



**CONAMA10**  
CONGRESO NACIONAL  
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

# **Estudio morfológico de pantallas acústicas dispersas. Reflexión de ondas y textura superficial. Valoración de la incidencia en el rendimiento estético- funcional.**

Autor: María de la O Moreno Balboa

Institución: Universidad Alfonso X El Sabio

e-mail: [mmorebal@uax.es](mailto:mmorebal@uax.es)

Otros Autores: Laura Abad Toribio (Universidad Alfonso X El Sabio); David Colorado Aranguren (Universidad Alfonso X El Sabio); Marta Serrano Pérez (Universidad Alfonso X El Sabio); José Domínguez de Posada (Universidad Alfonso X El Sabio)

## RESUMEN

La polución por ruido de tráfico es uno de los agentes contaminantes que más deterioran la calidad de vida de los ciudadanos, por ello, durante los últimos años, se ha incrementado el uso de barreras acústicas a lo largo de las vías de penetración y circunvalación de las grandes ciudades. Se configura así un cuadro de componente dual emisor-receptor, entre los cuales se ha interpuesto un obstáculo de tal manera que interrumpa la onda acústica con reflexión o absorción de la energía incidente. La Universidad Alfonso X el Sabio está llevando a cabo un proyecto de investigación, entroncado en el diseño industrial y las ciencias ambientales, para valorar como el 'uso efectivo de la forma puede mejorar la función'. El proyecto se centra en las pantallas acústicas reflectantes, en concreto en las pantallas acústicas difusas, en la cara interna de la misma, aquella que está expuesta de manera directa a las ondas acústicas, y que es la que de manera efectiva ejerce la función principal de la acción antirruído. Se ha procedido a generar texturas superficiales destinadas a ser evaluadas posteriormente en laboratorio. Para la consecución de este objetivo se optó por la generación sistemática a partir de figuras geométricas tridimensionales, mediante dos métodos de inserción en el plano vertical, adicción, que genera superficies cóncavas y sustracción que genera superficies convexas. El presente estudio nos permitirá obtener una serie de conclusiones que esperamos nos ayuden a demostrar como el 'uso efectivo de la forma puede mejorar la función' es decir la relación que existe entre la atenuación acústica y la geometría superficial. A su vez se evaluarán los modelos desde el punto de vista estético. Las pantallas antirruído constituyen per se un marco de comunicación con el viajero, que lo visualiza a 100km/h y con el espectador estático que lo contempla. Esta relación dinámico-estática queda enriquecida visualmente con la diversificación de las formas, evitando elementos organizados monótonamente con seriación inexpressiva.

**Palabras Clave:** Pantalla acústica, reflexión de ondas, ruido, acústica geométrica, tráfico rodado

## 1. RESUMEN

La contaminación por ruido de tráfico es uno de los agentes contaminantes que más deterioran la calidad de vida de los ciudadanos, por ello, durante los últimos años, se ha incrementado el uso de barreras acústicas a lo largo de las vías de penetración y circunvalación de las grandes ciudades. Se configura así un cuadro de componente dual emisor-receptor, entre los cuales se ha interpuesto un obstáculo de tal manera que interrumpa la onda acústica con reflexión o absorción de la energía incidente.

La Universidad Alfonso X el Sabio está llevando a cabo un proyecto de investigación, entroncado en el diseño industrial y las ciencias ambientales, para valorar como el “uso efectivo de la forma puede mejorar la función”.

El proyecto se centra en las pantallas acústicas reflectantes, en concreto en las pantallas acústicas difusas, en la cara interna de la misma, aquella que está expuesta de manera directa a las ondas acústicas, y que es la que de manera efectiva ejerce la función principal de la acción antirruído.

Se ha procedido a generar texturas superficiales destinadas a ser evaluadas posteriormente en laboratorio. Para la consecución de este objetivo se optó por la generación sistemática a partir de figuras geométricas tridimensionales, mediante dos métodos de inserción en el plano vertical, adición, que genera superficies cóncavas y sustracción que genera superficies convexas.

El presente estudio nos permitirá obtener una serie de conclusiones que esperamos nos ayuden a demostrar como el “uso efectivo de la forma puede mejorar la función” es decir la relación que existe entre la atenuación acústica y la geometría superficial.

A su vez se evaluarán los modelos desde el punto de vista estético. Las pantallas antirruído constituyen per se un marco de comunicación con el viajero, que lo visualiza a 100km/h y con el espectador estático que lo contempla. Esta relación dinámico-estática queda enriquecida visualmente con la diversificación de las formas, evitando elementos organizados monótonamente con seriación inexpresiva.

## 2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En sólo un siglo, nuestro planeta ha sufrido una metamorfosis ambiental sin precedente en toda su historia, de tal manera que de cada máquina de transporte que el hombre creaba surgían también residuos sólidos, líquidos, gaseosos y **acústicos**.

Actualmente el problema de la **contaminación ambiental** por ruido en las ciudades ha llegado a ser de gran importancia dado el número de personas expuestas y los efectos que tiene en la comunidad. Organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización para el Comercio y Desarrollo Económico (OCDE) han incluido al ruido dentro de los temas ambientales de investigación prioritaria, señalándolo como un indicador de la calidad ambiental urbana. [1]

Se ha probado fehacientemente que las personas sometidas a niveles sonoros comprendidos entre 65 y 80 decibelios están expuestas a alteraciones psicosomáticas y a una reducción de rendimientos intelectivos y laborales, con pérdida del bienestar. Con una exposición superior a 80dB(A) aparecen alteraciones físico-sensoriales graves. Existen, pues, como mínimo 15 razones para abordar el tratamiento del ruido y la adopción de medidas correctoras aplicadas entre el tráfico y el receptor. [2]

Vías de transporte, áreas industriales y aglomeraciones residenciales conforman fuentes claves generadoras de la mayor parte del ruido que acosa a nuestros ciudadanos. Efectivamente, España, junto con Japón, es el país más ruidoso de la OCDE. Carente hasta hace escaso tiempo, de normativas reguladoras, de limitaciones acústicas y de pantallas antirruído, nuestro país inicio hace 20 años una única singladura hacia soluciones mejores.

Organizadas adecuadamente, las **pantallas antirruído** o **pantallas acústicas** suponen una respuesta actual a la problemática acústica en zonas urbanas periféricas sometidas al impacto directo del tráfico vial. Denominamos pantallas acústicas o pantallas antirruído a las barreras o muros constituidos por elementos de pared relativamente delgada, verticales o inclinados, que ofrecen gran resistencia a la transmisión del sonido.

Las numerosas ventajas que presentan explican su gran desarrollo en los últimos años en Europa. Su emplazamiento idóneo es en zona periurbana, en las vías de penetración a las grandes ciudades.

Las soluciones de ingeniería aportadas a situaciones particulares son muy variadas, y en todas ellas se intenta rentabilizar el binomio **coste eficacia**, ya que no debe despreciarse el elevado importe de estos elementos protectores, debido a las grandes superficies que han de cubrirse. En nuestro país, las soluciones aportadas deben calificarse de **conservadoras**, no encontrándose ninguna de las innovaciones que pueden hallarse en la literatura especializada.

A nivel europeo existe toda una dilatada experiencia de más de 40 años en la construcción de este tipo de **ECOMOBILIARIO** para atenuar ruidos del tráfico.

Las pantallas antirruído constituyen *per se* un **marco de comunicación** con el viajero, que lo visualiza a 100 kilómetros por hora y con el espectador estático que lo contempla/sentado en un banco. Esta relación dinámico-estática queda enriquecida visualmente con la **diversificación de las formas**, evitando elementos organizados monótonamente con seriación inexpresiva. [3], [4]

### **3. MORFOLOGÍA DE PANTALLAS ACÚSTICAS. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS.**

En un primer acercamiento a la hipótesis se ha incidido en la textura superficial de la pantalla acústica, en concreto en la cara interna de la misma, aquella que está expuesta de manera directa a las ondas acústicas, y que es la que de manera efectiva ejerce la función principal de la acción anti-ruido.

Se han diseñado texturas superficiales a partir de cuerpos. Se pretende evaluar como la geometría superficial de la pantalla puede incidir en el rendimiento funcional de la pantalla acústica reflectante.

