

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ZAMORA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y AGRONOMÍA
ÁREA DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA METALÚRGICA

INGENIERÍA DE MATERIALES



PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE MATERIALES CERÁMICOS FABRICADOS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN

AUTOR: DIEGO VICENTE BENITO

DIRECTORA: NATIVIDAD ANTÓN IGLESIAS

FECHA DE ADJUDICACIÓN: FEBRERO 2012

FECHA DE PRESENTACIÓN: SEPTIEMBRE 2012



INDICE

1.	RESUMEN	4
2.	ABSTRACT	5
3.	OBJETIVOS	6
I.	TÉCNICA ACÚSTICA Y PROCESADO DE MATERIALES	7
4.	TÉCNICA DE LA ACÚSTICA DE MATERIALES	8
4.1.	<i>Acústica</i>	8
4.2.	<i>Materiales acústicos</i>	20
4.2.1.	Propiedades específicas	20
4.2.2.	Clasificación	25
4.2.3.	Curva del coeficiente de absorción lineal idealizada	34
4.2.4.	Introducción a los modelos de los materiales acústicos	36
4.3.	<i>Aislantes y absorbentes acústicos: cerámicas convencionales</i>	37
4.4.	<i>Materiales reciclados</i>	42
4.4.1.	Introducción	42
4.4.2.	Tipos de materiales reciclados	44
4.4.3.	Materiales acústicos reciclados	46
4.4.4.	Reciclado de cerámicas	48
4.4.5.	Referencia de uso en materiales acústicos	50
5.	TÉCNICAS DE PROCESADO EN CERÁMICAS	51
5.1.	<i>Etapas de proceso</i>	51
5.1.1.	Tecnología de polvos	51
5.1.2.	Moldeo y preconsolidación	52
5.1.3.	Sinterizado y consolidación	56
5.2.	<i>Cerámicas convencionales</i>	60
5.2.1.	Fabricación de ladrillos, tejas, y baldosas	60
5.2.2.	Reactividad de cementos y yesos	60
5.3.	<i>Cerámicas recicladas</i>	61
5.3.1.	Molienda	61



5.3.2.	Conformado húmedo, y plástico	62
5.3.3.	Proceso STARCH	62
5.3.4.	Secado	63
5.3.5.	Sinterización	63
II.	MODELOS MATEMÁTICOS	65
6.	INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS	66
7.	MODELOS ACÚSTICOS	67
7.1.	<i>Modelo o ecuaciones de Biot</i>	67
7.1.1.	Modelo de Johnson-Champoux-Allard	73
7.1.2.	Ecuaciones de Delany – Bazley	76
7.2.	<i>Modelo para materiales densos: Ley de la masa</i>	77
7.3.	<i>Modelos acústicos intrínsecos</i>	78
8.	MÓDULO DE WEIBULL: ESTUDIO DE FIABILIDAD	82
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	85
9.	MATERIALES	86
9.1.	<i>Origen de muestras</i>	86
9.2.	<i>Probetas de materiales convencionales</i>	86
9.2.1.	Características	86
9.2.2.	Corte y acondicionamiento superficial de muestras	91
9.3.	<i>Probetas de materiales reciclados</i>	94
9.3.1.	Características	94
9.3.2.	Acondicionamiento de las probetas de hormigón procedente de un ensayo de compresión	95
9.3.3.	Procesado de probetas a partir de residuos de ladrillo	97
9.3.4.	Caracterización previa de las probetas	101
10.	MÉTODOS	106
10.1.	<i>Método de ensayo mediante tubo de impedancia acústica</i>	106
10.2.	<i>Metodología de ensayo: Aplicación</i>	109
10.2.1.	Acondicionamiento de las muestras para el ensayo de impedancia	111



IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	114
11.	INTRODUCCIÓN	115
12.	DENSIDAD DE LAS MUESTRAS	115
13.	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN LINEAL DE LAS MUESTRAS	123
14.	IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECIFICA DE LAS MUESTRAS	135
15.	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE WEIBULL: COEFICIENTE DE ABSORCIÓN	141
16.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELO DE DELANY-BAZLEY	149
16.1.	<i>Resultados de la resistencia al flujo estático del aire</i>	155
17.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELO DE JOHNSON-CHAMPOUX-ALLARD: OBTENCIÓN DE PROPIEDADES DE DISEÑO	156
18.	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS INTRÍNSECAS	163
19.	TABLA RESUMEN	173
V.	CONCLUSIONES	174
VI.	ANEXO	176
VII.	REFERENCIAS	186
20.	BIBLIOGRAFÍA	187
21.	ÍNDICE DE FIGURAS	195
22.	ÍNDICE DE GRÁFICAS	197
23.	ÍNDICE DE TABLAS	199



1. Resumen

Los materiales obtenidos a partir de residuos de construcción, permiten la incorporación de materia que se gestiona parcialmente en la actualidad. La aplicación de estos residuos, se ha ido incorporando a los procesos de fabricación de materiales, en diversos campos. En el caso de los materiales destinados al acondicionamiento acústico, se emplean los residuos de polímeros, y textiles de una forma extendida; por lo que estudiar la posible incorporación de materiales cerámicos reciclados es el objetivo fundamental de este estudio. La existencia de datos acústicos sobre los materiales convencionales, se centran en las propiedades de aplicación para acondicionamiento, sin embargo las características de diseño son limitadas. De tal forma, el estudio de algunos materiales convencionales señalados (ladrillos ordinario, y caravista), se realizó junto con los materiales fabricados a partir de residuos de construcción que se caracterizan en este proyecto (hormigón, y ladrillo), ambos para obtener piezas sinterizadas. Con ello se ha realizado la comparación de propiedades en tres líneas. Por un lado las propiedades empleadas en la técnica para realizar el acondicionamiento acústico, de otra parte los parámetros que influyen en el comportamiento acústico del material, y finalmente; extendiendo la funcionalidad del equipo principal empleado, la medida de propiedades elásticas. La información que desprenden los ensayos, se ha tratado mediante modelos físicos para obtener una visión del estado actual de los materiales cerámicos reciclados, definir las posibilidades de mejora, y finalmente incorporar nuevos métodos para estudiar propiedades derivadas de la acústica; y disponer de una visión del estado actual de estas técnicas innovadoras. Las características y mecanismos del comportamiento acústico de los materiales analizados, son principalmente absorbentes del sonido; haciendo fundamental el estudio detallado de la poroelasticidad de materiales.



2. Abstract

The materials obtained from construction and demolition waste allow for the inclusion, of matter which is managed partially nowadays. The implementation of these waste materials has been incorporated to the manufacture of materials. In the case of those materials intended for acoustic conditioning, polymer and textile wastes are used on a widespread and systematic manner; that's why studying the possible inclusion of recycled ceramic materials is the key objective of this study. The existence of acoustic data about conventional material focuses on the properties of application for design; however, the design characteristics are limited. Thus, the study of some identified conventional materials (ordinary and face bricks) was carried out along with materials built from construction waste which are characterized in this project (concrete and brick), both of them used to obtain sintered pieces. A comparison of properties has been carried out in three lines. On one side, the properties used in the technique to make the acoustic conditioning; on another side, the parameters affecting the acoustic performance of the material and, finally, extending the functionality of the main equipment used, for the measurement of the elastic properties. The information shown by the tests has been handled, through physical patterns, to get an overview of the current status of recycled ceramic materials, to identify possibilities of improvement, and, finally, to incorporate new methods to study some properties arising from acoustics, and to have a view of these innovative techniques. The characteristics and mechanisms of the acoustic performance of the materials analyzed are mainly sound-absorbent, making the detailed study of the poroelasticity of materials essential.



3. Objetivos

En este trabajo se prestan los siguientes puntos fundamentales de estudio:

-Caracterización de propiedades acústicas: Los materiales reciclados empleados no se encontraban caracterizados. Por lo que las propiedades que regulan el comportamiento ante el sonido, han sido recogidas.

-Comparación de propiedades: Se ha realizado la toma de datos de materiales convencionales de referencia con el objetivo de profundizar en su descripción, y tener una referencia de partida, ante los materiales reciclados.

-Determinación de parámetros: Para el diseño de materiales acústicos es necesario conocer un conjunto de propiedades, que han sido extraídas mediante modelos en este proyecto. Además el comportamiento presentado de cada material queda recogido mediante modelos acústicos.

-Determinación de propiedades elásticas: El fin de este objetivo es extender, y explotar las capacidades del tubo de impedancia acústica, por lo que se ha realizado un estudio y aplicación de los métodos más innovadores para la medida de estas propiedades; mediante emisión de ondas acústicas en el espectro audible.



I. TÉCNICA ACÚSTICA Y PROCESADO DE MATERIALES



4. Técnica de la acústica de materiales

4.1. Acústica

Esta rama de la ciencia se encarga del estudio de la generación, transmisión, y recepción de energía en forma de ondas vibratorias en la materia y los efectos que dicha energía puede producir. Aunque la acústica se estudia como rama independiente es parte de la termomecánica y física de ondas. Desde la edad antigua se ha buscado el entendimiento de los fenómenos relacionados con la vibración de cuerdas y el sonido emitido, el fenómeno del eco tempranamente se atribuyó a la reflexión de las ondas acústicas, y también se descubrió la relación de las perturbaciones en el aire con la acústica. Estos aportes fueron conformando el concepto de física acústica que actualmente conocemos. Pero no sería hasta el siglo XIX, cuando Lord Raileigh publica su trabajo *The theory of sound* (1977-1978), que revisa y recopila los conocimientos en acústica presentes hasta esa época y aporta un nuevo método para medir las vibraciones acústicas; lo que marca las bases formales de la acústica del siglo XX [7, 13].

El siglo XX marco una nueva etapa de un estudio amplio y profundo en esta especialidad. El gran desarrollo fue motivado por la aparición de la electrónica, sensores y actuadores acústicos, informática, y tratamiento de señales; que incorporó métodos de ensayo y vías de estudio. Esta diversificación que experimentó la acústica hizo que se acuñara el concepto de “ingeniería acústica” para el desarrollo y aplicación de los avances desarrollados en aspectos de tratamiento de señales, y generación de ondas acústicas. Esta rama técnica queda configurada por una serie de ámbitos de desarrollo, como son [5]:

-Electroacústica: Técnica imprescindible para el tratamiento de las señales acústicas, control activo de ruido, y generación de ondas. Si no existiera la posibilidad de convertir la señal acústica en eléctrica y viceversa, las limitaciones de esta ciencia serian considerables. La electroacústica estudia las técnicas que permiten realizar la



indicada conversión y las aplica en el diseño de los transductores. Bajo la denominación de transductores electroacústicos podemos agrupar dispositivos tales como: micrófonos, altavoces, pantallas acústicas, acelerómetros, hidrófonos y transductores ultrasónicos.

-Acústica Computacional: A partir de la década de los 70, el incremento de la potencia de cálculo mediante computadora y el desarrollo de los algoritmos de cálculo numérico permitieron realizar de forma óptima simulaciones de diversos fenómenos acústicos (radiación sonora de fuentes de ruido complejas, difracción, entre otros procesos). A partir de entonces la computación se ha convertido en un método fundamental de los campos de la ingeniería acústica, como el control de ruido y vibraciones.

-Acústica Arquitectónica: Es la rama de la acústica junto con la creación de dispositivos eléctricos más extendida, y más cercana a la sociedad; por su aplicación directa a la protección de la salud. Sin embargo existe en esta parte de la ingeniería una diferenciación entre el aislamiento acústico, destinado al control de la propagación del ruido. Mientras que el acondicionamiento acústico, busca adaptar las condiciones del campo acústico en las estancias de los edificios; y en último caso conseguir la adaptación de los entornos musicales. Esta parte de la técnica, tiene relación directa con la ciencia e ingeniería de materiales, ya que fundamentalmente se basa en la obtención de elementos constructivos que adapten el campo acústico en los espacios.

-Acústica submarina: Habitualmente el fluido mas estudiado para la propagación de las ondas acústicas es el aire, sin embargo la necesidad de estudiar las profundidades marinas; facilitó que el agua fuera ampliamente estudiada como medio de propagación cuando se encontró la utilidad para la navegación, y para aplicaciones civiles y militares como el sonar.

-Acústica musical: El estudio de los instrumentos y de la emisión de los mismos requiere un análisis detallado para conseguir los principales objetivos en esta disciplina que son la fidelidad, y repetitividad en la fabricación de instrumentos. Cabe destacar que también es parte de esta área el estudio de la emisión de conjunto, y



determinación de propiedades deseables de carácter arquitectónico (Salas de conciertos, teatros, etc.).

-Psicoacústica: Es la parte de la acústica mas empírica. Estudia las reacciones de las personas cuando están sometidas a estímulos sonoros. Los resultados obtenidos son utilizados en desarrollos de audio digital, fundamentalmente dirigido a la fabricación de bienes de consumo. Las grabaciones binaurales, la codificación de alta calidad, y el audio 3D (Dolby Surround); se han mejorado gracias al conocimiento de las capacidades cognitivas acústicas del ser humano.

-Control de Ruido y Vibraciones: Esta parte de la acústica técnica es de las más recientes, debido al aumento de fuentes acústicas originadas por maquinas. Su objetivo fundamental es el control desde el punto de origen, entorno de actuación, y la identificación apropiada de dichas fuentes. El control está relacionado fundamentalmente con el ámbito medioambiental.

Para el estudio de la física de la acústica, se deben considerar una serie de definiciones, y magnitudes que son de gran importancia para comprender el comportamiento de los materiales, y la interacción con las fuentes y receptores. Los primeros fundamentos de interés y expuestos de forma resumida, buscan concretar las características de la emisión acústica, el sonido, el ruido, las características ondulatorias fundamentales, y las magnitudes que emplea esta rama de la ciencia.

La emisión acústica, es una perturbación armónica que se propaga a través del medio material, y que se origina por cambios locales en la presión p , la densidad ρ , o la velocidad relativa de las partículas del medio v . Podemos decir que esta onda vibratoria es un sonido, cuando es percibido por el oído humano; y está comprendido entre los 20 Hz y 20 kHz. Fuera de este rango las emisiones inferiores se denominan infrasonidos, y por encima ultrasonidos. De estos dos últimos rangos únicamente decir que la energía que disponen les otorga ciertas propiedades de utilidad en la técnica. En el caso de los ultrasonidos, se hará alguna mención debido a su mayor energía, y pequeña longitud de onda. El ruido se define como aquella emisión acústica



incoherente e indeseada, que en ciertos casos dificulta la interpretación del sonido [1,2].

Centrándonos en el sonido las unidades a las que está referido son de presión (Carácter termomecánico), luego la unidad es el pascal (Pa). Pero en la medición de las perturbaciones esta unidad resulta bastante grande, y la emisión del sonido no tiene un comportamiento lineal debido al margen dinámico originado por otras magnitudes (Entiéndase frecuencia, y amortiguación). Luego resulta de mayor utilidad el nivel de presión sonora (SPL).

Donde la relación de escala se describe en la ecuación 1:

$$SPL = L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) (dB) \quad E.1$$

Sabiendo que $p_0 = 2 \cdot 10^{-6} pa$, que es la presión de referencia para el umbral audible humano a la frecuencia de $1000 Hz$. De esta manera se define una nueva unidad relativa utilizada de forma generalizada que es el decibelio (dB). En esta línea también pueden expresarse la intensidad, y la potencia acústica; ya que la presión al ser una magnitud escalar no proporciona suficiente información en muchos casos de estudio. En la tabla 1 se puede ver una clasificación de la intensidad de sonidos habituales.

Nivel de intensidad del sonido	
140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto
100 dB	Taladradora eléctrica
90 dB	Trafico
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
60/50 dB	Aglomeración de gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Umbral de audición

Tabla. 1. Descripción de los niveles de intensidad del sonido, y sensación generada en el oído humano [68].



Hay que destacar la forma armónica que presenta la emisión acústica, donde la presión manifiesta la amplitud, y la velocidad de propagación se interpreta mediante la longitud de onda λ medida en (m), que es la distancia entre dos puntos idénticos en un periodo T medido en (s), tiempo necesario para producirse una onda completa. El inverso del periodo es la frecuencia f , que es el número de ciclos (ondas) por unidad de tiempo (s^{-1} ó Hz). Estas son las magnitudes básicas para caracterizar una onda, sabiendo también que el área encerrada por la onda es la energía que posee. En el caso de las ondas acústicas generalmente se describen como ondas esféricas, sin embargo se pueden desarrollar otras geometrías. En la forma más genérica la ecuación diferencial de una onda, se muestra en la ecuación 2 [71].

$$\nabla^2 \psi(\vec{r}, t) = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}(\vec{r}, t) \quad E.2$$

Como puede verse la amplitud de una onda (presión en el caso acústico) depende de la posición y el tiempo; y su carácter armónico hace que las propiedades acústicas se estudien de forma compleja en parte real e imaginaria. En el caso de la presión permite conocer el desplazamiento de la perturbación longitudinal y transversal. Para otras magnitudes acústicas también existen formas complejas.

La presión, intensidad acústicas, se relacionan únicamente cuando la onda transcurre en campo abierto, y no existen reflexiones. Luego en un punto determinado y en la dirección de propagación de la onda, queda expresada en la ecuación 3.

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho \cdot c} \quad E.3$$

Donde p_{rms} es la media cuadrática de la presión, I es el módulo de la intensidad acústica, ρ la densidad del medio donde se propaga la onda acústica, y c la velocidad de propagación de la onda en el medio. El producto de estas magnitudes da lugar al concepto de impedancia característica Z_c , siendo las unidades de la impedancia característica ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) denominada rayls. Sin embargo la acústica presenta



una forma de presentar la impedancia, y algunas variaciones para casos particulares. La impedancia acústica se define como el cociente entre la presión de la perturbación p , la velocidad de las partículas v oscilando en el medio para propagar la onda, y la superficie sobre la que se propaga perpendicularmente la onda. También se expresa en rayls [6].

$$Z = \frac{p}{v \cdot S} \quad E.4$$

Así como la impedancia característica es la interpretación de la resistencia que opone el medio a la propagación de las ondas longitudinales puras, en el caso de la impedancia acústica se tienen en cuenta la propagación longitudinal y transversal. Esta impedancia también se puede atribuir a la resistencia que oponen las superficies atravesadas Z_s . Al igual que la presión la impedancia también presenta forma compleja, el estudio de la parte real e imaginaria se realizara junto a la exposición de los materiales acústicos por su relación directa, y la facilidad de comprensión del concepto. La importancia de las magnitudes anteriormente expuestas está en la posibilidad de realizar una analogía con la ley de ohm eléctrica. Siendo esta relación, la que se puede ver en la ecuación 5.

$$v = \frac{p}{Z} = \frac{I}{p} \quad E.5$$

Donde I es la intensidad acústica expresada en (w/m^2).

Teniendo en cuenta que las ondas acústicas sufren atenuación a medida que recorren una cierta distancia. Las ondas van disminuyendo su amplitud conforme van alejándose de su punto de origen. Aunque la amplitud de las ondas decrece, su longitud de onda y su frecuencia permanecen constantes, ya que éstas dependen sólo del foco emisor. La disminución de la amplitud viene cuantificada por la Ley Cuadrática Inversa, cuya amplitud disminuye con el cuadrado de la distancia al centro donde se originan; como en los fenómenos ondulatorios (sonido y luz). Sin embargo el comportamiento con el medio produce no solo un reparto de la energía para una



superficie, como en la atenuación, también se producen pérdidas en relación con la impedancia acústica. Las ondas al atravesar un medio se exponen a la fricción entre partículas que producen pérdidas en forma de calor, o amortiguamiento de la onda directamente dependiente con las velocidades de las partículas en su oscilación y el desplazamiento de la onda. En estos procesos tiene gran importancia los fenómenos ondulatorios para acentuar las pérdidas, o en algunos casos disminuirlas[9].

Los fenómenos físicos que afectan a la propagación del sonido, se originan en prácticamente en todos los casos debido al carácter ondulatorio de las emisiones acústicas. Sin embargo el comportamiento termomecánico también influye en los mecanismos de cesión de energía con otros cuerpos. A continuación se exponen los fenómenos principales [1, 2, 3].

-Absorción: Cuando una onda sonora alcanza la superficie de otro medio, una parte de su energía se refleja, pero otra parte de ésta es absorbida por el nuevo medio. Esto se debe al acoplamiento de la onda con la estructura del material, permitiendo que la energía de la onda participe en la oscilación de las partículas que componen el material, esta energía se disipa en forma de calor. La absorción de un medio se determina de forma porcentual mediante el coeficiente de absorción lineal (es el coeficiente mas empleado, existen otros como el de Sabine que estudia la absorción en campo difuso, pero resultan más específicos a otras aplicaciones donde la superficie y geometría es predominante en la absorción como las cámaras anecoicas, salas diseñadas para que todas las superficies absorban el sonido; e impidan la reverberación). Luego el coeficiente de absorción lineal se expresa según la ecuación 6.

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} \quad E.6$$

Siendo el cociente de la intensidad acústica absorbida, y la intensidad acústica incidente. Estas magnitudes no se miden directamente, se emplea la velocidad del sonido en el medio de referencia, y la presión captada por los sensores microfónicos. De esta forma puede también expresarse únicamente en función de la presión.



Si resulta de interés comparar el coeficiente de absorción lineal en incidencia normal con respecto al de Sabine (difuso, aleatorio), para determinar con más precisión como influye el ángulo de incidencia sobre el medio y las frecuencias. En la figura 1 se puede ver la comparación de ambos coeficientes.

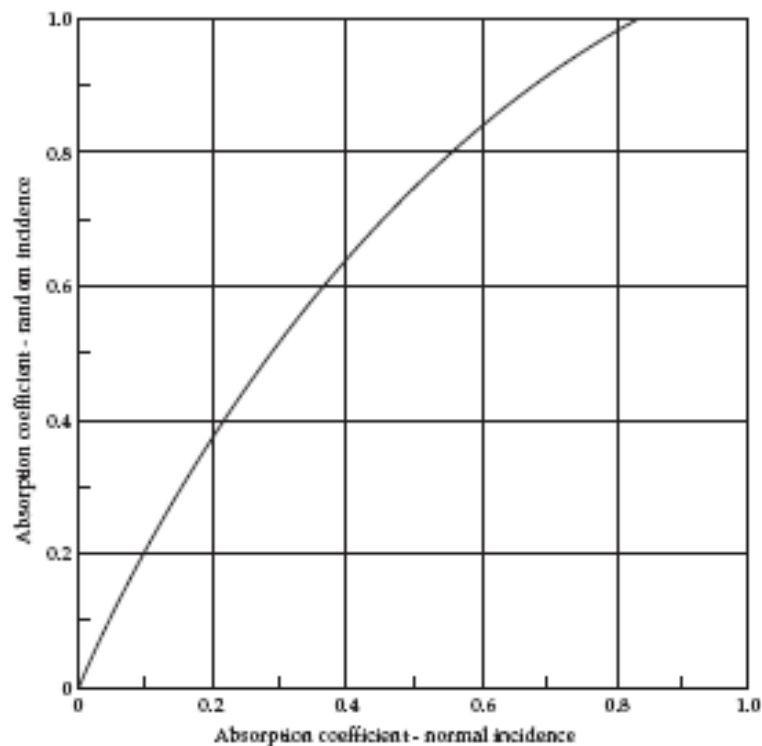


Figura. 1. Relación entre el coeficiente de absorción normal (abscisas), y el coeficiente de absorción en campo difuso (ordenadas) [8].

De la gráfica se puede comprobar que la incidencia normal es el caso más desfavorable de absorción, luego cuando se realizan ensayos en esta situación, se obtienen datos de ensayo que a nivel práctico son de gran fidelidad. Además se puede hacer el siguiente planteamiento, el coeficiente de absorción es directamente proporcional a la frecuencia, y cuando esta es elevada la diferencia entre ambos coeficientes es menor, debido a que la longitud de onda está más próxima a las dimensiones de los defectos superficiales del medio donde incide la onda.



-Reflexión: Una onda cuando alcanza un obstáculo que no puede traspasar o solo lo hace parcialmente, se refleja volviendo al medio inicial. Esta reflexión sigue la ley de Snell, y nos permite determinar qué cantidad de energía es reflejada según la frecuencia de la onda, y el ángulo de incidencia. Ecuación 7:

$$r = \frac{I_r}{I_i} \quad E.7$$

-Transmisión: El último caso posible de transferencia de energía es que la onda alcance la superficie de otro medio y sea capaz de atravesarla (Caso muy habitual en arquitectura), luego una parte de la energía se transmite al otro lado del medio. La suma de la energía reflejada, absorbida y transmitida es igual a la energía sonora incidente (original), como se puede ver en la figura 2.

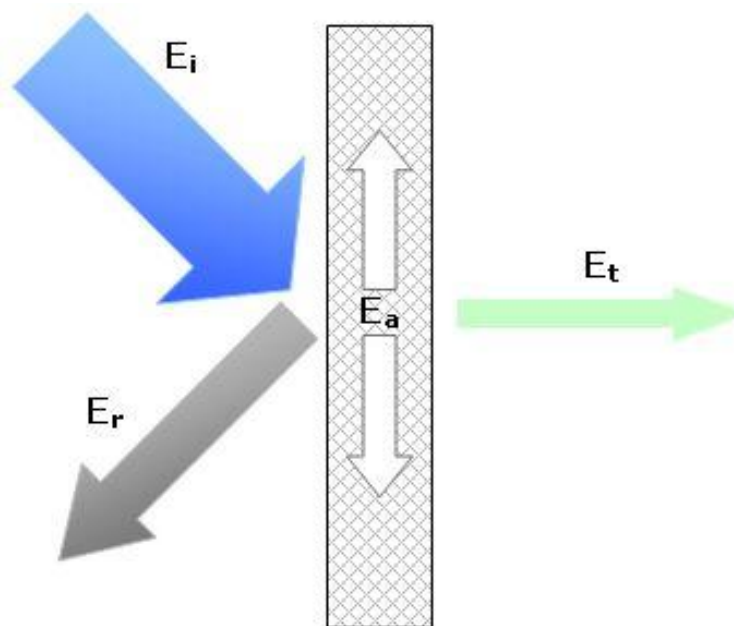


Figura. 2. Mecanismos de interacción de las ondas con el medio[66].



Luego el coeficiente de transmisión, ecuación 8:

$$t = \frac{I_t}{I_i} \quad E.8$$

Los coeficientes se relacionan todos ellos entre sí, mediante la expresión recogida en la ecuación 9:

$$r + t + \alpha = 1 \quad E.9$$

-Refracción: Es la desviación que sufren las ondas en la dirección de propagación, cuando el sonido atraviesa de un medio a otro distinto. La refracción se produce porque al cambiar de medio, cambia la velocidad de propagación del sonido.

-Dispersión (Scattering): Si la superficie donde se produce la reflexión presenta un perfil de contorno que esté relacionado con la longitud de onda (λ) de la emisión que incide, la onda reflejada no solo sigue una dirección sino que se descompone en múltiples ondas en distintas direcciones y con frecuencias menores (subarmónicos).

-Difracción: Se llama difracción al fenómeno que ocurre cuando una onda acústica se encuentra un obstáculo de dimensiones menores a su longitud de onda (λ), esta es capaz de cubrir su perímetro (rodear el obstáculo). La difracción de las ondas al atravesar orificios cambia su divergencia a esférica con el foco en el centro del orificio (Si se trata de orificios circulares).

-Reverberación: Es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido. Consistente en una prolongación temporal del sonido una vez que se ha extinguido el original, debido a las ondas reflejadas. La reflexión tiene un retardo no superior a 0.1 s ó de 34 m, que es el valor de la persistencia acústica en el aire en condiciones termodinámicas estándar. Cuando el tiempo transcurrido es mayor ya no hablamos de reverberación, sino de un fenómeno muy conocido que es el eco. En un espacio pequeño la reverberación puede resultar inapreciable, pero cuanto mayor es el volumen, mejor percibe el oído este retardo o ligera prolongación del sonido. Para determinar cómo es



la reverberación en un determinado espacio se utiliza una serie de parámetros físicos, uno de ellos es conocido como tiempo de reverberación. Conocido este valor se puede adaptar empleando sistemas absorbentes, o según el caso filtros de ciertas frecuencias.

Para el estudio acústico también hay que destacar algunas propiedades derivadas de lo visto anteriormente. Fijándonos en el caso de un sonido musical, que tiene carácter coherente, la onda de dicho sonido no resulta sencilla. Sabemos que esta varía su amplitud y frecuencia de forma rápida, y su estudio de forma global resulta muy complejo. Para estudiar la onda, se deben analizar ondas más simples que la componen, es lo que conocemos como espectro acústico de frecuencias (Los espectros son empleados en mas ramas de la ciencia, para el estudio de ondas). El espectro acústico nos permite descomponer una onda complicada, en muchas ondas sencillas con una frecuencia y amplitud bien determinada a lo largo del periodo de estudio. Estas ondas simples se acumulan según frecuencias y nivel de presión sonora, y aportan datos del comportamiento energético de la onda bajo estudio [14, 16].

El espectro permite discernir el perfil de ondas básicas (Cuadradas, diente de sierra, etc). Determinar la energía total de la emisión, el comportamiento que tienen los sonidos con respecto a la geometría, el medio, y los fenómenos ondulatorios. En la figura 3 se puede ver un espectro acústico en frecuencia habitual en el ruido blanco (Emisión sonora ponderada en todas las frecuencias a un nivel. Es ampliamente utilizado en análisis acústicos, por sus características bien determinadas) [10].

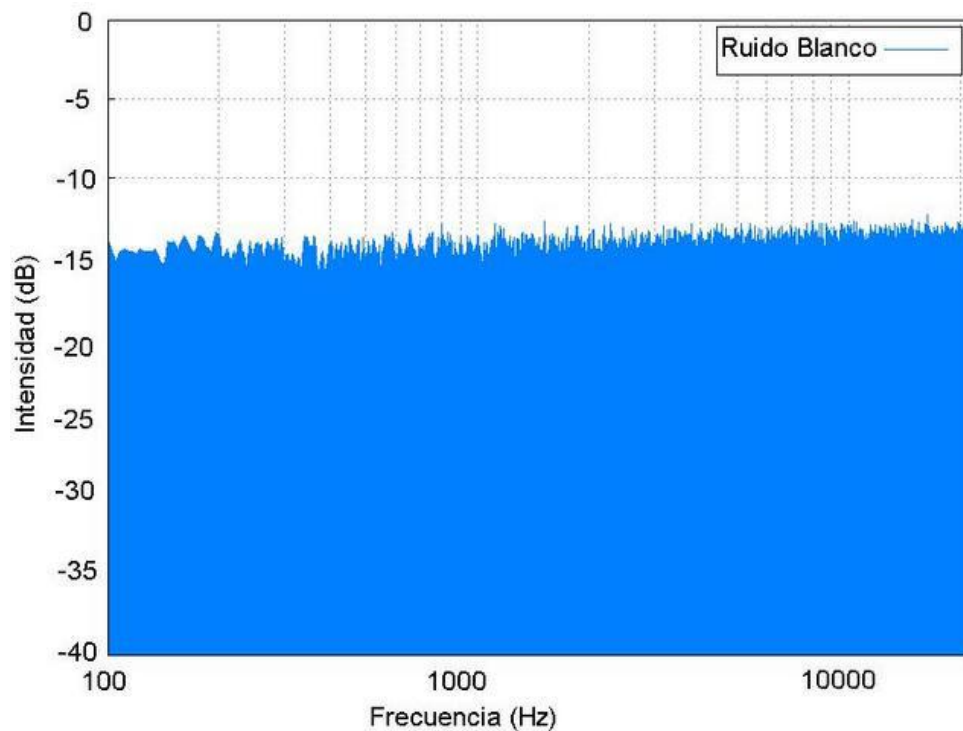


Figura. 3. Espectro que manifiesta la generación de ruido blanco en un intervalo determinado de frecuencias.

En relación con los ruidos técnicos, cabe destacar que son empleados para estudiar comparativamente el comportamiento de materiales, ó geometrías entre otros; para tener un patrón de referencia y poder estudiar la variación recogida en el ensayo. Entre los ruidos técnicos más empleados están [17].

-Tono puro: Onda sinoidal única con una frecuencia y amplitud constantes en el tiempo.

-Barrido de frecuencia: Onda sinoidal con amplitud constante, y variación de la frecuencia con un periodo determinado.

-Barrido de frecuencia equipotencial: Onda sinoidal con amplitud adaptada a la frecuencia en cada instante. Este tipo de ruido técnico se emplea para poder seguir la



adaptación de las curvas isofónicas (curvas que igualan la apreciación del oído humano en cada frecuencia).

-Ruido blanco: Onda armónica que varía su amplitud respecto un valor fijo de potencia, y la frecuencia se presenta de forma aleatoria en todo el espectro audible. Se emplea en procesos de medición en cámaras anecoicas, ya que permiten cuantificar la potencia acústica existente en el interior con gran precisión.

-Ruido rosa: Está formado por una variación de $12dB$ en todo el espectro audible, para cada octava el ruido se reduce en $3dB$, con esta procedimiento se busca que las frecuencias bajas tengan mayor importancia en el estudio. Este tipo de ruido es muy empleado en la acústica arquitectónica debido a que fomenta un estudio más detallado de aquellos sonidos que pueden propagarse aprovechando los modos de vibración de la estructura.

Como se ha indicado las octavas son una forma de medir la frecuencia en el campo musical, basado en la relación existente entre los modos fundamentales (siendo de 2 a 1). En el caso del espectro audible aproximadamente está compuesto por 10 octavas [14].

4.2. Materiales acústicos

4.2.1. Propiedades específicas

Para el estudio de la acústica de los materiales existen una serie de variables que solo se emplean en este campo, y que permiten cuantificar y definir la forma en que las ondas sonoras interactúan con el medio. Estas variables una vez estudiadas se emplean para diseñar las soluciones técnicas en las que se emplean dichos materiales [8, 13, 15, 20].



4.2.1.1. *Impedancia acústica*

Hasta ahora se indicó la relación de la impedancia con la presión y velocidad de las partículas debido a una onda. Sin embargo la impedancia acústica no solo depende del medio. En su forma compleja originada por el propio frente de onda de presión que tiene este carácter para poder definirla completamente, y la superficie del medio; terminan de definir la impedancia acústica. El frente de ondas nos indica que en un medio en el que la onda se propaga siendo plana, la impedancia acústica solo tendrá parte real, conocida como resistencia acústica específica. Sin embargo si el frente de ondas presenta otra geometría la impedancia será compleja, siendo la parte imaginaria la reactancia acústica específica. Esto es un indicador en los medios de la participación de ondas longitudinales, y transversales en la propagación. Sin embargo a nivel microscópico la impedancia acústica también tiene interpretación en algunos medios. La parte resistiva es debida al amortiguamiento de las partículas, viscosidad del medio, y a los efectos de disipación térmica. En definitiva la energía de la onda se convierte en otra energía. En el caso de la reactancia acústica, tiene cierta similitud con la capacidad que tiene el medio para almacenar energía cinética, y su posterior transformación. En el caso de los materiales porosos, donde existe un gran contenido de aire; se entiende como la explicación del valor de impedancia acústica que presentan. Respecto a su dependencia superficial, en parte está relacionada con la forma del frente de onda; pero también con la longitud de onda. Cuando existe una superficie con poca rugosidad en el orden de las longitudes de onda del sonido (medias, y altas frecuencias), se produce una reflexión elevada de la onda, debido a que la rugosidad no deforma el frente de onda en el instante que se acopla, y no genera un campo difuso que termina absorbiendo en gran parte el material. Finalmente el módulo de la impedancia nos da la resistencia que ofrece un medio a la propagación de ondas acústicas, y el argumento ó ángulo formado entre las dos componentes de la impedancia, manifiesta el desfase existente entre la presión que actúa sobre una partícula, y la velocidad de la misma [67, 69].



4.2.1.2. *Constante de propagación*

La constante de propagación también tiene carácter complejo, y se expresa de la forma siguiente según la ecuación 10:

$$\Gamma = \alpha + j \cdot \beta \quad E.10$$

Donde α es el factor de propagación, y β el factor de atenuación. Las investigaciones de Scott en 1945, basadas en el barrido de materiales expuestos a un sonido continuo, permitió conocer en mayor profundidad esta constante y el significado físico de la misma. La parte real de la constante, permite determinar el cambio de fase de la onda con respecto a la longitud de material. Mientras que la parte imaginaria permitió conocer el comportamiento exponencial de la caída de presión con el espesor, también presente esta tendencia en otros fenómenos de la física como la difusión ó la absorción óptica. Luego la importancia de esta constante de propagación es que permite conocer la variación espacial de la perturbación dentro del material. Siendo una variable interesante para algunos materiales acústicos, ya que actualmente se utiliza para determinar espesores óptimos de material para mejorar el acondicionamiento acústico (Ej. La lana de roca mejora su comportamiento cuando su espesor es $(\lambda/4)$).

4.2.1.3. *Coefficiente de reflexión complejo*

El coeficiente de reflexión depende directamente de la impedancia de los medios que forman la intercara. Luego dependiendo del cociente de estas impedancias, el coeficiente será real cuando la impedancia del medio de incidencia es menor que la del medio que genera la reflexión. El cociente formado está relacionado con un ángulo conocido como crítico en el que se produce una reflexión del 100%. Cuando el coeficiente es complejo, indica los cambios que sufre la reflexión en cuanto a la fase de la misma. En los materiales formados por láminas estas reflexiones se aprovechan para mejorar el aislamiento, en función del espesor de las capas.



4.2.1.4. *Factor de amortiguamiento*

Representa el amortiguamiento producido por la estructura del material. Siendo la relación entre la energía disipada del sistema por la transformación de la energía cinética en energía térmica, y la energía total del sistema. Las resonancias en los materiales permiten conocer la capacidad de amortiguamiento, de esta forma se puede estudiar la capacidad para atenuar ciertas frecuencias bajas.

4.2.1.5. *Porosidad*

Es la relación que existe entre el volumen de aire en el interior del material respecto del volumen total, se expresa como ϕ y es adimensional. Según sea el valor de la porosidad, y junto el valor de la tortuosidad; permite definir si el material es de celda abierta o celda cerrada (conexión entre las celdas). La gran ventaja del estudio de esta variable es que permite conocer el comportamiento resistente que puede presentar un material afectado por poros. Los poros a nivel resistente son concentradores de tensión, que facilitan la formación de fisuras. La acústica sólo permite analizar hasta un rango limitado de porosidad, pero la medición es bastante exacta, y permite un estudio bastante completo de la cantidad y distribución.

4.2.1.6. *Tortuosidad*

Es la medida geométrica de la desviación entre el camino seguido por la onda acústica y el camino directo (espesor), se expresa como α_{∞} y es adimensional. Es una forma de cuantificar en los materiales porosos y fibrosos, la disipación térmica producida en los poros. Además permite describir la geometría de los poros, para conocer en que situaciones mejora la absorción acústica. Junto a esta propiedad hay otras también muy específicas para los materiales porosos, que son las longitudes características térmica y viscosa, que permiten conocer ambos procesos de disipación; y el tamaño mínimo y máximo de los poros. También se estudia con relación a las anteriores la resistencia al flujo estático de aire. En general todas estas propiedades son muy interesantes para el estudio de la porosidad de cualquier material aunque no sea con el fin de diseñar un absorbente acústico.



4.2.1.7. Longitudes características

Estas variables expresadas como Λ y Λ' , indican el tamaño medio de los poros del material, y el tamaño de las uniones de la porosidad abierta respectivamente. Pero su importancia está en que tienen relación directa con la forma de disipar la energía acústica en el interior del material. Ya que son un indicador de cómo actúa la disipación viscosa y térmica respectivamente.

4.2.1.8. Relación del coeficiente de absorción acústica lineal, y el índice de reducción acústica compensado

Como se ha visto el coeficiente de absorción acústica es el cociente entre la energía absorbida respecto la energía incidente de una onda acústica. Sin embargo en la aplicación práctica las curvas de absorción no suelen presentarse con esta variable, utilizándose el valor de reducción. Este valor indica la reducción en decibelios que es capaz de aportar un material de un determinado espesor que limita dos espacios (permite conocer no sólo la absorción del material, también el aislamiento producido). Ahora bien el coeficiente de absorción lineal se puede expresar en función del espesor (e) en metros, para obtener la pérdida de transmisión como se puede ver en la ecuación 11 [9]:

$$PT = -100 \cdot \text{Log}(1 - \alpha) \cdot e \text{ (dB)} \quad E.11$$

Con este valor finalmente se puede obtener el índice de reducción acústica compensado R_w , debida únicamente a la absorción en el material.

$$R_w = \frac{\sum_{i=1}^n (CR(f)_i - 56 \text{ dB} - PT(f)_i)}{n_f} + 4,6 \text{ dB (dB)} \quad E.12$$

Siguiendo una banda de octavas, el coeficiente de reducción (CR) sirve para comparar todas las frecuencias de forma isoenergética, en el rango bajo-medio.



