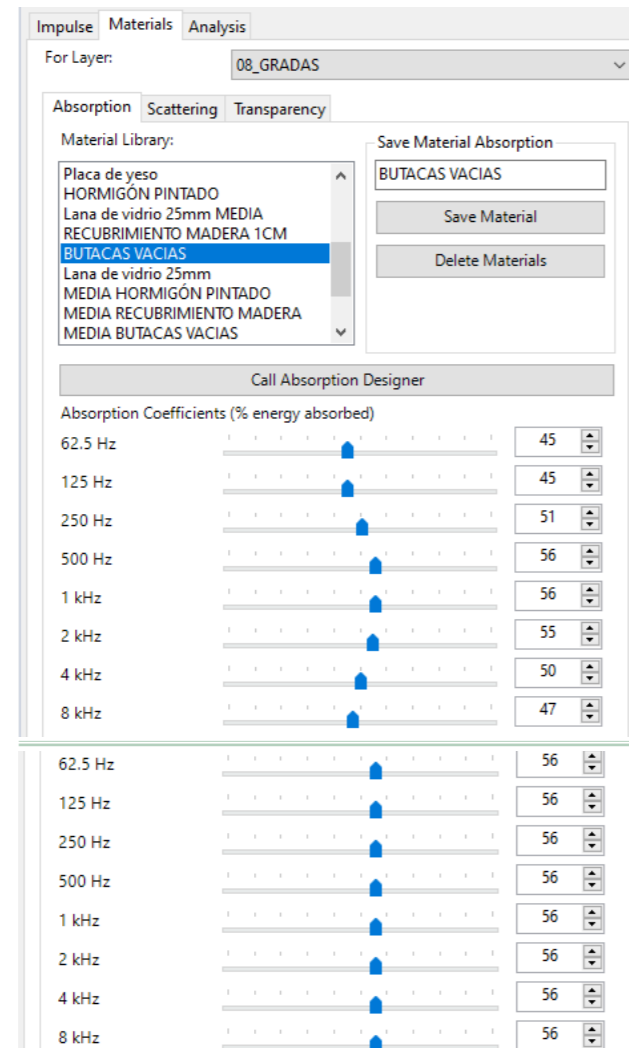
Frequency	Absorption Coefficient (% energy absorbed)
62.5 Hz	5
125 Hz	10
250 Hz	5
500 Hz	6
1 kHz	7
2 kHz	9
4 kHz	8
8 kHz	8

Frequency	Absorption Coefficient (% energy absorbed)
125 Hz	6
250 Hz	6
500 Hz	6
1 kHz	6
2 kHz	6
4 kHz	6
8 kHz	6

- Recubrimiento de madera para el escenario y las paredes laterales.

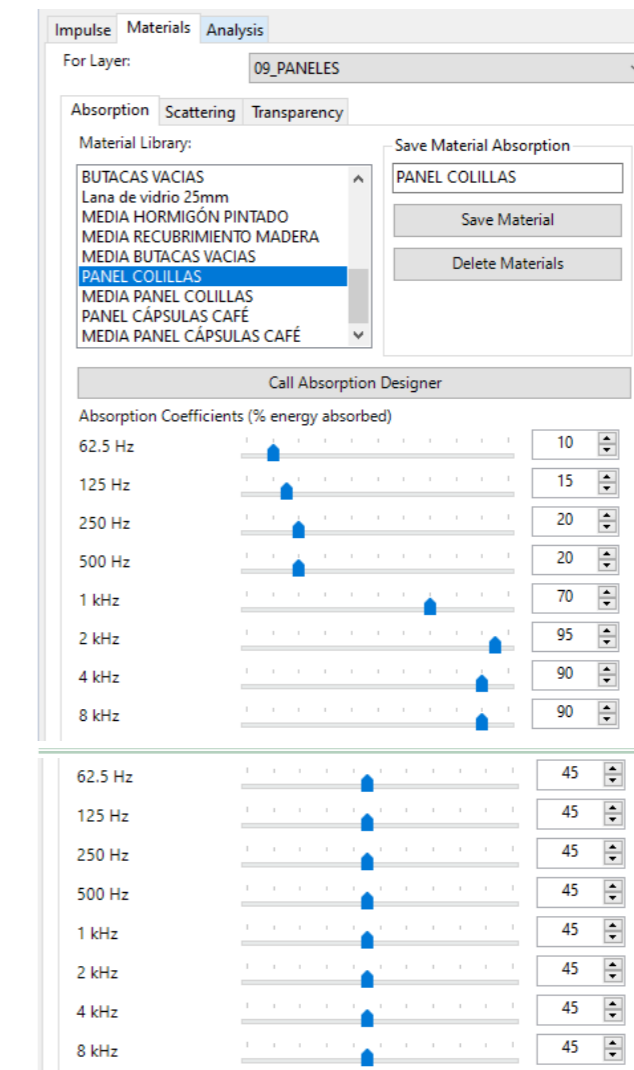


- Butacas vacías tapizado medio para las gradas y los pasillos.



Este dato ha sido obtenido del temario de la asignatura Fundamentos Físicos de la Arquitectura II, impartida en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, aunque se han promediado al 80 % estos valores para tener en cuenta el área de pasillo que se simplificó y añadió al área de las butacas.

- Panel de colillas recicladas



- Panel de cápsulas de café recicladas

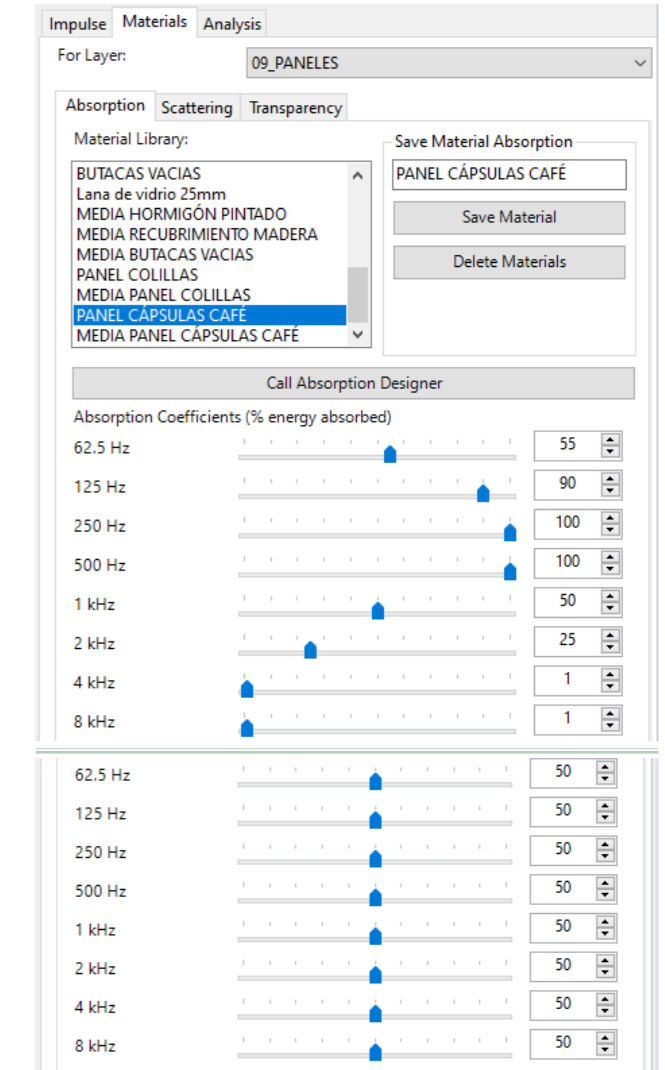


Figura 76_Datos sobre la absorción acústica de los paneles de colillas recicladas. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz.