En los siguientes cuadros morfológicos se exponen de manera grafica los cuerpos geométricos a utilizar en la generación de las texturas superficiales:

- Poliedros regulares
- Paralelepípedos
- Prismas
- Pirámides
- Cuerpos Geométricos Redondos
- Sólidos de revolución

Cada uno de estos cuerpos geométricos puede incidir en la superficie vertical de la pantalla acústica mediante adición, que produciría una textura cóncava, o mediante sustracción, que produciría una textura convexa. A su vez, en ambos métodos, se han considerado dos modos de presentación de los elementos geométricos en la superficie vertical, de manera regular, que genera texturas homogéneas y aleatorio que genera texturas heterogéneas. En los siguientes cuadros morfológicos se exponen de manera gráfica algunos de los cuerpos geométricos a utilizar en la generación de las texturas superficiales (ver Fig. 1).

5.1 cilindro			
	5.1.1 recto	Cónico	Cónico
		5.1.1.1 Regular	5.1.1.2 Irregular
	5.1.2 oblicuo	Cónico	Cónico
		5.1.2.1 Regular	5.1.2.2 Irregular
	5.1.3 truncado	Cónico	Cónico
		5.1.3.1 Regular	5.1.3.2 Irregular
5.2 cono			
	5.2.1 recto	Cónico	Cónico
		5.2.1.1 Regular	5.2.1.2 Irregular
	5.2.2 oblicuo	Cónico	Cónico
		5.2.2.1 Regular	5.2.2.2 Irregular
	5.2.3 truncado	Cónico	Cónico
		5.2.3.1 Regular	5.2.3.2 Irregular
6.0 esfera de revolución			
	6.1 esfera	Cónico	Cónico
		6.1.1 Regular	6.1.2 Irregular
	6.2 obsoleta	Cónico	Cónico
		6.2.1 Regular	6.2.2 Irregular
	6.3 Parabolóide	Cónico	Cónico
		6.3.1 Regular	6.3.2 Irregular
	6.4 Esferóide	Cónico	Cónico
		6.4.1 Regular	6.4.2 Irregular
	6.5 Parabolóide hiperbólico	Cónico	Cónico
		6.5.1 Regular	6.5.2 Irregular

Figura 1: Elementos geométricos

A modo de ejemplo, en la naturaleza pueden observarse numerosos polígonos regulares. Comentamos aquí algunos ejemplos curiosos. La forma tetraédrica aparece en la naturaleza en ciertas moléculas de enlace covalente. La más común de ellas es la molécula de metano ( $\text{CH}_4$ ), en la que los cuatro átomos de hidrógeno se sitúan aproximadamente en los cuatro vértices de un tetraedro regular del que el átomo de carbono es el centro. Existen también estructuras cristalinas naturales de forma tetraédrica. En el mundo de los minerales, los cristales a menudo tienen caras triangulares, cuadradas o hexagonales. Los cuasicristales hasta pueden tener caras en forma de pentágonos regulares. Los más famosos hexágonos en la naturaleza se encuentran en el reino animal. Los panales de abejas son un arreglo de hexágonos usados para almacenar miel y polen.

Tras exponer una pequeña parte de lo que podría ser una matriz generadora de soluciones físicas al problema planteado, pasamos a exponer los dos aspectos fundamentales del problema:

- Los fundamentos físicos que regirán la fase de experimentación.
- las bases generadoras de coherencia formal dentro del nuevo sistema, de esta forma, el aspecto formal de la textura superficial no será algo obtenido gracias al azar sino que estará sustentado por una base metodológica.

## 4. FUNDAMENTOS FISICOS: ACÚSTICA GEOMÉTRICA

Cuando se puede asumir que las dimensiones de los elementos de textura son mayores que la longitud de onda del sonido podemos tratar el problema en la misma forma como se analiza la luz, mediante geometría, esto se puede observar en la Figura 2.

### 4.1 Reflexión de ondas

Reflexión es el cambio dirección de un rayo o de una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. La reflexión de la luz puede ser de dos tipos dependiendo la naturaleza de la superficie de separación, especular (como en un espejo) o difusa (cuando no se conserva la imagen, pero se refleja la energía).

#### 4.1.1 Reflexión especular

Un espejo brinda el modelo más común de reflexión especular de la luz, este consiste de una capa de vidrio con un recubrimiento de metal que es donde sucede la reflexión. Los metales acentúan la reflexión suprimiendo la propagación de la onda más allá de su "profundidad de piel". La reflexión también puede ocurrir en la superficie de medios transparentes tales como el agua y el vidrio.

#### 4.1.2 Leyes de la reflexión regular

Cuando la superficie reflectante es muy lisa ocurre una reflexión de luz llamada especular o regular, para este caso las leyes de la reflexión son las siguientes:

El rayo que incide, el rayo reflejado y la normal con relación a la superficie de reflexión en el punto de incidencia, deben estar en el mismo plano (mismo medio).

El ángulo formado entre el rayo que incide y la normal es igual al ángulo que existe entre el rayo reflejado y la misma normal.

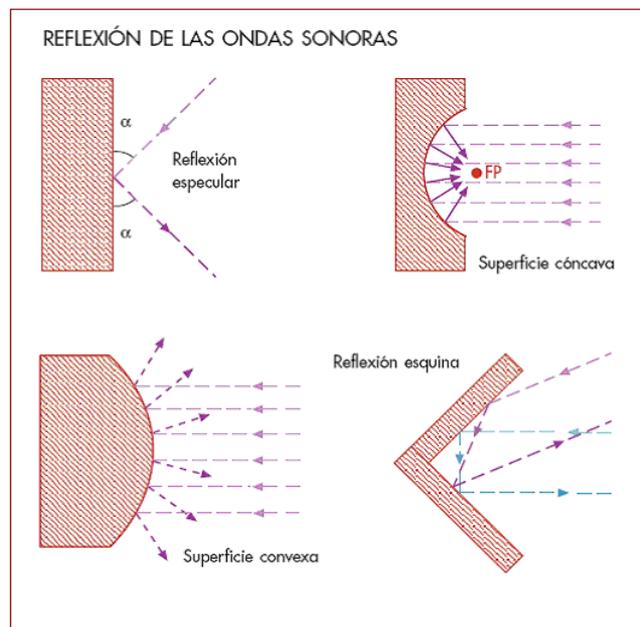


Figura 2: Reflexión de las ondas sonoras

### 4.1.3 Reflexión difusa

Cuando un haz de luz incide en una superficie áspera o granular es reflejada en todas direcciones debido a las irregularidades microscópicas de la superficie de separación y por esta razón no se forma ninguna 'imagen', a esto se le llama *reflexión difusa*. La forma exacta de la reflexión depende de la estructura de la superficie.

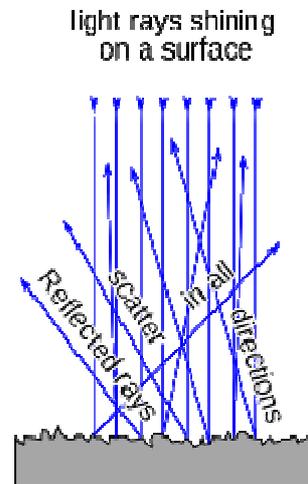


Figura 3: Reflexión difusa

Fuente:

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diffuse\\_reflecti](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diffuse_reflecti)

### 4.1.4 Retrorreflexión

La retrorreflexión es la capacidad que tienen algunas superficies que por su estructura pueden reflejar la luz de vuelta hacia la fuente, sin que importe el ángulo de incidencia original, este comportamiento se puede observar en un espejo, pero únicamente cuando éste se encuentra perpendicular a la fuente, es decir, el ángulo de incidencia es igual a 90°. Se puede construir un retrorreflector simple colocando tres espejos ordinarios de forma que todos sean perpendiculares entre sí (un reflector esquinero). La imagen que se produce es igual a la imagen producida por un espejo pero invertida. Tal como se observa en la figura, la combinación de las diferentes superficies hace que el haz de luz sea reflejado de vuelta a la fuente.

Si a una superficie se le aplica una pequeña capa de esferas reflectivas es posible obtener una superficie con una capacidad limitada de retrorreflexión. El mismo efecto se puede obtener si se dota a las superficies con una estructura similar a pequeñas pirámides (reflexión esquinera). En ambos casos, la estructura interna de la superficie refleja la luz que incide sobre ella y la envía directamente hacia la fuente.