4.2.2. Clasificación

La utilización de materiales en la técnica acústica es muy amplia, debido a la cantidad de aplicaciones existentes. En el caso de materiales destinados a la fabricación de sensores, y actuadores acústicos; las propiedades son muy distintas de los materiales destinados a formar parte de un instrumento musical, o de un detalle arquitectónico. Podemos encontrar en el primer caso materiales con propiedades magnéticas muy determinadas (fundamentalmente alta densidad de flujo, para conseguir una buena respuesta en variaciones del campo eléctrico muy pequeñas), también es necesario núcleos de ferrita de alta permeabilidad magnética que es donde actúa el imán del altavoz. En el caso de los micrófonos, también exigen unos materiales muy determinados. Aunque la evolución de los sensores microfónicos ha sido muy amplia nos centraremos en los tipos más convencionales. Los micrófonos pueden construirse de modo electrodinámico, similar funcionamiento al altavoz, aunque en este caso se recogen las variaciones de la membrana por los cambios que produce en el campo magnético. Y un tipo de micrófono actualmente muy extendido es el piezoeléctrico, basado en materiales con esta propiedad como el Cuarzo ó el Titanato de Bario; que al ser sometidos a la presión acústica sufren tensiones que producen carga eléctrica que es interpretada por el traductor.

Cuando se trata de fabricar instrumentos musicales, la diversidad de materiales es aún mayor, aunque hay que destacar que en estos instrumentos no todos los materiales que se emplean tienen aplicación acústica en los mismos, siendo en muchos casos utilizados en la estructura, incluso por estética. Aunque la clasificación de instrumentos musicales es amplia, fundamentalmente los materiales con propiedades acústicas se emplean en lengüetas de instrumentos de viento (madera, metales), membranas en algunos instrumentos de percusión (polímeros), y en cuerdas (polímeros, metales). Como se puede ver en todos los casos las mencionadas propiedades acústicas, realmente son propiedades termomecánicas, basadas en las vibraciones de los materiales, o en los cambios locales de su estado de equilibrio. Por lo tanto en adelante cuando se hable de las propiedades acústicas de los materiales se trata realmente de propiedades termomecánicas adaptadas a los fenómenos



acústicos. De forma resumida las propiedades elásticas, y másicas; nos permiten conocer la velocidad del sonido en el medio estudiado. El estudio de la propagación de las ondas sonoras, se realizará de forma detallada en los modelos matemáticos que explican el comportamiento de los materiales. En el caso de los sólidos, la velocidad del sonido queda expresada según la ecuación 13.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad E.13$$

Donde E es el módulo elástico, y ρ la densidad del material. Esta es la velocidad máxima de una onda acústica que se propaga en el medio.

Sin embargo el conjunto de materiales acústicos en los que se centra este estudio son aquellos con características absorbentes ó aislantes del sonido, empleados de forma extensiva en la arquitectura y a nivel industrial. Además los materiales cerámicos por sus características de rigidez y fragilidad, se limita gran parte de su aplicación a estos campos. En la figura 4 se puede ver una clasificación [9, 16, 20] bastante extendida de los materiales acústicos destinados al apantallamiento ó acondicionamiento del campo acústico.

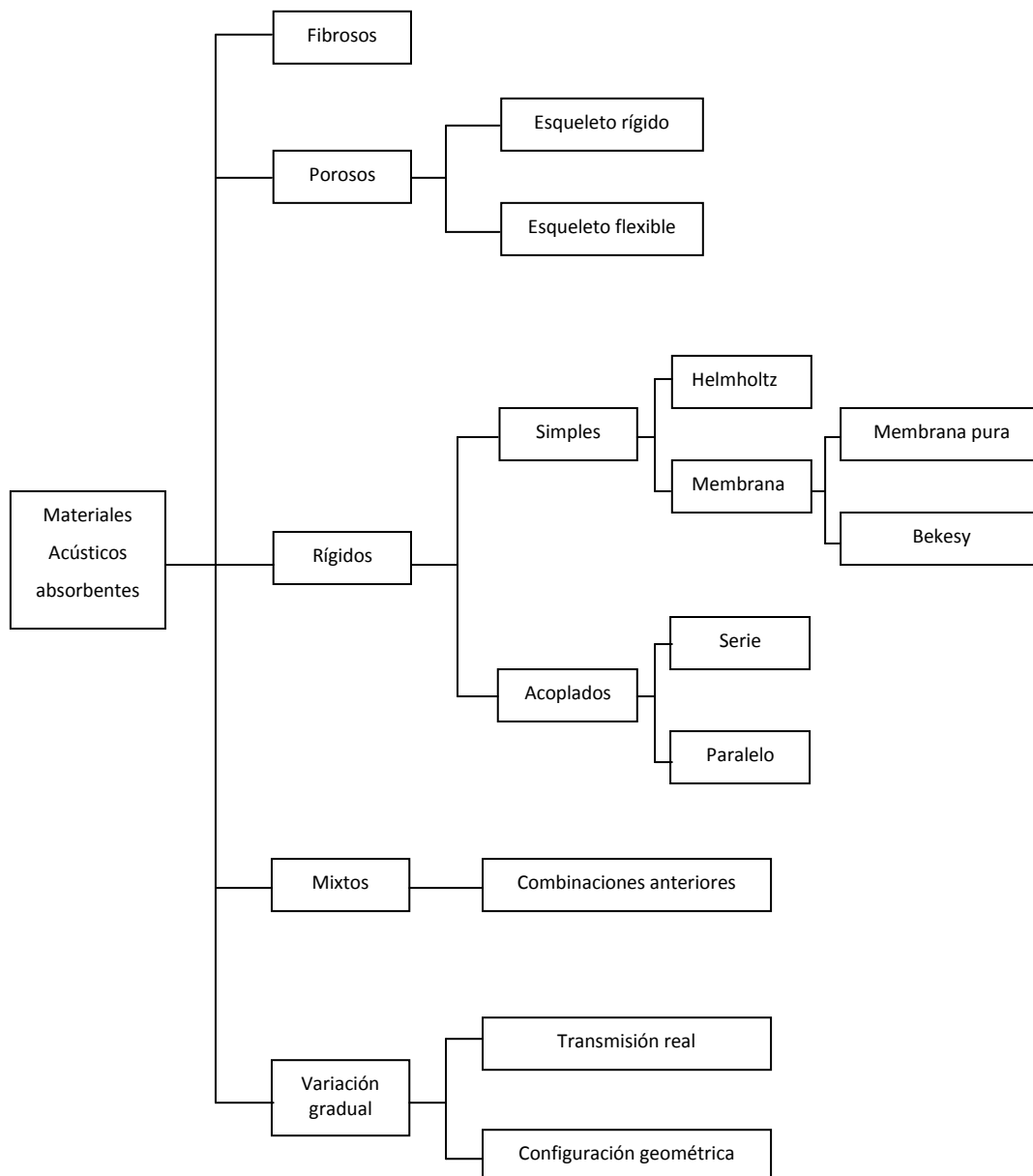


Figura. 4. Clasificación esquemática más extendida de los materiales acústicos empleados en la ingeniería.

Las características de los tipos de materiales acústicos expuestos en la figura 4, se exponen a continuación para tener un marco de las características esperadas de los materiales, y la posible manipulación que se puede hacer de estas propiedades, en el estudio posterior.



4.2.2.1. *Fibrosos*

Para alcanzar las propiedades que permitan la adaptación del sonido, estos materiales están formados por pequeñas fibras discontinuas y desordenadas que permiten la absorción acústica. El mecanismo en el que se basan estos materiales es que el conjunto de fibras originan espacios donde se aloja aire, que al verse alterado por las ondas de presión comunica la energía a las fibras que intentan vibrar, y en el contacto entre las mismas y el rozamiento del aire se produce calor; disipándose la energía acústica de esta forma. Los parámetros fundamentales que controlan el comportamiento son la densidad del material, y el diámetro de las fibras.

En cuanto a su comportamiento respecto de la absorción, la tendencia en estos materiales es que presenten una respuesta muy pobre a bajas frecuencias (hasta 200 Hz), y mejore progresivamente en las altas frecuencias obteniéndose coeficientes de absorción lineal de hasta el 90%. En algunas frecuencias altas, también alcanza frecuencias críticas que reducen la capacidad de absorción debido a que la vibración de las fibras no genera un desplazamiento suficiente en los contactos.

Existen varios tipos de materiales de estructura fibrosa pero los más extendidos a nivel de aplicación acústica son la lana de vidrio, con la que se alcanzan altos valores de absorción y con la ventaja de que es incombustible, y es un buen elemento para evitar la corrosión de los metales. Por otro lado otro material muy empleado (el más demandado en todo el mercado de la ingeniería acústica) es la lana de roca (mineral), que se obtiene de rocas basálticas y con unas características similares a las de la lana de vidrio. Ambos materiales consiguen la integridad añadiendo resinas aglutinantes a las fibras. Una ventaja que también presentan estos materiales es que tienen un excelente comportamiento como aislante térmico (ventaja también aprovechada en construcción).



4.2.2.2. Porosos

En este caso también la función principal es la absorción acústica mediante el aire contenido en los poros de la estructura. A diferencia de las fibras, estos materiales con el aumento de espesor consiguen abarcar las frecuencias bajas proporcionando mayor absorción. En las frecuencias altas el comportamiento es también muy bueno pero algo inferior a las fibras. En ciertas frecuencias altas se pueden producir aumentos puntuales de la absorción debido a que las longitudes de onda (λ), tienen el mismo tamaño que el espesor y se produce un acoplamiento que fomenta la pérdida de energía acústica en el material, debido a ondas transversales que se propagan en el plano del material. Dependiendo del comportamiento de la estructura tenemos materiales porosos, que tienen:

-Esqueleto rígido

Son materiales con una gran similitud con los de tipo fibrosos (algunas clasificaciones los junta). Muestran un buen comportamiento a frecuencias altas, pero pobre a frecuencias bajas; sin embargo, como hemos dicho mejora la absorción a bajas frecuencias con el aumento del espesor (particularmente esta estructura cuando el espesor es reducido fomenta una elevada reflexión del sonido). La estructura rígida aporta otra ventaja que es lo que caracteriza este tipo de materiales. La absorción en todas las frecuencias aumenta si existe una separación aireada posterior al material. Esto es debido a que se fomenta la propagación de ondas transversales en el material, porque la interfase material – aire se acopla con dificultad. Un ejemplo de este tipo de estructura en materiales porosos es el yeso, muy empleado actualmente en disposiciones complejas para la absorción acústica.

-Esqueleto flexible

La estructura de este tipo de material es elástica, y tanto el aire contenido como la estructura se someten a amplias vibraciones. Particularizando en las características de este esqueleto, facilita la absorción en todo el espectro con el aumento de densidad, pero presenta un límite donde pierde dichas características. Debido a su elasticidad alcanza frecuencias de resonancia con facilidad a frecuencias bajas y medias; donde



tiene mejoras de la absorción en dichas frecuencias. Y con la aplicación de diferentes densidades y capas, para formar el material controlando el espesor en función de la longitud de onda mejora mucho las propiedades absorbentes. Un ejemplo de este tipo de estructura es la vermiculita (silicatos de hierro ó magnesio) con aglutinantes.

4.2.2.3. *Rígidos*

Estos materiales al tener elevada rigidez y también una densidad media – alta, son apropiados para el aislamiento acústico debido a la facilidad para reflejar las ondas en la superficie, o generar campos de ondas difusos, que de forma global terminan absorbiendo el sonido.

-Simples

-Helmholtz

El Absorbente de Helmholtz (ó resonador) es un sistema creado artificialmente basado en una envolvente de elevada rigidez, que en su interior tiene una cavidad en la cual se aloja aire que esta comunicado con el exterior mediante un cuello estrecho. El aire del interior del absorbente se comporta como una masa resonante, y es en esa frecuencia de resonancia en la que se produce la absorción ya que la respuesta es elevada pero está centrada en una frecuencia. En lo que al material respecta, el aire y su comportamiento es lo que otorga las características, pero teniendo una gran importancia la geometría de la cavidad. El absorbente de Helmholtz, se basa en permitir la entrada de la onda de presión, y que existan múltiples reflexiones que generan en el interior un campo difuso que termina atenuándose. La principal ventaja es que permite absorciones muy altas, y se puede ajustar la frecuencia que se desea atenuar. Por este motivo en la aplicación técnica se le considera un filtro acústico.

-Membrana

Son un sistema que se basa en la transferencia de energía acústica en energía mecánica en forma de vibraciones. En una lamina de gran superficie, con elevada flexibilidad, y con una densidad alta; se consigue que la onda de presión alcance la superficie e intente reflejarse. Sin embargo la membrana debido a la flexibilidad se



deforma, y vibra con la misma frecuencia que la onda incidente. De esta manera la onda de presión reduce mucho su energía, que es aportada a la membrana; y de forma acústica la energía es absorbida. La absorción obtenida es muy alta, pero en un rango de frecuencias pequeño; aunque de gran utilidad para absorber componentes acústicas de máquinas.

-Membrana pura

El mejor sistema para una absorción elevada de las frecuencias bajas, es emplear una lámina de suficiente tamaño y un espesor de gran precisión para conseguir que los modos de vibración de la lámina sean lo más exactos al cálculo teórico, de esta manera únicamente hay que calcular el tamaño de la lámina para que se ajuste a la frecuencia deseada. También resulta de gran importancia en este sistema el apoyo de la membrana, ya que este debe ser perfectamente rígido para que cumpla con los modos de vibración, por este motivo se debe conocer bien la deformación que puede sufrir los puntos de soporte. Una desventaja de este sistema es que puede continuar vibrando por un corto periodo de tiempo, una vez que termina la excitación sonora. Por ello a nivel arquitectónico es habitual combinar este sistema con capas de material absorbente con un espacio de aire intermedio.

-Bekesy

Este modelo de membrana se descubrió a raíz de los estudios realizados por Georg von Békésy sobre la cóclea humana, en los que descubrió que las membranas fisiológicas basales dependiendo de la frecuencia se deformaban con distintas magnitudes, y esto se debía a los tejidos presentes en el centro y extremos de la membrana. Este estudio valió para que en 1961 se le concediera el premio Nobel de medicina [12].

Este concepto se adaptó a la ingeniería acústica, y se realizan membranas que tienen diferentes materiales desde el centro hacia los extremos. El modo de absorción es igual que una membrana pura pero cada material contribuye ampliando el rango de frecuencias que se pueden acondicionar. Un gran avance para este sistema fue la



aplicación de los materiales compuestos ya que facilita la fabricación y el coste es menor.

-Acoplados

Las propiedades elásticas y viscosas de los materiales se pueden aprovechar de forma combinada para controlar el nivel de oscilación de una masa vibrante. Este tipo de materiales están destinados a controlar el nivel acústico, sin adaptar las propiedades de las ondas acústicas; sino controlando la mecánica de la masa de los elementos. Es decir el objetivo es que las ondas acústicas del medio alcancen objetos y estos vibren (elasticidad), y se produzca la atenuación (viscosidad). En este sentido se emplean materiales con densidades muy diversas, y para obtener la viscosidad se emplean fundamentalmente elastómeros. La atenuación viscosa se origina por la velocidad con la que se presentan fuerzas cortantes en el material, facilitando la disipación de energía.

-Serie

Según sea el modelo seguido por el material, ó la composición geométrica de la solución técnica se obtendrá el comportamiento. Generalmente para este modelo se consigue la atenuación de las frecuencias altas debido a la “memoria” que presenta la combinación viscoelástica. Un ejemplo de este modelo se produce en las lunas de aislamiento acústico que se aporta una masa vibrante y el contorno se sujeta con espumas de caucho de etileno propileno dieno.

-Paralelo

En este caso las frecuencias bajas son las más atenuadas, ya que en cada oscilación se produce un consumo de energía debido a la viscosidad. Un ejemplo de este modelo se produce en los equipos de aire acondicionado (ruido de alta frecuencia) , donde la carcasa del equipo y el material absorbente tienen la misma geometría y están adheridos, ambos vibran en conjunto, y el material absorbente, también disipa las vibraciones.



4.2.2.4. *Mixtos*

Con el conjunto de materiales acústicos hasta ahora expuestos, se pueden realizar múltiples combinaciones como puede ser formación de membranas con materiales porosos de esqueleto rígido, o materiales porosos en los que la porosidad sigue modelos de absorbentes de Helmholtz, o los propios absorbentes de Helmholtz utilizados en combinación con materiales fibrosos. Las combinaciones son muy variadas y los patrones de absorción se pueden definir con gran precisión. Respecto a este estudio comparativo, los materiales acústicos mixtos, son de gran importancia ya que la mayor parte de materiales reciclados para estas aplicaciones toman diferentes comportamientos de absorción de los modelos habituales.

4.2.2.5. *Variación gradual*

También conocidos como absorbentes anecoicos, se basan en la adaptación progresiva de las características físicas. Uno de los problemas de la absorción es precisamente el acoplamiento de la onda de presión entre dos medios, debido a que la onda se refleja. Para evitar esta reflexión, se adapta la geometría de la superficie, junto a las propiedades del material de tal forma que la absorción puede ser del 99%. El mecanismo está basado en reducir al máximo las diferencias de impedancia superficial entre los dos medios.

-Transmisión real

Otra forma de evitar el sonido en espacios arquitectónicos es conseguir trasladar el sonido a través de un material que haga las funciones de vía y conseguir reducir la presión sonora que actúa sobre otras partes del espacio. Para ello se utilizan silenciadores de cavidad, ó estos mismos con absorbentes anecoicos. De tal forma que la onda de presión intenta buscar una vía de impedancia acústica reducida, entrando en otra zona de fuerte absorción. Esta solución técnica se utiliza mucho en conductos de ventilación y climatización en oficinas y auditorios, ya que la conexión entre espacios esta realizada desde un principio, y se busca evitar la colocación de pantallas absorbentes en los conductos para evitar las pérdidas de presión.

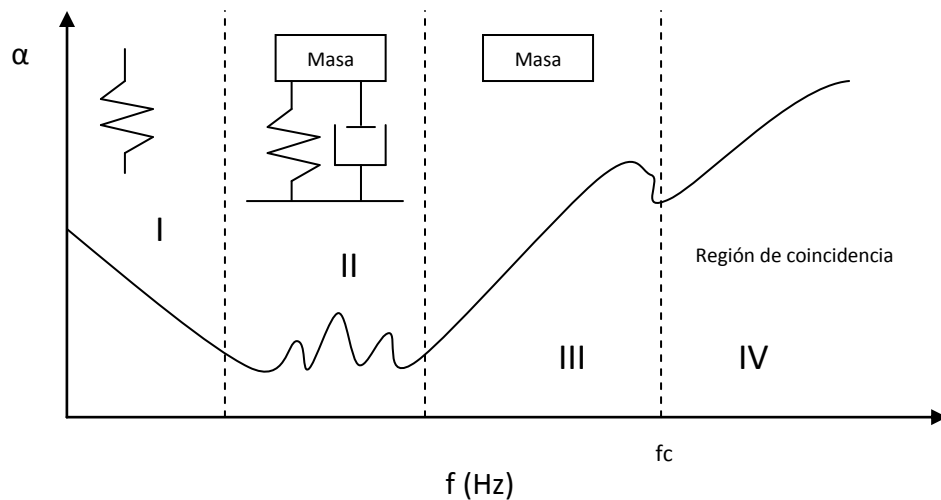


-Configuración geométrica

Entre los distintos materiales, según se realice la geometría del mismo las propiedades pueden mejorar ó empeorar, para conseguir la mejora no sirve solo una geometría apropiada también depende del material empleado. Un ejemplo sería un panel perforado, si se emplea un material con cierta rigidez se obtiene un aumento de la absorción. Sin embargo si este material es poroso y de estructura flexible, se produce una reducción de la absorción, ya que hay menor cantidad de material que pueda vibrar y forzar el flujo de aire; además de dañar una superficie mayor de los poros.

4.2.3. Curva del coeficiente de absorción lineal idealizada

Toda la clasificación expuesta anteriormente responde en alguna zona a la curva del coeficiente de absorción lineal idealizada [9, 14, 15, 20 ,21], véase gráfica 1. Esta curva es de carácter teórico, y es el comportamiento de un material que respondiera a todos los comportamientos de aislamiento y absorción acústica. En la realidad la única forma de alcanzar este comportamiento, sería formando un material compuesto, en el que cada capa facilitara este comportamiento y no fuera anulado por otras capas. También se puede alcanzar este comportamiento en paredes de diversos materiales. Alcanzar esta descripción no tiene sentido práctico, pero explica los fenómenos habituales en los materiales acústicos, y como se relacionan entre ellos y con la termomecánica. La curva del coeficiente de absorción lineal idealizada, está expresado dicho coeficiente en función de la frecuencia; dividiendo la gráfica en cuatro zonas distintas. Cada una de las zonas expresa la forma del comportamiento del coeficiente de absorción lineal, y el fenómeno termomecánico que induce el comportamiento. Las zonas están colocadas según las frecuencias a las que se desarrollan, pero en los materiales reales suelen aparecer como una superposición. Esta gráfica también suele expresarse en función del factor de reducción (R_w), que tiene más aplicación en la acústica técnica; y sirve para conocer que produce fallos de aislamiento en paramentos contruidos.



Gráfica. 1. Curva del coeficiente de absorción lineal idealizada.

La descripción de las zonas de la gráfica 1 son las siguientes:

La región I el material se comporta de forma perfectamente elástica, se puede ver que para ondas de presión de la misma amplitud, el aumento de la frecuencia hace que el material reciba más energía acústica, y el material la acumula pero se va saturando; y hace que aumente la transmisión de energía.

La región II aparece cuando en el material se presenta disipación de energía, fundamentalmente debido que en la superficie no se produce una distribución homogénea de las presiones, y estas al propagarse por el material, genera zonas de tensiones de tracción y compresión, que no hacen el mismo efecto sobre el material. Un ejemplo muy claro y habitual son los materiales porosos, la compresión y la tracción se puede considerar que actúa igual sobre el esqueleto. Sin embargo sobre el aire el comportamiento es muy distinto, el aire se puede succionar, pero su compresibilidad es limitada. En esta zona es donde se producen las resonancias del material originadas por la coincidencia con las frecuencias propias, que serán tanto más elevadas cuanto el amortiguamiento sea menor.



La región III representa la zona donde los fenómenos de absorción se basan en la densidad del cuerpo y su rigidez, al igual que la zona elástica, presenta linealidad hasta un poco antes de la región de coincidencia. Esta región fue la primera que se conoció del comportamiento acústico de los materiales, y corresponde a la Ley de Masas. Actualmente es muy empleada para el diseño de pantallas acústicas.

Finalmente la región IV se inicia con la región de coincidencia en la cual el cociente de las longitudes de onda de los medios que intervienen, coincide con el seno del ángulo de la onda incidente.

$$\text{Sen}(\theta) = \frac{\lambda_{\text{aire}}}{\lambda_{\text{material}}} \quad E.14$$

Cuando incide la onda el material busca vibrar en las frecuencias propias, sin embargo en esta situación apenas lo consigue y la absorción es mínima, debido a que apenas existen vibraciones longitudinales en el material (se desarrollan vibraciones transversales que facilitan el fenómeno). La frecuencia a la que se desarrolla la región de coincidencia se conoce como crítica f_c . Una vez superada esta región el material sigue comportándose según la ley de masas aunque cambia normalmente la pendiente del coeficiente de absorción lineal respecto de la frecuencia.

4.2.4. Introducción a los modelos de los materiales acústicos

Resulta de gran importancia poder recoger el comportamiento que muestran los materiales mediante modelos que puedan utilizarse en multitud de situaciones distintas. Con este método lo que se consigue no solo es definir con exactitud el material también permite adaptar el material a las necesidades técnicas para las que se pretende utilizar. Respecto a la mejora del material también resulta importante ya que el modelo predispone aquellos parámetros deseables para alcanzar un determinado comportamiento, pudiendo de esta forma centrar el estudio. Los materiales acústicos se rigen fundamentalmente por los modelos poroelásticos cuando la absorción es la cualidad principal, y cuando se trata del aislamiento son los modelos máscicos [20, 23].

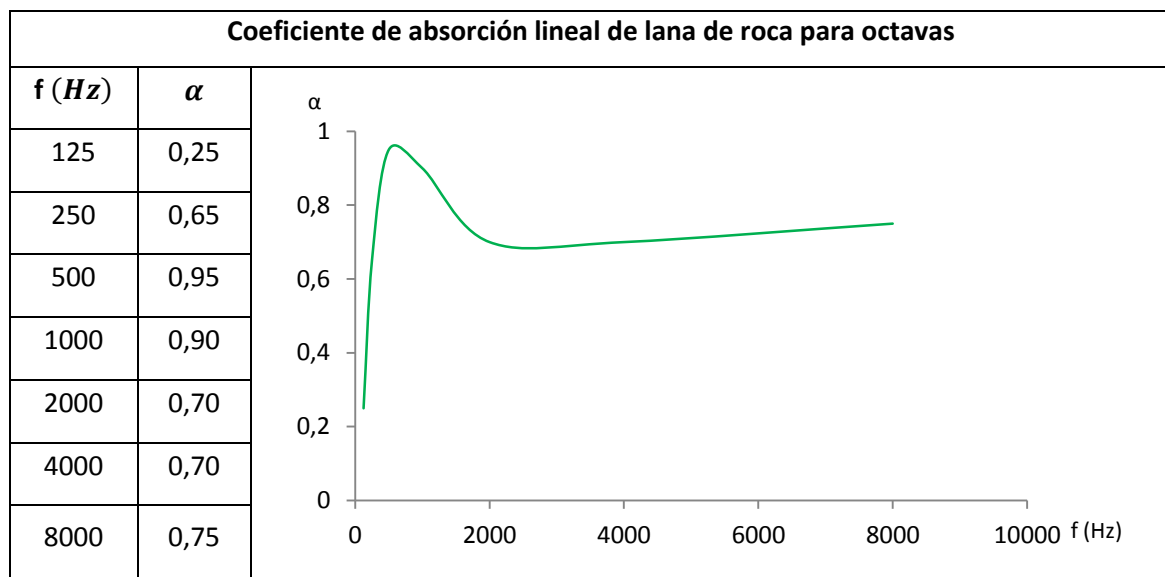


4.3. Aislantes y absorbentes acústicos: cerámicas convencionales

Los materiales cerámicos se han utilizado durante siglos, para tareas de acondicionamiento del sonido por su accesibilidad. Aunque sus propiedades no se han mejorado considerablemente hasta el siglo XX, la experiencia proporcionó el conocimiento de la fenomenología de estos materiales frente a los sonidos. La construcción de iglesias, teatros, y otras construcciones emplearon comúnmente estos materiales, sin embargo su aplicación directa a problemas acústicos no se realizaba, sustituyéndose por soluciones dimensionales. No sería hasta la construcción de teatros modernos cuando se empezaron a utilizar áridos para solucionar problemas de aislamiento entre espacios, estos se emplean disgregados y contenidos entre tabiques de madera, normalmente enmoquetada. Esta solución aunque desaprovecha mucho espacio, es de un coste reducido y bastante eficiente; por lo que se ha utilizado durante bastante tiempo (Actualmente existen teatros y cines con este absorbente acústico). El primer material que se consiguió que tuviera unas propiedades de absorción elevadas, y que además tuviera ciertas características de integridad, fue la lana de vidrio, basada en un material compuesto de fibras discontinuas unidas mediante aglutinante, normalmente resinas. Este material se diseñó para resolver en un inicio una problemática muy distinta a la acústica; y era el aislamiento térmico de edificaciones. La utilización de este material poco a poco se fue extendiendo, y pronto se conocieron las propiedades acústicas del mismo, por lo que se utiliza mucho debido a las propiedades de aislamiento térmico y acústico simultáneas. El mayor problema que presenta este tipo de material fibroso, es que presenta en frecuencias altas (en torno a 9000 Hz una frecuencia crítica que reduce mucho la absorción.). La mayor ventaja que presenta actualmente, y que sirvió para que se utilizara como material acústico; son sus propiedades ignífugas, que evita la propagación del fuego. Esta última característica es lo que permitió la sustitución por este material, los materiales acústicos poliméricos empleados, muy extendidos por la capacidad de absorber el sonido de forma muy eficiente en un gran rango de frecuencias.



La lana de roca también es de carácter fibroso, y tiene características complementarias a la lana de vidrio. Su diseño está enfocado directamente al aislamiento acústico por este motivo la frecuencia crítica está muy atenuada, y el comportamiento optimo se extiende algo más hacia los valores de frecuencia bajos. Es por este motivo que también se ha empleado como aislante estructural, para evitar la emisión del sonido que se propaga en las estructuras. El procesado de este material resulta más costoso que la fibra de vidrio, por este motivo no esta tan extendida y su utilización se limita a condiciones en las que se exige un acondicionamiento sonoro muy determinado. Se puede apreciar en la gráfica 2, el comportamiento a distintas frecuencias del coeficiente de absorción lineal de este material [18].



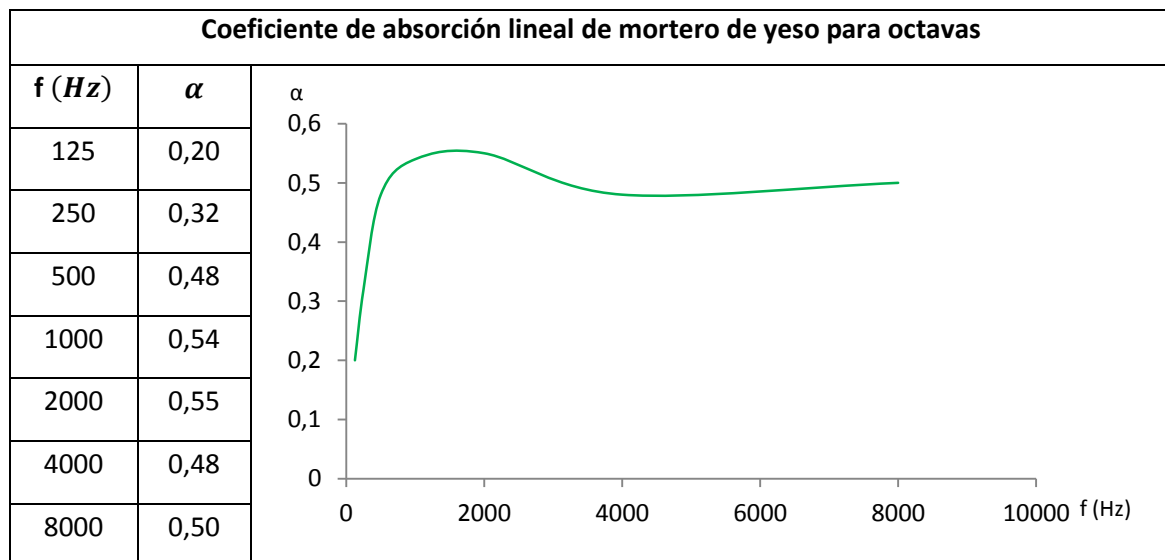
Gráfica. 2. Coeficiente de absorción lineal de lana de roca[18].

Luego los materiales fibrosos, están implantados en ámbito de las soluciones técnicas acústicas, y pueden representar dentro de las cerámicas empleadas para este objetivo, cerca de un 40% del material empleado.

Dentro de los materiales acústicos cerámicos, también se emplean materiales de carácter poroso. Estos materiales son fundamentalmente morteros de yesos, argamasas, y cementos. La necesidad de solucionar el encuentro de muchos materiales cerámicos, se traslado al conjunto de paramentos acústicos; y al espaciado de estos



materiales con respecto las superficies rígidas. Por este motivo los morteros, son una buena solución por su condición de materiales porosos, y su capacidad de adhesión de otros materiales. Sin embargo la mejora de las propiedades acústicas está condicionada a la variación de la porosidad, y la composición de estos materiales. En el caso más extendido, los yesos para aislamiento acústico, la aplicación puede ser manual, o mediante inyección; para ambos casos se emplean yesos con elevada porosidad obtenidos con una materia prima de mayor grosor ó mediante la introducción de aire en la masa. De este modo el material empieza a tener características de material acústico absorbente, pero con una capacidad limitada. La composición es el otro factor que se modifica para que la masa tenga un buen comportamiento. Para ello se introducen estructuras granulares, orgánicas, o fibrosas; consiguiendo aumentar el coeficiente de absorción. Entre las estructuras granulares incorporadas a los morteros se encuentra la vermiculita, perlita mineral (vidrio amorfo volcánico expandido), poliestireno expandido, y caucho sintético. Como puede verse, se tiende en el caso de los morteros, para mejorar su comportamiento a la formación de materiales compuestos. A nivel orgánico se incorporan sustancias como celulosa, o compuestos orgánicos volátiles, en el caso de estos últimos con el fin de aumentar la porosidad (Acumulación y fácil volatilización), aunque tienden a no emplearse por ser nocivos para las personas. En último lugar el aporte de fibras, fundamentalmente de vidrio, es la solución que actualmente tiene más éxito debido a que se aprovecha la disipación de energía acústica mediante el contacto de fibras, y la reducción de las propiedades de resistencia mecánica es mucho menor que en otro tipo de soluciones. Toda la tecnología de acondicionamiento sonoro que tienen las mezclas de mortero, en las dos últimas décadas, se ha empleado para la realización de paneles rígidos con cámara de aire ó con capa de material con propiedades absorbentes del sonido, fundamentalmente en el caso de los paneles de yeso recubiertos con capas de papel, y en el caso particular de los paneles de cemento con capa de EPDM esponja (caucho de etileno propileno dieno), que tiene su utilización en barreras acústicas de exterior para evitar la contaminación de tráfico, ferroviaria, y de aeronaves. En la gráfica 3 podemos ver el comportamiento de la absorción acústica del yeso que es el material cerámico poroso más representativo [18].

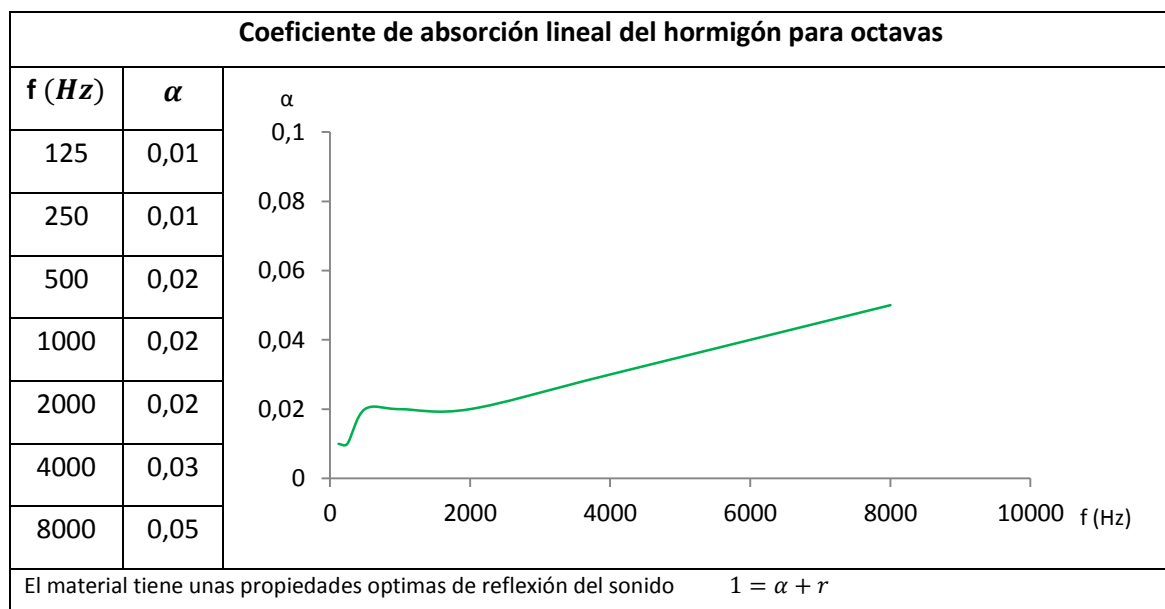


Gráfica. 3. Coeficiente de absorción lineal de mortero de yeso [18].

Dentro de los materiales cerámicos también se plantea la situación de que estos presenten una cierta densidad y rigidez (en relación con la ley de la masa), por lo que los fenómenos de reflexión en la superficie se van a incrementar. Esta situación también resulta de gran utilidad en el acondicionamiento acústico, fundamentalmente en los casos de aislamiento de ruidos externos en la edificación. Hay que considerar que son muchos los materiales cerámicos que pueden realizar un aislamiento acústico adecuado, pero de forma general las características fundamentales son la densidad del material, el acabado superficial, y la rigidez del mismo. La densidad del material hace que la impedancia acústica específica se incremente, y el material ofrezca mayor resistencia a la transmisión de las ondas. En el caso del acabado superficial cuanto menor sea la rugosidad, las ondas se acoplaran peor a la superficie y se reflejaran. Y finalmente una rigidez elevada hace que las ondas tengan mayor dificultad para originar la perturbación en el medio, y estas necesitan más energía para conseguir la propagación. Esto presenta un inconveniente si la energía es suficiente la velocidad del sonido en un material rígido es elevada, y se propagara casi sin atenuación grandes distancias (problema fundamental de impactos en las estructuras). Como se verá en los



modelos matemáticos es la masa el factor fundamental, es por este motivo que estos materiales consiguen una gran reducción acústica entre dos espacios con los espesores más pequeños de entre todos los materiales. Sin embargo al no producirse absorción en la zona de emisión se presentan problemas de elevado tiempo de reverberación, y un aumento de la presión sonora cuando la emisión es continua. Luego no suele ser habitual el empleo de estos materiales de forma individual. Entre los materiales cerámicos rígidos hay que destacar el hormigón, y distintos elementos como ladrillos, azulejos, gres, tejas, basados en la fabricación a partir de la cocción de arcillas; por otro lado también están los vidrios planos. Estos materiales tienen altos coeficientes de reflexión a frecuencias bajas debido a que la longitud de onda es grande, cuando la frecuencia es alta la longitud de onda tiene un tamaño más próximo a los defectos superficiales del material y consigue un mejor acoplamiento. En la gráfica 4 se aprecia el comportamiento del hormigón que es el material más representativo para este caso, si vemos el comportamiento se adapta perfectamente a la región III (dependencia con la masa) de la curva del coeficiente de absorción lineal idealizada; gráfica 1.



Gráfica. 4. Coeficiente de absorción lineal de hormigón [18].



Los productos cerámicos también se emplean para la fabricación de absorbentes basados en geometrías, o filtros de frecuencias. Es el caso de la terracota, con la cual se realizan paneles perforados para evitar la contaminación acústica del tráfico, estos elementos están diseñados para reflejar y absorber las frecuencias bajas emitidas por los vehículos en los desplazamientos. En el caso de los filtros, se ha extendido mucho la utilización de absorbentes de Helmholtz en auditorios para aislar salas contiguas, para ello se emplean series de estos absorbentes, que normalmente se fabrican en vidrio para reducir el coste, y que la envoltura sea suficientemente rígida.

4.4. Materiales reciclados

4.4.1. Introducción

La gestión de la materia empleada por las sociedades modernas resulta de vital importancia, para poder resolver la problemática que presentan los deshechos en la actividad de las personas, evitar la utilización de materiales de la naturaleza que presentan limitaciones respecto su cantidad, y pueden generar perjuicios ambientales (sostenibilidad). Pero también la importancia a nivel económico de poder reincorporar al ciclo de vida de los materiales, productos que reducen sus costes (refusión de metales). Luego el objetivo del reciclado se centra en varios aspectos como son reducir la cantidad de materia empleada para generar productos que cuando finalizan su ciclo de vida son susceptibles de convertirse en deshechos. Buscar métodos que permitan reutilizar productos que estén en las fases finales del ciclo, y finalmente para conseguir cerrar el ciclo de vida, tratar física o químicamente de forma total o parcial aquellos productos de desecho, con el fin de obtener materias primas para realizar los productos habituales, ó materias nuevas susceptibles de otros usos. Una de las partes más delicadas del proceso de reciclado es precisamente la relación de estos procesos con la protección del medioambiente, ya que algunos procesos que buscan adecuar la materia para evitar daños al entorno, en su procesado pueden resultar más dañinos. Otra característica que limita una mayor implantación de las técnicas de reciclado es



precisamente el carácter económico de la actividad, dando lugar a la evaluación de costes del empleo de materia nueva; o materia obtenida mediante procedimientos de recuperación. Sin embargo uno de los pilares del reciclado esta a nivel industrial, en el aprovechamiento de sobrantes en los procesos de fabricación, para obtener un producto secundario por un coste relativamente bajo (generalmente más bajo que el tratamiento del residuo, y con la posibilidad de beneficio en el mercado) [29].

La aparición de normas y legislación respecto al reciclado en el entorno industrial, y después en los productos de consumo, ha permitido la aparición de una serie de estructuras que han conformado una industria propia. Esta industria está basada en procesos de recuperación desde los puntos de producción de los deshechos y chatarras, para conseguir un acopio de estos materiales, un posterior tratamiento de clasificación para destinar cada material en particular a los procesos de valorización, que son propiamente los procesos de reciclado. Esta valorización puede realizarse de forma energética, para la obtención de energía en centrales eléctricas de ciclo térmico; ó con procesos que buscan habilitar materia nueva. En esta industria también se recoge el proceso de eliminación de materias que por sus condiciones no se conoce ninguna forma de tratamiento para su reutilización. Actualmente se busca que el número de estas materias, que no se pueden incorporar al ciclo de vida cerrado, sea el mínimo posible.