Figura 77_Datos sobre la absorción acústica de los paneles de cápsulas de café recicladas. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz.

4. CASO DE ESTUDIO

4.4 Simulación, cálculos y análisis de los resultados

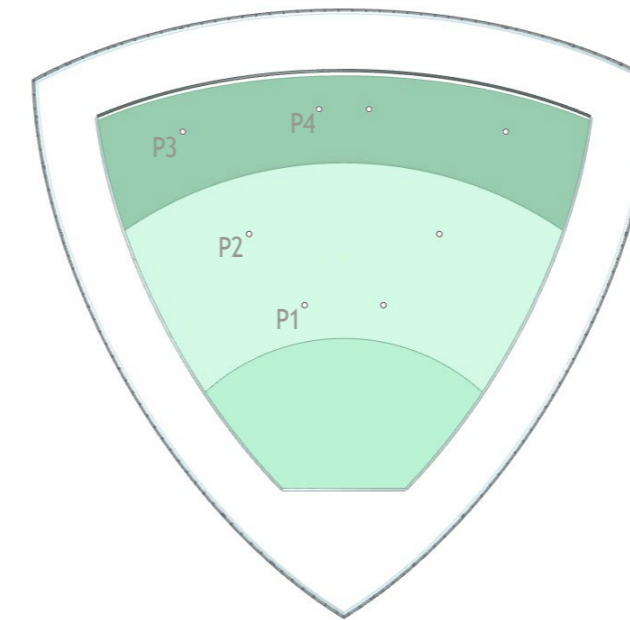


Figura 78_Planta con los puntos de cálculo recomendados por la norma ISO 3382.

4.4 SIMULACIÓN, CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

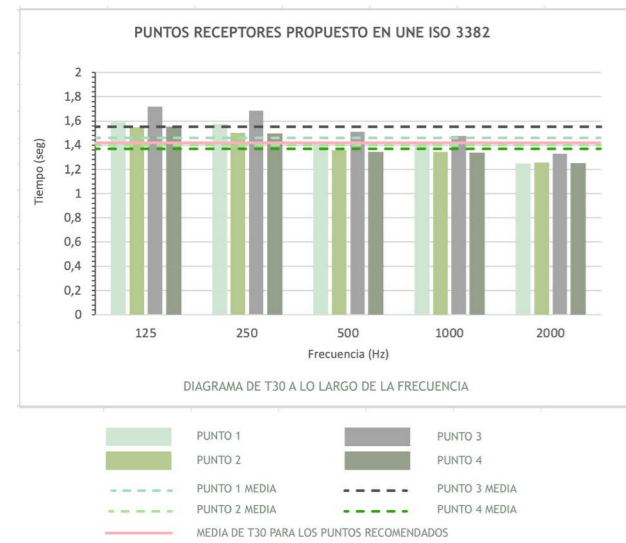
Con la geometría del edificio original exportada en Rhinoceros y siguiendo el mismo proceso que en el apartado 3.4.3, se busca generar una simulación acústica de cómo un impulso sonoro lanzado desde el centro del escenario a 1,5m de altura persiste en la sala una vez que la fuente ha dejado de emitir sonido. Para ello simularemos un caso genérico, con única fuente emisora, definida como una mujer que da una conferencia y las condiciones del aire predeterminadas por Pachyderm.

Una vez obtenida la simulación, se pasa a determinar los diferentes casos de estudio sobre los que se aplicará el algoritmo de cálculo, tal y como se hizo para el ejemplo a pequeña escala. Para ello, se ha tenido en cuenta que, al tratarse de una intervención acústica posterior a su construcción, no sería real modificar la geometría del edificio original, por lo que este estudio se centrará en la aplicación de nuevos materiales reciclados y la posible variación de los paneles acústicos actuales.

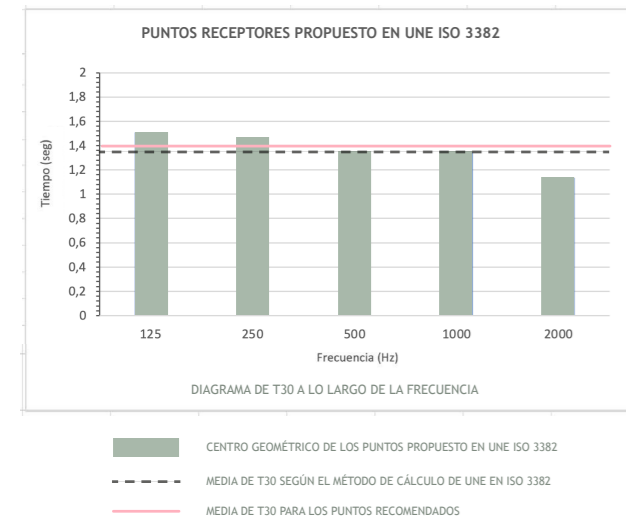
A. Caso de referencia:

Se consideran parámetros fijados para este caso: las dimensiones del edificio original construido según su planimetría y el material de ejemplo (lana de vidrio de 25 mm) aplicado a los paneles acústicos y la pared del fondo.

A.0) En primer lugar, se determinará el número de rayos a introducir en el componente Ray Tracing. Según la información que se puede encontrar sobre Pachyderm en los foros de la empresa creadora, se recomienda utilizar aproximadamente de 50 a 100 rayos por m³. Por otro lado, también se indica que el error de precisión del cálculo en Pachyderm es del orden de 10⁻². Teniendo esto en cuenta, y dado que el volumen del recinto es de aproximadamente 1000m³ ¿? se han realizado ensayos para los siguientes números de rayos: 30.000, 60.000, 90.000, 180.000, 360.000 y 720.000. A partir de los 60.000 rayos los errores absolutos y relativos obtenidos (considerando como referen-



Gráfica 01_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para los puntos que propone la norma ISO 3382.

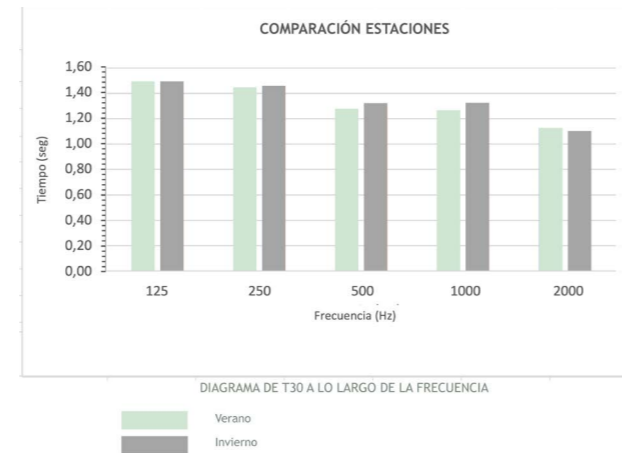


Gráfica 02_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el punto central.

cia la solución para 720.000 rayos) han sido del orden de 10-2, coincidiendo por tanto con el error de precisión del cálculo del programa. Por ello, sin pérdida de generalidad, se tomará para los ensayos realizados la cantidad de 90.000 rayos.

A. 1) A continuación, se determinará el punto más desfavorable para el tiempo de reverberación según el número de puntos propuesto por la norma. Cómo se referenció en el apartado 3.6, la tabla A.2 de la norma ISO 3382 exige que para el número de asiento de del auditorio Kresge (1.200 según su página oficial) se realicen las mediciones oportunas en 8 puntos. Estos ocho puntos han sido distribuidos de manera simétrica por su planta (fig.78) además de determinar un último punto que sea el centro geométrico de estos ocho. Tras los cálculos, cuyos resultados se pueden observar en las gráficas 1 y 2, se comprueban que, el punto más desfavorable es el punto 3, y que el punto central produce unos valores para el tiempo de reverberación que se aproximan tanto a la media de los 8 puntos como a los propuestos por la norma. Así, con el propósito de resumir los apartados de cálculo, se tomará este punto central como único punto receptor de referencia para el resto de experimentos (Gráficas 01 y 02).