### 4.1.5 Reflexión del sonido

Recordamos aquí que cuando una onda sonora golpea una superficie plana es reflejada de manera coherente asumiendo que el tamaño de la superficie reflectiva es lo suficientemente larga con relación a la longitud de la onda que incide. Tómese en cuenta que las ondas del sonido audible tienen un amplio rango de frecuencias (de 20 Hz hasta 17000 Hz), al igual que la longitud de onda (que puede variar de 20 mm hasta 17 m). Como resultado, se obtiene que la naturaleza en general, así como el comportamiento del fenómeno de reflexión varía de acuerdo con la estructura y la textura de las superficies de reflexión; por ejemplo, una superficie porosa tiende a absorber grandes cantidades de

energía, mientras que una superficie áspera (donde áspero es relativo a la longitud de onda) reflejará las ondas en todas direcciones dispersando la energía de la onda, en lugar de reflejar el sonido en forma coherente.

## 5. CREACIÓN DE COHERENCIA FORMAL. TEORÍA DE LA SIMETRÍA

Los proyectistas tienen diferentes armas para otorgar coherencia formal a sus diseños. Las texturas que se generan con las pantallas acústicas están sustentadas por la teoría de la simetría expuesta por Giu Bonsiepe en su libro “Teoría y práctica del diseño industrial. Elementos para una manualística crítica”, [5]. En su libro, el autor expone:

“El valor instrumental de la teoría de la simetría es dotar al proyectista de una serie de procedimientos de proyectación controlada.”

A continuación describimos algunos conceptos fundamentales.

- A. **Parte elemental:** una configuración privada en sí misma de simetría.
- B. **“Motivo elemental”:** el más pequeño reagrupamiento de partes elementales por los que se explica la repetición.
- C. **Operaciones de superposición:** movimiento en el que son sometidos los grupos elementales de modo que se superpongan por completo. Existen cuatro operaciones elementales de superposición: Traslación, Rotación, Reflexión y Dilatación.

1. **Traslación:** un desplazamiento simple y lineal de una parte elemental a lo largo de una directriz de traslación.

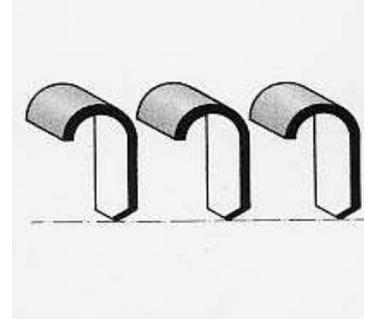


Fig. 4: Traslación.

2. **Rotación:** movimiento circular de una parte elemental alrededor de un eje.

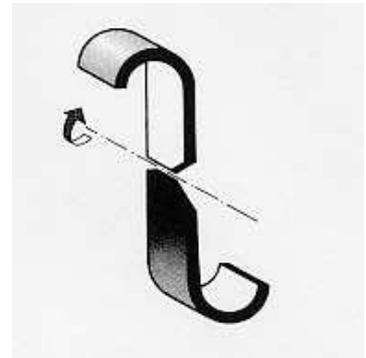


Fig. 5: Rotación.

3. **Reflexión especular:** vuelco de los datos de una parte elemental sobre un eje o un plano de reflexión.

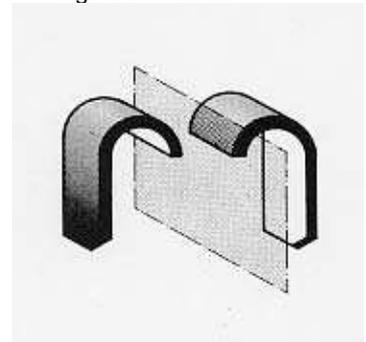


Fig.6: Reflexión especular.

4. **Dilatación:** mutación uniforme de una parte elemental desde un punto prefijado (centro de dilatación). Las configuraciones así obtenidas son semejantes entre sí.



Fig. 7: Dilatación.

Las operaciones fundamentales de simetría están emparejadas a las siguientes operaciones de superposición:

1. rotación más traslación.
2. rotación más reflexión.
3. traslación más reflexión.
4. traslación más dilatación.
5. dilatación más reflexión.
6. dilatación más rotación.
7. reflexión más dilatación más traslación.
8. dilatación más rotación más reflexión.
9. dilatación más rotación más traslación.

Si nos acercamos a la naturaleza nos encontramos con múltiples estructuras que apoyan esta teoría de la simetría y demuestran el poder generador de la misma (Figura 9):

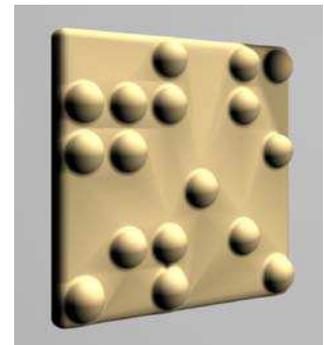
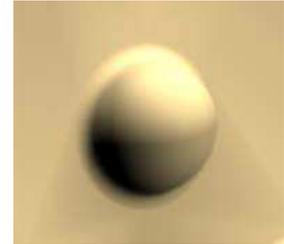


Figura 9: Simetría en la naturaleza  
Autor: Fernando Arias

## 6. APLICACIÓN DE LA HIPÓTESIS DESDE UN PUNTO DE VISTA FORMAL. LEYES DE LA SIMETRÍA.

Un primer acercamiento a las soluciones que podríamos obtener partiendo de esta teoría de la simetría:

1. **Parte elemental:** en nuestro caso las partes elementales de diseño será cualquiera de las geometrías reflejadas en la matriz generadora. En este caso utilizaremos como parte elemental la esfera y la inserción en la superficie portante será cóncava.(6.1.1)

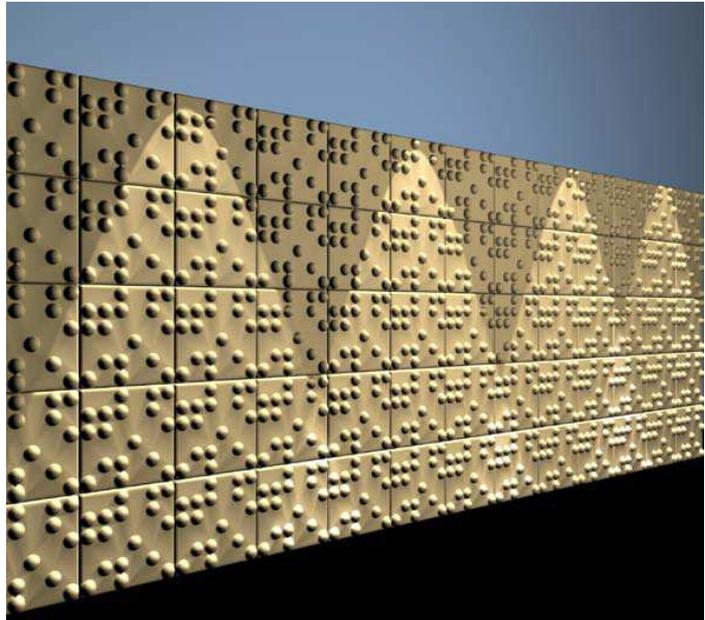
Figura 10: Parte elemental

2. **“motivo” elemental:** en el caso que nos ocupa el más pequeño reagrupamiento de partes elementales está configurado de modo que la inserción de partes elementales es aleatoria. (6.1.1.2).



Figura 11: Motivo elemental

- operaciones de superposición:** la primera textura superficial vendría dada simplemente por la operación de traslación. (6.1.1.2.).



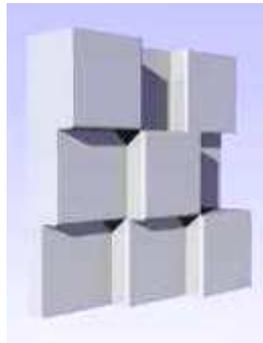
*Figura 12: Operaciones de superposición*

## **7. SISTEMA EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE LA ATENUACIÓN DEL RUIDO MEDIANTE TEXTURAS SUPERFICIALES.**

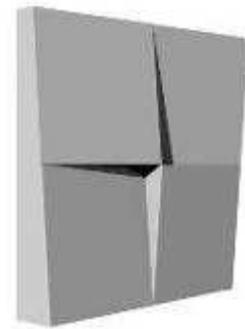
Mediante métodos informáticos, mediante modelado en 3D, se ha procedido a la prefiguración de en un primer momento de los elementos modulares que configurarán la pantalla y posteriormente se han realizado simulaciones de posibles configuraciones de los módulos en el plano vertical. En la página siguiente se muestran algunas de estas simulaciones (ver Figuras 13).