Y finalmente en el caso de productos de desecho que pueden generar daños al medio ambiente o a la salud de las personas, y que tienen gran dificultad de procesado (Ej. Los residuos nucleares); se someten al almacenamiento controlado, hasta que en algunos casos se pueden realizar las operaciones de recuperación (Ciclo cerrado avanzado, depende del tiempo) [29, 76].

Luego podemos recoger el ciclo que sigue la materia mediante un diagrama, en el que se colocan los principales puntos donde la materia interactúa con sus actores fundamentales, producción, consumo, reciclado, y medioambiente. Véase figura 5.

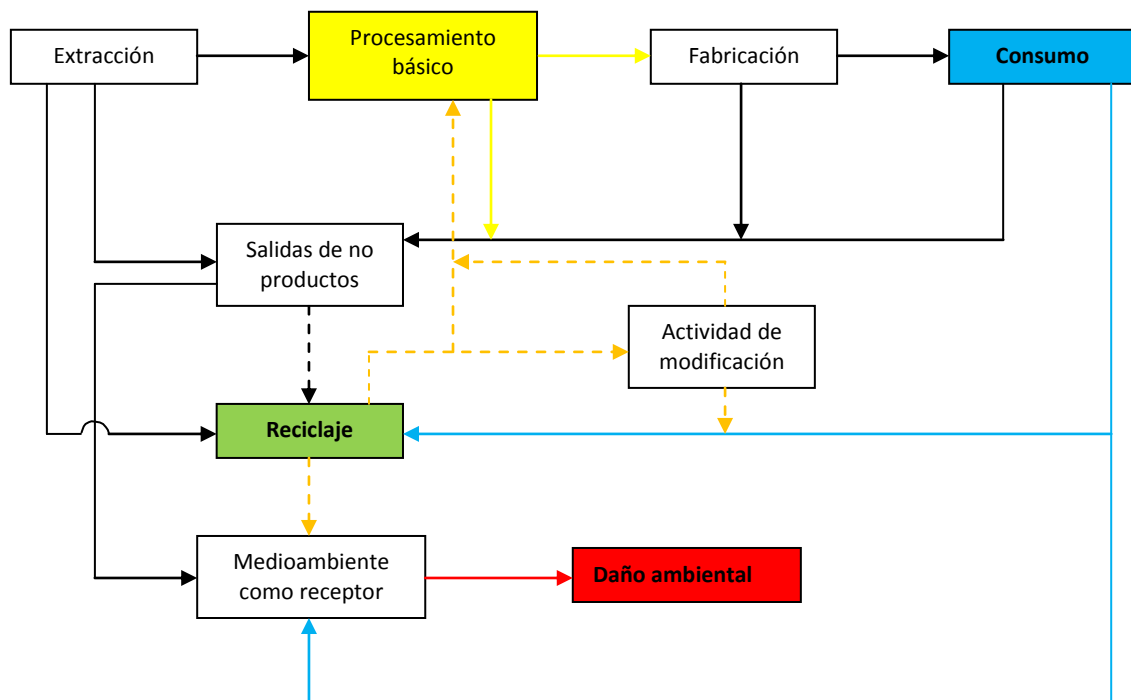


Figura. 5. Representación esquemática del flujo seguido por un material, desde la extracción de la materia prima [76].

Como se puede ver el reciclado tiene una gran dependencia de las actividades de modificación, esta serie de actividades consiste en la adecuación final (Refinado de polímeros, adición de elementos químicos en aleaciones, blanqueado de papel, etc). Esta serie de operaciones tienen como objetivo incorporar el producto reciclado a las industrias básicas sin la modificación de estas. Finalmente cabe destacar la importancia que tiene en el proceso de reciclado de algunas materias el aporte de materias primas obtenidas en la extracción, esto es debido a que las propiedades de algunos materiales una vez empleados y reciclados son inferiores a las originales, o se incorporan una serie de defectos que se busca paliar con materia nueva añadida.

4.4.2. Tipos de materiales reciclados

Actualmente existen más de 600 materiales [29] distintos que son susceptibles de recuperación a nivel industrial, este número resulta bastante reducido en comparación a los materiales que tienen capacidad para poder ser reciclados sin interferir con el medioambiente, aunque no presenten rentabilidad económica. Existen materiales



dentro de los metales, cerámicas, y polímeros; que pueden reciclarse. Por lo tanto ninguna de las familias de materiales queda excluida de este proceso de recuperación. Aunque según se profundiza en las propiedades de cada tipo de material, se encuentran características comunes que dificultan el reciclado en cada uno de estos grupos. En el caso de los metales, se puede decir que posee un reciclado en general bastante sencillo (refusión), pero presentan el problema de que algunos de ellos forman óxidos con facilidad, que impurifican o dificultan este método. Teniéndose que recurrir a métodos hidrometalúrgicos para su obtención. También pueden presentar problemas de pérdidas de material por escoriado en los procesos de fusión. El material obtenido después de la recuperación tiene las mismas propiedades que el material de partida, y es esta una de las mayores ventajas; abaratando el proceso.

En el caso de las cerámicas, particularmente los vidrios, se reciclan con suma facilidad volviendo a fundir este material con materia nueva para evitar la introducción de defectos, debido a su transición vítrea. Sin embargo tienen el inconveniente de que no pueden ser vidrios excesivamente impurificados, ya que estas impurezas son difíciles de extraer; siendo generadoras de fallos en la estructura del material, y resultando inviable el reciclado (gran dispersión de propiedades físicas). En el caso de las cerámicas de estructura cristalina, su reciclado es bastante actual y dificultoso, se basa en el procesado de polvo, debido a que la formación de los compuestos originales necesitaría una gran cantidad de energía para obtener los elementos primarios necesarios para formar la reacción que da lugar a la estructura de la cerámica. Luego como se puede ver se aprovechan las características mecánicas de baja tenacidad de fractura y elevada resistencia para obtener un conjunto de partículas que se vuelven a reagrupar para obtener un material que a nivel microscópico resulta similar a las características del material de partida, pero a nivel macroscópico se altera completamente el comportamiento; respondiendo a la distribución de partículas.

Los polímeros son el tercer grupo de materiales reciclados que tienen unas características comunes en su procesado. Según sea su comportamiento frente a la temperatura, tendremos las actitudes de estos materiales para ser reciclados. Cuando los polímeros alcanzan una temperatura de transición vítrea antes de la



descomposición de las macromoléculas, se conoce como termoplástico, y en este caso son materiales sencillos de procesar ya que con el incremento de temperatura y de forma mecánica se pueden obtener nuevos productos. El problema reside en los materiales formados a partir del curado de los compuestos químicos para formar el polímero. En este caso la temperatura de descomposición es la única que se alcanza, y el material no puede ser físicamente procesado. Para aprovechar dichos materiales, conocidos como termoestables; se pueden revalorizar de forma energética siendo esta opción menos adecuada. Pero también se puede realizar un tratamiento químico de obtención de los monómeros primordiales. Como se puede ver, según el tipo de material, se presentan ciertas opciones de proceso que suelen ser comunes a las características de los enlaces químicos que presente el material.

4.4.3. Materiales acústicos reciclados

En este apartado se hará una exposición de los materiales de carácter no cerámico, que se estudiarán de forma particular. Se expondrán una serie de materiales reciclados empleados en la acústica, y sus características.

Los materiales como la lana de roca y la lana de vidrio, son materiales que se han extendido mucho a nivel de las soluciones acústicas. Pero los materiales poliméricos obtenidos del reciclado han cubierto una gran parte del mercado debido a su coste reducido. Estos materiales tienen dos vías principales de recuperación a partir de desechos, el primer caso es la recuperación de polímeros termoplásticos empleados en la industria y el consumo. Estos polímeros se procesan nuevamente para obtener el acabado de fibras o espumas. Los casos más importantes en este sentido, enfocados al acondicionamiento acústico son el politereftalato de etileno (PET) en forma de fibras obtenido a partir del reciclado de botellas de bebidas (fundamentalmente) [56]. Este material está sustituyendo actualmente a un conjunto de lanas poliméricas de mayor coste porque consigue igualar las propiedades de absorción (Un valor promedio de coeficiente de absorción de 0,45). Sin embargo la gran ventaja de este material reciclado es que aprovecha toda la tecnología empleada para fabricar otro tipo de lana reciclada que es la de poliéster. Este tipo de lana aunque posee unas propiedades algo menores, tiene la ventaja de dar salida al mercado este material recuperado. Otro



polímero que presenta ventajas en el procesado, y en el posterior uso como absorbente acústico es el poliestireno en su forma expandida, aunque presenta la limitación que para tener capacidad absorbente se tiene que emplear con láminas alternas de materiales viscoelásticos como el polibutadieno. En el caso de materiales termoestables como el caucho vulcanizado empleado en los neumáticos [55], también se ha trabajado en un método para volver a incorporar este material como solución acústica. Para ello se trituran los neumáticos en forma de partículas o de copos, y se conglomeran nuevamente mediante aglutinantes; pero respetando los espacios entre partículas (comportamiento poroso, y viscoelástico). En lo que respecta a esta forma de obtención, cabe destacar un caso particular de material metálico reciclado que se emplea como absorbente acústico, y filtro en los equipos de climatización. El aluminio se recicla de forma masiva, pero se presenta como material absorbente poroelástico cuando está en forma de espuma de celda abierta.

La segunda forma de obtener materiales acústicos reciclados es emplear salidas de no productos, fundamentalmente de la industria textil [57], y de espumas poliméricas en automoción. En el caso de las fibras textiles, intrínsecamente obtienen el comportamiento como absorbente fibroso, en el conjunto. Entre las fibras más empleadas para la fabricación de absorbentes acústicos están, el poliéster, la poliolefina, y diversas fibras vegetales. Teniendo en cuenta que la forma de generar el tejido tiene importancia en las posteriores propiedades acústicas, obteniéndose los mejores resultados con las tramas de tricotado, o cajas combinadas. Sin embargo este material aunque presenta una serie de ventajas amplias, como bajo consumo energético, tiene la dificultad de absorber frecuencias bajas. Para ello actualmente se está investigando en dotar al material original, con lo que se conoce como velos de nanofibras [50]. Estas fibras se obtienen mediante electrohilado de alcohol polivinílico (PVA), y no interfieren con el uso normal del tejido; a nivel acústico el conjunto de fibras se comporta como una membrana resonante en la superficie del material acústico. En el caso de la industria del automóvil, también aparece materiales de no producto, como son los recortes de espuma de los asientos del vehículo. Al tratarse de una industria de elevado tamaño, el aprovechamiento de estos materiales permite



hasta reducir costes en la producción de espumas; debido al beneficio obtenido como materiales para el acondicionamiento arquitectónico. Para formar el material se realiza un triturado de las espumas, y las partículas obtenidas se extienden en capas, aplicándose calor para realizar la unión en las superficies. Hay que destacar que al aplicar calor se reduce la porosidad del material, pero también aumenta la densidad de material por m^2 , formándose un compromiso de propiedades que permite obtener un material con un alto coeficiente de absorción. Como caso particular, el Liceo de Barcelona, emplea este tipo de material para acondicionar acústicamente el edificio[73].

De forma concreta, los polímeros reciclados están muy extendidos en el campo de la acústica arquitectónica; aportando unos buenos resultados. Sin embargo la mayor problemática de este conjunto de materiales es el riesgo que presenta en caso de incendio por la capacidad combustible de los mismos [72]. Lo que supone en un gran número de casos el mayor impedimento para su aplicación. El otro gran problema, reside en las propiedades acústicas, y es que los materiales poliméricos no responden bien a la ley de masas, ni forman una impedancia acústica apropiada para fabricar con ellos materiales que aíslen el sonido.

4.4.4. Reciclado de cerámicas

La cantidad de materiales cerámicos producidos anualmente, es de miles de toneladas; sin embargo los destinados a la construcción representan el 85% de toda la producción. El porcentaje restante lo representa elementos de vidrio, cerámicas técnicas, y cerámicas convencionales de consumo. Siendo los materiales cerámicos los más extendidos en cuanto a producción anual en toneladas. Por este motivo es prioritario para los países regular los desechos producidos por estos materiales, debido a su volumen de acopio. En el caso de España la legislación vigente para la regulación de los residuos procedentes de la construcción es el RD 105/2008 por el cual se regula la producción y gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) [36, 75], con el fin de promover la prevención, reutilización, y reciclado con el fin de alcanzar un desarrollo sostenible. Esta legislación impone una serie de obligaciones a los actores en las actividades de construcción. Este real decreto tiene como principal objetivo la



gestión y la trazabilidad de los residuos; y como alcance todo material que sea empleado en la construcción; y no esté recogido explícitamente su tratamiento por otra ley o disposición. Luego metales, polímeros, y cerámicas; son susceptibles a ser controlados por este decreto. Por las características de este documento, nos centraremos en la regulación de los materiales cerámicos según esta legislación. Los productos cerámicos quedan divididos en dos grandes bloques, los de origen natural debidos al movimiento de tierras, y los productos cerámicos manufacturados que se administran según códigos, siendo básicos hormigones, yesos, ladrillos y porcelanas. Los residuos naturales, según esta normativa tienen uso directo como áridos de asiento en edificación, y de forma auxiliar como material de aporte en valorizaciones basadas en el reciclado. A nivel preventivo se debe asegurar que estos materiales no generen impermeabilización del suelo y dañen entornos ambientales. En el caso de los materiales manufacturados son origen de demoliciones, o de partidas de material rechazadas; por lo que la primera pauta es la selección para evitar que ciertos compuestos puedan originar reacciones entre sí, pudiendo contaminar el suelo y las aguas. El objetivo de estos materiales es mucho más complejo y sigue una escala para producir el ciclo cerrado. En la figura 6, podemos ver el orden de preferencia para el tratamiento de residuos cerámicos manufacturados.



Figura. 6. Opciones de valorización seguidas por el RD 105/2008, para la gestión de residuos de la construcción [75].

Luego la legislación está enfocada a identificar los residuos de construcción, su procedencia, lugar de acopio, y condiciones en las que se encuentra para su valorización (tamaño, grado de afino, y tipo de material de procedencia específico). Con estas condiciones la legislación no interviene en cómo se produce la valorización solo obliga a que siga la jerarquía de gestión del residuo. Por este motivo, realizar procesos de reciclado de materiales cerámicos, resulta en un proceso ventajoso; ya que la legislación no limita las posibles soluciones técnicas. El flujo de materia para aprovechamiento se realiza desde las plantas de gestión de residuos, con las industrias de reciclado, luego aun habiendo gestionado la trazabilidad del residuo esta continua hasta cerrar el ciclo, siendo un procedimiento útil para la mejora de los materiales.

4.4.5. Referencia de uso en materiales acústicos

La investigación en materiales cerámicos para el empleo en soluciones acústicas, está bastante desarrollado en el ámbito de morteros, hormigones, paredes de fábrica, y paneles flotantes. Sin embargo la inclusión de materia reciclada en este campo es en la actualidad muy limitada. Respecto a las cerámicas recicladas, las aplicaciones hasta el



momento investigadas están en la línea de la fabricación de materiales compuestos, empleando partículas cerámicas como refuerzo, con el fin de mejorar la integridad estructural de sistemas muy extendidos como son las espumas poliméricas. Destinadas a mejorar la absorción acústica, y basadas en la mecánica poroelástica. Cabe destacar que ciertas cerámicas estructurales ya están presentes en el mercado, pero todavía no se han realizado ensayos acústicos en las mismas para determinar la capacidad que tienen para acondicionar el sonido (casos de gres porcelánico y material para bovedillas) [58].

5. Técnicas de procesado en cerámicas

En este apartado se explicarán con brevedad las técnicas más adecuadas para el trabajo desarrollado en el estudio actual. Las técnicas destinadas al procesado de cerámicas son bastante limitadas, cuando se trata de obtener productos convencionales. No sucede lo mismo con las cerámicas avanzadas, debido a la exigencia de pureza de la materia prima, que permite realizar la adhesión del material en más estados físicos [26]. Luego en el procesado convencional, se producen tres etapas claras de proceso, para todos los materiales obtenidos. Preparación de la materia prima en forma de polvo, acondicionamiento (adición de aglutinantes, aditivos, dispersantes, etc.), aglutinado, moldeo y preconsolidación, y sinterización.

5.1. Etapas de proceso

5.1.1. Tecnología de polvos

La materia prima y los aditivos que se aportan para facilitar las operaciones posteriores cumplen con una serie de requisitos destinados a mejorar las propiedades, y la calidad de las piezas obtenidas. La granulometría del polvo de partida, tiene importancia en la elección del tipo de moldeo, y si el proceso será por vía húmeda ó seca. También hay



que destacar que en muchas propiedades, y fundamentalmente en las mecánicas se busca el máximo empaquetamiento del polvo, para mejorar la densidad y el posicionamiento adecuado para las tareas posteriores de sinterizado que pueden inducir defectos al variar el tamaño. Hay que considerar que un tamaño uniforme tampoco es beneficioso, ya que teniendo diferentes tamaños resulta más sencillo cubrir las cavidades. También debe cuidarse la pureza de la materia prima, cuanto mayor sea; más difícil serán los procesos de oxidación a altas temperaturas, y la inducción de tensiones residuales [26].

Otro factor de gran importancia es la reactividad de la materia prima. Es el principal factor de densificación en el proceso de sinterizado, debido al cambio de la entalpía superficial de la cerámica a elevadas temperaturas. Una partícula pequeña pero de gran superficie, tiende a reducir ésta con la temperatura, uniéndose a otras partículas cercanas. La reactividad además puede intervenir en la temperatura y tiempo necesario para realizar la sinterización, pero presenta la dificultad que puede promover el crecimiento de grano.

También resulta de importancia el estudio del polimorfismo en las estructuras presentes en la materia prima. Si no se controla este factor, habitualmente empeora y fragiliza las propiedades del material; pero también puede emplearse en beneficio de las propiedades si se limita su aparición, o aparece en una cantidad determinada del material.

El aglutinamiento del polvo de partida (fabricación de la pasta) es importante para adecuar el material a la técnica de moldeo. El material tiene que tener la uniformidad suficiente para soportar el moldeo sin que exista descohesión del polvo empleado.

5.1.2. Moldeo y preconsolidación

Una vez obtenida la pasta cerámica uniforme y estable, se puede emplear alguna de las técnicas de moldeo para obtener la forma final de la pieza. Esta pieza obtenida por moldeo es lo que se conoce como pieza en verde, y debe tener la integridad suficiente para la manipulación y la realización del proceso de sinterizado. En la tabla 2 podemos



ver algunas de las operaciones destinadas a la preconsolidación, en las que intervienen los productos de aglutinamiento, previo al proceso de moldeo [27].

Prensado	Slip casting	Moldeo por extrusión
Adicción de ligante Adicción de lubricante Granulado ó secado Adición de coadyuvante de sinterización	Preparación de la barbotina Adicción de ligante Adicción de defloculante Regulación de PH Regulación de la viscosidad Desaireación	Adición de termoplástico Adición de plastificante Adición de agente mojante Adicción de lubricante Desaireación Adición de coadyuvante de sinterización Granulado ó peletizado

Tabla. 2. Operaciones de preconsolidación habituales en los procesos previos al moldeo [27].

La técnica de prensado está destinada a obtener cuerpos en verde mediante la aplicación de presión a la pasta en húmedo, o polvo en seco; con el fin de conseguir el encastre de las partículas, o incluso pequeñas deformaciones plásticas. De esta forma el material puede ser manipulado, y se obtiene una mejora de las propiedades finales debido al aumento de la densidad en verde. Sin embargo las condiciones de aplicación de la presión son de gran importancia para el comportamiento posterior de la pieza. Si el proceso de compactación es uniaxial, existirán regiones en los bordes de la pieza que su densidad disminuirá, y por lo tanto se formara un gradiente de densidades que afectara a las propiedades. Por este mismo motivo los flujos de masa no serán tan eficientes para reducir la porosidad. Estos problemas son resueltos parcialmente con la compactación isostática, que consiste en la aplicación de presión en todas las direcciones. Sin embargo la porosidad tiene el problema de que se alcanza un comportamiento asintótico aun cuando se sigue aumentando la presión realizada sobre la pieza. Para disminuir la porosidad de forma considerable, aproximándose a



valores de densidad de sólido; se emplea la compactación isostática en caliente (HIP). Esta técnica alcanza un grado de acabado y propiedades en las piezas de gran calidad, sin embargo resulta ser una técnica bastante costosa, y que está muy limitada a piezas de compromiso fabricadas con cerámicas avanzadas.

El slip casting tiene como objetivo reproducir el proceso de colada como en los metales. Existen muy pocos materiales cerámicos que se fundan en su totalidad para procesarlos, por lo que el proceso está enfocado a formar una suspensión de la materia prima en polvo con agua. Esta suspensión se vierte sobre un molde que normalmente es de carácter poroso, para eliminar el agua de la suspensión. La suspensión realizada se conoce también como barbotina, siendo este nombre también muy extendido para esta técnica de moldeo. Físicamente es un moldeo por gravedad, ya que una vez vertida la suspensión, la eliminación del agua se origina por desplazamiento originado por la gravedad hacia el molde poroso. Las ventajas que posee esta técnica es la sencillez, permite la realización de un moldeo plástico consiguiendo de esta forma piezas de geometría más intrincada, y la diferencia de tamaño en las piezas obtenidas es amplia. Pero se debe tener en cuenta que un factor crítico de este proceso es la desaireación, que puede producir una reducción en las propiedades de la cerámica, el nivel de producción es bajo al tratarse de un método discontinuo, y el proceso de secado puede generar fisuras al no ser homogéneo. El proceso se puede realizar tanto para la obtención de un cuerpo en verde sólido, como cuerpos huecos mediante el vaciado y formación de cáscara en contacto con el molde. El proceso de moldeo en barbotina tiene una variante que consiste en la aplicación de vacío al molde poroso para reducir el tiempo de obtención de la pieza en verde. Cabe destacar que históricamente es el método de moldeo de cerámicas artísticas más extendido. En las figura podemos ver el proceso de moldeo de una suspensión de caolinita.



Figura. 7. Moldeo en barbotina, fase de vertido de la pasta [81].

En último lugar el proceso de moldeo por extrusión busca resolver parte de la problemática del slip casting, al tratarse de un proceso continuo tiene un rendimiento mayor, véase figura 8. En este caso se realiza el moldeo de una sección determinada de forma continua, y la pasta se somete a un proceso de secado continuo para evitar las deformaciones en la sección. De esta forma se obtiene el cuerpo en verde que posteriormente se sinteriza. Para poder realizar este proceso la mezcla de materia prima y productos es tal, que no se obtiene una pasta propiamente, tienen la apariencia de gránulos ó pellets con una gran plasticidad. Esto es debido a las características de las maquinas de extrusión que son sensibles a los líquidos que contengan finos abrasivos. La presión ejercida sobre el material termina formando una cerámica plástica continua. Este método es actualmente el más extendido para fabricación de cerámicas convencionales, particularmente para materiales de construcción basados en arcillas (ladrillos, tejas, preformas de gres, etc). Características similares presenta el moldeo por inyección destinado a la formación de piezas con geometría compleja, que posteriormente se realiza un secado para obtener el cuerpo en verde.



Figura. 8. Extrusora de vacío para ladrillos convencionales [77].

5.1.3. Sinterizado y consolidación

El cuerpo en verde tiene unas características que permiten la manipulación para las posteriores etapas del proceso de fabricación, sin embargo no es posible ponerlo en servicio debido a la falta de integridad de la pieza, que tiende a estar en el estado primordial de polvo seco. Por este motivo es necesario el proceso de sinterización (cocción de la cerámica) para la consolidación de la pieza. El proceso está destinado a enlazar las partículas de materia prima mediante los procesos de difusión a alta temperatura. A nivel microscópico el enlace se produce al formarse cuellos cohesivos en los puntos de contacto de las partículas, que con el tiempo van creciendo paulatinamente. El crecimiento de los cuellos de unión durante la sinterización depende de la forma que tengan las partículas. El caso más general es que las partículas tengan geometría esférica, y según este modelo se presentan varias etapas durante el sinterizado que son seguidas aproximadamente por otras geometrías [28].

El proceso está destinado a enlazar las partículas de materia prima mediante los procesos de difusión a alta temperatura. A nivel microscópico el enlace se produce al formarse cuellos cohesivos en los puntos de contacto de las partículas, que con el tiempo van creciendo paulatinamente. El crecimiento de los cuellos de unión durante la sinterización depende de la forma que tengan las partículas. El caso más general es que las partículas tengan geometría esférica véase figura 9, y según este modelo se presentan varias etapas durante el sinterizado que son seguidas aproximadamente por otras geometrías.

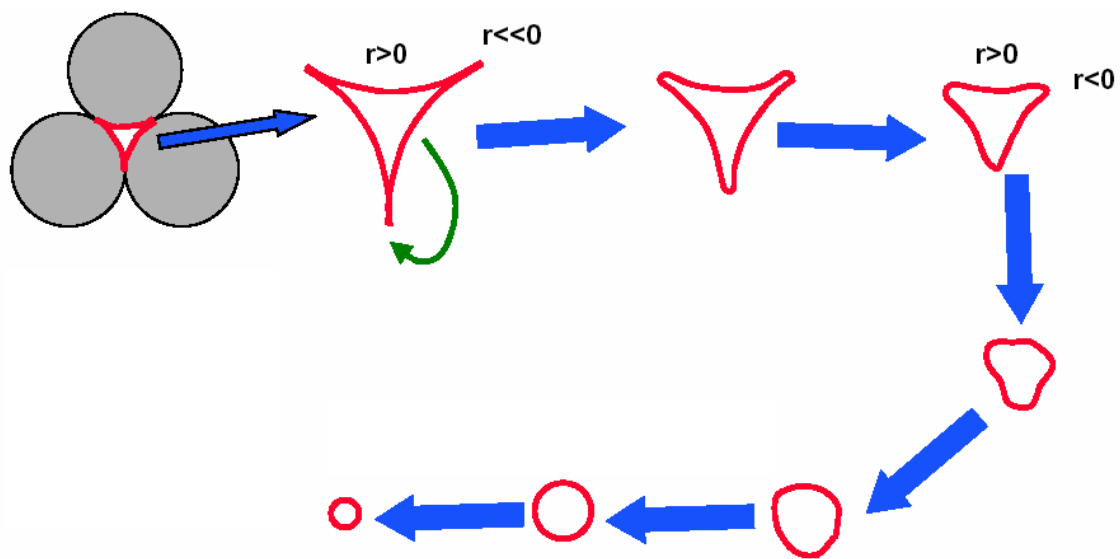


Figura. 9. Cambio en la forma y tamaño de los poros durante la sinterización, originado por los procesos de difusión atómica en los cuellos [74].

La sinterización se desarrolla en tres etapas, primero las partículas en contacto establecen los cuellos y forman los límites de grano entre sí. En esta etapa las contracciones del cuerpo compacto todavía no son importantes. En la segunda etapa se produce el engrosamiento de los cuellos hasta cerrar los canales existentes, resultando en la formación de una porosidad cerrada, y produciendo un aumento de la densidad en el material. Finalmente, en la última etapa se redondea la porosidad y sirve de elemento que se opone al crecimiento de los límites de grano, reduciéndose de esta forma la densificación de la materia [74]. Véase figura 10.

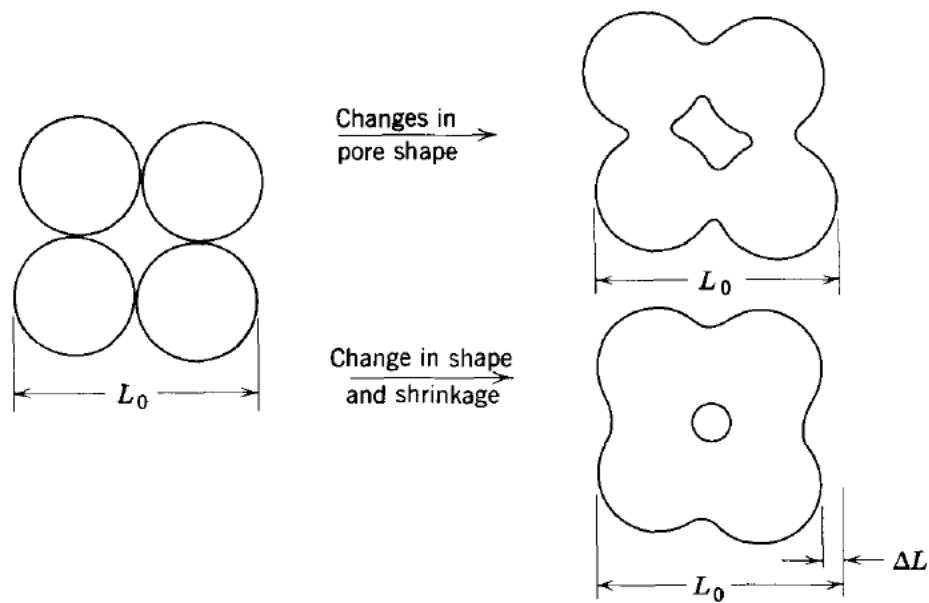


Figura. 10. En la parte izquierda contacto inicial para comenzar a formar los cuellos, en la parte superior derecha crecimiento de límites de grano y cierre de la porosidad; en la parte inferior redondeo de porosidad y densificación [74].

Para conocer los intervalos en las diferentes etapas, y conseguir ajustar la densidad de la pieza procesada y la economía del proceso; se emplean las curvas de sinterabilidad que son una representación de la densidad frente a la temperatura [28]. En la figura 11 se puede observar los cambios de comportamiento según se atraviesan las distintas regiones.

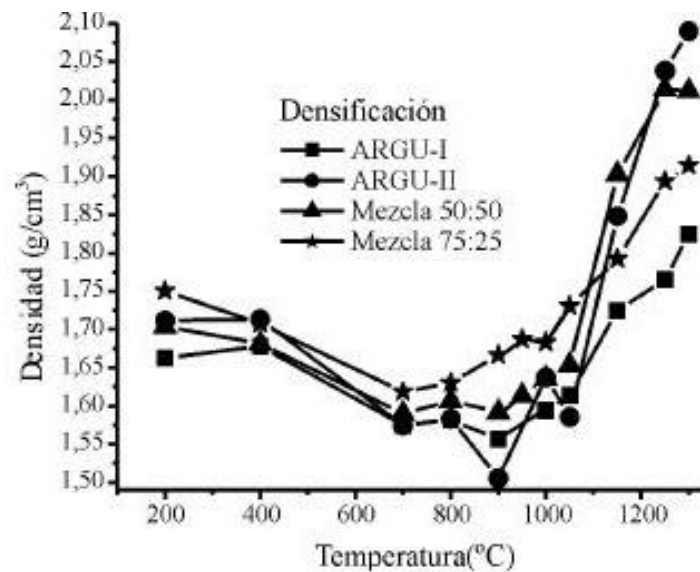


Figura. 11. Curvas de sinterabilidad de arcillas con distintas proporciones de materia orgánica. [28].

Los materiales pueden enlazarse de maneras distintas en los procesos de sinterización. Existen cuatro modelos fundamentales de adhesión. Sinterización supersolidus que se presenta cuando algún componente de la materia prima es capaz de aportar fase líquida. Cuando la materia prima es capaz de reaccionar y formar compuestos gracias a la temperatura, se conoce como sinterización reactiva. Cuando algún componente aporta fase líquida de forma completa se conoce como sinterización con fase líquida, y finalmente si un material previo que conforma una estructura de celdas abiertas denominado preforma; se le introduce una fase líquida en las cavidades se conoce como sinterización de infiltración de preformas.

Estas fases descritas en su forma general son comunes a la mayoría de los materiales cerámicos, aunque existen materiales que su conformado es de carácter reactivo, como sucede con los cementos y yesos. También hay que destacar que la tecnología de polvos no es una técnica exclusiva de las cerámicas, ya que también es empleada para el procesado de diversos metales.



5.2. Cerámicas convencionales

En este apartado se pretende exponer las técnicas empleadas particularmente para la obtención de materiales arquitectónicos destinados al acondicionamiento acústico.

5.2.1. Fabricación de ladrillos, tejas, y baldosas

El material base es la arcilla con distintas mezclas de margas, esquistos, y arena [62]. De esta forma se alcanzan las características de textura, plasticidad, regularidad y contracción, y color. La fabricación se hace en el lugar de extracción de la arcilla, que es adaptada a las necesidades del producto final, y según el grado que posea la materia prima; mediante trituración, molienda, tamizado, mezclado con aditivos. En el caso de los ladrillos, la arcilla se mantiene troceada y humedecida en mezcladoras hasta la utilización. Cuando se va a formar el cuerpo en verde del ladrillo, se amasa formándose un continuo que posteriormente se extrusiona con la sección deseada. Una vez realizada la sección se corta mediante alambre a la distancia determinada. Esta serie de piezas se introduce en un horno de secado entre 100°C y 200°C para eliminar la humedad mediante corrientes de aire, y reducir el coste en el posterior proceso de sinterizado. El proceso de cocción ó sinterizado puede variar mucho la temperatura según sea el producto final, habitualmente se opera entre 900°C para el caso de ladrillos ordinarios, hasta 1400°C cuando se busca una buena densificación ó superficies de reducida porosidad. En algunos materiales se realizan procesos de esmaltado para evitar la penetración de agua en los poros, ó por motivos estéticos [27].

5.2.2. Reactividad de cementos y yesos

Existe un conjunto de materiales cerámicos muy empleados en la construcción que permite la unión con otros elementos gracias a las reacciones que se producen cuando se adiciona agua. Las etapas de fabricación de estos materiales son bastante particulares, por lo que indicaremos los rasgos más distintivos que son la presencia de la cal como elemento hidrófilo, y el empleo de temperatura para obtener un mayor grado de eliminación de agua formando complejos. Cuando el material se mezcla con



agua comienza a reaccionar produciéndose la formación de enlaces resistentes y generación de calor. Los materiales obtenidos de esta forma suelen tener una densidad alta, y por ello suelen comportarse como aislantes del sonido ya que reflejan con facilidad las ondas acústicas [27].

5.3. Cerámicas recicladas

La presencia de materiales acústicos realizados con cerámicas, es limitada. Pero en el caso de materiales reciclados se limita únicamente al empleo de lanas de roca y vidrio, como paneles acústicos. Para obtener dichos paneles, se recupera de las construcciones estos tipos de lana, y por separado se someten a un proceso de aumento de temperatura hasta los 150°C, para conseguir un reblandecimiento de las resinas, al conjunto obtenido se le añaden nuevos ligantes y se somete a presión el conjunto. De esta forma se consigue un material de mayor densidad, aunque menos absorbente; pero que se puede destinar como pantallas acústicas de techos.

Sin embargo la realización de materiales cerámicos de carácter estructural a partir de residuos, si que tiene un cierto desarrollo. Aunque a día de hoy todavía no se han investigado en profundidad las propiedades acústicas. Los métodos actualmente empleados para la fabricación de estos materiales, son de interés para el futuro procesado de materiales cerámicos con propiedades acústicas. A continuación se enumeran las etapas empleadas habitualmente para el tratamiento de estos materiales, y sus características particulares en los procesos de reciclado [29].

5.3.1. Molienda

La adecuación de tamaño es fundamental para poder realizar el proceso posterior de sinterizado, cuando se trata de materiales reciclados es necesario que estén bien seleccionados, para incluir la menor cantidad posible de otras materias que alteren las propiedades. Pero también es importante para que aumentar la superficie del material a procesar, y que proporcionalmente la superficie de impurezas sea pequeña. Según la



energía que se emplee en realizar esta adecuación, mayor grado de reducción de las partículas se obtendrá [27,28, 60].

5.3.2. Conformado húmedo, y plástico

Los materiales reciclados tienen la problemática de presentar una mayor dificultad para hidratarse ya que han sido sometidos a procesos de curado, ó a procesos de sinterizado; luego la materia esta mucho mas densificada. Es por este motivo que aunque se emplean las mismas técnicas de moldeo que en los materiales convencionales, estén muy extendidas técnicas destinadas al aglutinamiento. Como en el caso del proceso STARCH. Por otro lado también se emplean métodos de flujo plástico para la producción por inyección o extrusión, que apenas tienen variaciones con los métodos convencionales [28, 61].

5.3.3. Proceso STARCH

Este proceso de moldeo consiste en el empleo de aglutinantes orgánicos, concretamente almidones para conseguir un comportamiento plástico en técnicas de moldeo. Habitualmente el moldeo en barbotina emplea una suspensión líquida, para después eliminar el líquido gracias a la porosidad del molde. En el caso del proceso STARCH el flujo es plástico, ya que se emplean moldes metálicos, poliméricos, ó que carecen de poros. La ventaja de este proceso es que el aglutinante ofrece una unión polimérica hasta que en el proceso de secado es eliminado por acción de la temperatura [30, 54].

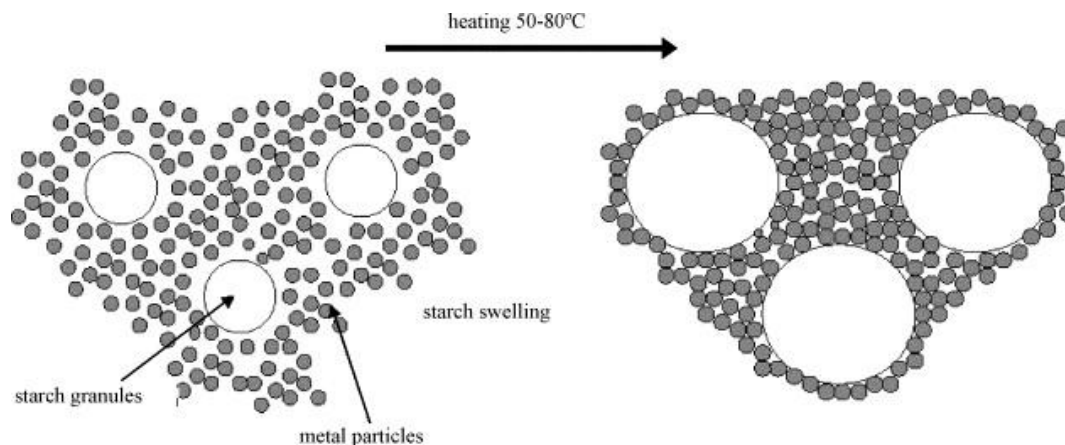


Figura. 12. Mecanismo de consolidación de la pieza en verde mediante almidón [82].

5.3.4. Secado

Al igual que en los procesos convencionales el secado está destinado a obtener de forma rápida el cuerpo en verde para poder ser manipulado. Si el secado se produjera en el ambiente, existe la problemática [28] de que los aditivos añadidos al polvo reciclado se puedan separar de la fase líquida. Esta separación daría origen a fallos en el proceso de sinterizado, debido a que la densidad en verde no sería homogénea [27, 28].

5.3.5. Sinterización

Finalmente en el proceso de consolidación los residuos cerámicos tienen la ventaja de que presentan gran uniformidad en el tamaño a diferencia de otras cerámicas convencionales. Sin embargo la presencia de materia orgánica, u otros materiales cerámicos no extraídos. Pueden originar procesos de formación de cuellos incompletos [28, 74] en el primer caso, y en el caso de otros cerámicos que se sintericen; presentando diferentes propiedades mecánicas con el material base [28].

Cabe indicar que actualmente no se dispone de información suficiente sobre el procesamiento de materiales cerámicos reciclados. Por lo que este trabajo está enfocado a determinar características de los materiales que mejoren las propiedades acústicas, pero no se desarrollara en profundidad que técnicas de fabricación son necesarias para



alcanzar dichas características. La exposición de las técnicas de procesado, está motivada por el empleo en los ensayos acústicos de materiales obtenidos por estos métodos, o reutilizados.



II. MODELOS MATEMÁTICOS



6. Introducción a los modelos

Los modelos matemáticos son herramientas que se emplean habitualmente la ciencia para recoger las relaciones existentes entre los hechos que suceden en la naturaleza, y el formulismo matemático que lo interpreta. Su aplicación es debida a la necesidad de determinar comportamientos, que resultan complejos de observar o repetir, por las características del propio sistema. A nivel técnico es una herramienta de gran importancia en el diseño, ya que permite escalar el comportamiento de un fenómeno, ó imponer condiciones que se adapten a la problemática estudiada. La clasificación de los modelos está basada en la capacidad de estos para aportar datos cualitativos ó cuantitativos del fenómeno. Siendo más importante el método de obtención, que se basa en la deducción ó la inducción (Este carácter marca lo empíricos ó racionales que son los modelos). Para los materiales estudiados los modelos son primordialmente empíricos, basados en la obtención de propiedades acústicas a partir de muestras de material muy bien definidas.

Los modelos que se expondrán están centrados en las propiedades acústicas y mecánicas, pero según las características estudiadas tendrán mayor influencia los comportamientos poroelásticos, o de amortiguamiento másico. Ya que éstas son a priori las tendencias que pueden manifestar los materiales bajo estudio. El objetivo de conocer los modelos para estos materiales es que nos sirvan para poder hacer la comparación entre los materiales estudiados, y poder describir cómo se pueden comportar si estos se modifican. Pero también es de gran importancia poder aplicar modelos para obtener otras propiedades de carácter intrínseco a partir de las acústicas conocidas mediante los ensayos realizados con el tubo de impedancia [23].