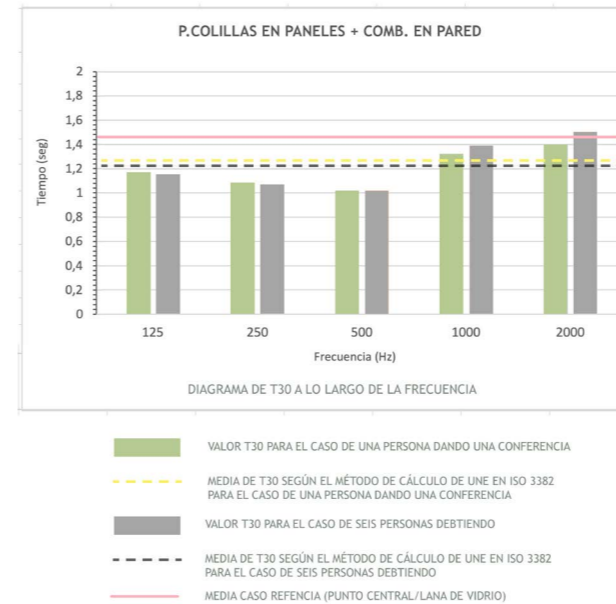
A. 2) Como último ensayo para analizar el caso de referencia, se realiza una comparativa del comportamiento de la sala variando los datos del medio de propagación. Es decir, se ha realizado el cálculo para las condiciones de confort para invierno (22°C y 45% de humedad relativa) y verano (24°C y 55% de humedad relativa) según el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios). Los resultados observados en la gráfica 3 no presentan grandes variaciones entre ellos, siendo sin embargo la estación de verano ligeramente más desfavorable, por lo que se tomará ésta como referencia para los cálculos posteriores (Gráfica 03).



Gráfica 03_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia distintantast estaciones, invierno y verano.

Se concluye pues que para los siguientes experimentos se tomarán los siguientes datos fijados:

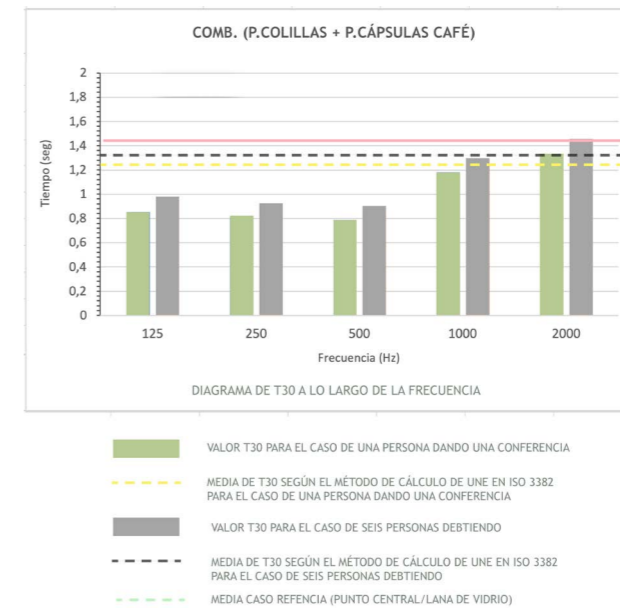
- Número de rayos: 90.000 rayos para los componentes de cálculo,
- Punto receptor: el punto central geométrico
- Datos del medio: los valores de temperatura y humedad relativos a la estación de verano.



Gráfica 04_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.1)

B. Análisis de los materiales propuestos en el cálculo acústico.

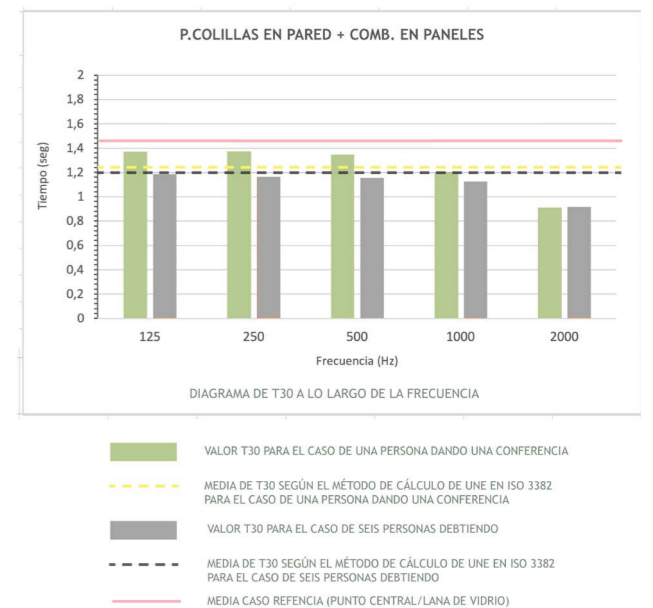
Los siguientes parámetros se considerarán fijados para este caso: las dimensiones del edificio original construido según su planimetría (cubiertas, butacas, cerramiento, escenario posición y divisiones de los paneles); mientras que serán variables los materiales aplicados a los paneles acústicos y la pared de fondo. Se detallan a continuación los diferentes ensayos realizados.



Gráfica 05_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.2)

B. 1) La primera prueba de materiales que se calculará será con los paneles de colillas recicladas (descrito en la sección X)aplicadas tanto a la pared del fondo como a los paneles acústicos suspendidos de la cubierta (Gráfica 04).

B. 2) A continuación, se calculará aplicando para ambas superficies el producto resultante del estudio de las cápsulas de café (descrito en la sección X) , en el que se combinan un panel construido con dichos residuos y un panel de colillas recicladas (a partir de ahora, COMB.) (Gráfica 05)



Gráfica 06_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.3)

B.3) En siguiente lugar, se calculará una solución mixta, utilizando la solución COMB. para los paneles acústicos y paneles de colillas recicladas para la pared del fondo (Gráfica 06).

B.4) Como último caso de estudio de materiales, se evaluará la composición mixta considerando paneles de colillas recicladas para los paneles acústicos suspendidos y COMB. para la pared del fondo (Gráfica 07).

Como se puede ver, existe una tendencia clara en la que, al utilizar los paneles de colillas recicladas sobre la pared del fondo, disminuyen los tiempos de reverberación para las frecuencias más altas. Sin embargo, son las soluciones con COMB. en la misma pared la que ofrecen una mejor media para T30 y, más importante, mejores resultados para bandas de frecuencias bajas, que son las que determinan un correcto entendimiento del habla. Centrándose en los resultados de todas las combinaciones de materiales únicamente para la banda de frecuencia relativa a 500 Hz, se confirma que será la solución B.2, con el producto compuesto por paneles de cápsulas de café y paneles de colillas recicladas, la que mejores resultados presenta para el caso que ocupa este trabajo. (Gráfica 08)

C. Análisis de la influencia de la geometría de los paneles

Para este último punto de cálculo, se estimarán como fijos los siguientes parámetros: dimensiones del edificio, datos climáticos de estación de verano y la propuesta de materiales con mejores resultados acústicos analizados en el apartado B., esto es, la solución B.2. Mientras que, en este caso, nos centramos en la geometría de los paneles acústicos como parámetro variable. Describimos a continuación las variantes analizadas.