01-1.2.1.1 hexaedro regular



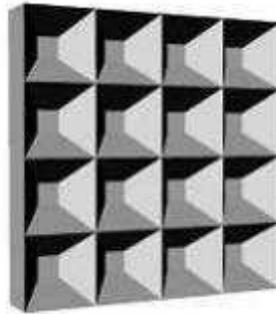
02-1.2.1.2 hexaedro



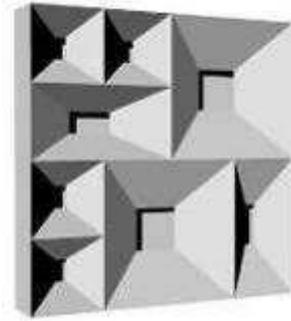
03-2.2.1.2. paralelepípedo  
oblicuo



04-3.1.1.1.1. prisma triangular



05-4.2.3.2.1. pirámide  
cuadrangular truncada reg



07-4.2.3.2.2. pirámide  
cuadrangular truncada ale

Figura 13. Simulaciones de algunos elementos modulares para los estudios de morfología de pantallas

Por lo general, el modelo visual suele ser el modelo 3d que los diseñadores manejamos, dejando las fórmulas a procesos computacionales. Esto es así, porque lo que el modelo en 3d visual representa se acerca más a la imagen en 3D final que se mostrará al “renderizarse”.

En nuestro caso desde un principio se optó por un software de modelado paramétrico, ya que se pretende, en un futuro someter a los módulos a esfuerzos similares a los producidos por el viento u otros fenómenos atmosféricos. En concreto se comenzó utilizando el programa CATIA V5 para la generación de los módulos en 3d.

Estos modelos tridimensionales una vez modelados, han de ser renderizados para que prefiguren las geometrías que se han diseñado de manera que simulen la realidad. Denominamos renderizado al proceso final de generar la imagen 2D. Esto puede ser comparado a tomar una foto. Generalmente se buscan imágenes de calidad fotorrealista, y para este fin se han desarrollado muchos métodos especiales. Las técnicas van desde las más sencillas, como el rénder de alambre (wireframe rendering), pasando por el rénder basado en polígonos, hasta las técnicas más modernas como el Scanline Rendering, el Raytracing, la radiosidad o el Mapeado de fotones.

El proceso de rénder necesita una gran capacidad de cálculo, pues requiere simular gran cantidad de procesos físicos complejos. La capacidad de cálculo se ha incrementado rápidamente a través de los años, permitiendo un grado superior de realismo en los rénders. [6]

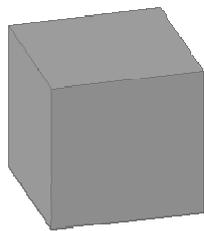
Para generar las imágenes fotorrealistas que ilustran la aproximación a la hipótesis se utilizó el software 3d Studio Max 2009. Este software utiliza las tecnologías de trazado de rayos y radiosidad para crear sofisticadas imágenes y animaciones de estructura simple. Calcula automáticamente la luz indirecta, sombras tenues y definidas, degradados de color, reflejos, translucidez, transparencia, refracción, brillo, profundidad o campo y atenuación de profundidad. Soporta multiprocesadores y procesamiento en segundo plano. [7]

A continuación se exponen algunos de los módulos diseñados junto con las texturas generadas por cada uno de ellos utilizando la teoría de la simetría expuesta por Bonsiepe G, en su libro “Teoría y práctica del diseño industrial. Elementos para una manualística crítica”. [5]

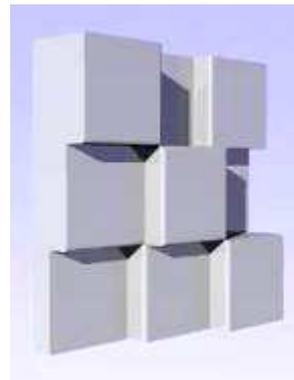
## 7.1 Infografía de motivos elementales.

### ADICIÓN

Parte elemental: **Hexaedro**



Motivo elemental: **repetición aleatoria**



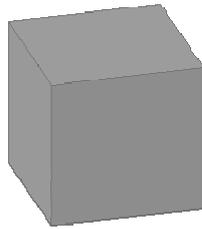
Operaciones de superposición: **Traslación.(1)**



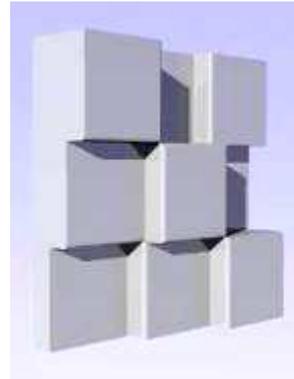
Figura 14. Cuadro explicativo de generación de texturas superficiales 1,

## ADICIÓN

Parte elemental: **Hexaedro**



Motivo elemental: **repetición aleatoria**



Operaciones de superposición: **Traslación + rotación.**(1)

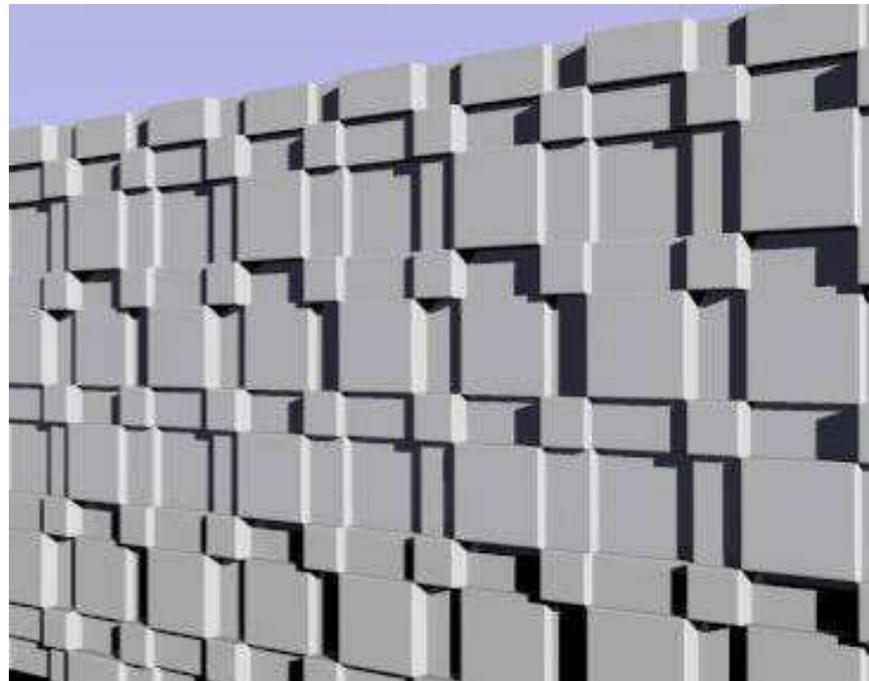
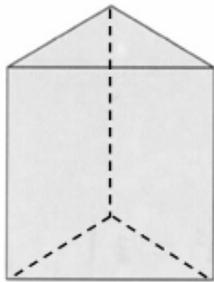


Figura 15. Cuadro explicativo de generación de texturas superficiales 2,

## ADICIÓN

Parte elemental: **prisma triangular**



Motivo elemental: **repetición aleatoria**



Operaciones de superposición: **Traslación horizontal.**(1)