En otra línea de trabajo esta la utilización de la estadística del módulo de Weibull. El empleo de este método está destinado a poder conocer la fiabilidad de los ensayos, y de las propiedades de los materiales, en cuanto a la dispersión que pueden presentar según sea el proceso de obtención; para la variable de mayor importancia que es el coeficiente de absorción (α).



7. Modelos acústicos

Como se definió en la técnica de los materiales acústicos, los materiales cerámicos se rigen fundamentalmente, y en su mayoría por el modelo rígido de la Ley de Masas, y por modelos poroelásticos. Sin embargo existen algunas excepciones en el comportamiento originadas por las características superficiales del material, que generan frecuencias resonantes (Normalmente comportamiento mixto con los modelos anteriores, véase la gráfica 1 curva del coeficiente de absorción lineal idealizada). Los modelos poroelásticos y de masas buscan definir para las distintas frecuencias el comportamiento de las propiedades acústicas, destacando sobre todo el coeficiente de absorción y la impedancia acústica específica.

Los modelos poroelásticos se emplean en el caso de materiales que presenten cavidades en su interior en un rango que puede variar entre algunos milímetros a unos pocos micrómetros. Los materiales pueden formarse por conjuntos de fibras discontinuas, basados en esqueletos del material, o apilamiento de esferas. Para poder explicar la acústica de estos materiales, se debe comprender el modelo mecánico fundamental de la poroelasticidad de Biot [21, 22, 23], y su adaptación a la acústica. El origen del estudio de materiales porosos, se debió a la necesidad de explicar la mecánica geotécnica de suelos disgregados. Esta disciplina tiene una gran importancia en el análisis de cimentaciones, en el empuje originado por sedimentos en represas, y en los procesos de extracción de petróleo; entre otros.

7.1. Modelo o ecuaciones de Biot

El modelo o ecuaciones de Biot [22, 23, 71] se explican suponiendo un material poroso que tiene un fluido contenido en el interior de las cavidades del material. Se busca obtener las deformaciones de este material conocidas las tensiones del mismo. Para ello se considera un volumen elemental formado por el sólido y el fluido. Este volumen debe cumplir las siguientes condiciones.



-El volumen considerado es mucho mayor que el tamaño de los poros y la estructura del sólido.

-La presión ejercida sobre las caras es homogénea, y se considera que la longitud de onda en el caso de una perturbación es mucho mayor que el volumen considerado.

- El material sólido tendrá comportamiento homogéneo e isótropo, y se puede tratar como si fuera infinitesimal.

De esta manera se puede separar el tensor de tensiones en dos partes. La parte originada por el sólido ($\bar{\bar{\sigma}}_s$), y la originada por el fluido($\bar{\bar{\sigma}}_f$).

$$\bar{\bar{\sigma}}_s = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad E.15$$

$$\bar{\bar{\sigma}}_f = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix} \quad E.16$$

Donde σ_1 puede verse en la ecuación 17:

$$\sigma_1 = \phi \cdot p \quad E.17$$

Donde ϕ se conoce como porosidad, y es el cociente entre el volumen de cavidades en una muestra y el volumen de la muestra. De forma análoga se puede expresar los tensores de deformación.

$$\bar{\bar{\varepsilon}}_s = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{\varepsilon_{xy}}{2} & \frac{\varepsilon_{xz}}{2} \\ \frac{\varepsilon_{yx}}{2} & \varepsilon_{yy} & \frac{\varepsilon_{yz}}{2} \\ \frac{\varepsilon_{zx}}{2} & \frac{\varepsilon_{zy}}{2} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad E.18$$



Donde:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} i = j, \frac{\partial L_i}{\partial i} \\ i \neq j, \left(\frac{\partial L_i}{\partial j} + \frac{\partial L_j}{\partial i} \right) \end{cases} \quad E.19$$

Para el fluido se tiene, en la diagonal principal del tensor:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad E.20$$

Las ecuaciones de continuidad son las siguientes. Siendo ξ la infiltración de fluido del exterior debido a la cantidad de fluido w . Mientras que U y u son la velocidad de la fase líquida y la fase sólida respectivamente.

$$\xi = -\nabla w \quad E.21$$

$$\dot{w} = \phi \cdot (\dot{U} - \dot{u}) \quad E.22$$

Ahora bien si se considera que el material es elástico lineal, la relación entre las tensiones y deformaciones son:

$$\sigma_{ij} = \lambda_0 \cdot \text{traza}(\bar{\bar{\varepsilon}}_s) \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij} - \beta \cdot p \cdot \delta_{ij} \quad E.23$$

$$\xi = \frac{1}{M} \cdot p + \beta \cdot \text{traza}(\bar{\bar{\varepsilon}}_s) \quad E.24$$

Como se puede ver λ y μ son las constantes de Lamé, considerando el caso isótropo. Mientras que M es un coeficiente que determina la presión necesaria para incrementar en una unidad el volumen de fluido, para una deformación isovolumétrica. En el caso de β es otro coeficiente para determinar la presión necesaria para extraer el fluido en un sistema abierto.



La energía potencial para el sistema se expresa en la ecuación 25:

$$dE_p = \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} + p \cdot d\varepsilon_1 \quad E.25$$

Las ecuaciones del movimiento del fluido en el interior de las celdas del material se indican en la 26 y 27:

$$\sigma_{ij,j} = \rho \cdot \ddot{u}_i + \rho_f \cdot \ddot{w}_i \quad E.26$$

$$-p_{,i} = \rho_f \cdot \ddot{u}_i + \rho_w \cdot \ddot{w}_i + \frac{1}{\gamma} \cdot \dot{w}_i \quad E.27$$

Ambas ecuaciones expresan las densidades del fluido ρ_f , la densidad total del material según la regla de las mezclas ρ ; y la densidad relativa ρ_w que depende de la forma de los poros, según la tortuosidad. Véase ecuación 28. Finalmente γ es la transmisibilidad del fluido y expresa la viscosidad del mismo. (Ecuación 29).

$$\rho_w = \frac{a}{\phi} \cdot \rho_f \quad E.28$$

$$\dot{\eta} \cdot \gamma = \frac{k}{\eta} \quad E.29$$

Donde k es la permeabilidad del sólido.

En el caso de estudio de la acústica, el modelo de Biot finalmente se consigue expresar mediante la ecuación de onda [22, 24, 25]. Siendo:

$$(\lambda + 2\mu) \cdot \nabla^2 u + Y \cdot \nabla^2 U - \mu \nabla \times \nabla \times u = \rho_{11} \cdot \ddot{u} + \rho_{12} \cdot \ddot{U} + b \cdot (\dot{u} - \dot{U}) \quad E.30$$

Donde se presentan el conjunto de constantes de Biot. Estas constantes son comunes a las formas de desarrollo del modelo, según los campos de estudio. Presentan las



relaciones entre las propiedades elásticas, de densidades, y de flujo de los medios que conforman el material:

$$\lambda = \lambda_0 + M \cdot \beta^2 + M \cdot \phi \cdot (\phi - 2 \cdot \beta) \quad E.31$$

$$Y = M \cdot \phi \cdot (\beta - \phi) \quad E.32$$

$$\rho_{11} = \rho + \rho_f \cdot \phi \cdot (a - 2) \quad E.33$$

$$\rho_{12} = \rho_f \cdot \phi \cdot (1 - a) \quad E.34$$

Finalmente la constante más importante del modelo permite de forma directa relacionar la porosidad, y es muy empleada para obtener la geometría y el comportamiento del flujo.

$$b = \frac{\phi^2}{\gamma} \quad E.35$$

Hay que destacar que esta formulación es la más general para el caso de propagación de ondas en el material. Otras disciplinas se pueden basar únicamente en las ecuaciones elásticas. Para el caso de aplicaciones estructurales como el aluminio de celda abierta, empleado para aumentar la rigidez de nervios huecos, evitando añadir masa; siendo muy empleado en automoción véase figura 13. Este material es bastante singular, y es de referencia en el estudio poroelástico, debido a sus características bien definidas y su facilidad de estudio por tener una porosidad macroscópica. La forma de procesar el aluminio de celda abierta se basa en procesos que tienen interés en este proyecto como es el sinterizado, pero también puede obtenerse mediante espumado con gases inertes. Sin embargo el modelo en el caso de la propagación de ondas, no se limita solo al caso de la acústica; también se aplica a la geotecnia sísmica [23].

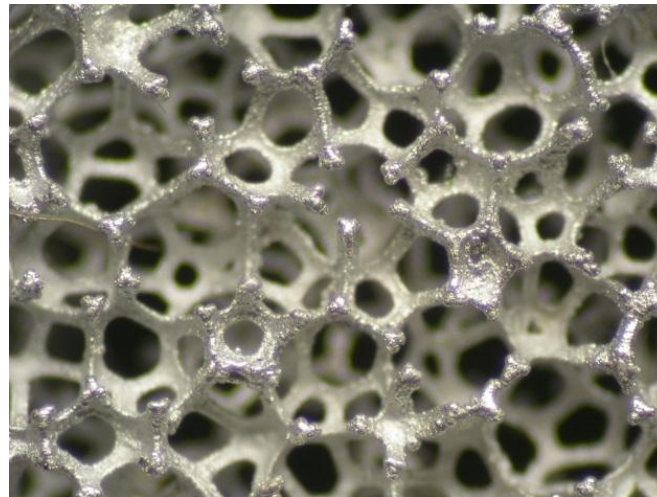


Figura. 13. Aluminio poroso, estructura de celda abierta en el punto límite de formación de retícula [80].

Cabe destacar del modelo de Biot, que se adapta fácilmente a múltiples fluidos, como es el caso del agua y el aire en el estudio de sedimentos, o acústica del fondo marino [22]. También permite considerar que la estructura porosa se encuentra aislada en su contorno, no existiendo flujo del fluido. También permite estudiar el caso de celda cerrada, y celda abierta; que es la situación en la que el fluido puede circular entre los poros. Este caso se puede particularizar cuando $\beta = \xi = 0 \rightarrow M = \infty$, esto indica que no hay filtración, y tampoco cambios de presión debidos al flujo; luego la presión ejercida para incrementar el volumen de aire es infinita. Esta condición expresa la posibilidad de estudiar un material que carece de porosidad (Esta condición como se verá en el caso de las propiedades acústicas intrínsecas, permitirá estudiar una gran variedad de materiales). Finalmente indicar que las ecuaciones planteadas por Biot se han empleado en los resultados obtenidos en laboratorio para diversos materiales, confirmado experimentalmente la validez del modelo. En la figura 14 se pueden ver diferentes tipos de celdas abiertas, y cerradas, donde se pueden presentar distintas condiciones del modelo.

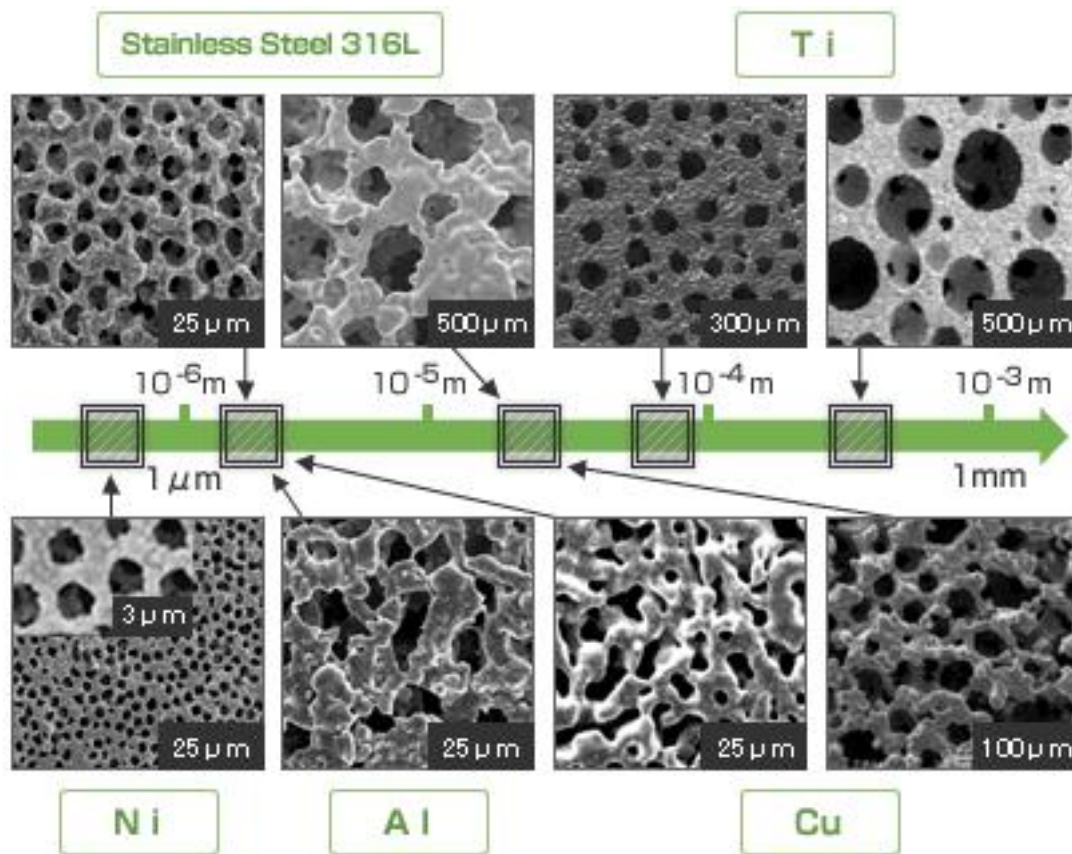


Figura. 14. Conjunto de materiales metálicos obtenidos mediante pulvimetalurgia, que muestran distintos tipos de poros [80].

7.1.1. Modelo de Johnson-Champoux-Allard

Para el estudio de los materiales acústicos absorbentes, como es el caso de algunas cerámicas; el modelo de Biot es aplicable pero no resulta práctico [20, 23, 24, 46, 47].

Por este motivo Allard adaptó el modelo a las propiedades de la acústica; Conociéndose éste como el modelo de Biot-Allard, o de la poroelasticidad acústica. Este modelo se fue adaptando por diversos autores [20, 65,70] hasta obtener un modelo de 5 parámetros (modelo de Johnson-Champoux-Allard) [20, 47, 70] que pueden ser determinados con el coeficiente de absorción, y la impedancia para cada frecuencia. Pero también permite diseñar la curva de absorción de un material, conocidos dichos parámetros. A continuación se presentan las ecuaciones de este modelo, donde hay que destacar la utilización del módulo de compresibilidad isoterma



efectivo K_e y la densidad efectiva ρ_e , los cuales no tienen interpretación física directa porque se trata de magnitudes complejas. El resto de variables son para simplificar la exposición de la ecuación como en el caso de A , H , y H' , y los propios parámetros acústicos del material $\{\alpha_\infty, \phi, \sigma, \Lambda, \Lambda'\}$.

$$Z_n(\omega_i, a) = j \frac{1}{Z_0} \sqrt{\rho_e(\omega) \cdot K_e(\omega)} \cdot \text{Cot} \left(\omega \cdot h \sqrt{\frac{\rho_e(\omega)}{K_e(\omega)}} \right) \quad E.36$$

$$K_e(\omega) = \frac{\gamma \cdot p_0}{\gamma - (\gamma - 1) \cdot \left(1 - j \frac{H'}{2\omega} \sqrt{1 + j \frac{\omega}{H'}} \right)^{-1}} \quad E.37$$

$$\rho_e(\omega) = \left(\frac{1}{\rho_0 \cdot A(\omega)} + B \cdot \frac{\left(\frac{\phi}{A(\omega)} - 1 \right)^2}{\phi \cdot \rho_1 + \phi^2 \cdot \rho_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{A(\omega)} \right)} \right)^{-1} \quad E.38$$

$$A(\omega) = \left(1 - j \frac{\phi \cdot \sigma}{\omega \cdot \rho_0 \cdot \alpha_\infty} \cdot \sqrt{1 + j \frac{\omega}{H}} \right) \quad E.39$$

$$H = \frac{\sigma^2 \cdot \Lambda^2 \cdot \phi^2}{4 \cdot \alpha_\infty \cdot \eta \cdot \rho_0} \quad E.40$$

$$H' = \frac{16 \cdot \eta}{B^2 \cdot \Lambda'^2 \cdot \rho_0} \quad E.41$$

$$\alpha(\omega_i, a) = 1 - \left| \frac{Z(\omega_i, a) - 1}{Z(\omega_i, a) + 1} \right|^2 \quad E.42$$

Ahora bien este modelo, aunque es muy completo para obtener la fenomenología de la interacción de las ondas acústicas con los medios porosos, presenta el inconveniente



de que para resolverlo de forma inversa, es decir, empleando la curva del coeficiente de absorción frente la frecuencia para obtener los cinco parámetros resulta muy complejo. Utilizándose múltiples métodos se puede resolver este problema, el de minimización es de carácter iterativo; pero también se puede resolver por métodos analíticos, evolutivos, híbridos, y Simplex.

De forma analítica se puede resolver con las siguientes expresiones 43, 44, y 45, y con ayuda del parámetro obtenido del modelo de Delany-Bazley [47, 48, 49]:

$$\sigma = \lim_{\omega \rightarrow \infty} (Im\{\rho_{eq}\} \cdot \omega) \quad E.43$$

$$\alpha_{\infty} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(\frac{c_0}{c(\omega)} \right)^2 \quad E.44$$

$$\phi = \sqrt{\alpha_{\infty}} \frac{1 - r(\omega)}{1 + r(\omega)}_{\omega \rightarrow \infty} \quad E.45$$

El error cometido por este procedimiento para expresar estos tres primeros parámetros es menor al 4%. Sin embargo, la forma analítica no resulta satisfactoria para la determinación de todos los parámetros, ya que las longitudes características se obtienen con un error muy elevado y variable. La constante s se toma con un valor de 1,6 para materiales cerámicos con poros de estructura esférica [20].

$$\Lambda = s \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \eta \cdot \alpha_{\infty}}{\phi \cdot \sigma}} \quad E.46$$

$$\Lambda' \approx 2 \cdot \Lambda \quad E.47$$



Finalmente se expone la ecuación 48 de minimización de la función objetivo, χ^2 para obtener $a = \{\alpha_\infty, \phi, \sigma, \Lambda, \Lambda'\}$. Este es el procedimiento de resolución más extendido a nivel computacional del método inverso, y que tiene para todos los parámetros un error relativamente bajo (la reducción del error se consigue con los métodos evolutivos, e híbridos) [48, 45].

$$\chi^2(a) = \sum_{i=1}^N \left[(\alpha_i - \alpha(\omega_i, a))_{h1}^2 + (\alpha_i - \alpha(\omega_i, a))_{h2}^2 \right] \quad E.48$$

7.1.2. Ecuaciones de Delany – Bazley

Estas ecuaciones [20, 43, 44] están basadas en un solo parámetro que es la resistencia al flujo estático σ . Al igual que el modelo de Johnson-Champoux-Allard, se puede emplear de forma directa ó inversa; pudiéndose resolver de forma sencilla en ambos sentidos. Este modelo es de carácter experimental, y presenta unos coeficientes de carácter general, y correcciones para estructuras porosas determinadas basadas en fibras, gránulos, mallas, etc. La gran ventaja que presenta este modelo es que permite obtener la resistencia al flujo, que junto a la porosidad y la tortuosidad, permite realizar la verificación con el modelo de Johnson-Champoux-Allard. Pudiéndose obtener los parámetros característicos del material de forma aproximada. Son dos las ecuaciones de Delany – Bazley, 49, y 50.

$$Z_c = \rho_0 \cdot c_0 \cdot \left(1 + 0.0571 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j \cdot 0.087 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right) \quad E.49$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \cdot \left(1 + 0.0978 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.700} - j \cdot 0.189 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right) \quad E.50$$

La ecuación 49, nos permite obtener la impedancia característica, mientras que la ecuación 50 indica el número de onda complejo de forma directa. Sin embargo en el procedimiento inverso, se necesita una ecuación que relacione ambas ecuaciones con la impedancia acústica específica.



$$Z = Z_c \cdot \cot(k \cdot l)$$

E.51

Donde l es el espesor de la muestra.

La utilización del modelo uniparamétrico y el de 5 parámetros [20], es empleado por los investigadores de materiales absorbentes para simplificar la obtención de los 5 parámetros aun siendo de forma aproximada. La importancia de los parámetros reside en las posibles vías de modificación del material y la posibilidad de adaptar la absorción a frecuencias determinadas. El inconveniente que presenta el modelo de Delany- Bazley, es que sería una forma sencilla de obtener el módulo elástico a partir de la impedancia característica, sin embargo sólo se puede emplear para un rango de materiales muy reducido que deben cumplir $0.001 < f/\sigma < 1$. Pero este es el menor inconveniente, ya que la impedancia de un material poroso contiene información del esqueleto del material, y el aire alojado; luego las propiedades elásticas no serían las del material.

7.2. Modelo para materiales densos: Ley de la masa

Hasta ahora hemos visto como en los materiales porosos se puede explicar matemáticamente sus propiedades acústicas, sin embargo existen gran cantidad de materiales acústicos que no presentan cavidades, y que predomina el aislamiento de sonidos debido a la reflexión en la superficie del material. Este conjunto de materiales se rigen por la Ley de la Masa, en la que el espesor y la densidad del sólido, son los parámetros determinantes para determinar el nivel de reducción sonora producido, y establecer la frecuencia crítica donde se produce la disminución de propiedades. La Ley de Masas tiene dos regiones que están separadas por la frecuencia critica, la primera zona, el comportamiento de la masa es predominante y directamente proporcional a la reducción sonora producida; sin embargo en la segunda zona las fuerzas de inercia alteran el comportamiento a altas frecuencias, produciéndose un decaimiento y un posterior cambio de reducción sonora con la frecuencia, que tiene la



misma pendiente que el tramo másico; como expresa la curva del coeficiente de absorción lineal idealizada, véase gráfica 1. Luego la Ley de Masas [11, 13, 14, 20] queda expresada de la siguiente manera:

$$PT = 18 \operatorname{Log} \left(\frac{f \cdot \rho \cdot e}{Z_0} \right) (dB) \quad E.52$$

La frecuencia crítica se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$f_c = \frac{c_0^2}{\pi \cdot e} \sqrt{\frac{3 \cdot \rho}{E}} \quad E.53$$

La ley de la masa resulta importante para cuantificar el aislamiento de paramentos arquitectónicos. Sin embargo es muy limitada con materiales muy densos en donde el acabado superficial resulta muy influyente en la transmisión, ya que las ondas de presión no solo pueden desplazarse en el material, pueden inducir vibraciones en el mismo como sucede con las membranas. También hay que añadir que la ley de masas no aporta información sobre las frecuencias bajas que según la densidad pueden estar situadas para $f \leq (200 - 500)Hz$. Esta es una gran dificultad ya que no permite estudiar los materiales de un espacio, donde se generan modos de vibración tanto en la estructura como en el aire.

7.3. Modelos acústicos intrínsecos

La medida de magnitudes acústicas es utilizada también para conocer propiedades elásticas del material conocidas como intrínsecas. Existen multitud de métodos para determinar el módulo de Young ó el coeficiente de Poisson[8, 10] entre otros basados en métodos de análisis del espectro audible de impactos sobre el material. Estos métodos presentan una precisión mayor que los basados en el cálculo de la pendiente en la curva tensión - deformación ingenieril en el ensayo de tracción simple. Al estar



tan extendidos este tipo de ensayo están regulados según las normas, E1875-00, E1876-07, C1198-96, entre otras [33, 34, 35]. Todas estas normas se basan en la producción de un impulso en una geometría determinada, y mediante modelos del sólido rígido se determina la velocidad de propagación según una dirección del material para estudiar tanto deformaciones longitudinales, como transversales. Las ventajas de estos métodos son que el equipamiento es sencillo, la realización del ensayo también, y no hay destrucción de la muestra. Sin embargo, presenta inconvenientes como probetas de elevado tamaño y determinada geometría, no permite el ensayo de muchos materiales porque se pueden producir fractura; o no tengan suficiente rigidez como para emitir un sonido audible, y tampoco se pueden ensayar materiales porosos ó compuestos (Cabe señalar que para los MMCC, existen algunas correcciones para emplear estos métodos; aunque la determinación experimental aun está limitada al método de tracción simple) [35].

Algunos de los problemas de los métodos acústicos expuestos, se han tratado de abordar mediante el análisis del espectro del coeficiente de absorción de los distintos materiales [4]. La absorción de los materiales tiene una relación directa con las frecuencias de resonancia de la zona viscoelástica de la curva idealizada del coeficiente de absorción lineal. Luego identificando donde se encuentran dichas frecuencias de resonancia se consigue determinar la amortiguación que afecta al material, y gracias a este parámetro el modelo de Biot - Allard, se puede adaptar para que la densidad y módulo de compresibilidad isoterma se expresen de forma real; pudiendo obtenerse con ello el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, constantes suficientes para definir la elasticidad de un material isótropo.

La determinación de las propiedades elásticas mediante el empleo del tubo de impedancia, se realiza obteniendo el espectro del coeficiente de absorción en el rango de los 800 *Hz* a los 6300 *Hz*; realizando el ensayo normalizado con algunas variaciones. Estas condiciones de ensayo son las siguientes:

- La probeta debe colocarse asentada sobre la terminación rígida del tubo de impedancia, evitando cavidades de aire que puedan resonar en el ensayo.



-Las condiciones de contorno entre el tubo de impedancia, y la probeta deben ser tales para que exista un ajuste holgado, que no genere presiones en la probeta que afectan las condiciones del ensayo.

-La probeta debe estar desacoplada mecánicamente del tubo, para evitar que se extiendan vibraciones a la misma.

Con estas condiciones se pueden obtener las propiedades elásticas, con el método que proponen F. Chevillotte, R. Panneton, y J. Tran Van [49].

El módulo elástico de un material en función del coeficiente de Poisson y el módulo de compresibilidad isoterma se expresa según la ecuación 49.

$$E = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)} \cdot K_b \quad E.54$$

Sabiendo que el coeficiente de absorción lineal se puede expresar como:

$$\alpha(\omega) = 1 - \left| \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \right|^2 \quad E.55$$

Siendo la impedancia acústica.

$$Z(\omega) = \sqrt{\rho \cdot K_e} \cdot \coth \left(j \cdot \omega \cdot L \cdot \sqrt{\frac{\rho}{K_e}} \right) \quad E.56$$

El módulo de compresibilidad isoterma equivalente de carácter complejo, se puede expresar de tal forma que sea función del módulo de compresibilidad isoterma real, y del factor de pérdidas de amortiguamiento.

$$K_e = K_b \sqrt{1 + j \cdot \eta} \quad E.57$$



A partir de las ecuaciones 55, 56, y 57 se puede obtener la siguiente expresión:

$$\alpha(\omega) = 1 - \left| \frac{\pi \cdot \sqrt{\rho \cdot K_b} \cdot \eta - 4 \cdot Z_0}{\pi \cdot \sqrt{\rho \cdot K_b} \cdot \eta + 4 \cdot Z_0} \right|^2 \quad E.58$$

Para obtener el valor del módulo compresibilidad isoterma hay que conocer el valor que toma el coeficiente de absorción en la mayor resonancia acústica absorbente. Generalmente esta es la primera y más pronunciada del espectro, al comenzar la región III de la curva del coeficiente de absorción idealizada, véase gráfica 1.

En lo que respecta al factor de pérdidas de amortiguamiento, se necesita calcularlo también con el coeficiente de absorción lineal en la resonancia.

$$\alpha(\omega) = 1 - \left| \frac{\eta_r - 1}{\eta_r + 1} \right|^2 \quad E.59$$

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_{opt}^b} \quad E.60$$

$$\eta_{opt} = \frac{2 \cdot Z_0}{\omega \cdot \rho \cdot L} \quad E.61$$

Obtener con exactitud el coeficiente de pérdidas de amortiguamiento resulta difícil, debido a que las perdidas exactas por calor ó por deformación de la estructura; son menores que las estimadas $\eta_{opt} \neq \eta_{opt}^b$. Por lo que se necesita realizar una corrección del factor [20, 49].

$$\eta_{opt}^b = \eta_{opt} \cdot (3,27 \cdot 10^{-5} \cdot (\alpha \cdot \rho)^2 - 6,2 \cdot 10^{-2} \cdot (\alpha \cdot \rho) + 16,86) \quad E.62$$

Esta corrección lo que tiene en cuenta es el porosidad que puede tener una muestra, sin considerar la introducción de esta variable. Cuanto más cercana este la muestra a una estructura porosa de celda abierta, y con una densidad media; tanto o más será la precisión del modelo.



Para determinar definitivamente el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, se emplea el residuo obtenido de las diferencias existentes entre las frecuencias; de varias muestras de un mismo material. Para el método se comparan 3 muestras, y se obtiene el coeficiente de Poisson.

$$R = \left| \frac{f_1^b(\nu, s_1)}{c_b(\nu, s_1)} \cdot L_1 - \frac{f_1^b(\nu, s_2)}{c_b(\nu, s_2)} \cdot L_2 \right| + \left| \frac{f_1^b(\nu, s_1)}{c_b(\nu, s_1)} \cdot L_1 - \frac{f_1^b(\nu, s_3)}{c_b(\nu, s_3)} \cdot L_3 \right| \quad E.63$$

Mediante la tabla 3 se pueden interpolar los valores del coeficiente de Poisson [49]:

$c_b \exists [0,5]$	s	ν
1.077	3.35	0.2
1.008	3.95	0.1
1.4997	1.25	0.3
1.5103	1.4	0.2
3.2744	0.5	0.3
3.3316	0.6	0.1

Tabla. 3. Valores del coeficiente de Poisson para cada denominador del residuo de la ecuación, y relación de aspecto [49].

8. Módulo de Weibull: Estudio de fiabilidad

La importancia del estudio de si un material resulta fiable con respecto a las propiedades, viene determinado por la necesidad técnica de la fabricación de que en las propiedades no solo exista el valor; también el mismo tiene que tener repetibilidad [53]. Esta clase de estudio permite encontrar en los materiales aquellos factores que intervienen en la dispersión de los valores, pudiéndose trabajar sobre ellos para obtener unas propiedades más estables en una muestra amplia del material.

Para analizar los datos obtenidos en los ensayos realizados, se emplea la distribución de Weibull de 2 parámetros [53, 52], esta distribución probabilística tiene la capacidad



de aportar información de comportamientos que sigan distintas funciones de probabilidad, aportando a su vez información de la evolución de errores con respecto del valor medio, y de la propiedad de referencia. La distribución de weibull es de la forma:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}; x \geq 0 \quad E.64$$

Y la densidad de probabilidad se expresa:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}; x \geq 0 \quad E.65$$

Siendo α y β respectivamente el parámetro de escala y de forma. Este ultimo parámetro es de especial importancia porque la pendiente en la forma linealizada de la densidad de probabilidad, es un indicador directo de la dispersión de los valores respecto a la distribución a la que se adaptan los datos. La dispersión de valores será menor cuanto mayor sea la pendiente β .

$$\ln \left[\ln \frac{1}{1 - F(x)} \right] = \beta \cdot \ln(x) - \beta \cdot \ln(\alpha) \quad E.66$$

Para poder operar con la forma linealizada se debe tener en cuenta la densidad de probabilidad $F(x)$, este valor dificulta el cálculo debido a la dependencia con la posición de los resultados. Es lo que se conoce como “rango de mediana”, y debe calcularse mediante un estimador. A continuación se muestra la ecuación de estimadores, y el estimador de rango de mediana de Bernard; que es el más ampliamente utilizado en el área de confiabilidad; aunque existen más estimadores que pueden aportar un ajuste más apropiado en algunos casos [52].

$$\ln \left[\ln \frac{1}{1 - F(x)} \right] = \beta \cdot \ln(x) - \beta \cdot \ln(\alpha) \quad E.67$$



$$F(x_i) = (j - 0.3)/(n + 0.4)$$

E. 68

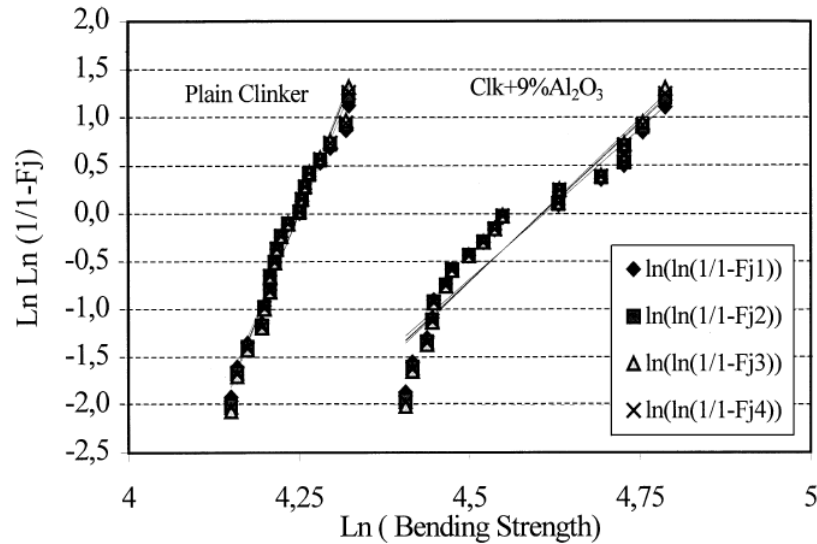


Figura. 15. Ejemplo de linealización de la distribución de Weibull [52].

Finalmente destacar que esta distribución es ampliamente utilizada para el estudio de la fiabilidad de maquinas y equipos, incluso comportamientos de supervivencia de seres vivos. Debido a que permite conocer cuando las tasas de fallo [54], según el periodo de estudio aumentan o disminuyen por la aparición de otras variables que afectan al sistema. Por este motivo también es empleada en el estudio de sistemas multivariantes.



III. MATERIALES Y MÉTODOS



9. Materiales

9.1. Origen de muestras

Para la realización del análisis de las propiedades de los materiales cerámicos reciclados, se ha realizado la preparación de un conjunto de probetas de varios orígenes y de distintos materiales. En un primer lugar, se han conseguido probetas de ladrillo ordinario, y de ladrillo caravista; para poder comparar el comportamiento de estos materiales convencionales, y con respecto a las cerámicas recicladas homólogas. Por otro lado se han obtenido probetas de material reciclado a partir de residuos de hormigón de dos series distintas, para compararlas directamente con la ley de masas, ya que el hormigón convencional y los materiales reciclados a partir de él; presentan una tipología completamente distinta.

En cuanto al origen de las probetas ensayadas, se han obtenido de tres formas distintas. Los materiales convencionales se han conseguido cortando piezas cerámicas de construcción, mientras que las probetas de hormigón se han empleado muestras procedentes de un ensayo de compresión convencional del proyecto *“Comportamiento frente a compresión de materiales cerámicos, fabricados mediante moldeo a partir de residuos de construcción”* [30, 54]. Finalmente las probetas de ladrillo reciclado han sido procesadas específicamente para este proyecto.

9.2. Probetas de materiales convencionales

9.2.1. Características

El hecho de realizar los ensayos sobre piezas de materiales convencionales empleados en la construcción, se ha visto motivado porque dentro de las funciones estructurales habituales en estas soluciones, también se han desarrollado condiciones de mejora de las propiedades acústicas, y por lo tanto hacer una comparativa con los materiales



fabricados a partir de polvo procedente de residuos. Por otro lado, se ha prestado atención al estudio de aquellos materiales que son el origen de los materiales procesados en el laboratorio; buscando con ello tener un mayor conocimiento de las diferencias existentes.

Los productos convencionales seleccionados para el estudio han sido el ladrillo caravista, que se trata de un material obtenido a partir de arcillas compuestas de filosilicatos con un tamaño de partículas menor de $20\mu m$ y en una proporción de un 30% en alúmina y un 60% en sílice; y que además contiene minerales secundarios como feldespato, y calcita. La representación de estos minerales secundarios, es menor al 7%, en el caso de los feldespatos tienen propiedades defloculantes que no son útiles en el proceso de extrusión, mientras que una cierta cantidad de calcita es útil como fundente, para realizar la cocción a menor temperatura. El resto generalmente es en su mayoría materia orgánica, o en cantidades muy reducidas ácidos, álcalis, menor del 0,2%; o sales también menor al 0,04%. Esta composición y las propiedades que debe alcanzar el material de los ladrillos caravista está regulado por las directivas europeas de marcado CE, y específicamente por la norma UNE 67019:1996 [37].

Para alcanzar las propiedades de este material el procedimiento está basado en un secado de 3 horas a $150^{\circ}C$, donde no se produce deformación apreciable, y posteriormente un sinterizado gradual de los ladrillos caravista que comienza en $400^{\circ}C$ y se eleva la temperatura durante 2 horas hasta $900^{\circ}C$ donde se mantienen los ladrillos por un periodo de 24 horas. Después de este tratamiento se introducen durante 3 horas en el horno con una temperatura de $1400^{\circ}C$ para formar mediante difusión una capa superficial de aproximadamente 2 mm de espesor, parcialmente vitrificada (gresificada); esta superficie solo se realiza sobre 3 superficies del producto que son un canto y las dos testas. Es precisamente la formación de esta capa la que otorga las propiedades para evitar las humedades en fachadas que puedan formar hielo en invierno, o ciclos térmicos en el cambio estacional; que deterioren el ladrillo.



Las características normalizadas del material de los ladrillos caravista son las siguientes:

Ladrillo caravista normalizado	
Densidad	2000 kg/m^3
Resistencia a compresión	39 MPa
Módulo de Young	50 GPa^*
Absorción agua	8,3%
succión	$0.004 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$
Eflorescencia	Ninguna
Reducción de nivel sonoro	19 dB
Conductividad térmica	$0,342 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Tabla. 4. Propiedades normalizadas de ladrillo caravista [37].

Las características expuestas solo son validas para ladrillos caravista sin empleo de clínker. Ya que actualmente en el mercado existen una serie de productos como son las baldosas y algunos ladrillos como el caravista que se fabrican íntegramente de clínker.



Figura. 16. Tipos de cerámica convencional, de izquierda a derecha ladrillo convencional de tabiquería, ladrillo caravista de paramentos exteriores, y bovedilla de forjado [79].



La geometría de los productos cerámicos, puede verse en la figura 16, también es de gran importancia, ya que el primer objetivo es mejorar las condiciones estructurales de los productos, y en segundo lugar satisfacer condiciones de aislamiento térmico. Por este motivo, la manipulación de la geometría puede resultar útil para la mejora de propiedades acústicas.

En el caso del material destinado a conformar productos de tabiquería véase figura 16, como pueden ser bovedillas, rasillones, ladrillos de hueco doble, etc., las características que presentan son muy distintas a los ladrillos caravista; pero pueden formar parte de los materiales reciclados bajo estudio. Los ladrillos destinados a tabiquería al emplearse en mayor cantidad, y al no tener unas condiciones ambientales como los dispuestos en paramentos exteriores, emplean materias primas menos seleccionadas, y las temperaturas de proceso son menores. Fundamentalmente se caracterizan por una menor presencia de sílice y alúmina en la pasta, y una mayor cantidad de compuestos orgánicos y de caliza para economizar el proceso de sinterizado. Una composición habitual y que es recogida en los intervalos de la norma UNE 67019:1996 [37, 63], es la que se expresa en la tabla 5.

Composición de la pasta empleada en cerámicas de tabiquería									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Organico	$CaCO_3$
49,00%	13,50%	4,00%	0,25%	2,00%	12,00%	1,75%	2,00%	15,50%	20,50%

Tabla. 5. Composición de la pasta empleada para la fabricación de cerámica de tabiquería.

El proceso de fabricación es idéntico al de el ladrillo caravista, salvo que la última fase de vitrificación de la superficie no se realiza; y en el proceso de moldeo se cambia la rugosidad superficial para favorecer la unión con los morteros.



Figura. 17. Línea de producción de ladrillos, proceso de entrada en horno continuo [78].

En la pasta empleada para estos materiales cerámicos hay que destacar la presencia de heterogeneidades que influyen significativamente en las propiedades mecánicas, y térmicas; y de forma secundaria en las propiedades acústicas. Al tratarse de materias primas utilizadas directamente desde la extracción, no tienen un proceso de cribado que deje únicamente la arcilla de tamaño adecuado. De esta forma, y según sean las condiciones presentes en la extracción, existen un conjunto de impurezas habituales como son el cuarzo, y el feldespato; que permanecen en el conjunto de la pasta. Estas impurezas generan que la red de partículas arcillosas no pueda contraerse libremente durante el sinterizado, produciendo tensiones residuales, fisuras, y desconexión de las impurezas con respecto a la pasta. A nivel mecánico, este conjunto de defectos disminuyen la resistencia del material, sin embargo a nivel acústico pueden dar origen a un incremento de la porosidad y con ello de la absorción, una buena reflexión debido a impurezas rígidas y densas; pero que tienen un acoplamiento con la arcilla bastante deficiente. La mayor dificultad que presenta este material es que necesita tanto cámaras, como enlucidos de yeso para facilitar el acoplamiento y con ello no solo aislar el sonido, sino también atenuarlo. Las características normalizadas del material de los ladrillos son las siguientes [37, 59]:



Ladrillo normalizado	
Densidad	1950 kg/m^3
Resistencia a compresión	10 MPa
Módulo de Young	35 GPa^*
Absorción agua	17,5%
succión	$0.03 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$
Eflorescencia	F0 (No exponer)
Conductividad térmica	$0,25 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Tabla. 6. Propiedades normalizadas de ladrillo convencional.