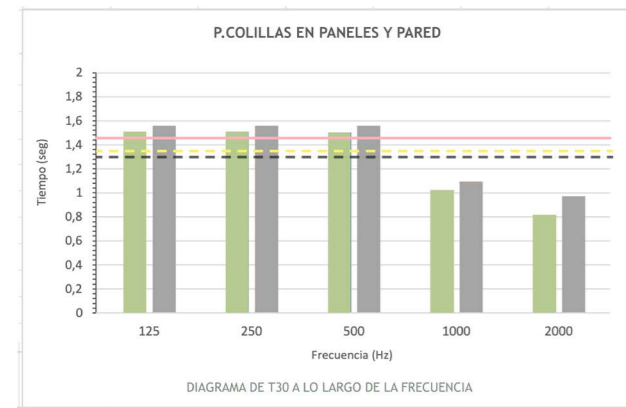
C.0) En primer lugar, para generar unos datos de referencia sobre la funcionalidad de estos paneles, se calculará el tiempo de reverberación para la sala prescindiendo de éstos (Gráfica 09).

C.1) Seguidamente, se comprobará el tiempo de reverberación para el caso en el que todos estos paneles conformen únicamente dos paneles continuos, uno sobre el primer conjunto de butacas más cercano al escenario y otro sobre las butacas del palco del fondo de la sala (Gráfica 10)

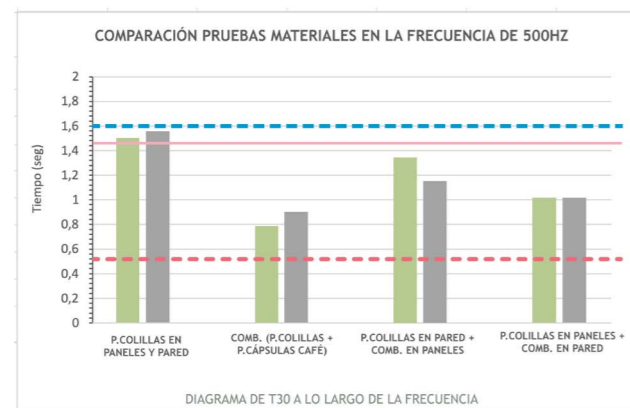
C.2) En siguiente lugar, con el fin de verificar la influencia de la curvatura de los paneles en el tiempo de reverberación, se varía dicha geometría para que la curvatura

de estos paneles sea el doble respecto a los paneles diseñados en el edificio original (Gráfica 11).

C.3) Por último, se comprobará el comportamiento de dichos paneles con una curvatura doble respecto a la original a lo que además se les añade un segundo panel de colillas recicladas (Gráfica 12).



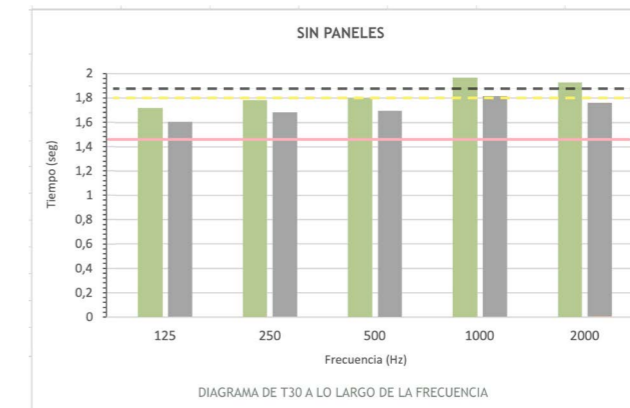
VALOR T30 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
 MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
 VALOR T30 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
 MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
 MEDIA CASO REFERENCIA (PUNTO CENTRAL/LANA DE VIDRIO)



VALOR T30 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
 VALOR T30 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
 MEDIA CASO REFERENCIA (PUNTO CENTRAL/LANA DE VIDRIO)
 VALOR ÓPTIMO OBTENIDO DE LA FÓRMULA
 VALOR MÍNIMO EXIGIDO POR DB-HR

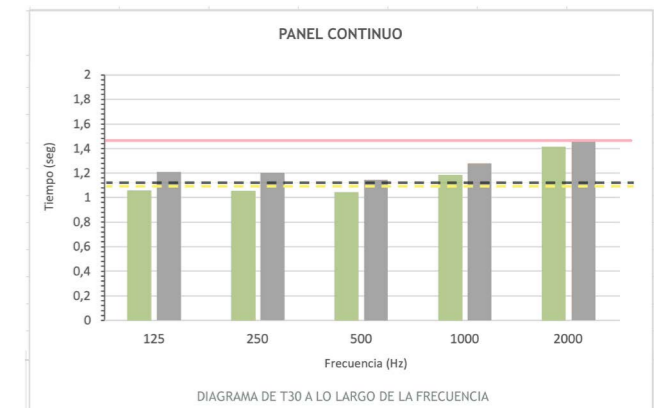
Gráfica 07_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.4)

Gráfica 07_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia comparando los casos B.1), B.2), B.3) y B.4).



VALOR T30 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
 MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
 VALOR T30 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
 MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
 MEDIA CASO REFERENCIA (PUNTO CENTRAL/LANA DE VIDRIO)

Gráfica 09_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.0)

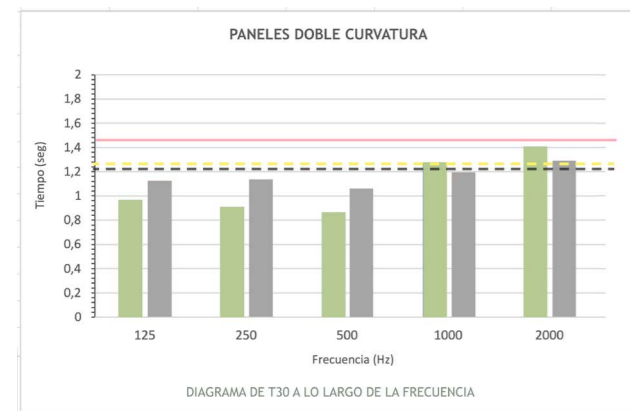


VALOR T30 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
 MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
 VALOR T30 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
 MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
 MEDIA CASO REFERENCIA (PUNTO CENTRAL/LANA DE VIDRIO)

Gráfica 10_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.1)

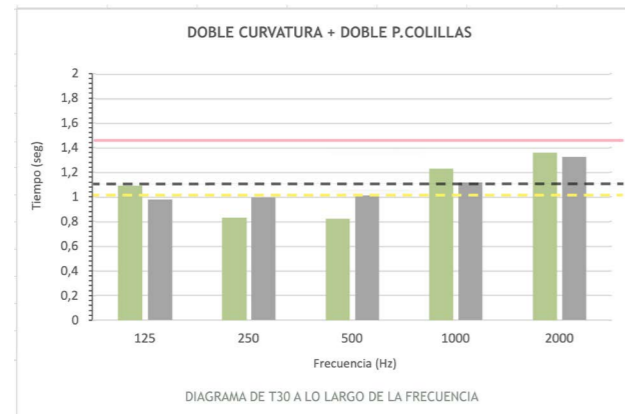
Gracias a la primera gráfica de este apartado, se observa claramente que la influencia de los paneles acústicos suspendidos es crucial para corregir el tiempo de reverberación de la sala. También podemos concluir que la geometría que estos presentan en su diseño original es la más adecuada para la media de las frecuencias de 500 y 1000 Hz; y en especial para la banda de frecuencias de 500 Hz. Aunque cabe destacar que el caso con doble curvatura (C.2 y C.3) muestra una tendencia

en la que, para bandas de frecuencias altas, mejora paulatinamente los resultados en el caso de 6 personas llevando a cabo un debate. Esto podría indicar que tal vez esta curvatura es más favorable para una superposición de voces (Gráfica 13).