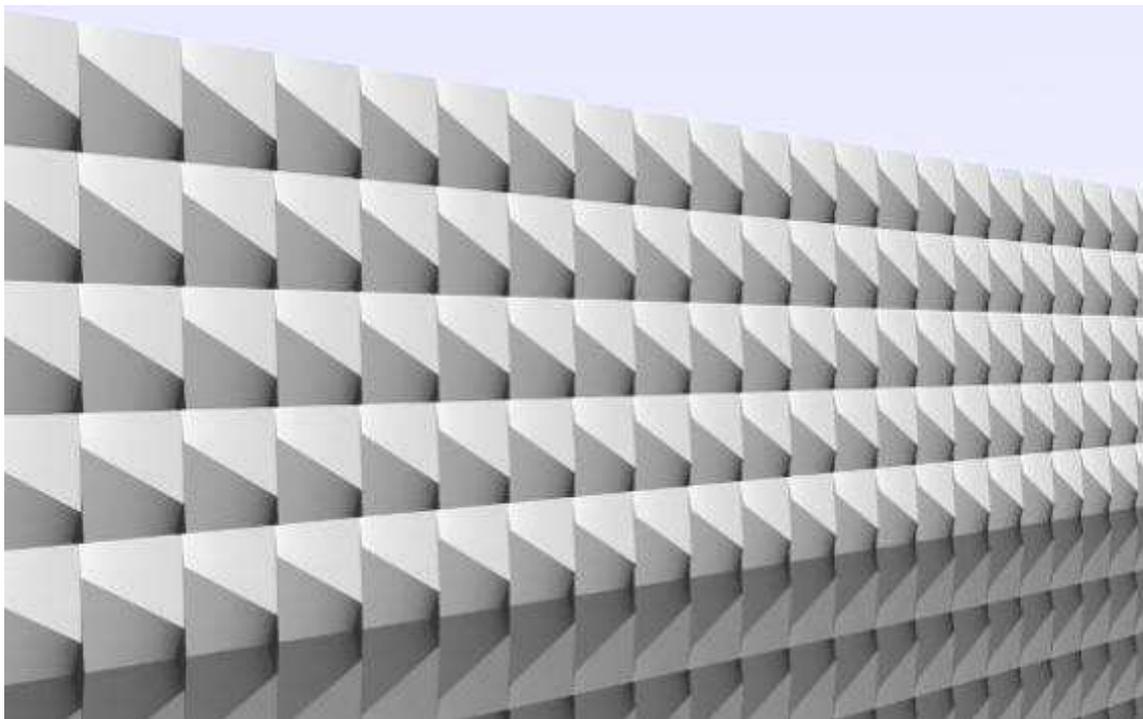
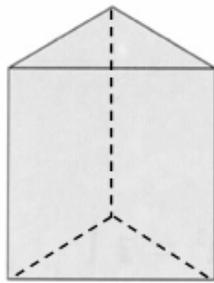


Figura 16. Cuadro explicativo de generación de texturas superficiales 3,

**ADICIÓN**

Parte elemental: **prisma triangular**



Motivo elemental: **repetición aleatoria**



Operaciones de superposición: **Traslación + rotación horizontal.**(1)

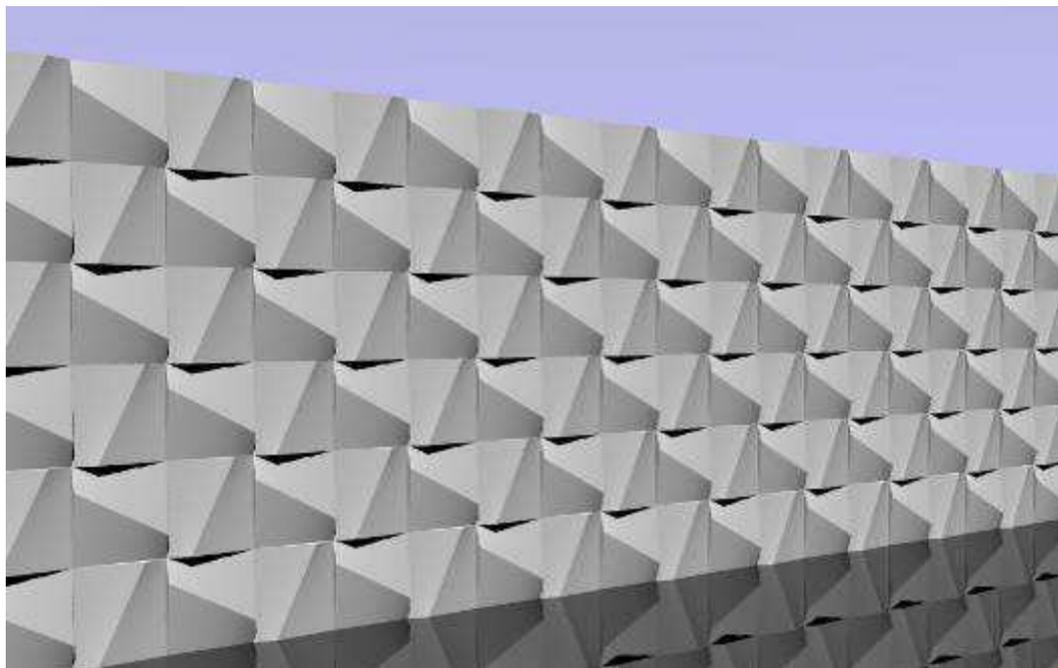


Figura 17. Cuadro explicativo de generación de texturas superficiales 4,

## 7.2 Generación de modelos volumétricos experimentales.

Método seguido para la consecución de los modelos físicos para su evaluación es el siguiente: se ha llevado a cabo la generación, mediante impresión 3D, de una primera unidad elemental de cada una de las texturas a evaluar. Para ello se han generado módulos a escala, en un principio se pensó en utilizar una escala 1:10, esta idea fue descartada ya que esta escala conllevaba la generación de módulos de 60mm de ancho por 60mm de alto y un espesor de 10mm, en algunas de las piezas se insertan geometrías que a escala real tienen 50mm, esto daba lugar, en escala 1:10 a geometrías de 5mm. Siendo estas excesivamente pequeñas para la atenuación del ruido ya que el volumen de las piezas ha de ser mayor que la longitud de onda.

Finalmente se han generado piezas mediante impresión en tres dimensiones a escala 1:5, dado lugar a piezas cuyas dimensiones máximas son: 120mm X 120mm X 20mm.

### 7.2.1 Impresoras 3D

Tradicionalmente, esta visualización se ha realizado con maquetas manufacturadas, laboriosas de producir y con un gran coste económico. Hasta hace muy poco, era impensable la idea de enviar los datos 3D generados con un programa CAD directamente a una máquina capaz de “imprimir” un modelo real por secciones horizontales, como si de una impresora doméstica se tratara. Ahora es posible.

### 7.2.2 Tecnología de impresión 3D. [8]

Las impresoras 3D utilizan dos componentes básicos para generar prototipos rápidos: un composite especial y una solución que tiene la propiedad de compactar el composite. El área de trabajo es una superficie de 250 x 350 mm, sobre la que se deja caer el composite uniformemente y, posteriormente, varios cabezales de inyección de tinta similares a los de una impresora doméstica lanzan la tinta sobre la sección del modelo a compactar. La impresora 3D “imprime” dos capas de entre 0,089 mm y 0,203 mm cada minuto hasta un máximo de 20 cm de altura (el tamaño máximo de la cubeta).

Cuando ha terminado la impresión y el modelo está completo, el composite sobrante se aspira y se recicla para futuros usos, dejando el modelo limpio y libre de residuos. En este estadio del proceso, la pieza es todavía frágil y debe manipularse con cuidado. Para darle el acabado final, es necesario infiltrarla en uno de los distintos infiltrantes adhesivos especiales, que incrementan la dureza y resistencia de la pieza del prototipo hasta que éste puede ser manipulado sin ningún tipo de precaución especial.



Figura 18: Impresoras 3d

<http://www.foro-cualquiera.com/informes-frikis/55423-impresora-3d-una-gran-revolucion.html>

En nuestro caso se ha utilizado la impresora en 3d, Dimension SST, esta impresora produce modelos ABS de alta calidad. Además cuenta con un proceso automático de extracción de soportes.