9.2.2. Corte y acondicionamiento superficial de muestras

Al tratarse de materiales cerámicos, aunque no son de elevada dureza; resulta necesario cortarlos con herramientas diamantadas. El tubo de impedancia, emplea muestras de 30mm y de 60mm de diámetro, sin embargo en los ensayos solo se han empleado probetas de 30 mm debido a que no se disponen herramientas de corte para otro tamaño de piezas. Para realizar el corte se ha empleado una corona de diamante IZAR® destinada al corte de gres mediante refrigeración por agua, y con un diámetro de 30 mm , y una profundidad de corte de 50 mm ; sin perforación central.

Esta herramienta se dispuso en un taladro de columna IRSA® con caja de reducciones. Para realizar el corte se emplearon los siguientes parámetros. Una velocidad de rotación de la herramienta de 250rpm , con un desplazamiento vertical de 14mm , refrigeración abundante de agua, y velocidad de desplazamiento vertical manual. Mediante este procedimiento se obtuvieron dos series distintas de probetas, la primera de 24 muestras de ladrillo caravista a partir de 4 cantos de la parte vista de la pieza cerámica, cortados mediante disco de diamante refrigerado por agua. Por otro lado, de ladrillo convencional se obtuvieron de bovedillas por el espacio de trabajo y la supercie lisa de las nervaduras de estas. De este material se obtuvieron 10 muestras, 2 por cada nervio. La diferencia entre las muestras está originada porque en el corte de las probetas de ladrillo caravista, no se conocía los posibles defectos que se podían



incorporar a las mediciones en esta etapa. En las muestras de ladrillo convencional, ya se conocía que sólo se incorporaban defectos cuando la refrigeración resultaba insuficiente. Al tratarse de materiales frágiles, y con bastante facilidad para fisurarse al estar expuestos a vibraciones; se empleo una envolvente de lámina de polietileno de 0,5mm de espesor.

Con este procedimiento se consiguió reducir en gran medida el fallo de las probetas por fisura durante la operación. En las probetas de ladrillo caravista, no se realizo ningún tipo de pulido para poder estudiar la capa vitrificada del material. Sin embargo en las probetas de ladrillo convencional, se pulió la superficie con un papel de carburo de silicio *P180*, mediante una pulidora marca Struers LaboPol-1, véase figura 18.



Figura. 18. Pulidora Struers LaboPol-1, empleada para obtener el grado superficial deseado en las muestras.



Las probetas obtenidas de ladrillo caravista (LC en adelante) pueden verse en la figura 19. Los cantos originales y procesados pueden apreciarse en la figura 20.



Figura. 19. Conjunto de muestras de ladrillo caravista (LC), en el momento en que se efectuaba el corte. Se observa la lámina empleada para evitar las vibraciones.

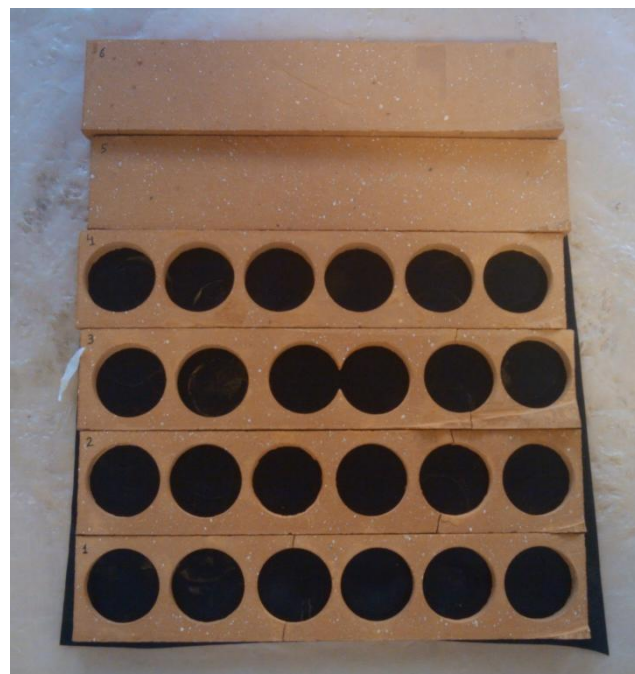


Figura. 20. Cantos empleados para extraer las muestras de ladrillo caravista (LC).



9.3. Probetas de materiales reciclados

9.3.1. Características

Las probetas empleadas pertenecen a ensayos anteriores [30], y están compuestas de los residuos de un hormigón HM-25-p-40-I con base de cemento Portland EN 197-1 CEM II/A-L 42,5 R (80-94% Portland), arena, grava, aditivos Rheobuild 570, y agua. Este hormigón fue molido hasta el grado de polvo de tamaño inferior a $63\ \mu m$, y se seleccionó dicho tamaño mediante tamizado. El polvo obtenido se empleó en el proyecto anterior *“Comportamiento frente a compresión de materiales cerámicos, fabricados mediante moldeo a partir de residuos de construcción”* [30] para obtener probetas para ensayos de resistencia a compresión.

Para su elaboración se siguió el proceso STARCH de almidón de arroz, para conseguir elaborar las probetas mediante moldeo. Estas probetas se sometieron a secado durante 4 horas a $110^{\circ}C$, para obtener la piezas en verde que una vez desmoldeadas se sinterizarían. La sinterización se realizó en varias etapas: 2 horas a $600^{\circ}C$, seguidamente otras 2 horas a $800^{\circ}C$ para realizar un presinterizado, y finalmente a $1150^{\circ}C$ se realiza la sinterización durante 2 horas.

Las características para los tipos de probetas obtenidas son las siguientes.

Cerámica de hormigón reciclado		
Propiedades	Probetas H1	Probetas H8
Densidad	$1130\ kg/m^3$	$1130\ kg/m^3$
Resistencia a compresión	$3,69\ MPa$	$3,83\ MPa$
Módulo de Young	$7,86\ GPa$	$8,69\ GPa$

Tabla. 7. Propiedades determinadas para el hormigón reciclado.

Las características expuestas son promediadas con respecto a los ensayos de compresión realizados en anterior proyecto [30].



9.3.2. Acondicionamiento de las probetas de hormigón procedente de un ensayo de compresión

Para evitar el empleo de materia de polvo de hormigón, y al disponer almacenadas una gran cantidad de probetas véase figura 21; se han empleado para realizar probetas para ensayos acústicos. Los ensayos acústicos no son destructivos, sin embargo los diversos proyectos [30, 54] realizados en el laboratorio de materiales generan una gran cantidad de probetas ensayadas a rotura. Por este motivo se ha buscado la forma de reincorporar las probetas a diversos estudios. En el presente caso, los daños sufridos por los ensayos de compresión, únicamente afectan en que las fisuras formadas recorren el material y aumentan la conexión de poros (este fenómeno mejora la absorción acústica debido a que aumenta la tortuosidad entre poros que anteriormente están menos comunicados). En nuestro caso, se ha minimizado cualquier tipo de influencia fuese positiva o negativa, puesto que los restos de los ensayos de compresión eran suficientemente grandes y alejados de lo que sería la zona de ensayo.

También hay que destacar que la reutilización, según la legislación de los RCD, es una forma de empleo de materiales prioritaria al reciclado; teniendo además un ciclo de vida mayor y más eficiente; que las probetas procesadas a partir de polvo de residuos de hormigón. El aprovechamiento de las probetas es limitado, y solo ha podido efectuarse en las probetas de hormigón porque tienen una tendencia elevada a fracturarse en forma de conos [30] debido a la tensión cortante a 45° con respecto a la carga uniaxial aplicada. En el caso de las probetas de ladrillo reciclado, la tendencia de rotura es en diversos tipos, predominando la rotura en cono. Sin embargo la rotura presenta unas características que imposibilitan el aprovechamiento de muestras, debido a que no queda un volumen suficiente.



Figura. 21. Inventario de probetas ensayadas a compresión, empleado para obtener muestras para ensayos acústicos.

Para obtener probetas útiles para los ensayos acústicos deben estar diametralmente en buen estado, y tener hasta 10 *mm* de altura como mínimo. Aunque existían algunas probetas con fisuras en el material originadas por los ensayos de compresión, las probetas que se sometieron a ensayo no podían tener ningún tipo de fisura que origine una baja integridad de la muestra, o que alcanzase las dos bases del cilindro; ya que los ensayos serían incorrectos.

Para extraer las probetas se realizó el corte mediante una sierra manual para metales, al tratarse de un material blando y con una porosidad considerable, el proceso resulta sumamente sencillo. Al proceder de esta manera las superficies no quedan suficientemente paralelas entre sí, y pueden quedar contornos de corte que restan planitud a las muestras. Por este motivo se realiza un lijado de las bases para evitar los problemas mencionados. Para el lijado, se ha empleado una pulidora con papel de desbaste de carburo de silicio #180.

Las probetas obtenidas se han conseguido de dos series distintas. Estas series de probetas son la H1 y la H8; la designación se basa en los residuos de los que provienen



(mismo material, distintos testigos de hormigón), y parámetros de molienda. En el caso de la muestra H1 se ha empleado mayor masa de bolas en el molino, que en el caso de las probetas H8; esto influye en que las partículas en la serie 1 han recibido impactos más súbitos facilitando la formación de aristas, mientras que en la serie 8 las partículas son más redondeadas. La trituración del H1 hace que la granulometría alcanzada sea más homogénea, aunque la forma de las partículas sea más irregular, mientras que en la H8 la morfología es más redondeada pero la dispersión granulométrica es mayor, de ahí los resultados en cuanto a la deformación observada en anteriores estudios [30].

9.3.3. Procesado de probetas a partir de residuos de ladrillo

Para completar el conjunto de materiales estudiados, y conocidos los ensayos sobre los ladrillos de tipo caravista y convencional, se obtuvieron muestras de ladrillo reciclado. Estas muestras se consiguieron procesar a partir de polvo de este residuo, del que se disponía una cierta cantidad. Al existir dificultades para la obtención de polvo cerámico de diversos materiales, se realizaron las probetas con material de la muestra L9, que a nivel mecánico obtuvo unos resultados algo inferiores a la muestra L12 en el proyecto, (Antón, N. ; Escudra, J. ; Pérez-Delgado, M. L., “Sinterabilidad de residuos cerámicos procedentes de la construcción: estudio previo”. Actas del II Congreso Nacional de Pulvimetalurgia, pags. 123-131. Leganés (Madrid). 2007.) [83]. Sin embargo a nivel acústico estas condiciones pueden resultar óptimas.

Para procesar las probetas se partió de una cantidad de 100 g para cada molde cilíndrico realizado en acero inoxidable con unas dimensiones de 33 mm de diámetro y 120 mm de altura. Con la masa de polvo cerámico de ladrillo, se calculó la masa necesaria de almidón de arroz para realizar el proceso STARCH la información de las cantidades de la mezcla, así como los procesos posteriores se obtuvieron del proyecto anteriormente mencionado [30]. Para las probetas realizadas se emplearon las siguientes proporciones, indicadas en la tabla 8.



Cantidades empleadas para la realización del moldeo por la técnica STARCH			
Molde	Polvo L9 (g)	Almidón de arroz (g en 125 ml)	Agua destilada (ml)
1	100,27	5,837	47,6
2	100,22	5,837	48,2
3	100,14	5,909	47,2
4	50,30	5,909	27,0

Tabla. 8. Cantidades empleadas en el proceso STARCH para las muestras L9.

Obtenida la pasta húmeda de ladrillo reciclado, se procede al llenado de los moldes. Los moldes se sitúan mediante silicona sobre una superficie metálica que permite el cierre. Las paredes del molde se cubren con una capa de vaselina que facilita el posterior desmoldeo de las piezas en verde. Una vez que se produce el llenado de los moldes, se someten a un vibrado manual, con el fin de eliminar el aire que pudiera introducirse durante el llenado.

Una vez realizado el llenado y la posterior eliminación de aire, se realiza el proceso de secado en el cual se mantienen las probetas a una temperatura de 110°C, durante 4 horas. Una vez que las probetas terminan este proceso, ya se tienen las piezas en verde que serán cortadas, y rectificadas. En las figuras 22, y 23, se pueden ver el proceso de secado, y las piezas extraídas de los moldes.



Figura. 22. Proceso de secado. Las piezas son retiradas de las bases para facilitar la pérdida de humedad.



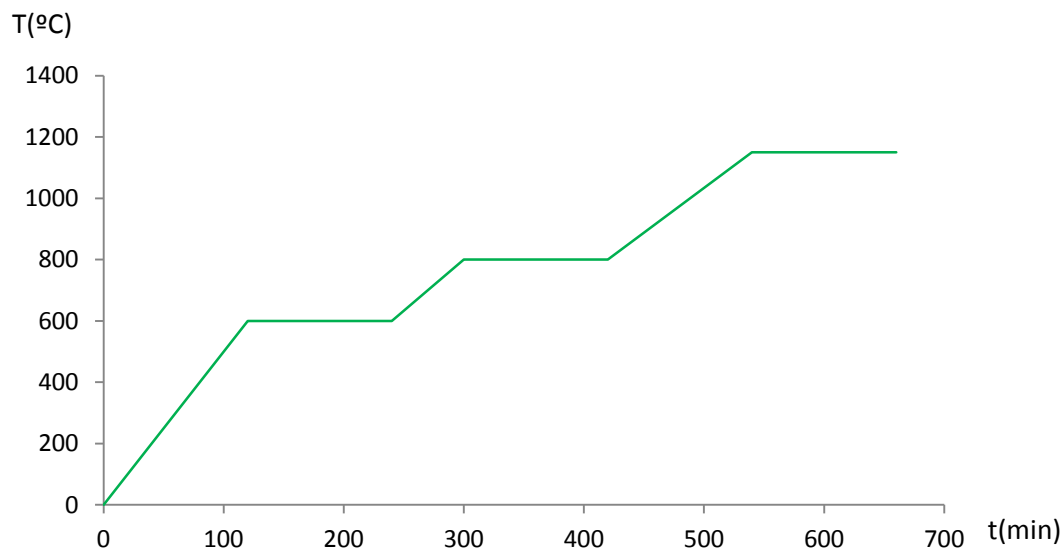
Figura. 23. Piezas extraídas de los moldes. Estado de las probetas en verde.

En la figura 23 se aprecia como las piezas en verde presentan un gran número de cavidades de aire. Esto es debido a que el proceso de vibrado no ha resultado suficiente para eliminar el aire de las piezas. Un motivo que puede haber afectado en



el proceso, es que la cantidad de agua en la pasta no fuera suficiente; y no fluyera adecuadamente llenando el molde.

Estas piezas fueron cortadas para obtener los tamaños necesarios para el tubo de impedancia considerando la reducción de volumen en el proceso de sinterizado, y facilitar el aprovechamiento de material. El proceso de sinterización sigue el s proceso de temperaturas que se ve en la gráfica 5, para la producción de los cuellos de unión. En el proceso se producen varias etapa de temperatura constante en el interior de un horno de mufla Microtest, la primera a 600°C se produce un “debinding”, proceso por el cual se separa de la pieza en verde restos orgánicos, y se facilita la posterior unión. A la temperatura de 800°C se realiza un presinterizado, destinado a la formación de cuellos de unión. Finalmente se produce el sinterizado a 1150°C, para engrosar los cuellos de unión, y desarrollar la densificación del material.



Gráfica. 5. Ciclo de calentamiento en el proceso de sinterizado de las muestras L9.

Una vez realizado el proceso de sinterizado de las muestras en verde, véase figura 24, el material está listo para caracterizarse tanto su densidad final, como las propiedades acústicas una vez que se realiza la reparación y las envolturas de las probetas.



Figura. 24. Conjunto de muestras en verde en el momento que se introducen en el horno de mufla.

9.3.4. Caracterización previa de las probetas

9.3.4.1. Designación

Se ha conservado la designación empleada en las probetas empleadas en anteriores proyectos de estos materiales. Esta designación se expresa por las letras *L* (de Ladrillo) y *H* (de Hormigón), seguida de las condiciones de molienda óptimas encontradas véase tabla 9 [83, 84], en nuestro caso las condiciones H1, H8, y L9; y por último el número de pieza fabricada y ensayada. De esta forma se tendrá la catalogación completa de los distintos especímenes fabricados en el laboratorio desde el inicio de esta línea de investigación. Véase en las figuras 25,26, y 27, las muestras catalogadas ensayadas en este proyecto.



Condiciones optimas de molienda para los materiales reciclados			
Muestra	Carga de material (kg)	Carga bolas (kg)	Nº de vueltas
H1	3	5	500
H8	6	3	500
L9	6	3	500

Tabla. 9. Condiciones optimas de molienda determinadas para los materiales reciclados bajo estudio [83,84].



Figura. 25. Conjunto de muestras de la serie H1.



Figura. 26. Conjunto de muestras de la serie H8.



Figura. 27. Conjunto de muestras de la serie L9

En el caso de las probetas obtenidas a partir de materiales convencionales la designación es distinta. $\emptyset \blacksquare \blacksquare$ Se ha expresado \emptyset como la letra o pareja de letras que definen al material de la muestra. Los números empleados, indican el orden de probeta procesada para el segundo, y para el primero la pieza de origen de la que se ha obtenido la probeta. El empleo del punto nos permite distinguir entre probetas de material convencional (Lo tiene) y las de materiales reciclados. En las figuras 28, y 29; se muestran las series de materiales convencionales.



Figura. 28. Conjunto de muestras de la serie LC (Ladrillo caravista).



Figura. 29. Conjunto de muestras de la serie LN (Ladrillo convencional).

9.3.4.2. Determinación propiedades físicas: densidad

Antes de procesar las probetas para su utilización en el tubo de impedancia, se efectúa la medida mediante calibre con una precisión de 2 decimas de milímetro, de las dimensiones de la probeta, diámetro y altura. Posteriormente se mide la masa



mediante balanza de precisión, de cuatro dígitos en gramos. Con los valores obtenidos se calcula la densidad que es de vital importancia para el cálculo de las propiedades acústicas intrínsecas y extrínsecas. La densidad que se calcula es la real del material cuando este ya ha sido sinterizado.



Figura. 30. Balanza de precisión empleada para determinar la masa de las probetas.



10. Métodos

10.1. Método de ensayo mediante tubo de impedancia acústica

El fundamento del ensayo de la absorción acústica, y la determinación de la impedancia acústica específica, consiste en colocar una muestra cilíndrica de material bajo estudio en el extremo de un tubo véase figura 31. El tubo tiene unas características de rectitud, rigidez, acabado superficial, y estanqueidad; que mediante la generación de ondas planas pseudo-aleatoria en el extremo contrario, se puede efectuar dichas medidas. Para ello se miden en uno o varios puntos conocidos la presión acústica, para poder determinar la función de transferencia de las posiciones obteniéndose el coeficiente de reflexión complejo en incidencia normal [31].

Las magnitudes determinadas se determinan en función de la frecuencia, la resolución de la frecuencia depende del muestreo del equipo digital; y del rango de frecuencias generadas. Sin embargo, tiene mayor importancia el intervalo de frecuencias bajo estudio que permite las dimensiones del tubo de impedancia (Ancho, largo del tubo, y posiciones microfónicas). Es por este motivo que los equipos generalmente estén compuestos de varios tubos de dimensiones distintas [19, 31, 38].



Figura. 31. Vista completa del equipo del tubo de impedancia acústica, en pantalla gráfica de la función de transferencia.

Las mediciones que puede realizar un tubo de impedancia son múltiples según sea la configuración del equipo. De esta forma se puede ampliar el número de propiedades analizadas. Para este estudio únicamente tiene interés el método de medición de dos micrófonos en posiciones fijas [8, 10, 20, 31] .

Esta técnica aprovecha la generación de ondas estacionarias en el interior del tubo de las que se conoce con precisión la posición de sus nodos. Al introducir un material que pueda absorber o modificar las condiciones de reflexión de la onda estacionaria, se obtiene la medida de su absorción e impedancia acústica. Para ello solo es necesario determinar para cada frecuencia la función de transferencia, como sigue [32].

Las presiones de la onda incidente y reflejada son respectivamente:

$$p_i = \widehat{p}_i \cdot e^{jk_0 \cdot x} \quad E.69$$

$$p_r = \widehat{p}_r \cdot e^{jk_0 \cdot x} \quad E.70$$



Las presiones acústicas p_1 y p_2 , en las posiciones microfónicas son:

$$p_1 = \widehat{p}_l \cdot e^{jk_0 \cdot x_1} + \widehat{p}_r \cdot e^{-jk_0 \cdot x_1} \quad E.71$$

$$p_2 = \widehat{p}_l \cdot e^{jk_0 \cdot x_2} + \widehat{p}_r \cdot e^{-jk_0 \cdot x_2} \quad E.72$$

La función de transferencia para la onda incidente es:

$$H_1 = \frac{p_{21}}{p_{11}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad E.73$$

Donde s es la separación entre los dos micrófonos.

De igual forma la función de transferencia de la onda reflejada se expresa:

$$H_r = \frac{p_{2r}}{p_{1r}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0 s} \quad E.74$$

Luego la función de transferencia H_{12} del campo acústico total resulta [31]:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0 \cdot x_2} + r \cdot e^{-jk_0 \cdot x_2}}{e^{jk_0 \cdot x_1} + r \cdot e^{-jk_0 \cdot x_1}} \quad E.75$$

Despejando el coeficiente de reflexión complejo lineal, se obtiene:

$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_r - H_{12}} e^{2 \cdot jk_0 \cdot x_1} \quad E.76$$

Luego como se puede ver la medida únicamente depende de las presiones, posiciones, y condiciones del aire del interior del tubo de impedancia en el momento de ensayo. La obtención del resto de propiedades ha sido expuesta en “3. Técnica de la acústica de materiales”



Existen una serie de condiciones en las que se realizan los ensayos en tubo de impedancia, que son importantes para obtener unas mediciones óptimas [31, 38, 39].

-Resulta necesario calibrar el tubo de impedancia con respecto a los ruidos del entorno en donde se encuentra situado, para que al realizar ensayos se evite introducir ruidos de fondo.

- El método está basado en la medición con cada micrófono en las dos posiciones, de esta manera se evita añadir errores debidos a las diferencias en amplitud y fase de los micrófonos.

- Los micrófonos deben ser calibrados en cada ensayo para conseguir que la diferencia de nivel entre ambos no supere $0,3 \text{ dB}$. De esta manera se consigue que no disminuya la sensibilidad en los ensayos.

- Antes de realizar los ensayos el equipo debe estar encendido y en emisión durante 10 minutos, para que la membrana del altavoz este adaptada. Y no produzca trinos desviados de frecuencia.

-Para que la función de transferencia tenga suficiente precisión es necesario realizar la emisión acústica aleatoria durante un tiempo suficiente e igual en cada posición microfónica. Con esto se consigue reducir los errores debido a la ponderación en cada frecuencia. Según la norma ISO 10534-2:1998, la duración mínima de la emisión en cada posición debe ser de 20 s.

-Las muestras deben ajustarse al tubo de impedancia sin holgura para obtener un cierre estanco, y evitar el deslizamiento longitudinal en el tubo.

10.2. Metodología de ensayo: Aplicación

En el laboratorio el equipo empleado es un tubo de impedancia ACAB 3000, con un amplificador BWSA; suministrado por la empresa Microtest S.A. Este dispositivo posee una fuente con una potencia de 100 W , destinada a poder regular la amplitud de las



ondas acústicas generadas en el interior de la cavidad. Mediante un equipo informático, se recoge desde el analizador, las señales eléctricas obtenidas de los sensores microfónicos que detectan la presión en un punto determinado. Con estos datos el software suministrado por el fabricante realiza el cálculo expuesto de la función de transferencia, para obtener el coeficiente de absorción acústica lineal, y la impedancia acústica específica; así como otras variables dependientes de las anteriores. La toma de datos que realiza el equipo es para cada 10 Hz en el intervalo de estudio, que en los ensayos realizados está comprendido entre 800 y 6300 Hz . Para realizar el ensayo también se ha fijado un rango de presión acústica que recomienda el fabricante del equipo, y que está relacionado con la sensibilidad de los micrófonos empleados. El rango de presión acústica está comprendido entre 90 y 110 dB , pero es recomendable que la oscilación respecto los 100 dB , sea pequeña.

Para el caso de los ensayos realizados se han seguido las indicaciones anteriores, sin embargo el tiempo de ensayo se ha aumentado considerablemente para introducir la menor cantidad de errores. En cada posición de micrófonos se mantiene el ensayo durante 2 minutos, para conservar la simetría.

El procedimiento seguido, para efectuar el ensayo de las probetas bajo estudio [64]. Se ha basado, en el encendido y emisión de trinos Pseudo-aleatorios, previo al ensayo para estabilizar la emisión en el equipo. Con el equipo apagado, se procede cada 5 ensayos realizados; a efectuar una calibración de los micrófonos. Para ello se alojan en un emisor estanco, que efectúa un tono puro de 114 dB y 1000 Hz . Con ello se consiguen dos cosas; mejorar la respuesta de los micrófonos en el intercambio de posiciones, y afinar la toma de datos de la presión acústica de las ondas estacionarias. Posteriormente con el portamuestras limpio, para evitar la vibración de partículas (disgregación de material cerámico), o un mal asentamiento de las probetas; se han introducido las muestras con la preparación necesaria para el cierre estanco. Se efectúa el ensayo activando la emisión del ruido, hasta que se alcanzan los 2 minutos en la posición inicial; pudiéndose observar las fluctuaciones que se producen en la función de transferencia H_{12} . Después se detiene el ensayo, pero conservando la medida inicial; para intercambiar las posiciones de los micrófonos. Con los micrófonos



en la nueva posición se efectúa la emisión y toma de datos durante 2 minutos nuevamente. De esta manera queda realizado el ensayo, y solo queda almacenar los datos en formato de texto con tabulaciones. El software del equipo de laboratorio no procesa los datos obtenidos. Finalizado el ensayo, se procede a retirar la probeta del portamuestras; aflojando el embolo de terminación rígida. La limpieza de este embolo se realiza con paño, y etanol. La secuencia de realización de los ensayos, sigue el orden de la designación de probetas, y estos se han realizado dos veces para cada probeta, para obtener unos datos más fiables en el estudio; incluso más de dos veces en probetas que presentaban particularidades en su comportamiento. En la figura 32 se puede ver la terminación del tubo de impedancia donde se realiza el intercambio de las sondas microfónicas, para el rango de frecuencias dado.

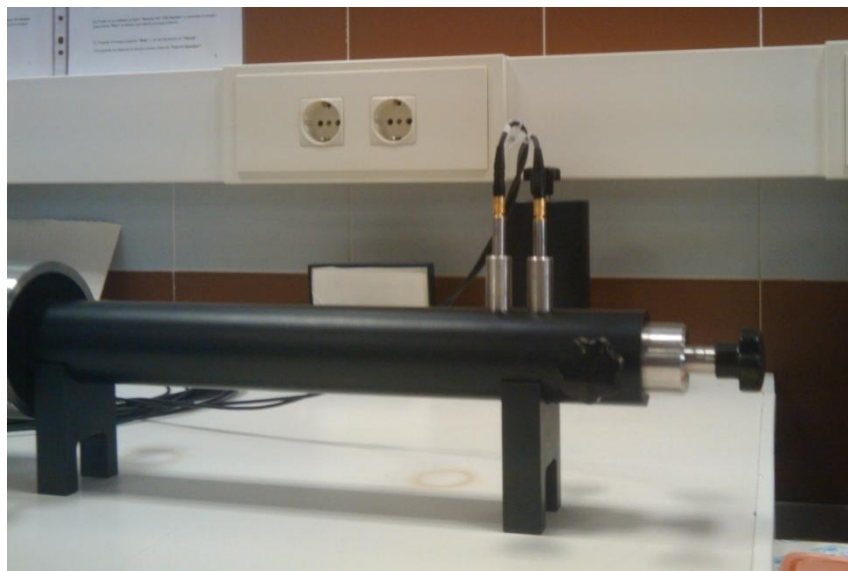


Figura. 32. Zona de posiciones microfónicas de intercambio, y terminación de colocación de la muestra ensayada.

10.2.1. Acondicionamiento de las muestras para el ensayo de impedancia

Como ya se ha comentado anteriormente es necesario que exista una buena adaptación y estanqueidad de las muestras para poder realizar el ensayo de



impedancia. A continuación se describirán brevemente las operaciones desarrolladas para adecuar las probetas [31, 64].

-Envoltura de estanqueidad:

El método del tubo de impedancia exige que las muestras ajusten perfectamente, pero sin presión. Esto resulta bastante complejo, y en el caso de los materiales cerámicos aun más por las características del corte con diamante, o por la reducción de volumen en el sinterizado. Por este motivo el ensayo se debe efectuar con una envoltura entorno a la muestra. Esta envoltura puede realizarse con vaselina, que es la forma más precisa; pero requiere un especial cuidado del equipo; y la limpieza habitual del mismo realizando el desmontaje de las partes afectadas. Por estas dificultades, se rechaza este método. La otra opción que permite la norma, a parte de la coincidencia exacta de la probeta, es el empleo de tiras poliméricas adhesivas. Este método permite además de ajustar la muestra, aumentar ligeramente el diámetro de muestras más pequeñas (no más de 5 mm). Para ello, y siguiendo la referencia del fabricante del equipo se emplea esparadrapo blanco, el cual tiene fibra de algodón, junto a resinas naturales. El acabado de la probeta es suficientemente viscoso como para deslizar en el portamuestras y quedar alojado sin ningún tipo de desplazamiento.

-Reparación de probetas:

Debido al origen de algunas de las probetas estudiadas, se ha dado la situación particular; de reparar parcialmente la probeta *H1 – 20*, y varias probetas de la serie *L9* mediante el empleo de silicona. Este método se puede utilizar porque las probetas cuando resultan excesivamente flexibles tienden a deformarse en la cavidad, y el ensayo no resulta satisfactorio (Lanas poliméricas de poliéster emplean este método), luego se realiza una superficie de silicona donde se sitúa el material. Esta estructura se ensaya en el tubo de impedancia, y posteriormente se diferencian los datos con los obtenidos de un testigo únicamente de silicona. En el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica, se ha realizado dicho testigo véase figura 34, para emplearse en este estudio, y para posteriores trabajos.



Figura. 33. Reparaciones efectuadas en las muestras para evitar grandes cavidades que originen datos erróneos en los ensayos.



Figura. 34. Testigo de silicona empleado para contrastar los datos de las probetas reparadas.



IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



11. Introducción

Una vez descritos los materiales y métodos empleados en este proyecto, además de conocer los modelos que rigen el comportamiento absorbente, y reflectante de dichos materiales. Se pasarán a exponer los resultados obtenidos en la etapa de experimentación con el tubo de impedancia acústica. El conjunto de los datos obtenidos se analizarán y discutirán en función de los datos bibliográficos, y características expuestas en capítulos previos.

La forma para proceder a la presentación de los resultados es la siguiente; primero se mostrarán de cada material los valores geométricos y másicos, de cada probeta y para cada material bajo estudio. Posteriormente se presentarán las dos características fundamentales para definir el comportamiento acústico, que son el coeficiente de absorción lineal; y la impedancia acústica específica. Para dichas propiedades se realizará un estudio mediante la distribución de Weibull con el fin de obtener la regularidad que presentan dichas propiedades en el material. Este estudio nos resultará de gran utilidad para el estudio de las propiedades intrínsecas de las probetas ensayadas, para poder discriminar los resultados obtenidos que no sean consistentes. Finalmente las propiedades acústicas e intrínsecas, se estudiarán bajo dos modelos; uno enfocado a las propiedades geométricas y de disipación de energía acústica, y el otro destinado a definir las propiedades elásticas.

12. Densidad de las muestras

Ladrillos caravista y convencional

Considerando las muestras bajo estudio como cilindros perfectamente definidos, las características de las probetas de materiales convencionales según series son las siguientes:



DIMENSIONES, MASA, Y DENSIDAD PROBETAS LN					
Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
LN1.1	28,55	7,68	4,92	10,08	2,05
LN2.1	28,60	7,91	5,08	10,36	2,04
LN3.1	29,04	7,95	5,27	10,46	1,99
LN4.1	28,98	7,37	4,86	9,64	1,98
LN5.1	28,64	7,46	4,81	9,76	2,03
LN6.1	29,48	6,17	4,21	8,07	1,92
LN7.1	29,28	6,27	4,22	8,42	1,99
LN8.1	28,69	7,72	4,99	10,12	2,03
LN9.1	29,13	6,46	4,31	8,45	1,96
LN10.1	29,38	6,31	4,28	8,33	1,95

Tabla. 10. Dimensiones, y densidad de las muestras de ladrillo convencional.

Si se comparan las propiedades expuestas en las tablas 10, y 11 de estos tipos de ladrillos, se puede ver fácilmente, que la colocación de los mismos en paramentos constructivos resulta completamente distinta (El ladrillo caravista está concebido para uso exterior), pero a nivel acústico queda patente también esta diferencia debido a que el ladrillo caravista por su geometría resulta ser un producto de una masa elevada, fomentando el carácter reflectante de las ondas acústicas.



DIMENSIONES, MASA, Y DENSIDAD PROBETAS L					
Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
LC1.1	29,30	9,23	6,22	12,20	1,96
LC2.1	29,42	8,48	5,76	11,14	1,93
LC3.1	29,49	9,63	6,58	12,60	1,91
LC4.1	28,98	10,34	6,82	13,48	1,98
LC5.1	29,11	10,93	7,27	14,33	1,97
LC6.1	28,96	10,91	7,19	14,27	1,99
LC7.2	29,03	9,57	6,33	12,72	2,01
LC8.2	28,93	9,93	6,53	13,04	2,00
LC9.2	28,97	9,21	6,07	12,14	2,00
LC10.2	29,11	10,30	6,86	13,36	1,95
LC11.2	29,13	9,58	6,38	12,28	1,92
LC12.2	29,23	10,71	7,19	14,14	1,97
LC13.3	28,98	9,08	5,99	11,72	1,96
LC14.3	28,95	9,92	6,53	12,94	1,98
LC15.3	29,05	10,33	6,85	13,62	1,99
LC16.3	29,12	10,36	6,90	13,43	1,95
LC17.3	28,94	10,08	6,63	13,64	2,06
LC18.3	29,08	9,99	6,64	13,42	2,02
LC19.4	28,92	10,48	6,88	13,62	1,98
LC20.4	28,86	10,22	6,69	13,42	2,01
LC21.4	29,09	10,33	6,87	13,54	1,97
LC22.4	28,97	10,67	7,03	13,96	1,98
LC23.4	29,17	9,24	6,17	12,18	1,97
LC24.4	28,91	10,52	6,91	13,68	1,98

Tabla. 11. Dimensiones y densidad de las muestras de ladrillo caravista.

El ladrillo convencional presenta una densidad promedio, con respecto a las probetas estudiadas de $1,99 \text{ g/cm}^3$.

El ladrillo caravista presenta una densidad promedio, con respecto a las probetas estudiadas de $1,98 \text{ g/cm}^3$. La desviación con respecto los resultados de cada muestra es menor en el ladrillo caravista, que en el ladrillo ordinario; esto es debido precisamente a los procesos de tamizado a los que se expone el polvo de origen. Reduciendo de manera considerable la cantidad de heterogeneidades en el material, véanse figuras 28 y 29.



Hormigón

El estudio acústico de este material se realizara únicamente empleando el modelo de la ley de la masa. Esto se debe a las características tan diferentes que presenta el material original, con respecto el material reciclado. En el primer caso, el hormigón se comporta como un material muy másico; y que produce una gran reflexión de las ondas acústicas cuando inciden sobre su superficie. En el caso del hormigón reciclado, es notable la aparición de una porosidad mucho más elevada; fomentando los fenómenos acústicos absorbentes y difusivos. El primer dato que expresa este cambio de propiedades es la densidad de cada uno de los materiales, en el caso del hormigón del cual se han procesado las probetas recicladas; posee una densidad entre $2,10 - 2,30 \text{ g/cm}^3$, esto se debe al proceso empleado para su asentamiento; en la construcción (apisonado, vibrado, centrifugado, etc.).

El estudio de los datos geométricos, de masa, y densidad en los materiales reciclados ensayados, está determinado por la reutilización de probetas de hormigón, y el procesamiento de probetas de ladrillo. Por este motivo se reflejan las condiciones de las probetas recuperadas, en el caso de las muestras de hormigón, indicando las probetas en inventario, las recuperadas, y el estado de las mismas.



Hormigón reciclado

Como ya se indico en “III. Materiales y métodos” las muestras de hormigón reciclado son obtenidas a partir del aprovechamiento de probetas ensayadas a compresión que han dejado una cantidad de volumen utilizable. Esto explica la discontinuidad de la numeración de las muestras como se ve en la tabla 12, y 14.

TABLA DE PROBETAS H1																				
	H1-1	H1-2	H1-3	H1-4	H1-5	H1-6	H1-7	H1-8	H1-9	H1-10	H1-11	H1-12	H1-13	H1-14	H1-15	H1-16	H1-17	H1-18	H1-19	H1-20
Disponible	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
P.Circular	O	O	X	X	O	O	X	O	O	O	O	X	O	O	O	O	X	O	X	O
Defectos	X	O	X	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	O
Envoltura	O	O	X	X	O	O	X	O	O	X	X	X	O	O	O	X	X	O	X	O

Legenda:		No hay probeta		Defectos reparados		Sin envoltura
	O	Afirmativo	X	Negativo		

Tabla. 12. Características de reutilización de las muestras empleadas en la serie H1.

DIMENSIONES, MASA, Y DENSIDAD PROBETAS H1					
Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
H1-1	29,20	9,91	6,64	7,21	1,09
H1-2	28,37	10,02	6,33	7,39	1,17
H1-5	29,13	10,90	7,26	7,56	1,04
H1-6	28,84	10,16	6,64	6,94	1,05
H1-8	29,15	9,94	6,63	7,23	1,09
H1-9	28,97	10,03	6,61	6,87	1,04
H1-10	29,73	9,85	6,84	7,19	1,05
H1-11	29,98	10,05	7,09	7,17	1,01
H1-13	29,54	10,58	7,25	7,15	0,99
H1-14	29,13	9,87	6,58	6,85	1,04
H1-15	29,44	10,10	6,88	7,36	1,07
H1-16	29,84	10,29	7,20	7,29	1,01
H1-18	29,14	10,14	6,76	7,37	1,09
H1-20	29,82	9,36	6,54	6,60	1,01

Tabla. 13. Dimensiones y densidad de las muestras de hormigón reciclado H1.



TABLA DE PROBETAS H8																				
	H8-1	H8-2	H8-3	H8-4	H8-5	H8-6	H8-7	H8-8	H8-9	H8-10	H8-11	H8-12	H8-13	H8-14	H8-15	H8-16	H8-17	H8-18	H8-19	H8-20
Disponible	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	X	O	O	O	O	X	O	O
P.Circular	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	X	X	X	O	O	O	O	X	O	X
Defectos	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	X	X	X
Envoltura	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	X	X	X	O	O	O	O	X	O	X

Leyenda:	 	No hay probeta	 	Defectos reparados	 	Sin envoltura
	O	Afirmativo	X	Negativo		

Tabla. 14. Características de reutilización de las muestras empleadas en la serie H8.

DIMENSIONES, MASA, Y DENSIDAD PROBETAS H8					
Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
H8-6	28,61	10,11	6,50	7,63	1,17
H8-7	28,26	9,87	6,19	7,52	1,22
H8-8	29,06	10,01	6,64	7,21	1,09
H8-9	28,68	9,65	6,23	7,18	1,15
H8-10	28,96	10,16	6,69	7,31	1,09
H8-14	28,90	9,81	6,44	6,89	1,07
H8-15	28,88	10,24	6,71	7,52	1,12
H8-16	28,75	9,60	6,23	6,66	1,07
H8-17	29,07	8,79	5,83	5,98	1,03
H8-19	29,21	10,32	6,92	7,63	1,10

Tabla. 15. Dimensiones y densidad de las muestras de hormigón reciclado H8.

La serie H1 de hormigón reciclado presenta una densidad promedio de $1,05 \text{ g/cm}^3$.

La serie H8 de hormigón reciclado presenta una densidad promedio de $1,11 \text{ g/cm}^3$.

Comparando esta serie con la H1, en esta propiedad se puede ver la dependencia con el proceso de molienda empleado en cada caso. Al ser mayor el redondeamiento de las partículas de polvo de la serie 8 existe una mayor compactación entre las partículas.



También destaca la diferencia presente respecto a la densidad del hormigón convencional, que es el doble a la de los materiales reciclados. En un proyecto anterior se pudo observar que su textura era intermedia entre un hormigón convencional y un hormigón celular, debido probablemente a su mayor contenido en CaO, componente calcáreo [30].