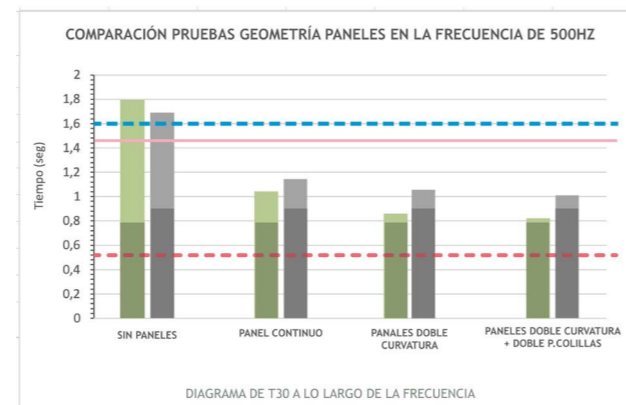
- VALOR T30 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
- MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
- VALOR T30 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
- MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
- MEDIA CASO REFERENCIA (PUNTO CENTRAL/LANA DE VIDRIO)

Gráfica 11_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.2)



- VALOR T30 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
- MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
- VALOR T30 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
- MEDIA DE T30 SEGÚN EL MÉTODO DE CÁLCULO DE UNE EN ISO 3382 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
- MEDIA CASO REFERENCIA (PUNTO CENTRAL/LANA DE VIDRIO)

Gráfica 12_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.3)



- VALOR T30 PARA EL CASO DE UNA PERSONA DANDO UNA CONFERENCIA
- VALOR T30 PARA EL CASO DE SEIS PERSONAS DEBTIENDO
- MEDIA CASO REFERENCIA (PUNTO CENTRAL/LANA DE VIDRIO)
- VALOR ÓPTIMO OBTENIDO DE LA FÓRMULA
- VALOR MÍNIMO EXIGIDO POR DB-HR
- VALORES PARA LA GEOMETRÍA DE REFERENCIA DE LOS PANELES

Gráfica 13_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia comparando los casos C.1), C.2), C.3) y C.4).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado mediante simulación numérica el análisis del comportamiento acústico en un caso de estudio de materiales reciclados como principal componente de absorción acústica. Para ello se han utilizado herramientas paramétricas, tanto para el diseño de la geometría arquitectónica como para el cálculo acústico mediante el programa Rhinoceros-Grasshopper y su complemento Pachyderm. El código de cálculo generado nos ofrece la posibilidad de analizar los resultados variando los “parámetros de diseño”, comportando así una herramienta rápida y eficaz para realizar una comparativa eficiente de la influencia de estos parámetros en el comportamiento acústico. Los materiales reciclados considerados fueron propuestos en precedentes Trabajos Fin de Grado de este mismo grupo, siendo en concreto, colillas y cápsulas de café. El caso de estudio elegido es el Auditorio Kresge.

Dado el enorme abanico de posibilidades de estudio mediante el código generado, se ha hecho un estudio previo sobre qué propiedades y cualidades del edificio en particular podrían tener más influencia en el comportamiento acústico. En consecuencia, se han realizado varios ensayos para este fin, modificando los siguientes parámetros: datos climatológicos (verano/invierno), dos fuentes diferentes emisoras de sonido, materiales absorbentes acústicos, uso de estos materiales en distintas capas del auditorio (paneles y pared del fondo) y, por último, la propia geometría de los paneles acústicos.

Como dato representativo para medir la calidad de los resultados acústicos en la sala se ha elegido el tiempo de reverberación, marcado como referencia por las normas DB-HR y UNE EN ISO 3382 .

Los resultados se han comparado sucesivamente con el caso de referencia, siendo éste el de la construcción original, para demostrar en qué medida las soluciones propuestas mejoraban o no su aplicación en el tiempo de reverberación del auditorio. Se ha añadido además el dato óptimo recomendado en DB-HR.

En primer lugar, se ha comprobado que los datos obtenidos para las dos estaciones, invierno y verano, difieren de forma mínima, siendo ligeramente más desfavorable para el caso de verano.

Las dos fuentes diferentes de sonido se han tenido en cuenta en todo el estudio, podemos comentar que los resultados de los ensayos realizados se comportan de manera muy similar entre ellos.

Los resultados obtenidos marcan una tendencia a favor del uso del material reciclado compuesto por la mezcla de colillas y cápsulas de café como mejora en la solución construida. Se ha comprobado que las soluciones mixtas propuestas, usando distintos materiales para los paneles y la pared del fondo no proporcionan una mejor solución, y por tanto se estima que es más aconsejable el uso del mismo material en ambas superficies.

Este estudio también ha servido para concluir que la geometría original de los paneles ofrece la mejor disposición en este caso. Sin embargo, el caso analizado con una curvatura doble en dichos paneles ofrece una solución más adecuada para frecuencias altas.

Como conclusión global, podemos decir que el uso de las herramientas paramétricas permite un análisis preciso y eficaz del comportamiento acústico de los edificios. La casuística de análisis en el código generado se puede denominar como infinita, dada la cantidad de combinaciones diferentes que se pueden estudiar según los parámetros de diseño definidos. Como se ha puesto de manifiesto a lo largo de este trabajo, el uso de materiales reciclados es de vital importancia en la construcción, y de esta forma, se puede analizar su viabilidad técnica como materiales absorbentes en diferentes proyectos, pudiendo llegar a proponerse con fiabilidad como soluciones reales.

6. POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Todo el estudio realizado en este trabajo ha sido aplicado a la acústica de un edificio real, resolviendo ésta a través de dos productos absorbentes acústicos elaborados a partir de materiales reciclados. Sería de gran interés poder ampliar el estudio de materiales con otros productos de estas características propuestos por otros alumnos de esta escuela en trabajos precedentes para comprobar su viabilidad práctica. Incluso, podría ser de provecho la creación de una base de datos donde compartir todos los valores relativos a las propiedades físicas y acústicas de estos materiales para fomentar así su uso en simulaciones de este tipo. De esta manera, serviría por tanto para concienciar a un mayor número de personas sobre la importancia y las posibilidades de darle a los residuos un nuevo ciclo de vida en el ámbito de la construcción. La aportación realizada en este trabajo, en particular el código de cálculo generado en Rhinoceros-Grasshopper hace que estos datos sean parámetros de entrada y por tanto los resultados sobre la geometría realizada, se obtendrían sin más que variar estos datos. Es precisamente el potencial del uso de las herramientas paramétricas.

Otra posible línea de investigación futura sería ampliar este mismo ensayo, pero para productos a partir de materiales reciclados con propiedades mecánicas. Esto conllevaría la búsqueda y estudio de nuevos complementos para Grasshopper que traten este tipo de cualidades y concluir en una nueva aplicación más ecológica y respetuosa con el medio ambiente.

Por último, si se tomase la línea de investigación correspondiente a implementar este tipo de aplicaciones en las fases de diseño de edificios de nueva planta, sería conveniente experimentar con la geometría del caso práctico. Se dispondría así de una herramienta que ayudaría a la ideación del proyecto para intentar demostrar que un diseño consecuente con la acústica deseada estaría más optimizado que la aplicación posterior de otros tratamientos para subsanar el mal comportamiento acústico de la construcción.