Para poder funcionar, esta impresora incorpora el software Catalyst, este importa automáticamente los archivos STL, generados mediante software de modelado en tres dimensiones, orienta la pieza, divide el archivo, genera estructuras de soporte (si es necesario) y crea una ruta de ingreso precisa para fabricar el modelo ABS. Catalyst ofrece capacidades de gestión de colas e información sobre el tiempo de trabajo, el estado del material y el estado del sistema. [9]

La impresora Dimension 768 utiliza plástico ABS duradero que permite probar modelos 3D para testear funcionalidad, forma y ensamble. Los modelos de la Dimension SST incluyen toda la funcionalidad de los modelos de la BST pero incorporan un sistema automático de limpieza de soporte soluble, con lo que da mayor comodidad en el proceso de diseño reduciendo tiempo de ingeniería y posibilitando el desarrollo de prototipos con geometría más complejas. [10]

Esta impresora dispone de un ÁREA de construcción de Tamaño máximo 203 x 203 x 305 mm. El Espesor de la capa es de 0,245 mm (0,010 pulgadas) o 0,33 mm (0,013 pulgadas) de material ABS y de soporte depositados con precisión. [10]

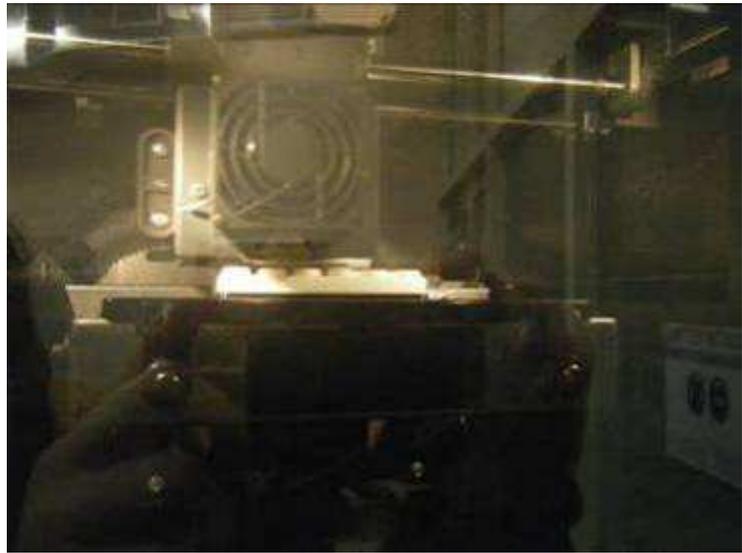


Figura 20: Impresora Dimension SST 768 trabajando en una de las piezas.

A continuación se muestran algunas de nuestras piezas obtenidas mediante la impresión 3D:

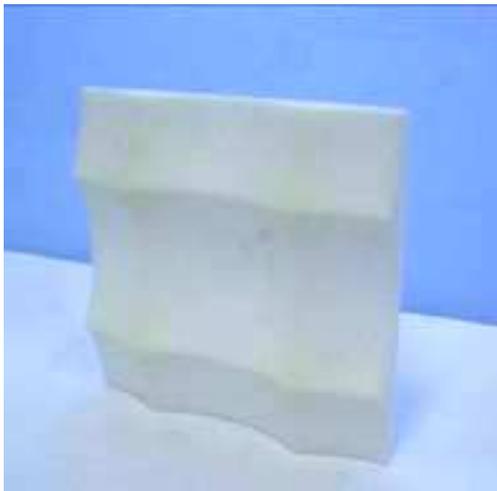


Figura 21: Pieza impresa.

55.-6.3.2.1. paraboloide sustracción



Figura 22: Pieza impresa.

2.- Hexaedro inserción aleatoria. 1.2.1.2. Adición

### 7.2.3 Método para la réplica de las unidades elementales. [11]

Para la consecución de las replicas se están generados moldes en silicona de cada una de las unidades elementales.

Los moldes de Silicona son sistemas de dos componentes (base más catalizador: A+B). Las siliconas para la reproducción de originales están disponibles en diferentes durezas. La utilización de silicona conlleva las siguientes ventajas:

- La Silicona tiene las mejores **propiedades para el desmolde** que todos los moldes elásticos.
- No se necesita spray desmoldeante.
- Silicona presenta **una resistencia química muy buena y resistencia a altas temperaturas.**

La combinación de buenas propiedades para el desmoldeo y resistencia al calor hace que silicona sea la mejor opción para llenado de resinas.



Figura 23: molde en silicona junto con las pieza impresa que reproduce.

#### 7.2.4 Reproducciones por colada. [11]

La colada de un material consiste en el vertido de un producto en estado fluido dentro de un contenedor con una forma determinada, en nuestro caso un molde en silicona.

Nosotros hemos utilizado resina de poliéster para realizar las reproducciones. Este compuesto está constituido por un monómero, estireno, y cadenas de poliéster.

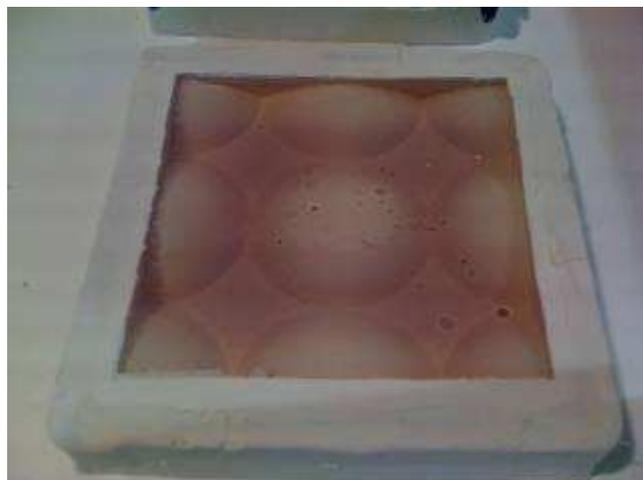


Figura 23: molde en silicona durante el proceso de catalización.

Lo más frecuente es utilizar resina pre-acelerada, como es nuestro caso, con lo que solo es necesario añadir el catalizador para provocar la reacción que ayude a solidificar dicha resina.

La mezcla adecuada de la resina con los productos se mantiene líquida durante unos minutos y después comienza un proceso inmediato de endurecimiento, que es la gelificación. A partir de este momento, la temperatura del compuesto se eleva, incluso por encima de 100° C, sobre todo en zonas de gran espesor. Esta fase de endurecimiento se mantiene, durante unos minutos, durante los cuales la resina puede tener un retiro de

entre 3% y 7%. Una vez transcurrido este periodo, que permite el endurecimiento apto para la separación del molde del modelo, se inicia la fase de maduración, que puede ser de horas y hasta varios días, alcanzando así la plena dureza resistencia química y estabilidad. Estas tres fases, gelificación, endurecimiento y maduración, suponen lo que se conoce como reacción de curado.

Mediante este método se han generado de cada una de las unidades elementales, 9 piezas, un total de 216 piezas, para proceder a su posterior configuración en pantallas anti-ruido a escala.

A continuación se muestran imágenes de algunas pantallas obtenidas que serán sometidas a ensayo en laboratorio.



Figura 24: Modelo a escala.

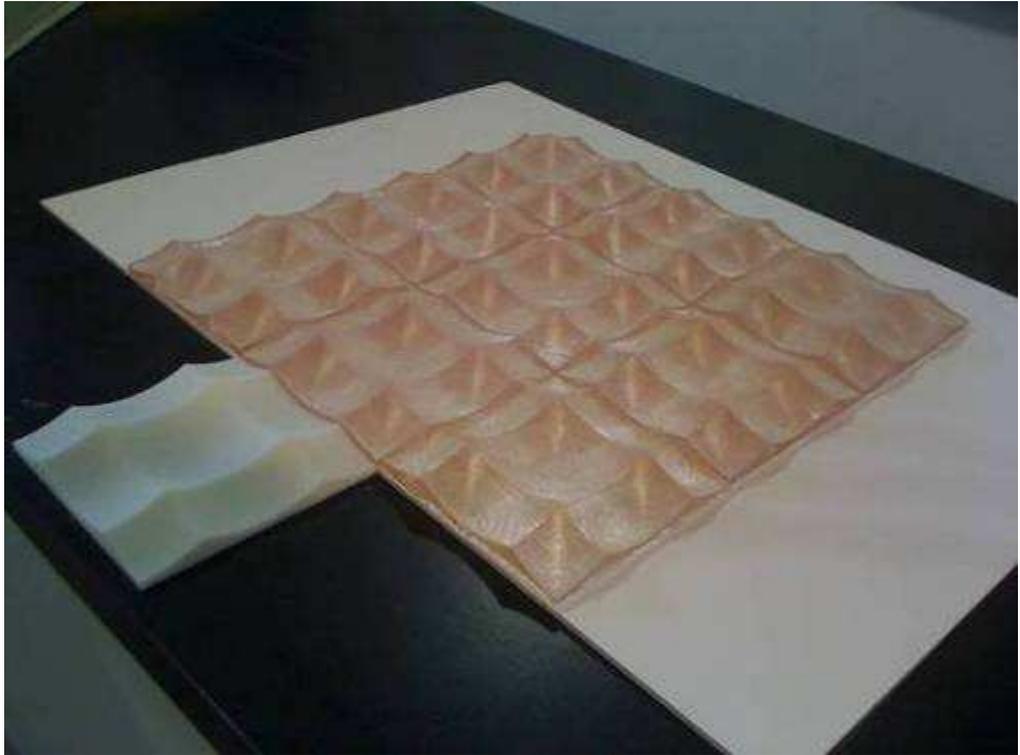


Figura 25: Modelo a escala.