Ladrillo reciclado

DIMENSIONES, MASA, Y DENSIDAD PROBETAS L					
Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L9-1	26,95	14,26	8,13	14,78	1,82
L9-2	27,30	14,13	8,27	14,88	1,80
L9-3	27,14	13,75	7,95	13,56	1,70
L9-4	26,72	14,52	8,14	15,34	1,88
L9-5	26,96	12,80	7,31	12,92	1,77
L9-6	26,90	12,96	7,37	15,21	2,06
L9-7	26,66	16,13	9,00	17,35	1,93
L9-8	27,04	16,63	9,55	17,17	1,80
L9-9	26,67	13,16	7,35	13,18	1,79
L9-10	27,44	13,46	7,96	13,36	1,68
L9-11	26,97	15,11	8,63	16,29	1,89
L9-12	26,72	11,72	6,57	13,58	2,07
L9-13	26,93	16,72	9,52	16,92	1,78
L9-14	27,40	13,30	7,84	13,92	1,77
L9-15	27,28	15,42	9,01	15,89	1,76
L9-16	27,50	18,38	10,92	18,79	1,72
Defectos reparados					

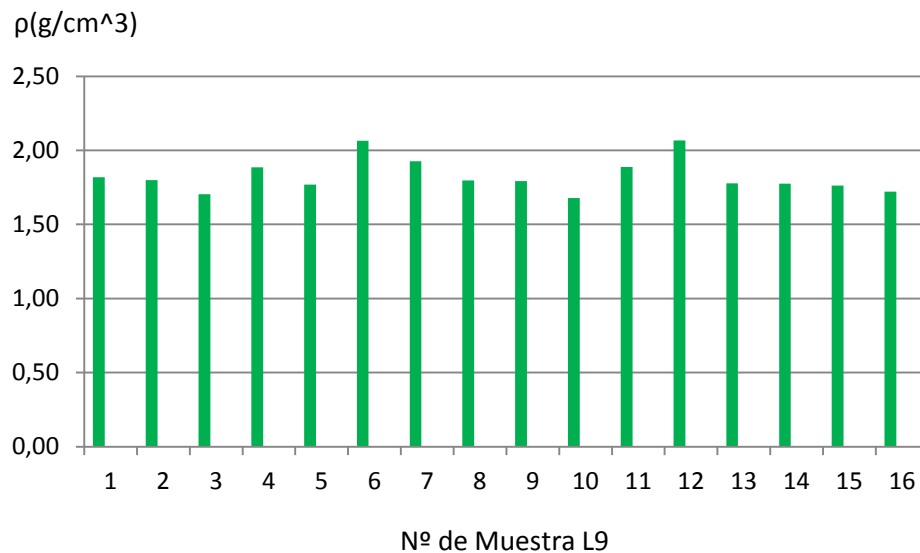
Tabla. 16. Dimensiones y densidad de las muestras de ladrillo reciclado L9.

La serie de ladrillo reciclado presenta una densidad promedio de $1,83 \text{ g/cm}^3$, comparándolo con el ladrillo convencional, la densidad resulta más reducida en este material, por lo que la porosidad será mayor en este tipo de material.

En la gráfica 6, se aprecia como las muestras varían su densidad de forma periódica debido a que existe en el extremo inferior del molde un grado mayor de compactación. Esto se puede determinar ya que la clasificación y el corte de las piezas en verde siguió

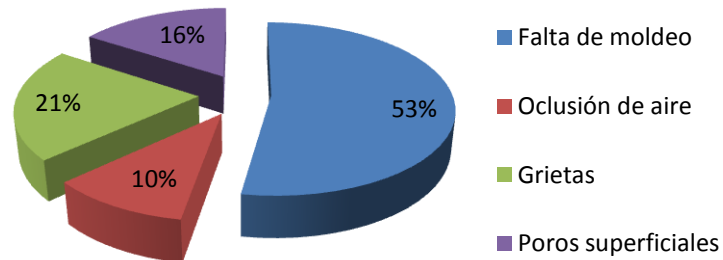


el mismo proceso, empezando por la parte superior, y obteniendo las sucesivas probetas hasta la parte inferior de la posición en el moldeo. Esta variación en las densidades genera una dispersión de $0,11 \text{ g/cm}^3$.



Gráfica. 6. Dispersión de la densidad en las muestras de ladrillo reciclado L9.

La realización de las muestras L9, presentó un fallo en el grado de humedad de la pasta, que origino un gran número de cavidades, y poros de gran tamaño. Por este motivo se han recogido el porcentaje de defectos que se han observado en las muestras, gráfica 7, para que sirvan de referencia para futuros ensayos de procesamiento de este tipo de material.



Gráfica. 7. Representación porcentual de los defectos encontrados en las muestras L9.

Finalmente indicar, que el número de muestras ensayadas en cada una de las familias de materiales ha estado determinado por la disponibilidad del material en el laboratorio. En cualquier caso, el número mínimo de especímenes necesarios para ser evaluados y tratados matemáticamente se han cumplido.

13. Coeficiente de absorción lineal de las muestras

Los resultados que desprende el tubo de impedancia acústica se centran en dos comportamientos, que se presentan en los materiales destinados al acondicionamiento acústico. Por un lado la absorción sonora se estudia a partir del propio coeficiente, y la reflexión de ondas acústicas, se estudia mediante la impedancia acústica específica. Por este motivo son las propiedades acústicas fundamentales para describir el comportamiento de un material, junto con el número de onda complejo que es dependiente de la impedancia. Los resultados presentados son los valores promedio de cada uno de los materiales bajo estudio. En el “Anexo 1” se presentan los valores tabulados del coeficiente de absorción, para cada una de las muestras estudiadas.



Para la comparación realizada con cada material recordaremos la gráfica 1 de la curva del coeficiente de absorción lineal idealizada. Esta gráfica es un esquema tipo que nos permite conocer a que comportamiento acústico se acoge un material.

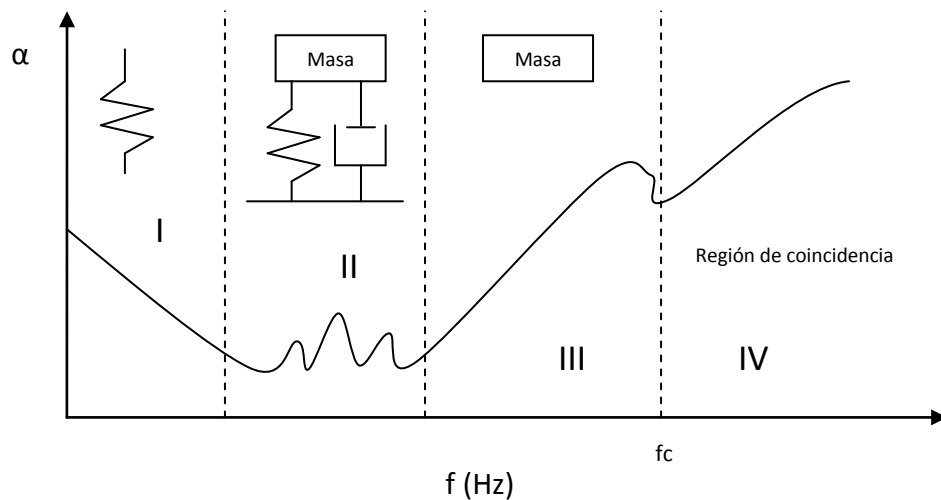


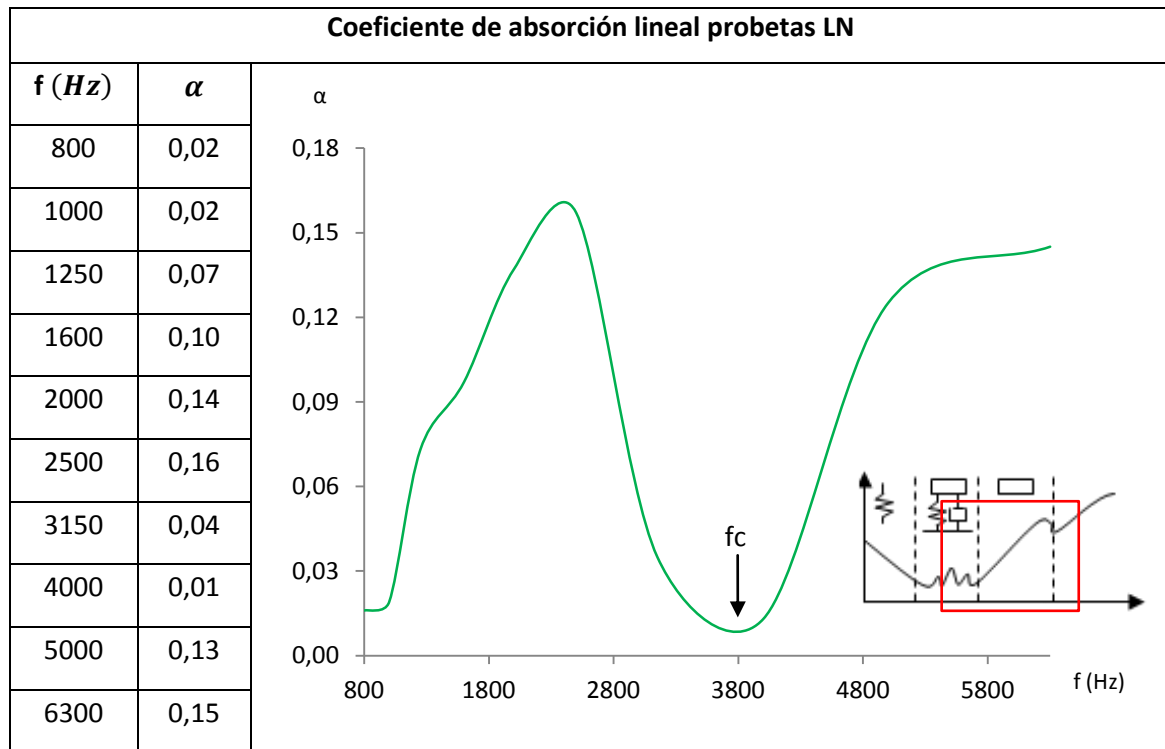
Figura. 35. Revisión a la curva del coeficiente de absorción lineal idealizada.

Luego los resultados en las distintas probetas, para el caso del coeficiente de absorción son los siguientes:



Ladrillo normal

El coeficiente de absorción lineal promedio de las muestras ensayadas, en las frecuencias de tercio de octava resulta:



Gráfica. 8. Coeficiente de absorción lineal de las muestras LN (Ladrillo convencional).

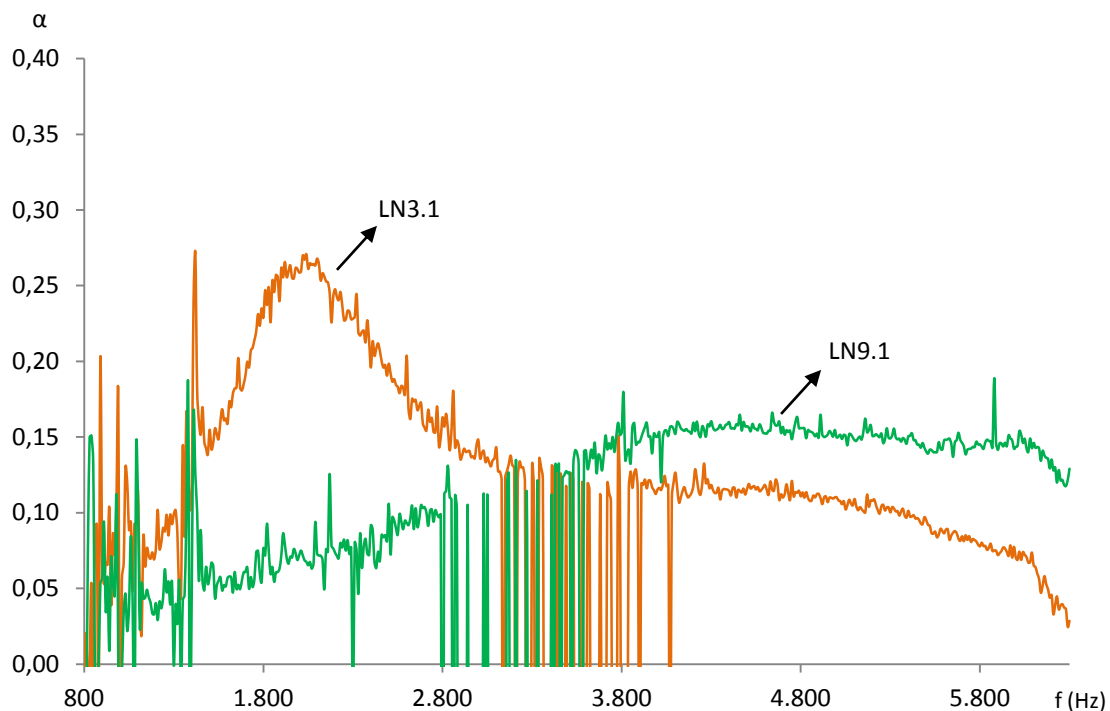
El comportamiento que presenta el ladrillo convencional, muestra que los mecanismos de absorción de las ondas sonoras; resultan muy reducidos para este material. Predominando la ley de la masa en el comportamiento, lo que hace que se comporte como un material reflector del campo acústico (Se determina esta característica por la presencia de la frecuencia crítica pronunciada). Sin embargo hay zonas del espectro audible importantes, donde se produce una gran absorción/transmisión. Visto de esta manera, el comportamiento de los ladrillos convencionales frente a la transmisión del ruido no sería bueno. Sin embargo las especificaciones técnicas de estos materiales, indican que el ladrillo puede producir un aislamiento acústico R_w de entre 29 dB a 32 dB, esto es debido a la presencia de los huecos en los ladrillos; que generan un mecanismo masa - unión viscoelástica – masa. Con esto se consigue aumentar la



región de la curva idealizada de la absorción, y que las propiedades de aislamiento mejoren.

De los resultados obtenidos se tiene un promedio para el coeficiente de absorción de 0,08, este valor resulta sumamente reducido, sin embargo según la ley de la masa la capacidad del ladrillo convencional para reducir el campo sonoro; resulta de 14,32 *dB* para las probetas estudiadas. Donde las ondas que lleguen a transmitirse tendrán una atenuación muy pequeña, debida a la baja absorción en el material. Empleando el modelo de la ley de la masa para determinar la frecuencia critica de este material, nos encontramos que la frecuencia teórica tiene un valor de 3450 Hz, frecuencia sumamente cercana al valor experimental obtenido, luego el material aún siendo reflector, no resulta adecuado por tener la frecuencia critica muy centrada en valores del espectro sonoro habituales.

De forma particular las probetas ensayadas no siguen un comportamiento común con respecto a la propagación del sonido, teniendo una gran importancia la cantidad y posición de heterogeneidades como son partículas de sílice, alúmina, restos de materia orgánica; que de forma general tienden a evitar el acoplamiento con el medio poroso de la pieza. Las características que se presentan de esta manera en los materiales, son útiles para saber que propiedades se deben manipular para alcanzar las propiedades buscadas, ó para distinguir materiales con distintos procesos (Un ejemplo de esto se verá en el caso del hormigón reciclado con elementos de la misma serie, y en el caso del ladrillo caravista respecto al ladrillo ordinario).



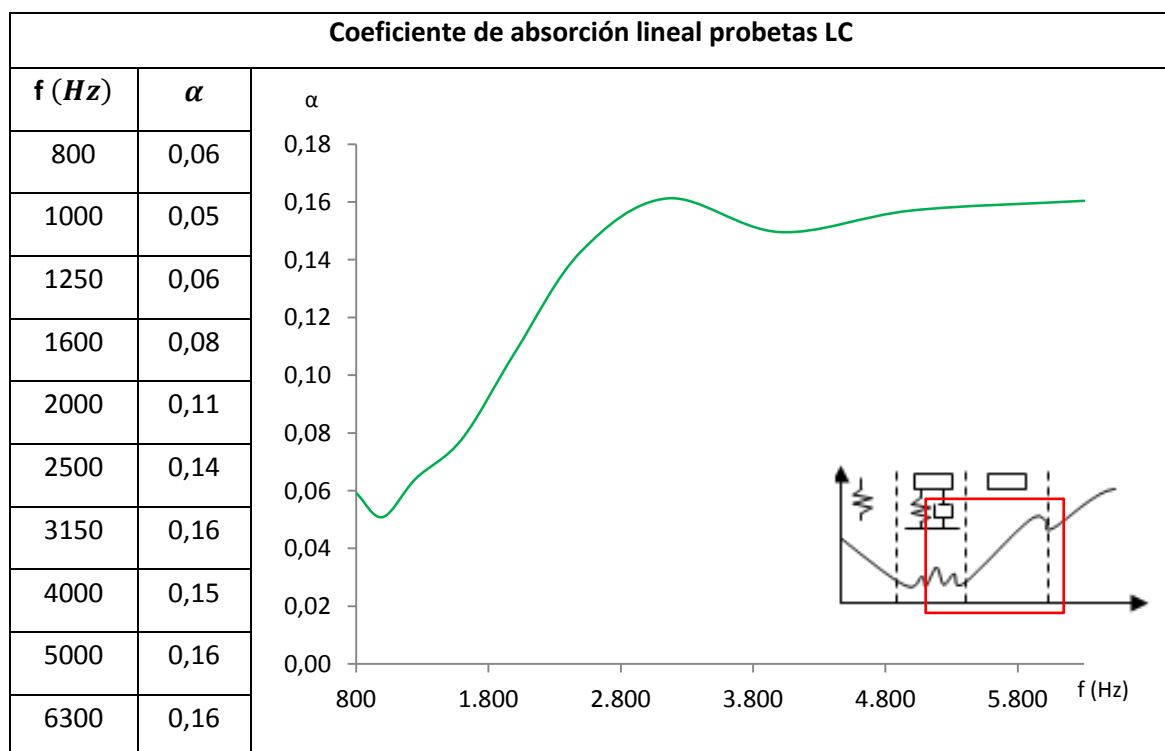
Gráfica. 9. Comparación del espectro de absorción lineal de dos muestras de ladrillo normal.

En la gráfica 9 se puede apreciar como la probeta LN3.1 tiene un comportamiento más absorbente y centrado respecto a unas frecuencias que la probeta LN9.1. De forma generalizada ambas probetas tienen una frecuencia crítica, casi coincidente (En esta frecuencia también influye la cantidad de impurezas presentes en la muestra y su posición). Estos dos comportamientos son los que caracterizan las propiedades acústicas de los ladrillos convencionales, cabe destacar que los valores inferiores a 0 ó superiores a 1, no son reales; y se presentan por el propio diseño del método. Esto es debido a que cuando se alcanza una frecuencia crítica la diferencia de la función de transferencia es mínima, y solo la parte imaginaria de la función adopta valores que varían entre resultados positivos y negativos debido a cambios en la fase de la onda reflejada. Luego serán respectivamente 0 ó 1 aquellos que sobrepasen dicho intervalo.



Ladrillo caravista

A diferencia del ladrillo convencional, el acabado de las partes que dan al exterior; como ya se vio es una capa de pequeño espesor vitrificada. El objetivo de la capa es evitar la entrada de agua en los poros del material, obteniendo de esta forma protección frente a los cambios de temperatura. Sin embargo la capa vitrificada, posee una cierta porosidad y es muy homogénea lo que facilita que las propiedades acústicas en este tipo de material sean considerables. El ladrillo caravista puede producir un aislamiento acústico R_w de $34dB$ a $40dB$.



Gráfica. 10. Coeficiente de absorción lineal de las muestras LC (Ladrillo caravista).

Como se aprecia en la gráfica 9 del coeficiente de absorción del ladrillo normal, el ladrillo caravista tiene similitudes con esa curva debido a la composición y al tamaño de la muestra. Sin embargo la presencia de la capa vitrificada, mejora en gran medida la presencia de la frecuencia crítica atenuándola de forma considerable. También se produce gracias a la capa, y la menor cantidad de inclusiones de gran tamaño; un valor del coeficiente de absorción más estable, lo que se traduce en la mejora del



aislamiento acústico R_w , pero también en un promedio del coeficiente de absorción algo mayor siendo de 0,13.

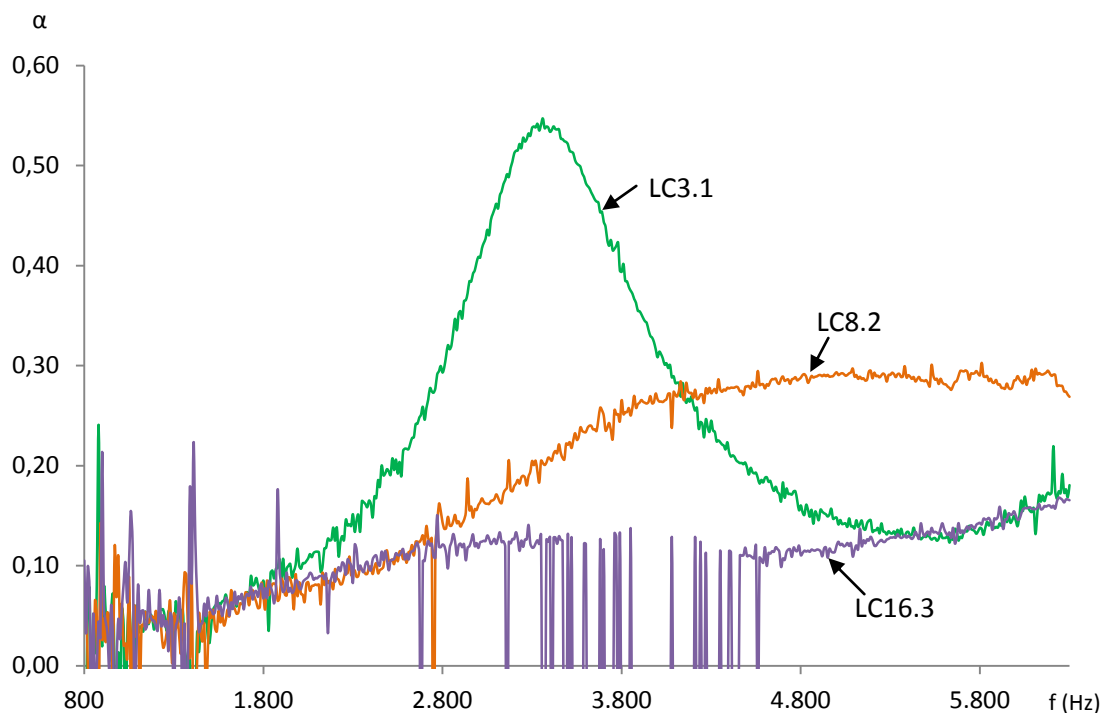
Particularmente el ladrillo caravista es un gran ejemplo de estudio, debido a que el comportamiento que presentan las distintas muestras, resulta muy dispar; y es precisamente este comportamiento lo que nos indica que pequeños cambios en las muestras pueden dar lugar a la variabilidad de las propiedades acústicas. Viendo la gráfica 11 del coeficiente de absorción para distintas muestras de ladrillo caravista, destaca la gran absorción de la probeta LC3.1, mientras que la probeta LC16.3, en el mismo intervalo refleja en gran medida el campo acústico. Esta sustancial diferencia la ocasiona la presencia de la capa vitrificada en el caso de la probeta LC3.1, sin embargo la probeta LC16.3 tiene en mal estado esta superficie (De forma general aparecen roces, desprendimientos, ó inclusiones de gran tamaño que atraviesan la superficie vitrificada). Estas características pueden verse en la figura 36.



Figura. 36. Diferencias superficiales de la muestra LC16.3 (Izquierda), y LC3.1 (Derecha).



Además existe otro comportamiento relacionado con la capa vitrificada, como se puede ver el coeficiente de absorción de la muestra LC3.1 está centrada respecto una frecuencia, y alcanza un valor elevado. Mientras que la muestra LC8.2, sin embargo tiene un crecimiento progresivo con la frecuencia, y sigue de forma directa la curva idealizada de absorción en la zona II y III. En el caso de la probeta LC3.1, lo que sucede es que la capa vitrificada es bastante gruesa, y la porosidad es muy homogénea; mientras que el interior es denso y las partículas bastante homogéneas en comparación al ladrillo convencional. Esto conlleva a que el material a nivel acústico se comporte como dos fases distintas, una absorbente y la otra rígida; consiguiéndose la reflexión de las ondas acústicas en el interior, y posterior absorción del campo acústico reflejado.



Gráfica. 11. Comparación del espectro de absorción lineal de tres muestras de ladrillo caravista.

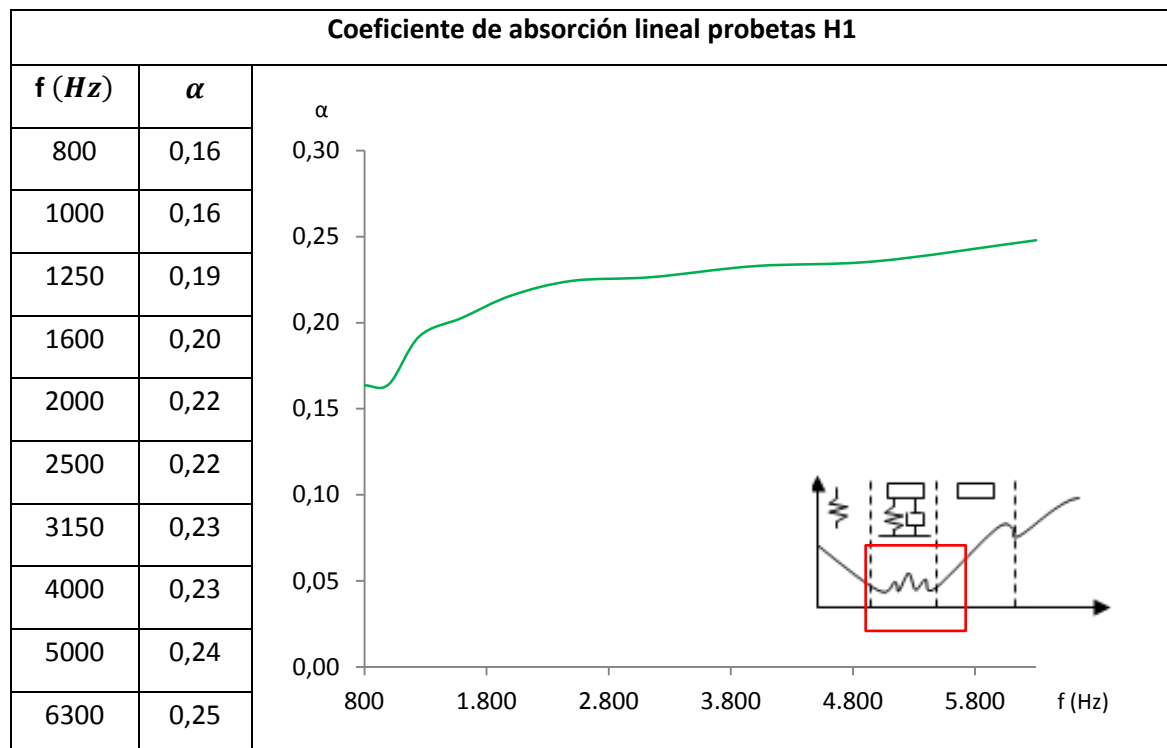


Hormigón reciclado

Las muestras obtenidas de polvo de residuos de hormigón, al realizarse un tratamiento de adecuación del tamaño de partícula; permite obtener un material muy homogéneo, obteniéndose para todas las muestras unos resultados similares. El proceso de moldeo mediante la técnica STARCH, facilita también la aparición de poros, que a nivel acústico y dependiendo de la forma y tamaño; suelen mejorar las propiedades. Lo que más destaca en este tipo de material es que respecto al material primordial (Hormigón), las propiedades cambian radicalmente. Mientras la absorción en el hormigón es prácticamente nula, salvo en el caso de los hormigones celulares; que son medias. El material reciclado por su parte, tiene coeficientes de absorción medio/bajos, sin haber realizado procesos de fabricación destinados a promover las características acústicas. En el caso del hormigón aporta un buen aislamiento, sino se encuentra acoplado mediante vibraciones a la fuente, de entorno a 45 *dB* para una sección de 15 *cm* según la ley de la masa. Pero en el caso del hormigón reciclado como se puede ver la absorción es prácticamente constante. Pudiendo promover un buen aislamiento siempre que participe con otro material rígido.



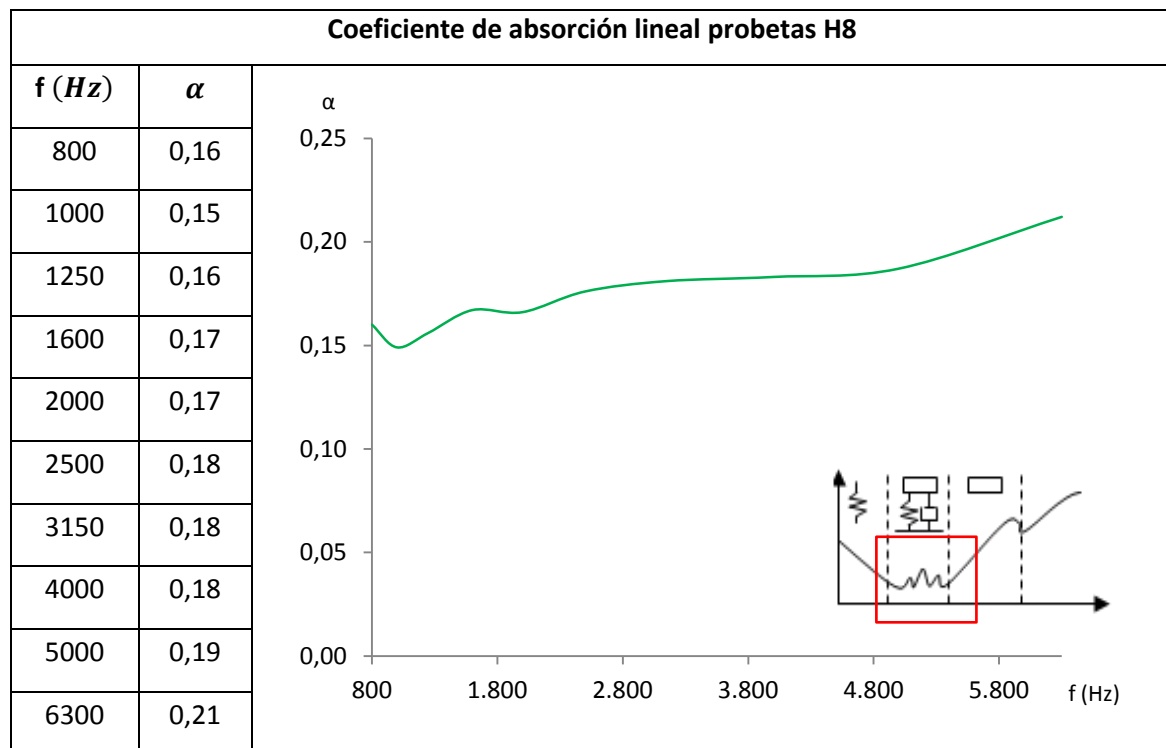
Serie H1



Gráfica. 12. Coeficiente de absorción lineal de las muestras H1(Hormigón reciclado).



Serie H8



Gráfica. 13. Coeficiente de absorción lineal de las muestras H8 (Hormigón reciclado).

El coeficiente de absorción acústica lineal promedio, resulta de 0,23 para la serie H1. Mientras que la serie H8, muestra un coeficiente promedio de 0,18.

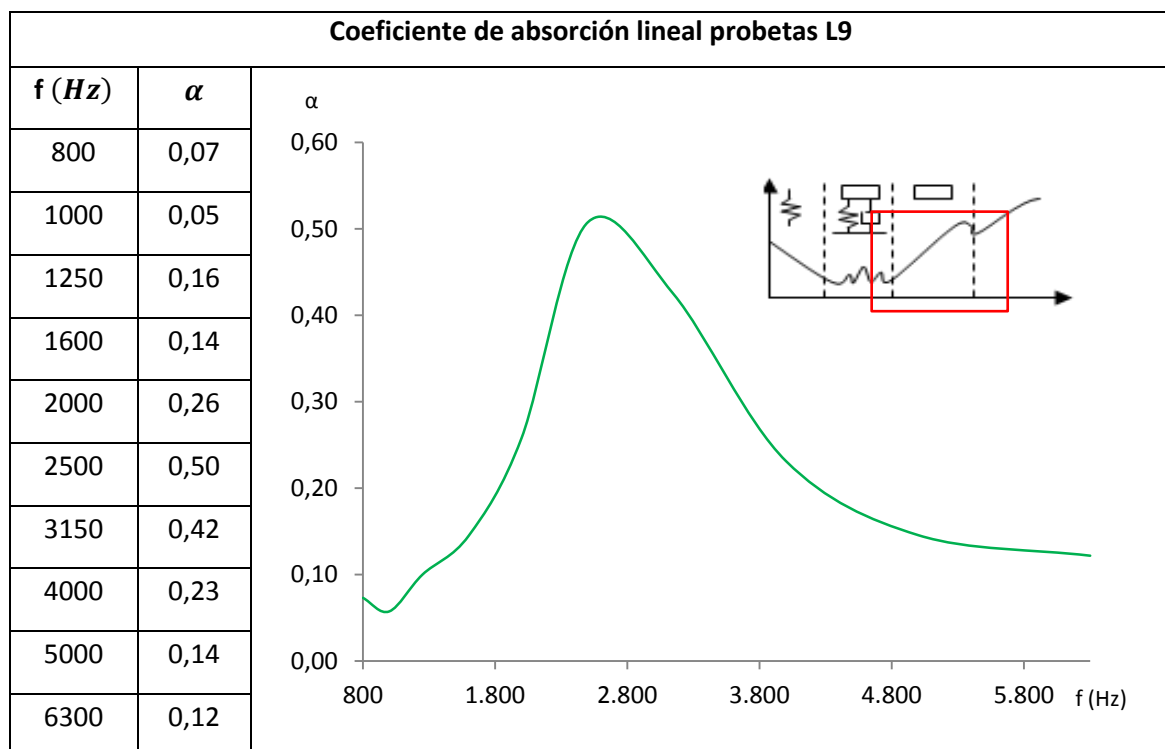
De forma práctica, para entender el valor del material absorbente; en la preparación de una solución de aislamiento acústica. Suponiendo un muro de hormigón de espesor 15cm, como hemos visto su aislamiento R_w es de 45 dB. Pero si empleamos un material absorbente de la serie H1, con un espesor de 2 cm, colocado en la parte posterior (desde la fuente de emisión acústica) de un muro de hormigón de 10 cm de espesor el aislamiento de esta solución resulta ser $R_w = 48$ dB. La mejora obtenida es relativamente buena (Obsérvese que la escala en decibelios es logarítmica). Sin embargo, aun con la mejora obtenida; no resulta suficiente para estar en los niveles proporcionados por materiales como la lana de roca, de vidrio, ó de fibras de poliéster. Por este motivo, las muestras de hormigón reciclado, para ser viables deben alcanzar un coeficiente de absorción del 37%, para poder considerarlas un material acústico



absorbente (Este valor se obtiene de la ecuación de atenuación, para reducir en 20 dB una emisión, con un espesor de material absorbente unidad).

Ladrillo reciclado

Como ya se ha visto los materiales reciclados bajo estudio, al obtenerse de polvo sometido a un proceso de tamizado, y por lo tanto una adecuación de tamaño bastante precisa; reducen la dispersión de sus propiedades. Esto junto a las características propias del moldeo, y la sinterización que permiten la formación de poros en el interior del material, predisponen a que las propiedades del material como absorbente resulten satisfactorias. En la gráfica 14 podemos ver el comportamiento absorbente de este material.



Gráfica. 14. Coeficiente de absorción lineal de las muestras L9 (Ladrillo reciclado).

Como se puede ver el comportamiento de la absorción del ladrillo reciclado, sigue patrones presentes en el ladrillo convencional, y caravista, con un valor promedio del coeficiente de absorción igual a 0,21. Al igual que en estos, presenta un



comportamiento de tendencia hacia la frecuencia crítica muy remarcado como sucede en el ladrillo convencional (Indicar que este es el material de procedencia), pero a su vez la sinterización realizada no elimina gran cantidad de poros abiertos de muy pequeño tamaño, lo que origina que tenga en una frecuencia entorno a los 2800 Hz una gran absorción del sonido. Este comportamiento tan distinto en el intervalo de frecuencias estudiado, podría apuntar a un comportamiento mixto en las propiedades acústicas, por lo que la aplicación de los modelos acústicos confirmara el comportamiento.

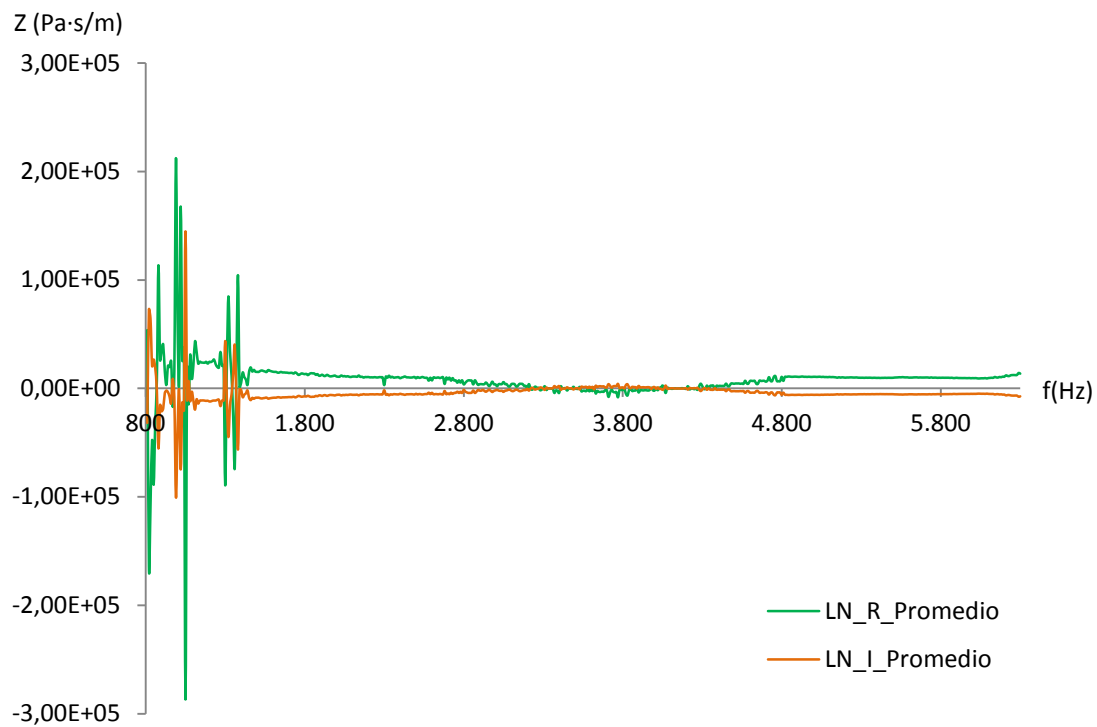
Finalmente destacar que la respuesta absorbente es idéntica a la de un resonador de Helmholtz, con la diferencia que este tiene una banda de absorción más pequeña, y los niveles de baja absorción son todos constantes. Indicar también que las lanas de roca de muy alta densidad, presentan comportamientos similares [7, 14, 20].

14. Impedancia acústica específica de las muestras

Para conocer cuáles son los mecanismos acústicos que se desarrollan en un material, y como se comporta el material ante la reflexión de ondas acústicas; se determina la impedancia acústica específica compleja. Al tratarse de una variable compleja, tiene una parte real que expresa directamente la resistencia que ofrece el material a la propagación acústica, y una parte imaginaria que aporta datos sobre la forma de disiparse la energía en el material, debida a las estructuras porosas. Finalmente con ambas partes, se determina la contribución de los fenómenos de absorción o aislamiento.



Ladrillo normal

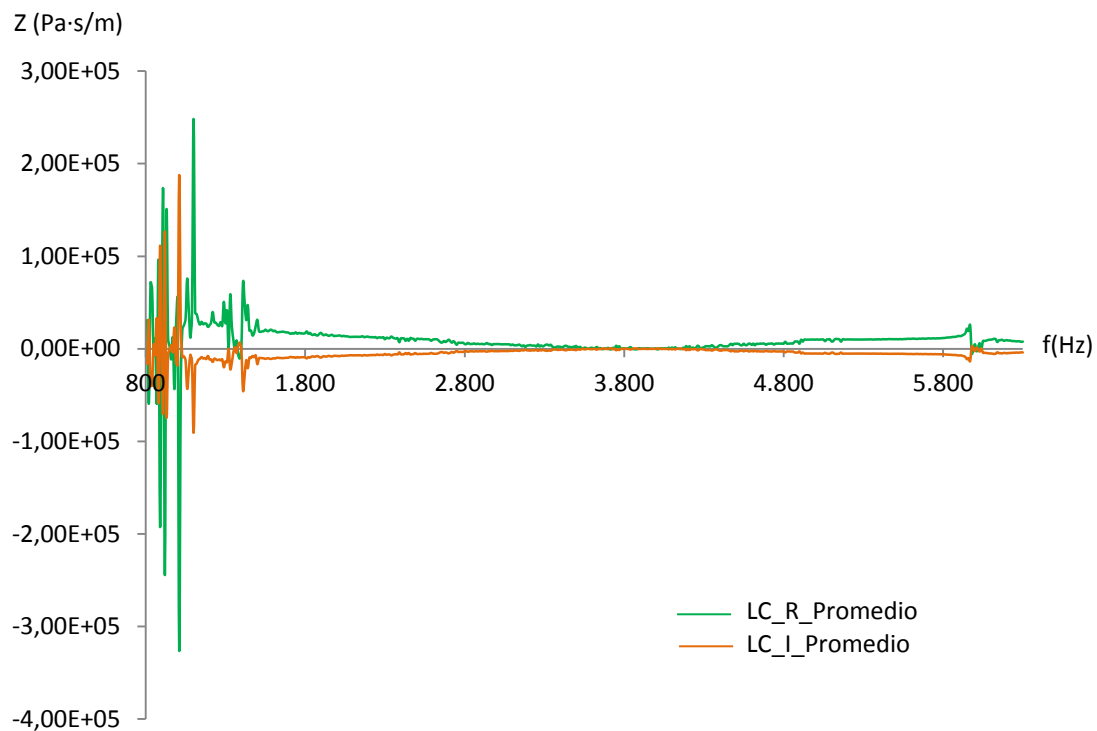


Gráfica. 15. Impedancia acústica específica de la serie LN, parte real e imaginaria.