7. REFERENCIAS Y FIGURAS

3.1 CONCEPTOS PREVIOS

1. Sutherland, Ivan Edward (1963). Sketchpad : A man-machine graphical communication system (2003). Technical Report Number 574, University of Cambridge, Computer Laboratory.
2. M. Burnett, Margaret (1999). “Visual Programming” in Encyclopedia of Electrical Engineering (John G. Webster,ed). Oregon State University, School of Electrical Engineering and Computer Science

3.2 GRASSHOPPER Y RHINOCEROS

1. Scott Davidson (2021) Grasshopper. Algorithmic modeling for rhino. Último acceso 10/04/2021 <https://www.grasshopper3d.com/>
2. Tedeschi, Arturo. (2010). Architettura Parametrica : Introduzione a Grasshopper (2a ed.). Le Penseur.
3. Flavio Wirz (2010). Prólogo del libro Architettura Parametrica : Introduzione a Grasshopper (2a ed.). Le Penseur.
4. Mirtschin, Jonathan (2011) Engaging Generative BIM Workflows. Collaborative Design of Lightweight Structures - LSAA 2011
5. Lagios, Kera; Niemasz, Jeff; Reinhart F, Christoph (2010). Animated Building Performance Simulation (Abps) - Linking Rhinoceros / Grasshopper With Radiance / Daysim. Conference proceedings of SimBuild 2010.
6. Soporte de Rhinoceros 3D, B-Spline racional no uniforme (NURBS). Último acceso 02/05/21 http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/es-es/information/nurbs_about
7. Pino, M. Suffo Pino; Carrilero, M. Sánchez; Gómez Ortiz, R.; Alvarez Alcón,M.; Sánchez Sola, J.M. y Marcos Bárcena, M. (2015) Metodologías de Diseño en Construcción Naval basada en Superficies NURBS. Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz.
8. Ibid pág. 13, referencia 7.
9. McNeelWiki, La historia de Rhino. Último acceso 02/02/2021 <https://wiki.mcneel.com/rhino/rhinohistory>
10. Soporte de Rhinoceros 3D, Características. Último acceso 02/05/21 <https://www.rhino3d.com/features/>
11. Gómez González, S., & Torné Ribé, J. (2016). Grasshopper para Rhinoceros e impresión 3D . Marcombo.

12. Palma, Marco; Sarotto, Maddalena ;Echenagucia, Tomás; Sassone, Mario; Astolfi, Arianna; Sound-strength driven parametric design of an acoustic shell in a free field environment; Building Acoustics (2014).
13. Emma, Giuseppina; L ' ottimizzazione multi-objetivo nella progettazione acustica delle aule scolastiche; Politecnico Di Torino Repository Istituzionale (2020).
14. Lagios, Kera; Niemasz, Jeff; Reinhart F, Christoph (2010). Animated Building Performance Simulation (Abps) - Linking Rhinoceros / Grasshopper With Radiance / Daysim. Conference proceedings of SimBuild 2010.
15. Mirtschin, Jonathan (2011). Engaging Generative BIM Workflows. Collaborative Design of Lightweight Structures - LSAA 2011.
16. Plotnikov, Boris; Schubert, Gerhard; Petzold, Frank (2016) Tangible Grasshopper: A method to combine physical models with generative, parametric tools. CDESIGN TOOLS | Evaluations - Volume 2 - eCAADe

3.3 GRASSHOPPER Y SUS COMPLEMENTOS

1. Nguyen, Hung Viet; Kästne, Christian y Nguyen, Tien N. (2005) Exploring Variability-Aware Execution for Testing Plugin-Based Web Applications. Proceedings - International Conference on Software Engineering.
2. Toda la información ha sido tomada de las descripciones que las propias aplicaciones han compartido en la web food4rhino.

3.4 PACHYDERM ACOUSTICAL SIMULATION

1. Open Research in Acoustical Science and Education Último acceso 22/05/2021 <https://www.orase.org/>
2. Tomás Mendez, Arianna Astolfi, Mario Sassone, Louena Shtrepi and Arthur van der Harten, Esplorazione Multi Obiettivo nella Progettazione Acustica Architettónica, 39 Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustic, Rome, 4-6 July, 2012.
3. Arthur van der Harten, Customized Room Acoustics Simulations Using Scripting Interfaces, Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA), Vol 12, June 2011.
4. Parigi, Dario; Svidt, Kjeld; Molin, Erik; Bard, Delphine; Parametric Room Acoustic workflows Review and future perspectives; eCAADe (2017) Volumen 35.
5. Van Der Harten, Arthur; Pachyderm acoustical simulation: Towards open-source sound analysis; Architectural Design (2013) Volume 2.
6. Temario de la asignatura Fundamentos Físicos de la arquitectura II impartida en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, Tema 9: Acústica Arquitectónica.
7. Mommertz, Eckard; Kahle, Eckhard; The bochum concert hall-The challenge of small concert halls for large orchestras on low budgets; Proceedings of the Institute of Acoustics (2018) Volume 40.
8. Takenaka, Tsukasa; Okabe, Aya; A Computational Method for Integrating Parametric Origami Design and Acoustic Engineering; 31st International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe); (2012) Volume 2.
9. Badino, Elena; Shtrepi, Louena; Astolfi, Arianna; Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice; Acoustic Journal (2020) Volume 2.
10. Day, Christopher; Marshall, Harold; Scelo, Thomas; Valentine, Joanne; Exton, Peter; The philharmonie de Paris - Acoustic design and commissioning; 2nd Australasian Acoustical Societies Conference, (2016) Volume 1

3.5 MATERIALES DE ESTUDIO

1. Información obtenida en la web de la asociación empresarial PlasticEurope, en el apartado “What are plastic”. Último accseo 03/04/2021 <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics>
2. Arandes, JM; Bilbao, Javier y López, DV (2004) Reciclado de residuos plásticos. Revista Iberoamericana de polímeros.
3. Parlamento Europeo (2019). Los plásticos de un solo uso, prohibidos a partir de 2021. Publicado en su página web.
4. Gutiérrez Ojeda, Alba (2020) Propuesta de un producto absorbente acústico para falsos techos compuesto por placas de yeso con perforaciones cónicas mediante la incorporación de cápsulas de café de polipropileno recicladas. Universidad de Sevilla.
5. V. G. Escobar, G. R. Gozalo, and C. J. Pérez (2019) Variability and performance study of the sound absorption of used cigarette butts. Materials (Basel)., vol. 12, no.
6. A. Abdul Kadir and A. Mohajerani (2015) Effect of heating rate on gas emissions and properties of fired clay bricks and fired clay bricks incorporated with cigarette butts, Appl. Clay Sci., vol. 104.
7. Ibid. pág 43, referencia 4.
8. Cafés Novell; Residuo cero. Último acceso 25/03/2021 <https://cafesnovell.com/residuoce-ro/>

4.1 AUDITORIO KRESGE

1. Eero Saarinen en Dickinson College, 01 dediciembre 1959, recogido en el número de octubre de 1963, de la revista Mississippi Architect.
2. Ignacio G. Pedrosa; Una bóveda celeste en el Auditorio Kresge; Revista Europea de Investigación en Arquitectura (2018)

TABLAS

Tabla 01_Características de una muestra de medida. FUENTE: **Propuesta de un panel realizado a base de residuos de colillas de cigarrillos, como alternativa ecoeficiente, en la ejecución de techos acústicos** por Fátima Heras Saldaña con Enrique D. Fernández Nieto como tutor.

Tabla 02_Propiedades del panel de colillas recicladas propuesto. FUENTE: Misma que en la tabla anterior.

Tabla 03_Propiedades del panel de colillas recicladas propuesto. FUENTE: Misma que en la tabla anterior.

Tabla 04_Valores máximos de tiempo de reverberación según la norma DB-HR. FUENTE: CTE-DB-HR.