Figura 26: Modelo a escala.

## 8. EVALUACIÓN.

### 8.1 Evaluación funcional.

Tras la obtención del modelo a escala ha comenzado a realizar el ensayo en laboratorio para evaluar la capacidad de atención acústica de cada una de las geometrías.

#### 8.1.1 Metodología del ensayo.

Se están llevando a cabo en las instalaciones de la universidad Alfonso X El Sabio mediciones utilizando 24 unidades elementales diferentes.

La campaña de ensayos prevista está compuesta por 24 unidades elementales diferentes a partir de las cuales, dependiendo de su geometría, se generarán entre 1 y 4 texturas diferentes, que están siendo sometidas a ensayo en laboratorio. Gracias a las leyes de la simetría [11], estas 24 unidades elementales dan lugar a 29 tipologías de texturas superficiales.

Se someterá al modelo a una fuente fija de sonido, y mediante la medición con sonómetros, las geometrías diseñadas están siendo sometidas a un espectro de frecuencias comprendido entre 0 y 500Hz, siendo las geometrías elegidas el espectro del ruido de tráfico rodado, que se define en la parte tercera de la Norma ISO-354.

Para poder llevar a cabo este estudio se está haciendo uso del sistema experimental diseñado expresamente para llevar a cabo el proyecto de investigación “ESTUDIO DE LA DIFRACCIÓN EN EL BORDE DE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS. VARIACIÓN DE LA EFICACIA DE LA PANTALLA EN FUNCIÓN DE SU SECCIÓN TRANSVERSAL”. [12]

Este sistema está compuesto por:

- Caja anecoica de dimensiones totales 50 x 50 x 52, esta dispone de una cara abierta donde dispondremos cada uno de los 29 modelos distintos de textura superficial ubicados de manera perpendicular al suelo.
- Dispositivo electroacústico: Se ha utilizado un altavoz profesional, conectado a un equipo de sonido, con objeto de simular una fuente de ruido puntual. De este modo reproducimos las frecuencias mencionadas mediante.



Figura 27: Altavoz profesional.

- Sonómetros: se están utilizando dos sonómetros, tipo T-1 cuya finalidad es medir la atenuación acústica. El primero de ellos se colocará en el exterior de la caja

acústica, de tal manera que quede orientado hacia la fuente fija de sonido, el altavoz, al nivel del suelo de la caja acústica y centrado con respecto a la misma. El segundo sonómetro se colocará en el interior de la caja acústica, en la parte trasera de la misma, y del mismo modo orientado hacia la fuente de sonido y centrado con respecto a la caja acústica.



Figura 28: Sonómetro tipo T-1.

La diferencia entre las lecturas de los dos sonómetros nos indica la atenuación producida por la pantalla para cada una de las frecuencias emitidas.

El valor de la atenuación obtenida está íntimamente ligado al lugar en el que se realizan los estudios, ya que las reflexiones del sonido en las paredes y techo del laboratorio afectan a la lectura de los sonómetros. De esta manera, los valores obtenidos no pueden ser entendidos como valores absolutos de la atenuación acústica de la pantalla, pero sí que pueden ser objeto de un estudio comparativo de atenuación en función de la frecuencia, si las condiciones de los ensayos han resultado ser las mismas. [13]

### 8.1.2 Resultados experimentales.

Las texturas están siendo sometidas a las siguientes frecuencias concretas: 63 Hz, 100 Hz, 160 Hz, 250 Hz, 400 Hz, 630 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz, 5000 Hz. Además se están desarrollando de tal manera que se hagan midiendo 80dB +/- 1dB en el sonómetro exterior.

A continuación, a modo ilustrativo, mostramos las tablas y gráficos obtenidos en algunos de los ensayos.

Tabla I: Resultados de experimentales de la atenuación acústica de 7.1.2.1. Superficie reglada adición-sustracción.



26.1 7.1.2.1. Superficie	Sonómetro 1 fuera	Sonómetro 2 dentro	Atenuación media
63 Hz	79,80	63,50	16,30
100 Hz	80,30	69,60	10,70
160 Hz	80,20	67,90	12,30
250 Hz	79,90	53,80	26,10
400 Hz	80,10	55,50	24,60
630 Hz	80,20	66,50	13,70
1000 Hz	79,90	74,50	5,40
1500 Hz	80,00	60,60	19,40
2000 Hz	80,20	64,10	16,10
3000 Hz	80,10	53,90	26,20
4000 Hz	80,00	62,70	17,30
5000 Hz	80,00	62,10	17,90

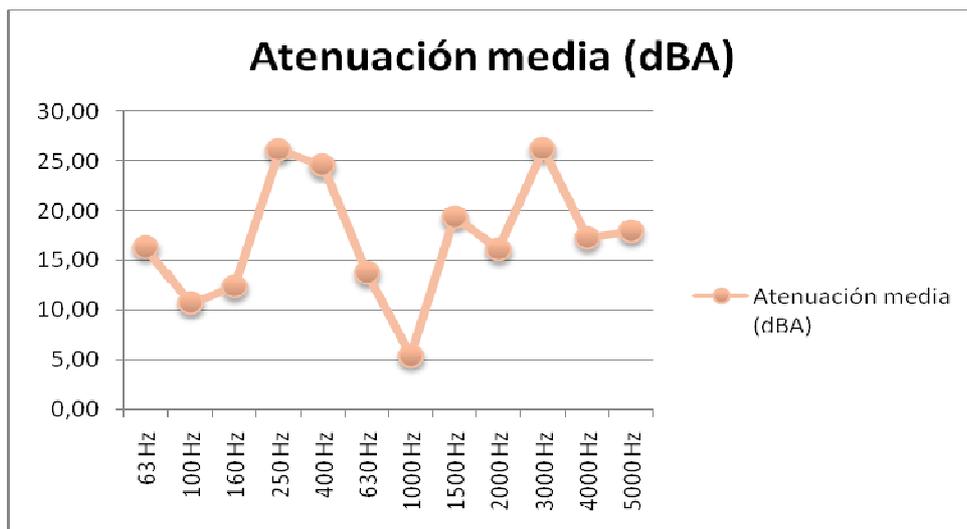
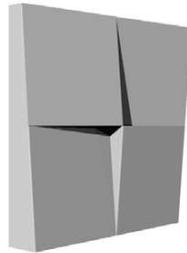


Figura 29: Representación grafica de los resultados

En el gráfico anterior puede observarse que la atenuación máxima media, obtenida por la unidad elemental representada cuando esta, está dispuesta sobre la superficie vertical mediante la operación de superposición de traslación + rotación, se produce en las frecuencias de 250Hz y 3000Hz.



04.1 2.2.1.2.	Sonómetro 1 fuera	Sonómetro 2 dentro	Atenuación media (dBA)
63 Hz	80,20	65,70	14,50
100 Hz	80,10	69,10	11,00
160 Hz	80,00	70,40	9,60
250 Hz	80,10	55,20	24,90
400 Hz	80,10	60,30	19,80
630 Hz	80,00	59,60	20,40
1000 Hz	80,10	75,10	5,00
1500 Hz	80,20	63,30	16,90
2000 Hz	80,00	60,70	19,30
3000 Hz	80,00	55,60	24,40
4000 Hz	80,10	61,10	19,00
5000 Hz	80,00	59,10	20,90