En la gráfica 15 se puede apreciar una zona del espectro de impedancia, donde las oscilaciones son de gran amplitud, correspondiendo con la zona viscoelástica, estas grandes diferencias indican frecuencias donde la reflexión es bastante alta con respecto a otros puntos cercanos. Cuando la amplitud de la parte real se hace negativa, se desarrolla el caso en el que se produce una elevada reflexión de la onda incidente, como sucede en el intervalo entre 3000 *Hz* y 4000 *Hz*. La presencia de regiones donde la parte imaginaria es positiva, indican que el mecanismo de absorción está sufriendo un cambio. Si es puntual como en este caso, es debido a que se alcanza una resonancia del aire de las cavidades del material. Si por el contrario, se extiende en el espectro, se debe a que la disipación de energía es producida por la densidad y rigidez del cuerpo (sólo depende la parte real).



Ladrillo caravista



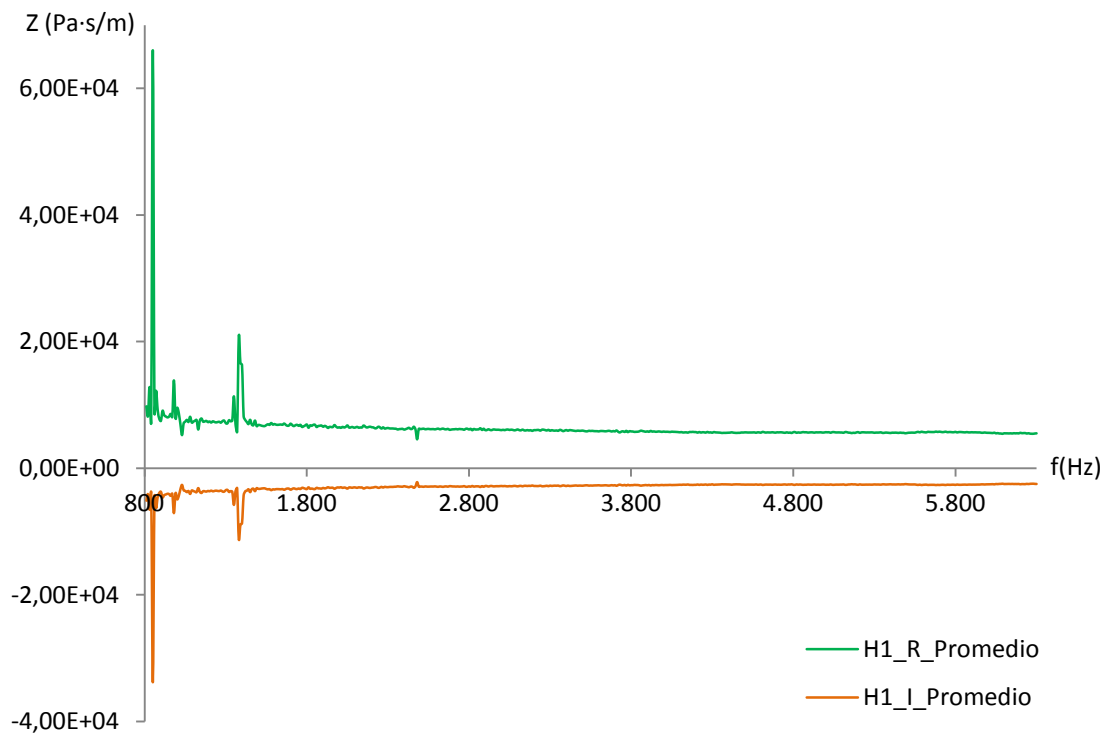
Gráfica. 16. Impedancia acústica específica de la serie LC, parte real e imaginaria.

El espectro del ladrillo caravista, no difiere demasiado del espectro del ladrillo convencional, ya que la materia que compone ambos, tiene iguales características. Sin embargo, aquí cabe destacar que la parte real de la impedancia aunque se hace muy pequeña en promedio, no sobrepasa el valor cero, y esto fomenta que se desarrolle la absorción frente a la reflexión, sucede lo mismo con la parte imaginaria, se mantiene negativa, lo que indica que el mecanismo de absorción de la capa vitrificada sigue siendo igual. Por este motivo se presenta un comportamiento en la curva del coeficiente de absorción prácticamente constante a partir de 3000 Hz. Finalmente hay que destacar el pequeño cambio que se produce en la frecuencia de 6000 Hz, que denota el cambio creciente de la absorción, una vez superada la frecuencia crítica. Esto puede verse con facilidad en la gráfica 11, en el comportamiento de las muestras LC3.1 y LC16.3.



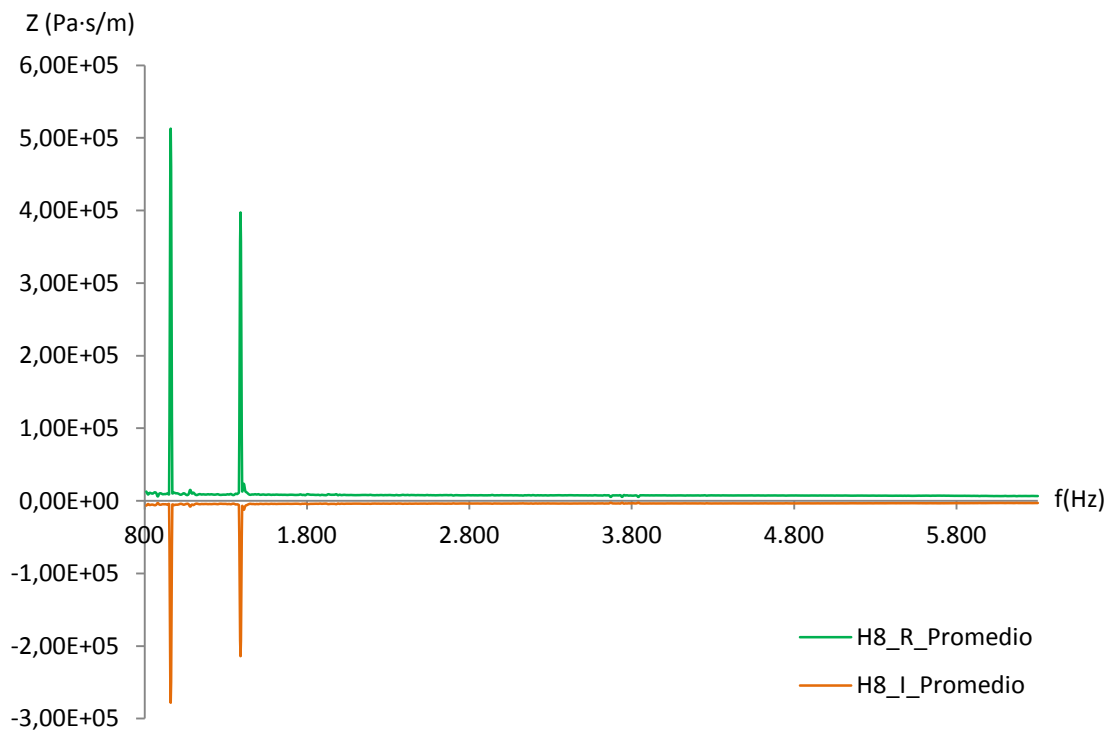
Hormigón reciclado

En las gráficas siguientes se puede comprender bien la importancia del estudio de la impedancia acústica específica, ya que se vuelven más tangibles las características del material; tales como composición, homogeneidad, y tipo de material acústico.



Gráfica. 17. Impedancia acústica específica de la serie H1, parte real e imaginaria.

Lo primero que destaca de la gráfica 17 es la regularidad de los valores, debido a las características del procesado de polvo que centra en un valor los tamaños del mismo. Además se comprueba que el material es absorbente en toda la banda de estudio, y tiene dos máximos en la zona viscoelástica que coinciden con zonas de mayor reflexión de las ondas. Estas zonas puntuales de reflexión, se deben a la dificultad de acoplamiento entre la onda incidente y el aire contenido en los poros (tamaño, y forma) [38]. En el estudio de las propiedades geométricas, se puede determinar las características de los poros, para posteriormente obtener los puntos donde se producen fenómenos de reflexión, o resonancias.



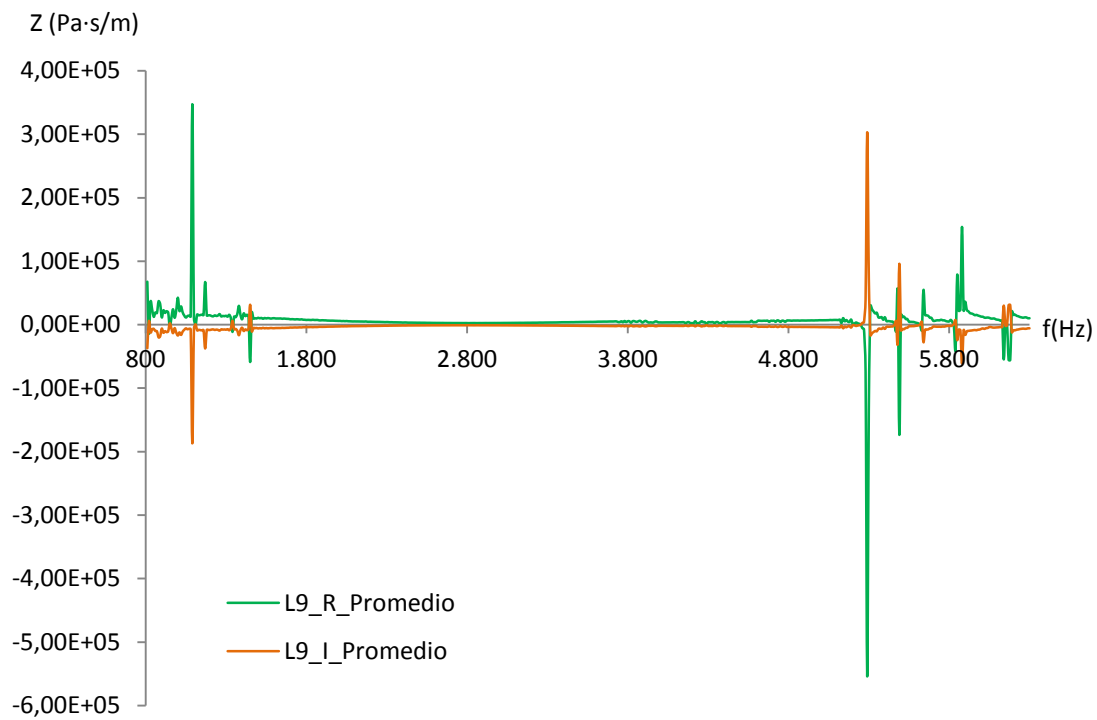
Gráfica. 18. Impedancia acústica específica de la serie H1, parte real e imaginaria.

El procedimiento de molienda empleado para la serie H8, tiene unas condiciones que aporta un material con muy baja dispersión de tamaños y formas. Es por este motivo que la gráfica 18 sea tan regular. En el estudio de la distribución de Weibull de este material, queda patente también la baja dispersión. Sin embargo se observa directamente que las características de absorción acústica son inferiores a las de la serie H1, debido a que las partículas se sitúan mejor entre sí, dificultando la formación de poros en el material. En cuanto a los valores a lo largo del espectro son constantes, y es una muestra de que el material siempre emplea el mismo método de disipación (Rozamiento del aire en las cavidades del material), y este mecanismo no sufre cambios con el aumento de la frecuencia.

Ladrillo reciclado

En el caso de este material el estudio realizado sobre la impedancia acústica específica, es de mucha importancia para poder determinar a qué clase de tipo de material se corresponde. Inicialmente el estudio del coeficiente de absorción lineal, no ha

resultado suficiente para determinar el comportamiento. Aunque si revela que la frecuencia crítica presente, se origina por que el material sigue en un intervalo la ley de la masa. En la gráfica se puede ver los valores que toma la impedancia acústica específica para el espectro estudiado.



Gráfica. 19. Impedancia acústica específica de la serie L9, parte real e imaginaria.

En la gráfica 19 aparece como el ladrillo reciclado tiene un cambio importante en el valor de la parte real e imaginaria. Hasta los 4000 Hz sigue prácticamente el comportamiento absorbente que manifiesta el ladrillo caravista. Pero en adelante, el material no tienen una frecuencia crítica en un intervalo amplio de frecuencias, lo que presenta es un conjunto de frecuencias críticas muy cercanas. Este fenómeno es muy típico en materiales fibrosos.

En lo que se refiere a la parte del espectro absorbente, se puede decir que el comportamiento es el de un material poroso rígido. Por lo que el material tiene un comportamiento mixto al igual que el ladrillo caravista, con la diferencia que en el caso del ladrillo reciclado no existe una contribución predominante de la absorción porosa,



ni de la reflexión debida a la masa. Si se aprecia la regularidad de las propiedades debida a la poca dispersión presente en el material, al igual que el resto de reciclados.

15. Determinación del módulo de Weibull: Coeficiente de absorción

Conocidos los datos de los ensayos realizados a los materiales cerámicos reciclados. Sabiendo las características de los materiales de construcción convencionales, obtenidos mediante ensayos, y recogidos en la bibliografía. Se puede evaluar el grado de fiabilidad de los resultados obtenidos para los materiales objeto de estudio, y la dispersión del coeficiente de absorción de cara a un posible uso técnico. Para la determinación del coeficiente únicamente se ha empleado el estimador de Bernard, por estar su uso muy extendido, y realizar una definición de la distribución bastante aproximada.

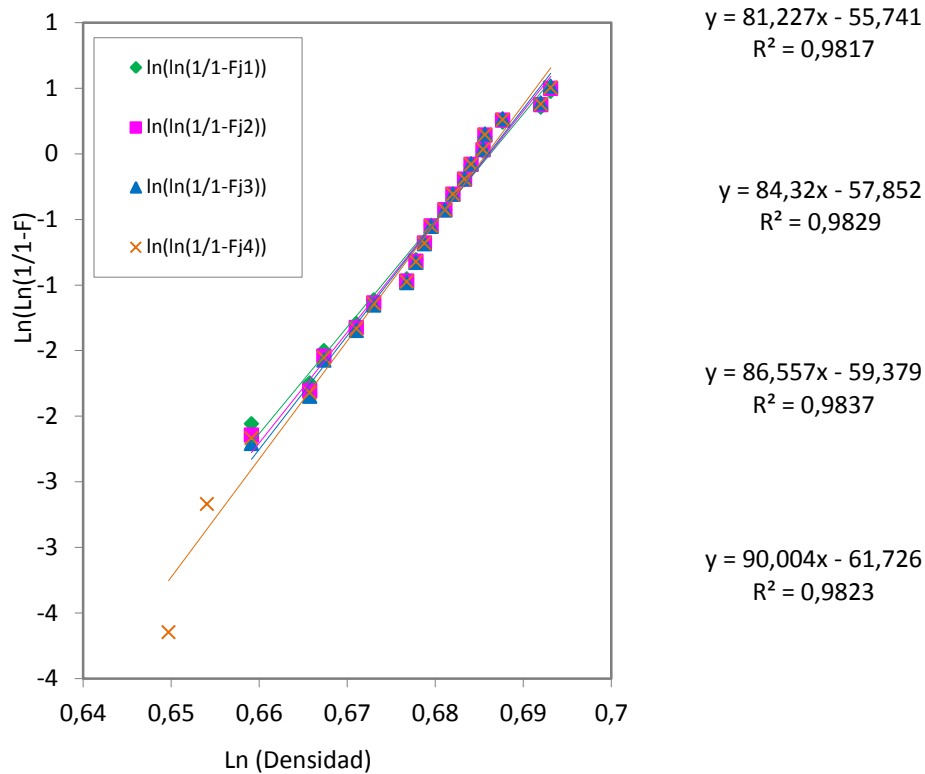
Primero se analizará los valores esperados para una propiedad másica como es la densidad en el caso del ladrillo caravista, para explicar como el coeficiente de absorción depende de varios parámetros, y que en este material que está diseñado para satisfacer un aislamiento acústico existe una tendencia.

Los valores obtenidos para la regresión de la distribución de Weibull de la densidad de las muestras LC, se tiene en la gráfica 20. En este caso se han empleado cuatro estimadores para ver si existen diferencias significativas sobre la variable de estudio.

Analizando los datos obtenidos tenemos que la densidad en el caso de los ladrillo caravista tiene una gran fiabilidad en esta propiedad, por lo que se puede realizar una comparación de esta propiedad con respecto su coeficiente de absorción, para conocer de forma secundaria cómo se comportan respectivamente el resto de materiales. Este procedimiento se ha realizado de esta manera por la imposibilidad de realizar la distribución de Weibull de la densidad para el resto de materiales, debido a que el número de muestras, es insuficiente. En el caso del coeficiente de absorción se



ha realizado dos mediciones una por cada lado, salvo en el ladrillo caravista que únicamente posee una superficie que sirve de referencia para las propiedades acústicas.



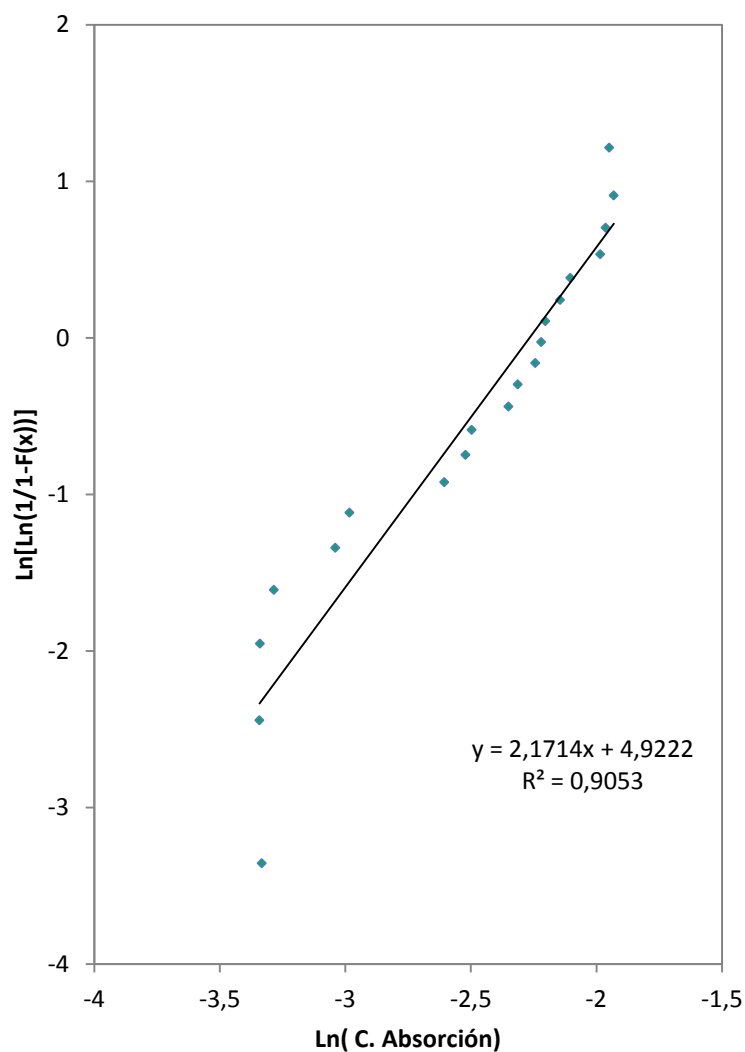
Gráfica. 20. Regresión de la distribución de Weibull de la densidad para las muestras LC.

Ahora se mostraran los valores obtenidos para el coeficiente de absorción de los materiales convencionales, para poder comparar el grado de dispersión de las propiedades con respecto a los materiales de estudio. Estos quedan recogidos en la tabla 17:

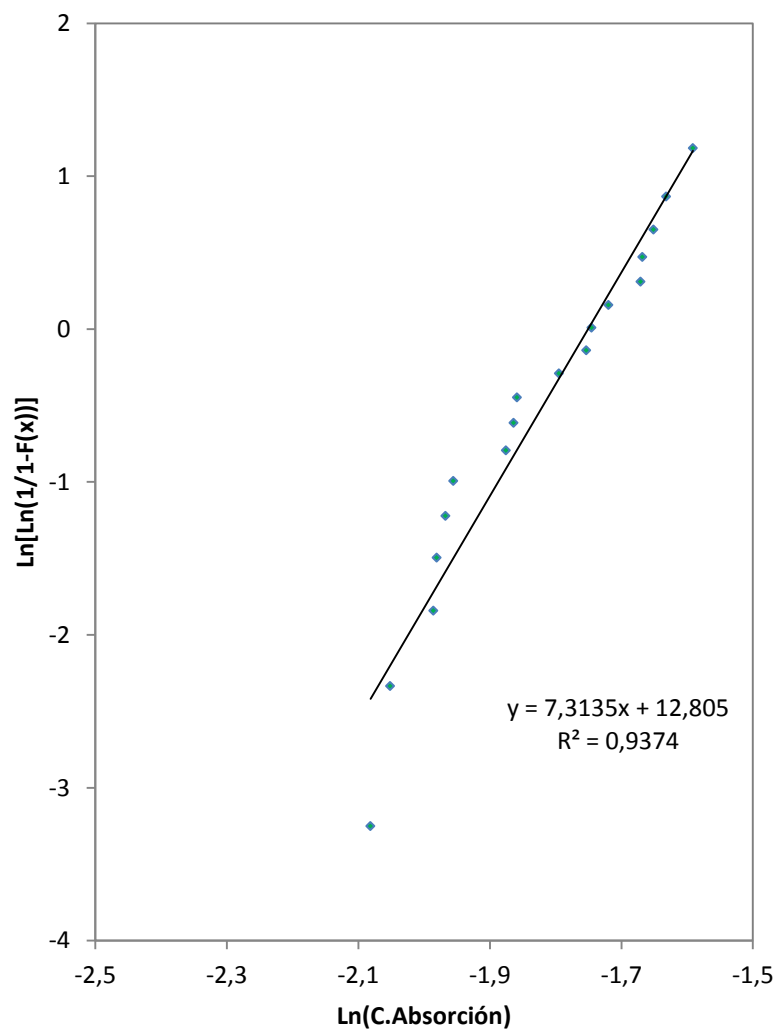


Parámetros de la distribución de Weibull para los materiales convencionales bajo estudio			
	α	β	R^2
Probetas LN	9,6487	2,1714	0,9053
Probetas LC	5,7596	7,3135	0,9374

Tabla. 17. Valores de los coeficientes de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para los materiales convencionales.



Gráfica. 21. Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras LN



Gráfica. 22. Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras LC.

De los resultados obtenidos, se confirma lo dicho anteriormente, en cuanto a la heterogeneidad de estos materiales y su influencia en las propiedades acústicas. Dando lugar en el caso de las probetas de ladrillo caravista (LC), un material de excelentes propiedades acústicas que se encuentra muy limitado por los fallos inducidos en las capas vitrificadas (Teniendo en cuenta que las probetas con fallos se han retirado de la distribución, de no ser así el cuadrado de la correlación sería de 0,81). El hecho de verse dañada la capa vitrificada, no solo reduce las propiedades acústicas; conlleva que la pieza sea inservible para esta tarea. Por otro lado la



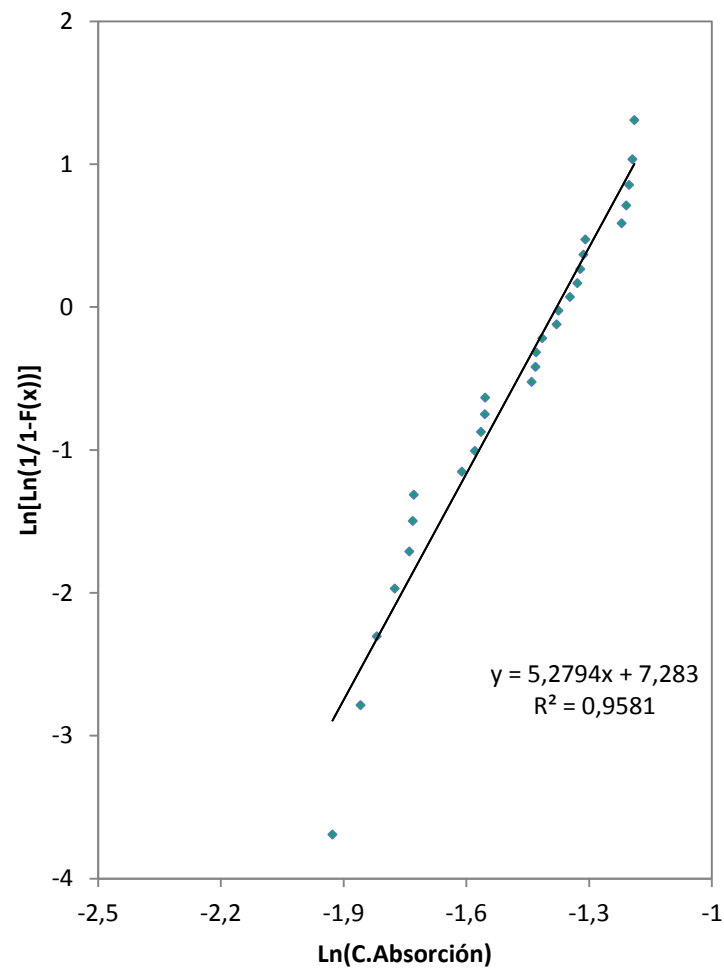
repetibilidad en las propiedades es mucho mayor en el ladrillo caravista, aun teniendo unas propiedades mucho más sensibles debido a la superficie; como queda mostrado mediante el parámetro β . Las probetas de ladrillo convencional, muestran que a nivel acústico no es un parámetro que esté desarrollado en estos materiales, ya que las propiedades son dispares entre probetas de una misma pieza. Esto demuestra que el valor de este material como material acústico es secundario, y lo limita aún más a la aplicación únicamente de la ley de masas para explicar su comportamiento; como ya se había visto.

Materiales cerámicos reciclados

Compararemos ahora los resultados obtenidos en los materiales reciclados bajo estudio. Para ello, se expondrán las regresiones lineales de la distribución de Weibull; con el fin de estudiar los comportamientos en el conjunto de las muestras.

Parámetros de la distribución de Weibull para los materiales reciclados bajo estudio			
	α	β	R^2
Probetas H1	3,9729	5,2794	0,9581
Probetas H8	5,1407	6,1058	0,9775
Probetas L9	0,3525	8,5067	0,9468

Tabla. 18. Valores de los coeficientes de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para los materiales reciclados.

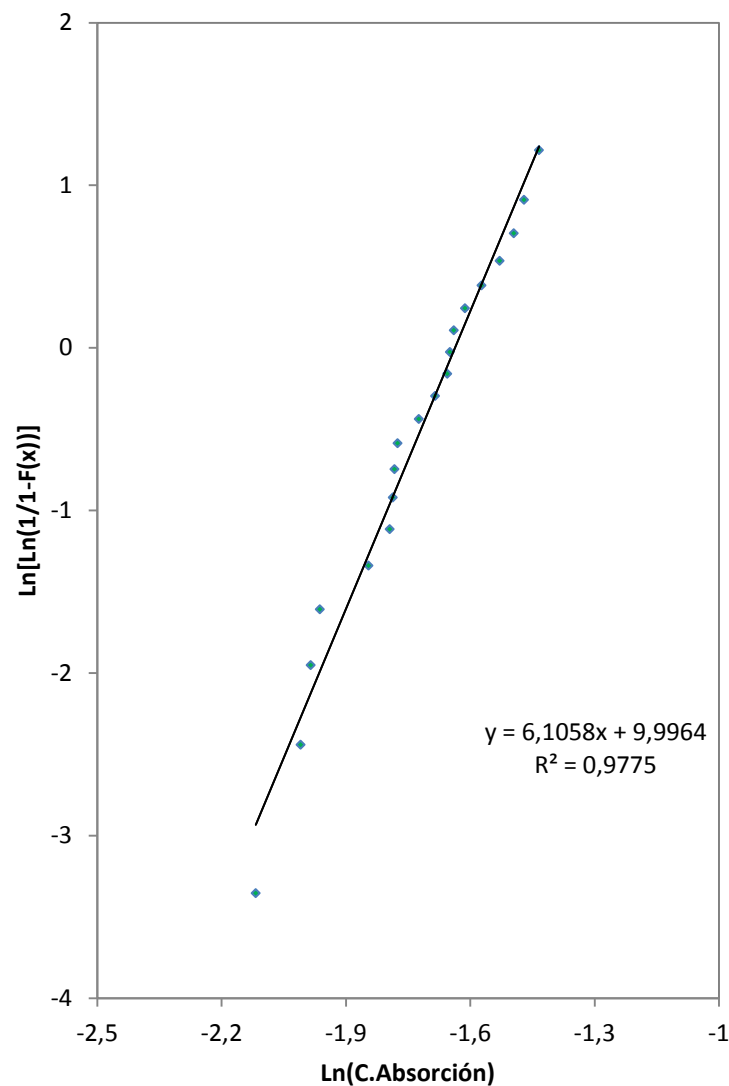


Gráfica. 23. Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras H1.

En la serie H1 se puede comprobar que la correlación con la regresión lineal es bastante precisa, dando de esta forma fidelidad a la distribución de Weibull empleada; véase gráfica 23. El valor del parámetro β , nos indica que la dispersión de valores en la muestra es pequeña, y por lo tanto la fiabilidad de los resultados es alta, pudiéndose afirmar que las propiedades acústicas en el material son de carácter primario. Esto es de gran importancia, porque el material ha sido procesado para funciones mecánicas, y se comprueba que existe margen de mejora bastante amplio en las propiedades acústicas. Hay que destacar que en esta distribución se presentan patrones en los grupos de muestras. Estudiando las probetas, se ha determinado que existen probetas como la H1-5, H1-6, y H1-15 que presentan un estado más compacto, y el coeficiente



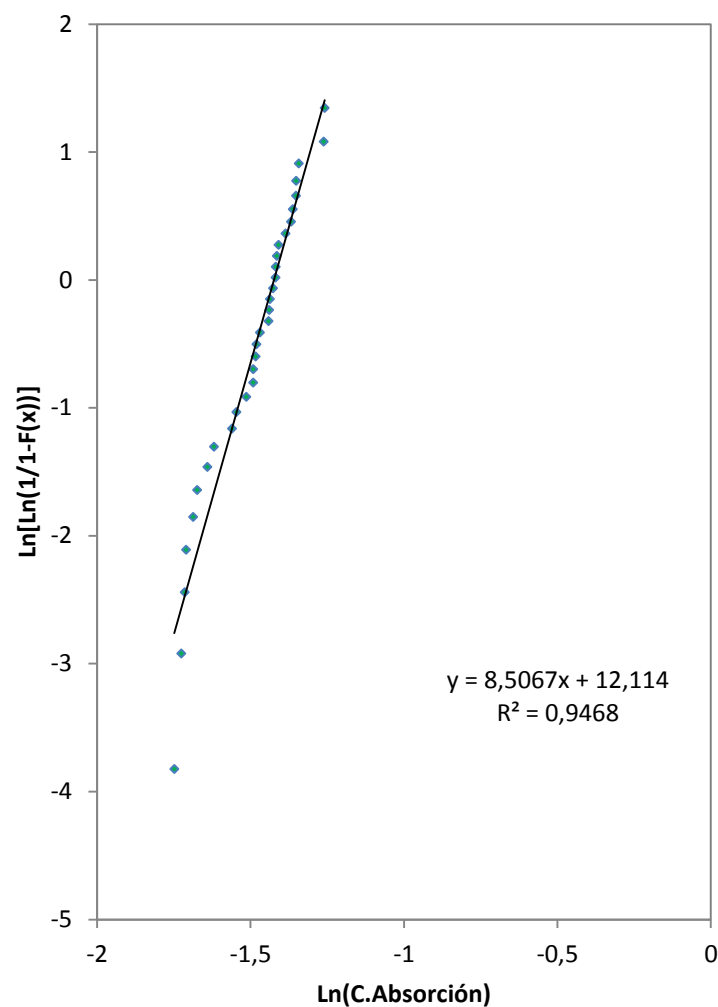
de absorción es menor; sin embargo en probetas como la H1-8, y H1-10 el grado de compactación es menor, fomentando la presencia de poros en el interior y de esta forma aumenta el coeficiente de absorción acústica. Estudiando las probetas mecánicas originales, se determinó la causa de este comportamiento. Al extraer las muestras para los ensayos acústicos, se cortaron en el tramo de material que era viable. En algunos casos este tramo coincidía con la base superior, y en otros con la base inferior. De tal manera que al ser obtenidas por una técnica de moldeo gravitatorio, se producía un gradiente en la humedad de la pieza; dando lugar en la base a mayores cavidades formadas por el agua de la pasta.



Gráfica. 24. Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras H8.



Para el caso de la serie H8, la fiabilidad de los resultados en las distintas muestras resulta muy alta como indica la gráfica 24, sin embargo las condiciones de molienda como ya se vio, no son las adecuadas para aumentar el coeficiente de absorción. Sin embargo al existir un tamaño de partículas de polvo y una forma bastante regular, se facilita que en el proceso de moldeo no se desarrolle de forma tan significativa la diferencia de contenido de agua.



Gráfica. 25. Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras L9.



En la gráfica 25 se presenta la regresión lineal del coeficiente de absorción para el ladrillo reciclado. El valor del modulo de Weibull resulta muy alto, al igual que en el caso del ladrillo caravista, y si nos fijamos en las tendencias de ambos materiales son muy parecidas. Hay que destacar que las frecuencias donde se desarrollan los máximos de absorción son en todas las muestras muy similares, luego por un lado se confirma la relación existente entre la materia de los ladrillos caravista, y la empleada en los ladrillos reciclados, siendo la adecuación del tamaño de partícula otra vez un indicador de la baja dispersión, como se vio en las series de hormigón reciclado.

Finalmente indicar que la distribución de Weibull se ha empleado debido a lo extendida que está en los estudios de materiales cerámicos por su carácter en condiciones de fallo, catastrófico y aleatorio. Ya que actualmente no se dispone de información suficiente sobre parámetros de Weibull para propiedades acústicas, únicamente podemos comparar con el ladrillo caravista. Se podrían haber empleado otras distribuciones pero la información que aportarían sería similar, y también dependerían de la disponibilidad de datos para realizar la comparación.

16. Comparación de resultados con el modelo de Delany-Bazley

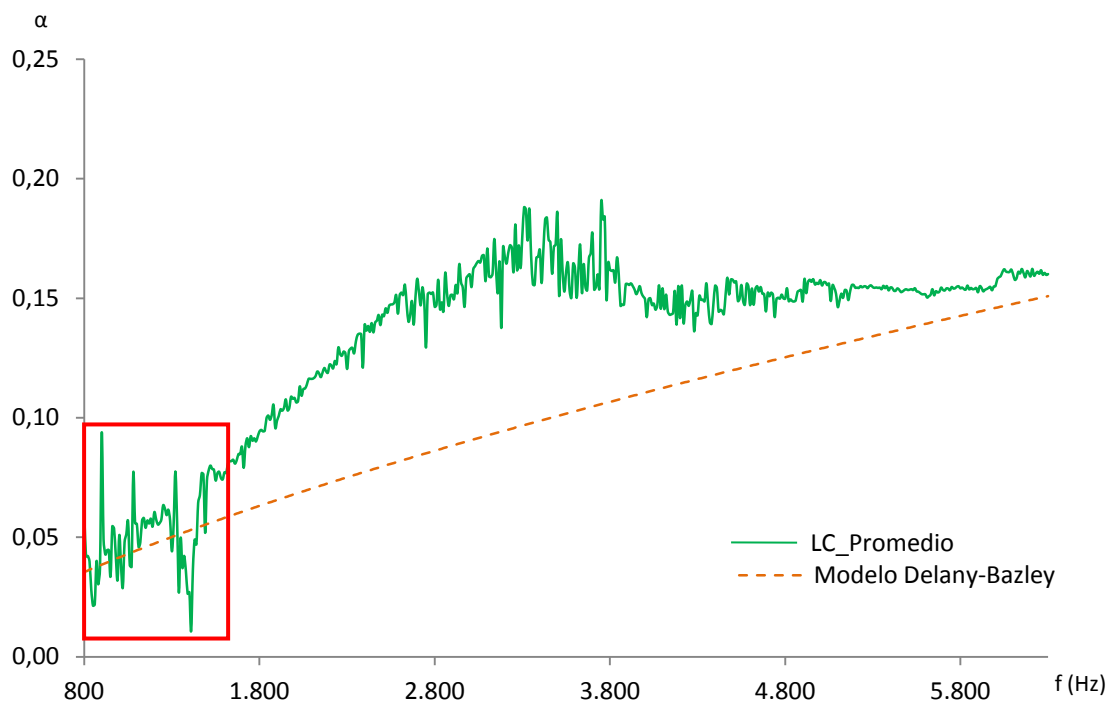
Un modelo sencillo, pero que aporta mucha información sobre una de las variables principales que influye en la absorción del sonido, es el modelo uniparamétrico de Delany-Bazley. Este modelo, nos permite conocer si un material sigue ó no las propiedades de un material acústico absorbente. A la vez que se puede determinar una variable de diseño como es la resistencia estática al flujo de aire. Variable de gran importancia en los materiales poroelásticos, y que tiene uso tanto en la mecánica de estos materiales, como en el desplazamiento de fluidos en el interior del material. En este último caso tiene especial interés para el diseño de filtros, tanto de partículas en el aire; como de sedimentos en los líquidos [22].



Para el estudio realizado, la resistencia estática al flujo de aire, resulta útil para poder obtener información de la geometría de las celdas del material. Luego con esta variable se puede estudiar cualitativamente otras dos variables geométricas, la porosidad, y la tortuosidad. Pero su función no solo se limita a comparar el material, y obtener un parámetro de diseño; también sirve de apoyo al modelo de Johnson-Champoux-Allard. Este otro modelo nos permite posteriormente cuantificar los 5 parámetros de un material poroelástico.

Con el conjunto de muestras ensayadas se realizó el promedio de los datos para el coeficiente de absorción, y la impedancia acústica específica, para poder determinar los parámetros analizando el espectro muestreado, de esta forma se obtiene el valor promedio para los parámetros y con ello se determina su valor.

Ladrillo caravista



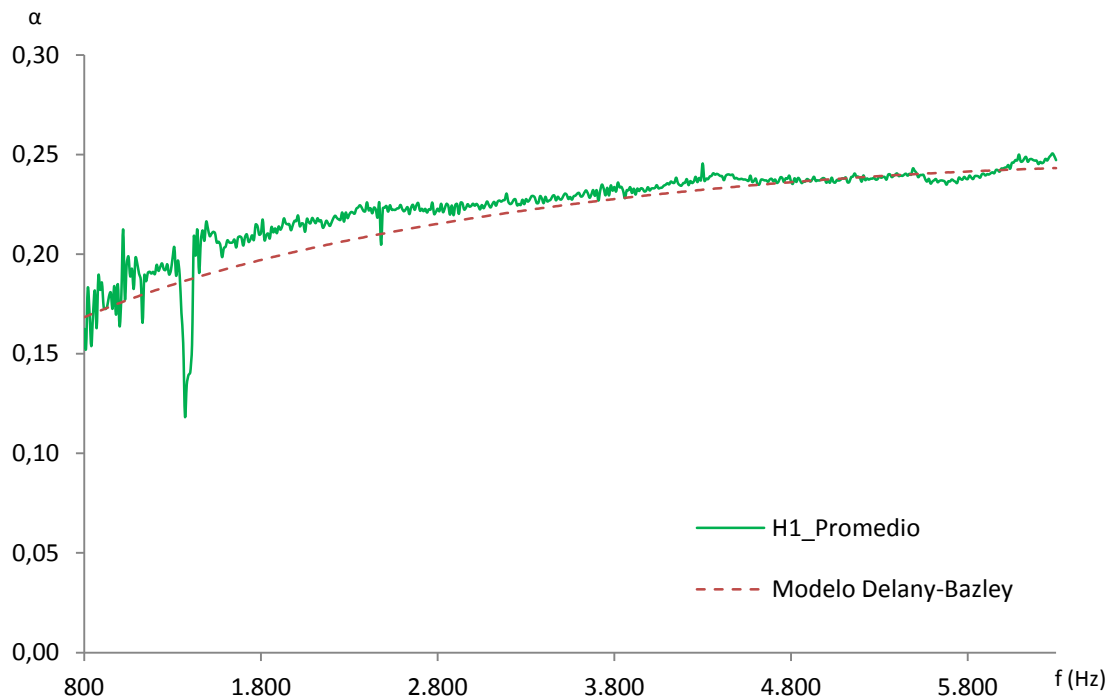
Gráfica. 26. Comparación del coeficiente de absorción de la serie LC con el modelo de Delany-Bazley.