Tabla 05_Número mínimo de posiciones del receptor en función del tamaño del auditorio. FUENTE: UNE EN ISO 3382-1

Tabla 06_Propuesta para determinar el tiempo de reverberación óptimo a partir de la ecuación. FUENTE: Tema 9 Fundamentos Físicos de la Arq II

GRÁFICAS

Gráfica 01_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para los puntos que propone la norma ISO 3382. FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 02_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el punto central. FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 03_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia distintas estaciones, invierno y verano. FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 04_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.1). FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 05_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.2). FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 07_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.4). FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 06_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso B.3). FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 08_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia comparando los casos B.1), B.2), B.3) y B.4).FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 09_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.0).FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 10_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.1).FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 11_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.2).FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 12_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para el caso C.3).FUENTE: Elaboración propia.

Gráfica 13_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia comparando los casos C.1), C.2), C.3) y C.4).FUENTE: Elaboración propia.

FIGURAS

Fig.01_ Gaudí con la maqueta original y el sistema de bolsas de pesos y cuerdas, 1897. FUENTE: <https://dnrxs38fwzpsy.cloudfront.net/p/2019/06/20140004/recetpari.jpg> (Último acceso 16/05/2021).

Fig.02_ Réplica de la Maqueta Funicular de Gaudí. FUENTE: <https://99percentinvisible.org/app/uploads/2017/10/gaudi-with-models.jpg> (Último acceso 16/05/2021).

Fig.03_ Réplica de la Maqueta Funicular de Gaudí. FUENTE: <https://i.pinimg.com/originals/05/0a/54/050a54c8cd15840bd151d5c82b9a8408.jpg> (Último acceso 16/05/2021).

Fig.04_ Lápiz óptico del ordenador Lincoln TX-2. FUENTE: http://2.bp.blogspot.com/_nic0FeMKd1o/SGJKJmFjuEI/AAAAAAAAAQQ/HQxIbkWHCms/s400/Sutherland_Sketchpad_01.jpg (Último acceso 16/05/2021).

Fig.05_ Ivan Sutherland probando Sketchpad en el ordenador Lincoln TX-2 , 1963. FUENTE: https://i.blogs.es/b5d7e1/sutherland/450_1000.jpg (Último acceso 16/05/2021).

Fig.06_ Logo de Grasshopper. FUENTE: <https://www.grasshopper3d.com/> (Último acceso 16/05/2021).

Fig.07_ Curvas a través de puntos de control, dibujada con Rhinoceros 3d 6.0. FUENTE: Elaboración propia.

Fig.08_ Captura de la interfaz de Rhinoceros 3d 6.0 con anotaciones sobre sus áreas de trabajo. FUENTE: Elaboración propia.

Fig.09_ Captura de la interfaz de Grasshopper en Rhinoceros 3d 6.0 con anotaciones sobre sus áreas de trabajo. FUENTE: Elaboración propia.

Fig.10_ Captura de los componentes parámetros de Grasshopper en Rhinoceros 3d 6.0. FUENTE: Elaboración propia.

Fig.11_ Captura de los componentes punto, círculo, curva (parámetros, en la izquierda), punto desde coordenadas, curva NURBS y cilindro (a la derecha) de Grasshopper en Rhinoceros 3d 6.0. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 12_ Perspectiva de la morfología de las superficies A, B y C respectivamente. FUENTE: Palma, Marco; Sarotto, Maddalena ;Echenagucia, Tomás; Sassone, Mario; Astolfi, Arianna; Sound-strength driven parametric design of an acoustic shell in a free field environment; Building Acoustics (2014).

Fig.13_ Planta de las tres opciones de superficies reflejando los rayos de sonido sobre la audiencia (opciones A, B y C). FUENTE: Palma, Marco; Sa-

rotto, Maddalena ;Echenagucia, Tomás; Sassone, Mario; Astolfi, Arianna; Sound-strength driven parametric design of an acoustic shell in a free field environment; Building Acoustics (2014).

Fig. 14_ Serie de imágenes de un estudio de la iluminación natural paramétrica de la Zollverein de Essen. FUENTE: Palma, Marco; Sarotto, Maddalena ;Echenagucia, Tomás; Sassone, Mario; Astolfi, Arianna; Sound-strength driven parametric design of an acoustic shell in a free field environment; Building Acoustics (2014).

Fig.15_ Configuración del sistema. A: Mesa multitáctil B: Cámara de profundidad 3D montada en la parte superior C: Vista en perspectiva de la escena del diseño D: Extensión flexible a través de un protocolo de red. FUENTE: Plotnikov, Boris; Schubert, Gerhard; Petzold, Frank (2016) Tangible Grasshopper: A method to combine physical models with generative, parametric tools. CDESIGN TOOLS | Evaluations - Volume 2 - eCAADe

Fig.16_ Configuración del sistema. A: Plataforma de diseño: modelos físicos colocados en la mesa de la Plataforma de diseño (bloques de poliestireno) con reconstrucción de objetos 3D integrada, B: Componente Grasshopper3D personalizado que ejecuta y visualiza simulaciones. FUENTE: Plotnikov, Boris; Schubert, Gerhard; Petzold, Frank (2016) Tangible Grasshopper: A method to combine physical models with generative, parametric tools. CDESIGN TOOLS | Evaluations - Volume 2 - eCAADe

Fig.17_ Un componente de simulación de envolvente de derechos solares personalizado en Grasshopper. FUENTE: Plotnikov, Boris; Schubert, Gerhard; Petzold, Frank (2016) Tangible Grasshopper: A method to combine physical models with generative, parametric tools. CDESIGN TOOLS | Evaluations - Volume 2 - eCAADe

Fig.18_ Logos Rhinoceros, Grasshopper y foo4Rhino. FUENTE: <https://www.food4rhino.com/> (Último acceso 15/04/2020)

Fig.19_ Categorías según uso de las aplicaciones de la web food4rhino. FUENTE: <https://www.food4rhino.com/> (Último acceso 15/04/2020)

Fig.20_ Los logos de las seis aplicaciones más descargadas en la web foo4Rhino. 1.LunckBox, 2.Kangaroo Physics, 3.LadyBug Tools, 4.Ghython, 5.Elk y 6.Panelingtools. FUENTE: <https://www.food4rhino.com/> (Último acceso 15/04/2020)

Fig.21_ Logo de Pachyderm. FUENTE: <https://www.food4rhino.com/en/app/pachyderm-acoustical-simulation> (Último acceso 15/04/2020)

Fig.22_ Imagen de simulación acústica realizada con Pachyderm Acoustical Simulation y expuesta en la página web de ORASE. FUENTE: <https://www.orase.org/> (Último acceso 15/04/2020)

Fig. 23_ Componentes de Pachyderm Acoustical Simulation disponibles en la interfaz de Grasshopper. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 24_ Componentes Polygon Scene, Geodesic Source y Visualize Pachyderm Rays. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 25_ Componentes Stationary Receiver, Direct Sound e Image Source. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 26_ Ayuda del componente Reverberation Time. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 27_ Componentes Ray TRacing, Energy-Time Curva y Reverberation Time. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 28_Pestaña Material Designer de la pantalla Pachyderm_Acoustic. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 29_Pestaña Impulse de la pantalla Pachyderm_Acoustic. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 30_Pestaña Source de la pantalla Pachyderm_Acoustic. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 31_Habitación modelada en Rhinoceros 3d para ejecutar el ejemplo de simulación y cálculo. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 32_Configuración de los valores del coeficiente de absorción en % para el material Placa de yeso de 2cm. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 33_Ejemplo de simulación y cálculo con los rayos de sonido en habitación modelada en Rhinoceros 3D. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 34_Captura del inicio del clip de la simulación a pequeña escala. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 35_Captura de mitad del clip de la simulación a pequeña escala. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 36_Captura del final del clip de la simulación a pequeña escala. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 37_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para placa de yeso de 2cm. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 38_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para lana de vidrio de 25mm. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 39_Diagrama de T30 a lo largo de la frecuencia para espuma de poliuretano de 75mm. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 40_Coeficientes acústicos en porcentaje para placa de yeso de 2cm. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 41_Coeficientes acústicos en porcentaje para lana de vidrio de 25mm. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 42_Coeficientes acústicos en porcentaje para espuma de poliuretano de 75mm. FUENTE: Elaboración propia.