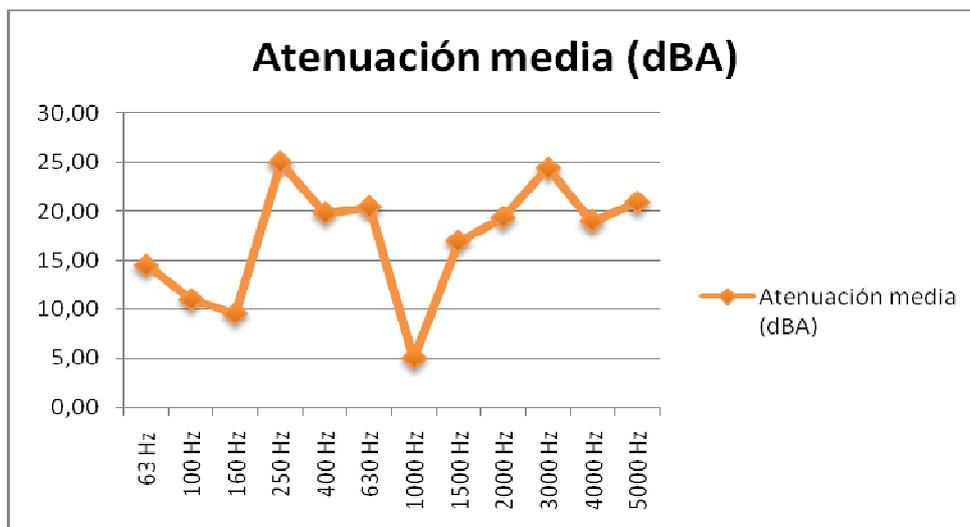


Figura 30: Representación grafica de los resultados

Esta manera de proceder se está repitiendo sobre todas las unidades elementales dispuestas mediante las operaciones de superposición traslación tanto vertical como horizontal y de traslación + rotación tanto vertical como horizontal.

## 8.2 Meta-funciones.

A su vez se evaluarán los modelos desde el punto de vista estético, para ello se expondrán unas especificaciones de diseño, de manera que posibiliten su evaluación. Para evaluar estéticamente las mismas se llevarán a cabo técnicas de evaluación multicriterio tomando como base el listado de meta-funciones que todo producto ha de contemplar.

Algunas funciones prácticas por su uso extendido en muchos objetos y por ser consideradas como valores positivos merecen el calificativo de "metafunciones":

- seguridad
- funcionalidad evidente (función indicativa)
- limitación de los márgenes de error
- comodidad en la manipulación
- estorbo limitado
- duración (opuesto a obsolescencia física)
- facilidad de limpieza
- exigencia de espacio (apilable o plegable)
- accesibilidad para el montaje de piezas
- carácter sistemático (ampliación, Intercambiabilidad, combinabilidad con otros productos)
- forma, tamaño, distribución y señalización adecuada de los mandos respeto a la normativa vigente
- reparabilidad (posibilidad de sustituir elementos)
- no dañino para el medio ambiente.

Estos son los parámetros a tener en cuenta en la evaluación estético-funcional de unidades elementales diseñadas.

### 8.3 Evaluación multi-criterio

Un último paso a desarrollar consistirá en evaluar los distintos diseños obtenidos durante la fase de generación de soluciones en base a una serie de criterios, para poder elegir la propuesta óptima.

Para poder reducir el riesgo de error en estas situaciones, la utilización de métodos y herramientas permitirá al decisor evaluar numéricamente las distintas alternativas de diseño existentes con la finalidad de ayudarlo a seleccionar la mejor de todas ellas en función de los objetivos que tengamos planteados, en nuestro caso, podríamos enunciar dos grandes objetivos:

1. la atenuación del ruido ambiental generado por el tráfico rodado.
2. La mejora de la calidad estética de la superficie interna de las pantallas acústicas instaladas en nuestros viales.

Resolviendo el problema matemático planteado se obtiene la solución, la cual, tras ser sometida a un proceso de validación, quedará dispuesta para su implantación.

Para ello utilizaremos de evaluación cuantitativas en las se mide el grado de satisfacción de los distintos criterios en una escala cardinal, permitiendo al responsable de la toma de decisiones cuantificar sus juicios de valor sobre la eficiencia de las alternativas y la importancia de los criterios en una escala de intervalos conocidos.

Se trata de una técnica basada en dotar a las alternativas y criterios de diferencias cuantificables en función de unas escalas.

1. La **valoración de los pesos de los criterios** constituye el primer paso. Esta valoración tiene como objeto representar la importancia relativa que el decisor otorga a cada criterio.
2. Una vez determinada la ponderación de los criterios, procedemos a la **valoración de cada alternativa frente a cada criterio**. Esta se traduce en el establecimiento de una correspondencia entre **el valor cualitativo que el decisor da una alternativa respecto de un criterio determinado y un valor numérico**. De este modo se consigue que la eficiencia para cada criterio se puntúe en una única escala.
3. el valor total de cada alternativa se calcula de la siguiente manera, se obtiene a partir del sumatorio del producto de la ponderación de cada criterio por la valoración de cada alternativa, unidad elemental diseñada, para cada criterio. Siendo la alternativa elegida aquella que mayor puntuación obtenga.

Con esta regla de decisión se consigue que el valor total de cada alternativa se determine más por la eficiencia de las propiedades importantes que por las de las menos importantes.

## 9. CONCLUSIONES.

Con las conclusiones que se obtengan, una vez realizada la campaña de ensayos completa, podrán hacer propuestas para la mejora del nivel de atenuación acústica al otro lado de una pantalla acústica.

Finalmente se analizará la validez del ensayo, su planteamiento y la metodología empleada en el proceso, dejando campos abiertos a nuevas investigaciones.

## 10. BIBLIOGRAFIA.

- [1] (OECD, 2001; OECD, 2003; Berglund y Lindvall, 1995; WHO, 2004).
- [2] Berglund y Lindvall. Ruido comunitario. Organización Mundial de la Salud (OMS). 1995.
- [3] Bello-Morales, Merino, A “Nuevos criterios estético funcionales de las pantallas antirruído construidas en hormigón”. CEDEX , 1989
- [4] Bello-Morales, Antonio; “Consideraciones estético-paisajísticas de las pantallas antirruído de carreteras”. Asociación Argentina de Carreteras. Buenos Aires. Asociación Argentina de Carreteras; octubre 1993. AVI CARRETERAS, n° 141, pp.39-43
- [5] Bonsiepe G,. “Teoría y práctica del diseño industrial. Elementos para una manualística crítica” Gustavo Gi, S.A. (1978)
- [6] “Definición de Modelo en 3D”, <http://www.alegsa.com.ar/Dic/modelo%20en%203d.php>
- [7] “CATIA”, <http://en.wikipedia.org/wiki/CATIA>
- [6] “Renderizado”, [http://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%A1ficos\\_3D\\_por\\_computadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%A1ficos_3D_por_computadora)
- [8] “Impresión 3D”, <http://www.foro-cualquiera.com/informes-frikis/55423-impresora-3d-una-gran-revolucion.html>
- [9] “Serie Dimension 768”, <http://www.sinardtest.com/international/ES/3d-printers/printing-productspecs768series.aspx>
- [10] “Serie Dimension 768”, <http://www.frateraguilar.blogspot.com/>
- [11] Navarro lizandra, “Maquetas, modelo y moldes: materiales y técnicas para dar forma a las ideas” Colección Treballs d’informatica i Tecnologia núm. 4. Universitat Jaume I
- [12] L. Abad, R. Magro, M. Serrano, T. García, “Diseño de una maqueta para medidas de atenuación de ruido en tráfico rodado”, Revista Tecnol@ y desarrollo / Medioambiente y desarrollo. ISSN 1696-8285.2010
- [13] M. Serrano, L. Abad, R. Magro, D. Colorado, M. Moreno, “Estudio de la difracción en el borde de las pantallas acústicas. Variación de la eficacia de la pantalla en función de su sección transversal”. Fundación Alfonso X el Sabio. 2010

## 11. AGRADECIMIENTOS.

La información que aquí se recoge son los resultados de la investigación que se está desarrollando en el marco de dos proyectos de investigación financiados por el Banco Santander / Fundación Universidad Alfonso X el Sabio, con los Nombres:

“ESTUDIO DE LOS FACTORES ASOCIADOS A LA ATENUACIÓN DEL SONIDO MEDIANTE BARRERAS ACÚSTICAS: DENSIDADES Y ESPESORES VARIABLES EN LAS PANTALLAS DE HORMIGÓN. DIFRACCIÓN EN EL BORDE SUPERIOR DE LAS PANTALLAS Y ESTUDIOS MORFOLÓGICOS EN PANTALLAS ACÚSTICAS DISPERSAS MEDIANTE REDES MODULARES”

“MORFOLOGÍA DE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS. ESTUDIOS DE DIFRACCIÓN EN EL BORDE DE LA PANTALLA”