Fig. 43_Interior del Anneliese Brost Music Forum. UENTE: <https://archello.com/project/anneliese-brost-musik-forum-ruhr> (Último acceso 20/06/2020)

Fig. 44_Detalles de los distintos acabados y tratamientos. FUENTE: <https://archello.com/project/anneliese-brost-musik-forum-ruhr> (Último acceso 20/06/2020)

Fig. 45_Interior de la sala de conciertos del Centro Cultural Ureshino. FUENTE: http://www.suep.jp/Ureshino_cultural_center/07.html (Último acceso 20/06/2020)

Fig. 48_Interior de la filarmónica de París. FUENTE: <http://www.jeannouvel.com/en/pro>

Fig. 46_Interior de la sala de conciertos Elbphilharmonie. FUENTE: <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/architectural-details-herzog-de-meuron-elbphilharmonie/> (Último acceso 20/06/2020)

Fig. 47_Detalle del proceso de modelado, cálculo y construcción de los paneles. FUENTE: <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/architectural-details-herzog-de-meuron-elbphilharmonie/> (Último acceso 20/06/2020)

Fig. 48_Interior de la filarmónica de París. FUENTE: <http://www.jeannouvel.com/en/projects/philharmonie-de-paris/> (Último acceso 20/06/2020)

Fig. 49_Las dos categorías de plásticos. FUENTE: PlasticEurope; Plásticos-Situación 2019.

Fig. 50_Datos sobre el consumo de plástico durante el año 2018 en el mundo y la Unión Europea. FUENTE: PlasticEurope; Plásticos-Situación 2019.

Fig. 51_Demanda de plásticos para su transformación por segmento y tipo de polímero en 2018. Total 51,2 M t. FUENTE: PlasticEurope; Plásticos-Situación 2019.

Fig. 52_Colillas de cigarrillos desechadas en la naturaleza. FUENTE: **Propuesta de un panel realizado a base de residuos de colillas de cigarrillos, como alternativa ecoeficiente, en la ejecución de techos acústicos** por Fátima Heras Saldaña con Enrique D. Fernández Nieto como tutor.

Fig. 53_Cápsulas de café. FUENTE: Gutiérrez Ojeda, Alba (2020) Propuesta de un producto absorbente acústico para falsos techos compuesto por placas de yeso con perforaciones cónicas mediante la incorporación de cápsulas de café de polipropileno recicladas. Universidad de Sevilla.

Fig. 54_Modelo muestra del panel de colillas recicladas. FUENTE: **Propuesta de un panel realizado a base de residuos de colillas de cigarrillos, como alternativa ecoeficiente, en la ejecución de techos acústicos** por Fátima Heras Saldaña con Enrique D. Fernández Nieto como tutor.

Fig. 55_Medidas muestra del panel de cápsulas de café recicladas. FUENTE: Gutiérrez Ojeda, Alba (2020) Propuesta de un producto absorbente acústico para falsos techos compuesto por placas de yeso con perforaciones cónicas mediante la incorporación de cápsulas de café de polipropileno recicladas. Universidad de Sevilla.

Fig. 56_Medidas del producto a base de cápsulas de café recicladas. FUENTE: Gutiérrez Ojeda, Alba (2020) Propuesta de un producto absorbente acústico para falsos techos compuesto por placas de yeso con perforaciones cónicas mediante la incorporación de cápsulas de café de polipropileno recicladas. Universidad de Sevilla.

Figura 58_Extracto de la norma UNE EN ISO 3382-1. FUENTE: UNE EN ISO 3382-1

Figura 59_Eeron Saarinen con la maqueta de otro de sus icónicos proyectos, el Arco Gateway en San Luis, Misuri. FUENTE: <https://www.arch360.com.ar/los-5-momentos-mas-importantes-de-la-vida-de-cesar-pelli/> (Último acceso 16/05/2021)

Figura 60_Plano de situación del auditorio y la capilla. En la esquina inferior izquierda también aparecela Baker House. FUENTE: Ignacio G. Pedrosa; Una bóveda celeste en el Auditorio Kresge; Revista Europea de Investigación en Arquitectura (2018)

Figura 61_Fotografía del auditorio y la capilla en el campus del MIT. FUENTE: Ignacio G. Pedrosa; Una bóveda celeste en el Auditorio Kresge; Revista Europea de Investigación en Arquitectura (2018)

Figura 62_Planimetría del auditorio Kresge, secciones y planta respectivamente. FUENTE: Ignacio G. Pedrosa; Una bóveda celeste en el Auditorio Kresge; Revista Europea de Investigación en Arquitectura (2018)

Figura 63_Descripción de la geometría del auditorio Kresge. FUENTE: Javier, Francisco; Sampedro, Sanchis; Marco, Javier Benlloch; Las formas del hormigón catálogo práctico de diseño (2010) TFM

Figura 64_Fotografía del interior de la sala. FUENTE: Ignacio G. Pedrosa; Una bóveda celeste en el Auditorio Kresge; Revista Europea de Investigación en Arquitectura (2018)

Figura 65_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría de la cubierta. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 66_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría de los aleros de la cubierta. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 67_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría del cerramiento exterior. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 68_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría del interior de la sala. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 69_Parámetros establecidos en Grasshopper para definir la geometría de los paneles acústicos.

Figura 70_Proceso de modelado de la cubierta y los aleros. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 71_Proceso de modelado del cerramiento exterior y sus perfiles. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 71_Proceso de modelado del interior de la sala. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 72_Resultado del proceso de modelado de los paneles acústicos. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 73_Datos sobre la absorción acústica del hormigón pintado. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 74_Datos sobre la absorción acústica del recubrimiento de madera. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 75_Datos sobre la absorción acústica de butacas vacías con tapizado medio. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 76_Datos sobre la absorción acústica de los paneles de colillas recicladas. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 77_Datos sobre la absorción acústica de los paneles de cápsulas de café recicladas. Valores por banda de frecuencia y media para las frecuencias de 500 y 1.000 Hz. FUENTE: Elaboración propia.

Figura 78_Planta con los puntos de cálculo recomendados por la norma UNE EN ISO 3382. FUENTE: Elaboración propia.

8. MATERIAL COMPLEMENTARIO DESCARGABLE

Como complemento a todo el estudio realizado y para facilitar el seguimiento de este documento, se adjuntan en el siguiente enlace de descarga los archivos correspondientes a:

- 01_KRESGE MODEL.gha
- 02_SIMULACION Y CALCULO.gha
- 03_ANIMACIÓN PEQ ESCALA.mov
- 04_ANIMACION KRESGE.mov

[HTTPS://DRIVE.GOOGLE.COM/DRIVE/FOLDERS/1LMFOMPPJPS6GDYDE9GJQUUX9Y2OANVTF?USP=SHARING](https://drive.google.com/drive/folders/1LMFOMPPJPS6GDYDE9GJQUUX9Y2OANVTF?USP=SHARING)