En la gráfica 26 del ladrillo caravista se puede ver que el modelo de Delany-Bazley no se adapta a la curva del coeficiente de absorción acústico lineal frente la frecuencia. La principal causa es que el material tiene un comportamiento combinado, por un lado la capa vitrificada es de carácter absorbente y representa como 2 mm del material, sin embargo el resto de la probeta otros 8 mm se rigen según la ley de masas. Si se puede decir que en la zona viscoelástica de la curva el modelo se aproxima a los datos obtenidos, y esto es debido a que en esta zona la absorción es predominante. Esto se puede ver en la zona de resonancias de absorción, que se encuentra remarcada en rojo. También queda patente antes de realizar la representación gráfica, que el modelo de Delany-Bazley no se adaptaría a los datos debido a que superaba el límite $(f/\sigma) > 0.001$, aunque fuera de forma reducida $(f/\sigma) = 9.84 \cdot 10^{-4}$. En lo que respecta a los resultados que superan los valores previsibles para el modelo, la explicación se encuentra en que la parte densa del material, y que sigue la ley de la masa, produce una gran reflexión del sonido; y la perturbación vuelve a situarse en la capa vitrificada de absorción; luego la mejora de la absorción se debe en este caso a un proceso combinado, que es muy aprovechado en las soluciones técnicas de aislamiento (capas intermedias de materiales absorbentes entre reflectantes).



Materiales reciclados

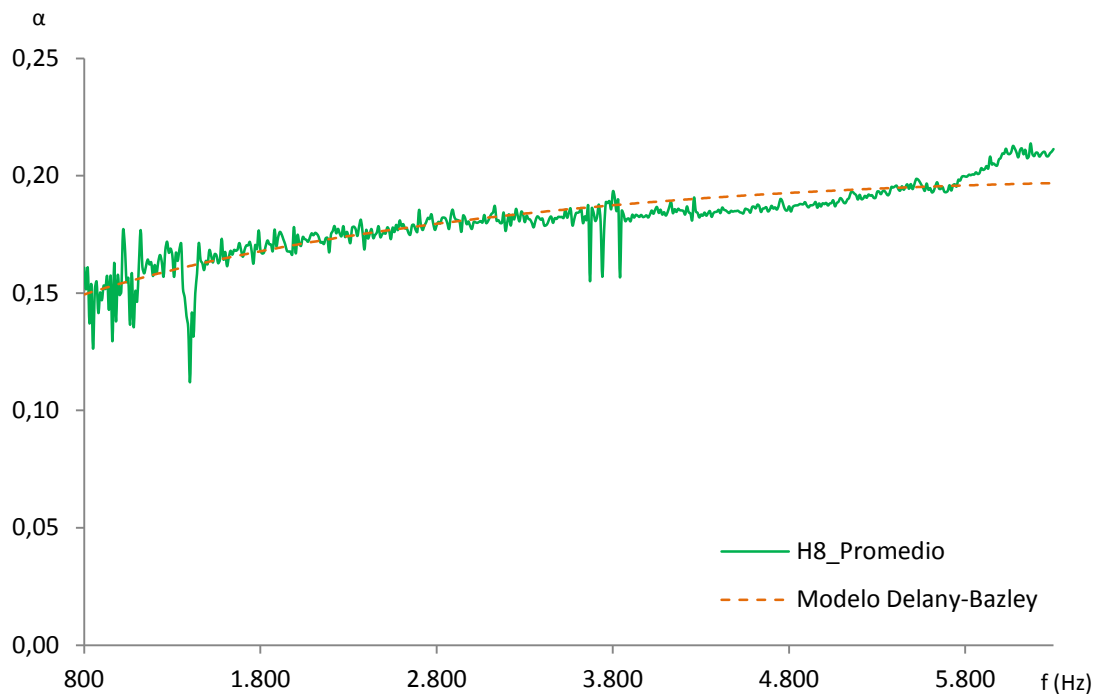


Gráfica. 27. Comparación del coeficiente de absorción de la serie H1 con el modelo de Delany-Bazley.

La serie H1 de hormigón reciclado expuesta en el gráfico 27, muestra que el modelo de Delany-Bazley se adapta de forma correcta a los datos promediados de la serie. La zona cercana a la frecuencia de 2000 Hz tiene un ligero desajuste que puede ser motivado por la diferencia de valores en las distintas probetas, ó porque el modelo de Delany-Bazley solo considera las pérdidas originadas por la viscosidad del flujo de aire. Sin embargo en otros modelos también se consideran las pérdidas debidas a la disipación de calor debido al contacto del flujo con el esqueleto del material. A diferencia del hormigón, véase gráfica 4, este material consigue comportarse de forma absorbente porque se ha conseguido un aumento del contenido de poros, y lo más importante existe comunicación entre los mismos. La densidad del hormigón empleado es de $2,2 \text{ g/cm}^3$, mientras que el material reciclado a partir de este hormigón tiene una densidad aproximadamente de la mitad, esto es un indicador de la cantidad de aire que está alojado en el material, y que cambia radicalmente las

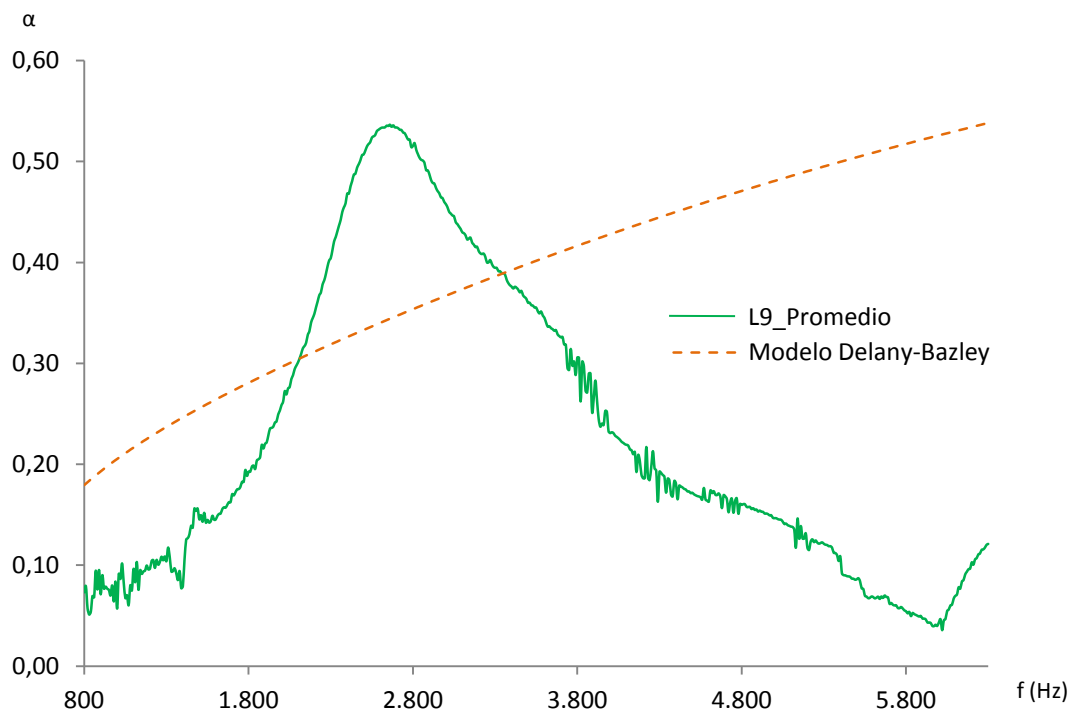


propiedades acústicas. Esto se podrá ver con más detalle en el análisis del modelo de 5 parámetros.



Gráfica. 28. Comparación del coeficiente de absorción de la muestra H8 con el modelo de Delany-Bazley

En el caso de la serie H8, los resultados comparados con el modelo son aun mejores. Esto es debido en gran parte a la regularidad de los datos obtenidos en los ensayos, y al carácter absorbente que muestra el hormigón reciclado, adaptándose bien el parámetro del modelo. Cabe destacar el aumento de absorción en las últimas frecuencias analizadas de los resultados, y la diferencia existente con el modelo; para este comportamiento no se ha encontrado una explicación. Indicar también que al igual que la serie H1, la comparación con el modelo de 5 parámetros, puede explicar mejor las condiciones de los resultados.



Gráfica. 29. Comparación del coeficiente de absorción de la serie L9 con el modelo de Delany-Bazley.

En la gráfica 29 queda demostrado que el ladrillo reciclado aunque presenta una gran absorción no sigue un modelo acústico poroso puro, como le sucede de forma similar al ladrillo caravista. Esto se confirma también porque supera el criterio $(f/\sigma) > 0.001$ dando un valor de $(f/\sigma) = 8.36 \cdot 10^{-4}$. Luego una explicación a esta situación es que la porosidad que presenta el material en gran parte pueda estar cerrada, o con grandes constricciones en los canales que comunican la porosidad, y la forma que tiene el material para resultar tan absorbente se basa en la vibración de la masa de aire, y la dificultad que presenta a las ondas sonoras para acoplarse al esqueleto; junto a los mecanismos de la porosidad abierta que pueda conservar el material. Un modelo que podría satisfacer estas condiciones es el de Pride-Lafarge, siempre y cuando la densificación que ha sufrido el material en el proceso de sinterizado no haga que predomine en este la ley de la masa [9, 14].



El comportamiento que se ha presentado, también explica como el ladrillo reciclado tuvo una mejor respuesta en los ensayos de compresión que el hormigón reciclado, debido a esta posible densificación con cierre de poros [28].

16.1. Resultados de la resistencia al flujo estático del aire

Empleando los resultados obtenidos de impedancia acústica específica para los tercios de octava, con el modelo de Delany-Bazley se consigue determinar la resistencia al flujo estático del aire. En los resultados se puede ver fácilmente como el coeficiente de absorción tiene relación directa con este valor, aunque tiene unos límites. Cuando la resistencia al flujo es muy pequeña, el coeficiente es pequeño debido a que no hay suficiente resistencia para que se disipe energía con el flujo. Por el contrario si la resistencia es muy elevada, no se desarrolla el suficiente movimiento en las celdas del material, y no se disipa energía. Luego cada material tiene una resistencia al flujo determinada, donde el coeficiente de absorción es máximo. Para los materiales estudiados, y según la forma que sigue el modelo empleado, con menores resistencias todos ellos mejorarían significativamente sus propiedades. Destacando que la serie H1, es la que presenta una mayor absorción, coincidiendo con la menor resistencia al flujo de los materiales estudiados.

Modelo Delany-Bazley	$\bar{\sigma}(N \cdot s/m^4)$
Probetas ladrillo caravista (LC)	$6,40 \cdot 10^6$
Probetas hormigón reciclado (H1)	$2,68 \cdot 10^6$
Probetas hormigón reciclado (H8)	$4 \cdot 10^6$

Tabla. 19. Resultados obtenidos del modelo de Delany-Bazley para la resistencia al flujo estática.



17. Comparación de resultados con el modelo de Johnson-Champoux-Allard: Obtención de propiedades de diseño

El modelo de Delany-Bazley, es en muchos casos suficiente para definir las características de absorción acústica de un material. Sin embargo no permite tener un conocimiento más exhaustivo de las propiedades que originan el comportamiento acústico, y tampoco se adapta a las condiciones de algunos materiales. Por este motivo, se emplean más modelos acústicos, para conocer las propiedades que son manipulables en el proceso de fabricación, y ajustar el modelo a situaciones particulares como son las frecuencias críticas. En el caso de los materiales anteriormente estudiados que no satisfacen el modelo de Delany-Bazley, no puede emplearse este modelo, debido a que los resultados serán similares.

A partir de los datos obtenidos en los ensayos con el tubo de impedancia acústica, y los resultados obtenidos del modelo de Delany-Bazley que sirven de apoyo; se consiguen los parámetros del modelo de Johnson-Champoux-Allard. Los parámetros del modelo, como ya se indicó, son cinco (Porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo estático del aire, y las longitudes características viscosa y térmica). Con estos parámetros se puede realizar una comparación más amplia entre los materiales bajo estudio, y además se pueden indicar que parámetros son susceptibles de modificación para mejorar las características del material.

Ladrillo caravista

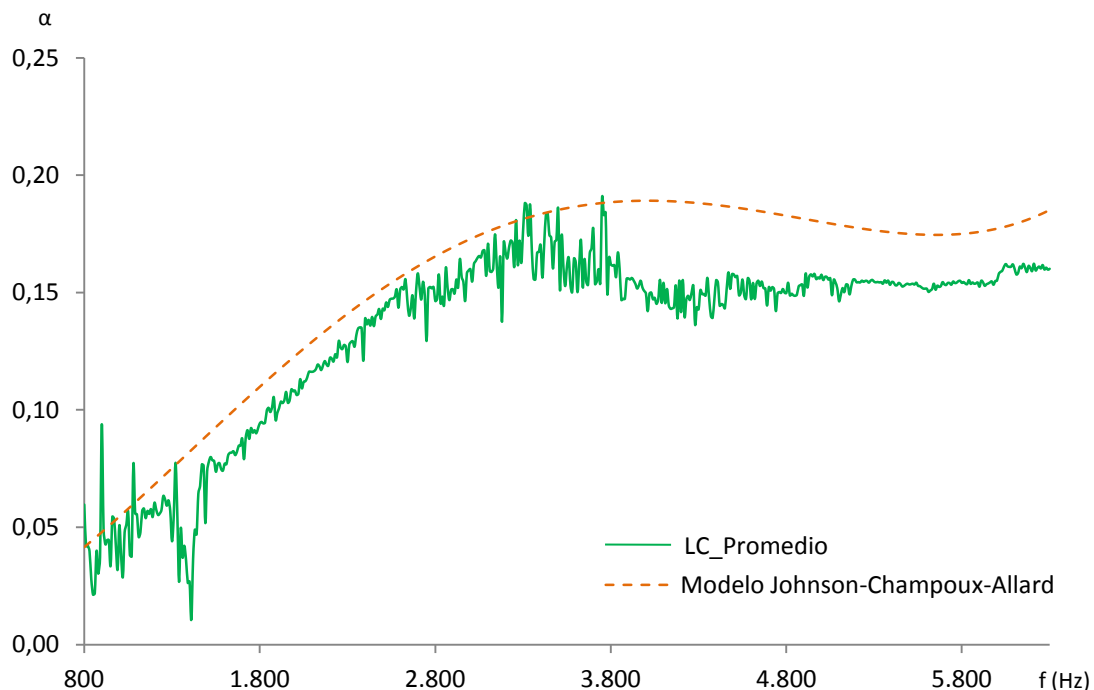
Empleando el método analítico inverso del modelo, sobre los datos obtenidos en los ensayos, se consigue determinar el valor de los cinco parámetros que definen un material poroelástico. El carácter del material estudiado es rígido, lo que facilita la obtención de algunos de los parámetros. En la tabla 20 se encuentran los valores obtenidos para este material.



Parámetros del modelo Johnson-Champoux-Allard				
$\sigma(N \cdot s/m^4)$	α_∞	ϕ	$\Lambda(\mu m)$	$\Lambda'(\mu m)$
$6,40 \cdot 10^6$	1,087	0,121	14	27,9

Tabla. 20. Parámetros del modelo JCA para el ladrillo caravista.

Destacan en los parámetros obtenidos la tortuosidad, y la porosidad. En el caso de la tortuosidad, se tiene que el camino recorrido por la onda acústica sigue una trayectoria prácticamente recta, este es un factor que nos está indicando que el material no tiene una buena capacidad para dispersar la onda en el interior y con ello mejorar la absorción. En lo que a la porosidad se refiere, el valor obtenido 0,121 comparado con los valores obtenidos de la bibliografía (en torno a 0,15) [63], es bastante aproximado. Aquí hay que destacar la dificultad que se presenta en el método, para determinar con exactitud el valor de toda la porosidad cerrada.



Gráfica. 30. Comparación del coeficiente de absorción de la serie L con el modelo JCA.



La baja porosidad, junto con los pequeños tamaños de las longitudes características (tamaño de poro y de aperturas de celda); dan una buena explicación al valor tan alto que presenta la resistencia al flujo estático de aire. Al ser una estructura muy cerrada y tupida, el aire tiene mayor dificultad para discurrir en el interior del material, y por tanto de disipar energía [41].

A partir de los parámetros del modelo, se ha realizado la curva de absorción de la gráfica 30. En comparación con los datos experimentales, vemos que los valores son algo superiores a los experimentales, y a partir de 3500 Hz el modelo no se adapta correctamente. La explicación está en dos vertientes, por un lado lo que se ha comentado de la presencia de dos partes del material muy diferenciadas, la capa vitrificada, y el cuerpo denso. Este conjunto puede promover comportamientos muy distintos, como es la aparición de una frecuencia crítica que como se ve esta atenuada. Sin embargo, el modelo de Johnson-Champoux-Allard, es capaz de trabajar con materiales de varias fases en estratos, y gracias a esto su uso está adaptado a materiales compuestos. Luego el modelo puede satisfacer las condiciones de este material. Por otro lado, el método analítico no estima con precisión las longitudes características, y estos parámetros son de importancia para la reducción de la absorción a frecuencias altas (Estos parámetros son los que modelan las frecuencias críticas).

El modelo por lo tanto se adapta relativamente bien a los datos de ensayo, teniendo muy presente las condiciones de las capas, y el método de determinación de los parámetros.

Hormigón reciclado

En las muestras obtenidas con este material tendrá especial importancia el proceso de fabricación empleado. La molienda nos aporta datos promedio del tamaño de las partículas, mientras que el proceso de sinterizado nos aporta datos sobre la reducción, y la porosidad final. Además se debe considerar que las series de este material muestran un comportamiento más homogéneo en el conjunto de las probetas ensayadas. De tal forma que la adaptación del modelo sea más probable.



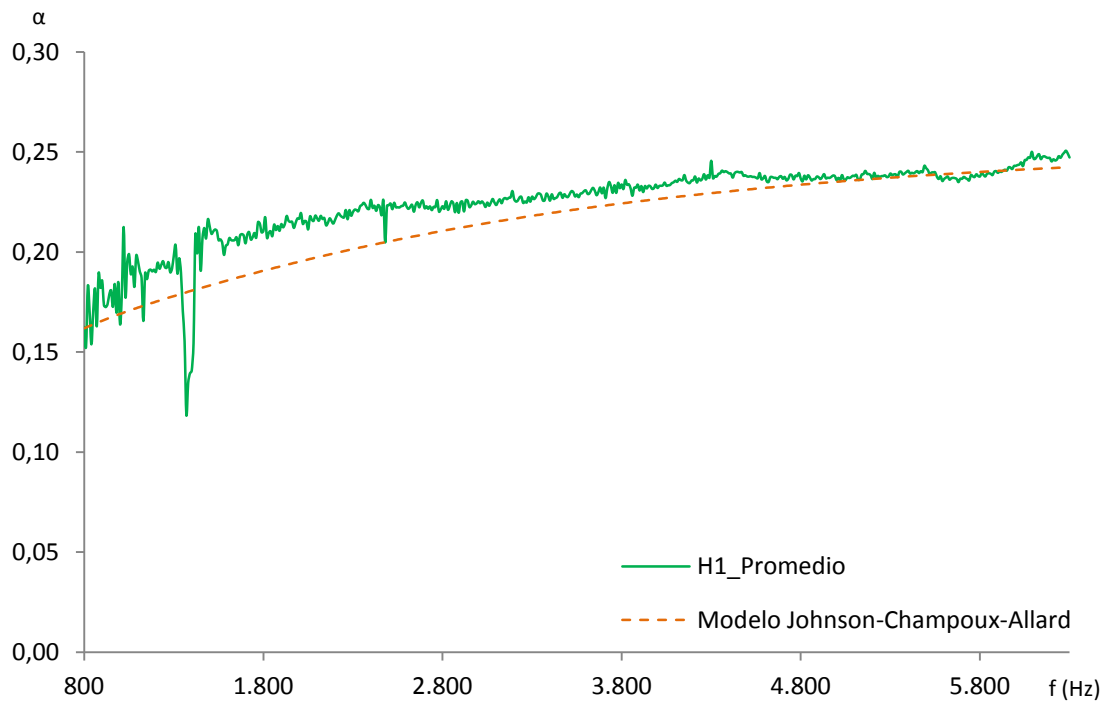
Serie H1

Los parámetros obtenidos para el hormigón reciclado por el método analítico inverso quedan recogidos en la tabla 21.

Parámetros del modelo Johnson-Champoux-Allard				
$\sigma(N \cdot s/m^4)$	α_∞	ϕ	$\Lambda(\mu m)$	$\Lambda'(\mu m)$
$2,68 \cdot 10^6$	1,332	0,296	24,4	48,8

Tabla. 21. Parámetros del modelo JCA para el hormigón reciclado H1.

Los parámetros obtenidos en este caso son más propios de un material absorbente, y los resultados así lo muestran. En el modelo de Delany-Bazley, se comprobó como la resistencia al flujo estático de aire es determinante para este material, y en este modelo se vuelve a comprobar que la tendencia es la misma. Luego de forma secundaria el aumento de la porosidad, origina una disminución de la resistencia al flujo, y por lo tanto una mejora de las propiedades acústicas. Pero también destaca el valor de la tortuosidad, ya que este parámetro indica que la forma que adoptan los poros es la adecuada, y por lo tanto la forma de las partículas que componen el material son de referencia para posteriores trabajos.



Gráfica. 31. Comparación del coeficiente de absorción de la serie H1 con el modelo JCA.

Cabe reseñar los valores obtenidos para las longitudes características. El valor de la longitud característica térmica, es un valor promedio de los poros más grandes del material (Entiéndase fuera de estos aquellos poros puntuales originados por burbujas de aire). Para este parámetro se ha obtenido el siguiente valor $48,8 \mu m$, y sabiendo que el tamaño de molienda es menor o igual a $63 \mu m$; se tiene que los huecos libres en una red cuadrada de sinterizado son de forma teórica de $52 \mu m$, sin considerar el efecto del sinterizado, como se puede ver en la figura 37. Por lo que los valores obtenidos son bastante realistas, pero a la vez orientativos debido al error que se comete con el método analítico. Para conseguir realizar este cálculo con suficiente precisión, se debe emplear el método evolutivo.

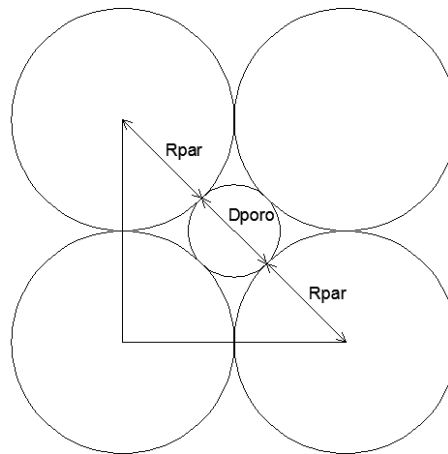


Figura. 37. Esquema de la posición ideal de las partículas previa a la sinterización.

En la gráfica 31 podemos ver el modelo con los parámetros determinados, y compararlo con los datos experimentales. Los valores que sigue el modelo son similares al modelo de Delany-Bazley, ratificando el carácter absorbente del material. Además la curva no experimenta ningún decrecimiento al igual que los datos experimentales (globales, los locales son origen de cambios de fase en la onda reflejada) [40], que sería origen de la presencia de alguna frecuencia crítica.

Serie H8

Los cinco parámetros determinados para esta serie quedan recogidos en la tabla 22.

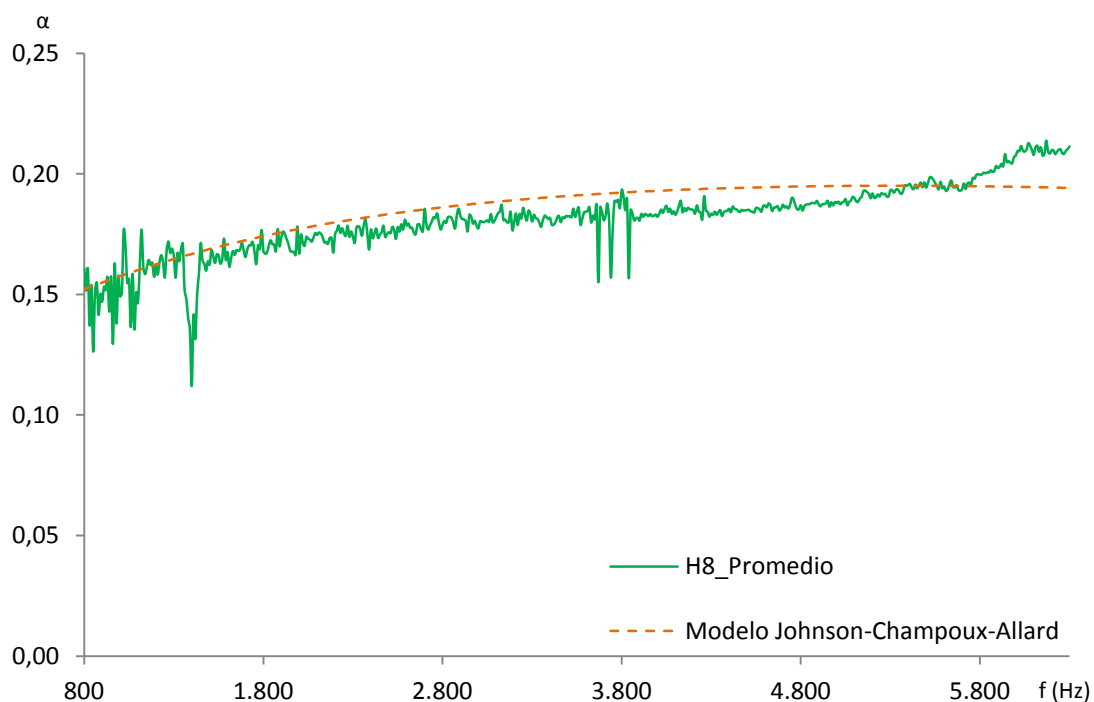
Parámetros del modelo Johnson-Champoux-Allard				
$\sigma(N \cdot s/m^4)$	α_{∞}	ϕ	$\Lambda(\mu m)$	$\Lambda'(\mu m)$
$4 \cdot 10^6$	1,168	0,262	19,9	39,8

Tabla. 22. Parámetros del modelo JCA para el hormigón reciclado H8.

Inicialmente lo que más destaca de los valores expuestos es la similitud a la serie H1. Por lo que las características comunes son de importancia para determinar el comportamiento general. Particularizando en los distintos parámetros, con facilidad se puede ver que las propiedades acústicas de absorción de la serie H8 son menores, y es



debido fundamentalmente a la disminución de la tortuosidad y de la porosidad. Estas dos variables tienen una influencia alta con la resistencia al flujo, y la alejan de los valores óptimos para este material. En lo que se refiere a la gráfica del modelo, sorprende que no se ajusta con tanta precisión como el modelo de Delany-Bazley, debido principalmente a que el modelo de Johnson-Champoux-Allard, da importancia a las longitudes características, y el método analítico inverso como se ha visto genera errores en la medida de estos dos parámetros.



Gráfica. 32. Comparación del coeficiente de absorción de la serie H8 con el modelo JCA.

Finalmente destacar que los ajustes que presentan los modelos se comportan de forma muy precisa en el caso del hormigón reciclado, y en el caso del ladrillo caravista el modelo de Johnson-Champoux-Allard, también presenta un comportamiento bastante aceptable en un rango de frecuencias amplio. Aunque la determinación más ajustada de las exponenciales, para esta clase de material en el modelo de Delany-Bazley también resultaría útil. En el caso del modelo JCA se puede indicar que el método analítico empleado no reporta los resultados con exactitud [42], y la utilización



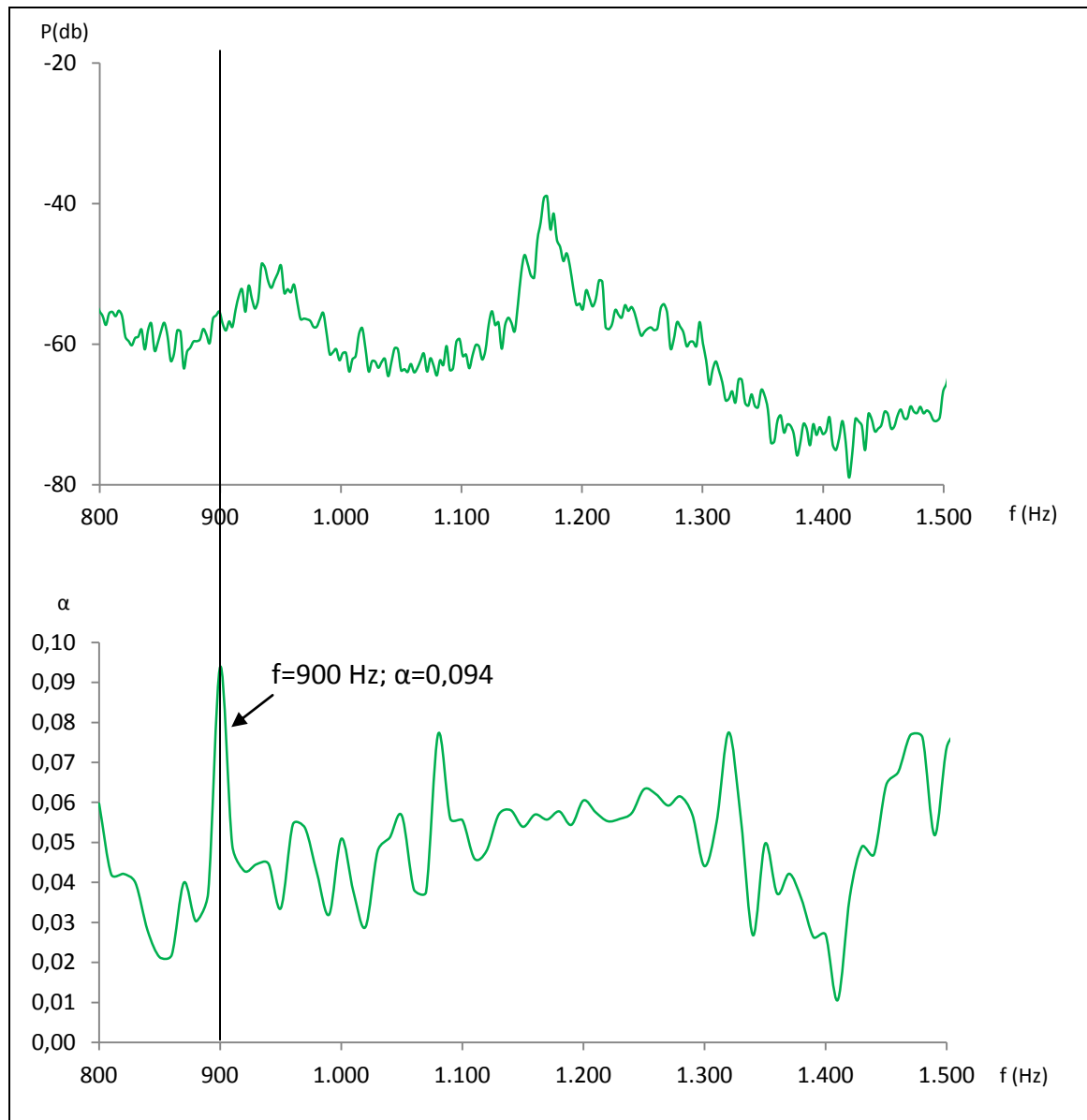
de los métodos evolutivo ó hibrido para el cálculo inverso sería adecuado. Hay que indicar que en el caso del ladrillo reciclado, se debe investigar en su porosidad cerrada.

18. Determinación de propiedades elásticas intrínsecas

Como ya se indico, las propiedades acústicas de los materiales son de origen termomecánico, luego la experimentación acústica se basa en la medida de propiedades tanto térmicas como mecánicas. De esta forma, también existe la posibilidad de obtener con las propiedades acústicas las propiedades intrínsecas, y concretamente las elásticas. Debido a que las perturbaciones que sufren los materiales cuando se propaga una onda sonora son reversibles. Para la determinación, es importante obtener el factor de perdidas corregido, ya que nos permite adaptar la energía captada en la resonancia a los valores experimentales. También es de importancia determinar la frecuencia y coeficiente de absorción de la resonancia, ya que este servirá para obtener las propiedades. Para determinar bien la resonancia, se realizara combinando dos procedimientos, por un lado se observara el espectro de absorción que es el que más datos aporta, y de forma auxiliar se compara con el espectro acústico, para ver las frecuencias que son más energéticas en el ensayo.



Ladrillo caravista



Gráfica. 33. Espectro de absorción (abajo) y espectro de presión sonora (arriba), del ladrillo caravista.

Para los datos de la resonancia de absorción, tenemos que el modelo de F. Chevillotte y R. Panneton, desprenden los siguientes resultados para el módulo de compresibilidad isotérmico de ladrillo caravista.



Ladrillo caravista L (Módulo de compresibilidad)	
$f(Hz)$	900
α	0,094
η_{opt}	0,0071
η_r	0,025
η_{opt}^b	0,0011
$K_b(GPa)$	16,39

Tabla. 23. Propiedades para la determinación del modulo de compresión del ladrillo caravista.

Con los datos de 3 muestras tomadas aleatoriamente de la serie de ladrillo caravista efectuamos también el cálculo del residuo, para obtener el coeficiente de Poisson. Las probetas seleccionadas son LC4.1, LC13.3, y LC21.4.

Datos empleados para la determinación del residuo		
	$f(Hz)$	$H(mm)$
Probeta L4.1	820	10,33
Probeta L13.3	910	9,08
Probeta L21.4	830	10,34

Tabla. 24. Datos para la determinación del residuo, que permite determinar el coeficiente de Poisson para el ladrillo caravista.

El residuo no converge para valores de 0 a 5 para el factor tabulado, luego no se puede determinar el coeficiente de Poisson para esta serie de muestras, puede ser debido a que el cuerpo resulta demasiado denso, ó las diferencias entre probetas son demasiado reducidas (Disponer de probetas de mayor espesor, y mayor diferencia entre las mismas puede ser la solución al problema). Por este motivo únicamente se puede determinar de forma experimental el módulo de compresibilidad isotérmico. Si buscamos para este material en datos bibliográficos [13, 15], su coeficiente de Poisson tenemos que esta entorno a 0,15 y 0,2. Por lo que el módulo de Young para este material, se estima que tiene un valor de 15 GPa. Según datos recopilados este valor



resulta aceptable para este tipo de material, siendo un valor medio-alto. Se puede indicar entonces que el cálculo del módulo de compresibilidad, es bastante aproximado.

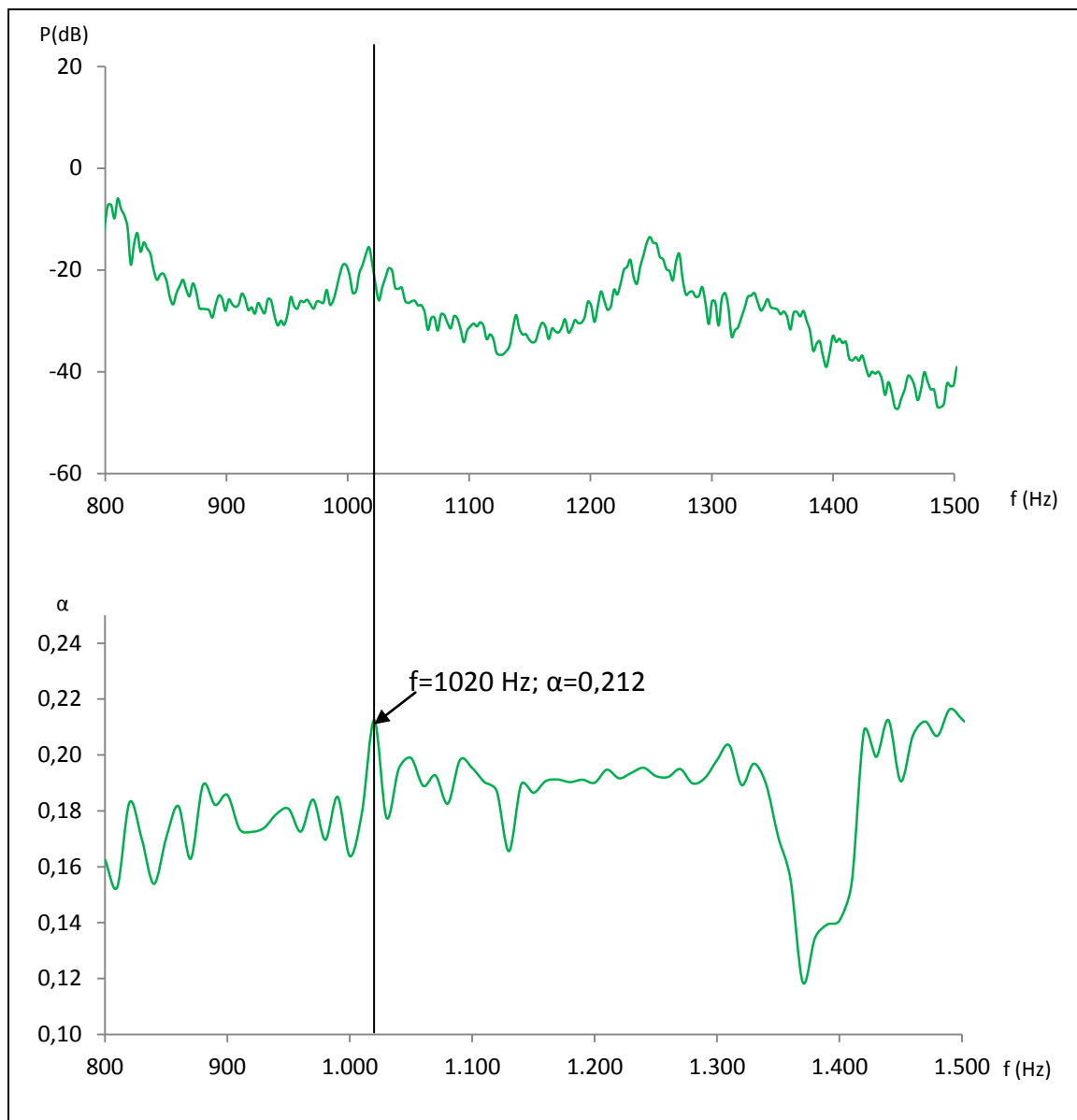
Si nos fijamos en los resultados obtenidos para el módulo de Weibull, la correlación de la regresión indica que los resultados son bastante dispersos, aunque la fiabilidad en los resultados es bastante buena, tenemos también que recordar que el material se comporta en dos líneas, la capa vitrificada como absorbente, y el resto de material sigue la ley de la masa, este puede ser el principal motivo de no poder obtener información adecuada de la dirección transversal de la probeta.

Hormigon reciclado

El espectro de absorción del hormigón se desarrolla en la región II de la curva idealizada, luego al desarrollarse en la zona viscoelástica será mucho más sencillo obtener sus propiedades. Los resultados obtenidos por este procedimiento, se compararán con los datos del proyecto original de estas probetas [30]. La ventaja que presenta el método empleado para este material, es que la estructura es suficientemente porosa para realizar las mediciones; y la unión entre poros es bastante amplia facilitando de esta manera la medición tanto del comportamiento longitudinal de las ondas, como el transversal.



Serie H1



Gráfica. 34. Espectro de absorción (abajo) y espectro de presión sonora (arriba), del hormigón reciclado H1.

Para los datos de la resonancia de absorción, tenemos que el modelo de F. Chevillotte y R. Panneton, desprenden los siguientes resultados para el módulo de compresibilidad isotérmico de la serie H1.



Hormigón reciclado H1 (Módulo de compresibilidad)	
$f(Hz)$	1020
α	0,212
η_{opt}	0,0118
η_r	0,059
η_{opt}^b	0,0033
$K_b(GPa)$	8,37

Tabla. 25. Propiedades para la determinación del modulo de compresión del ladrillo caravista.

Tomando 3 muestras de la serie H1 buscamos el residuo, para poder determinar el coeficiente de Poisson, las muestras tomadas son las siguientes H1-2, H1-11, y H1-18. Los espesores, y frecuencias a las que se desarrolla la resonancia de absorción en estas probetas quedan recogidos en la tabla 26.

Datos empleados para la determinación del residuo		
	$f(Hz)$	$H(mm)$
Probeta H1-2	840	10,02
Probeta H1-11	860	10,05
Probeta H1-18	1020	10,14

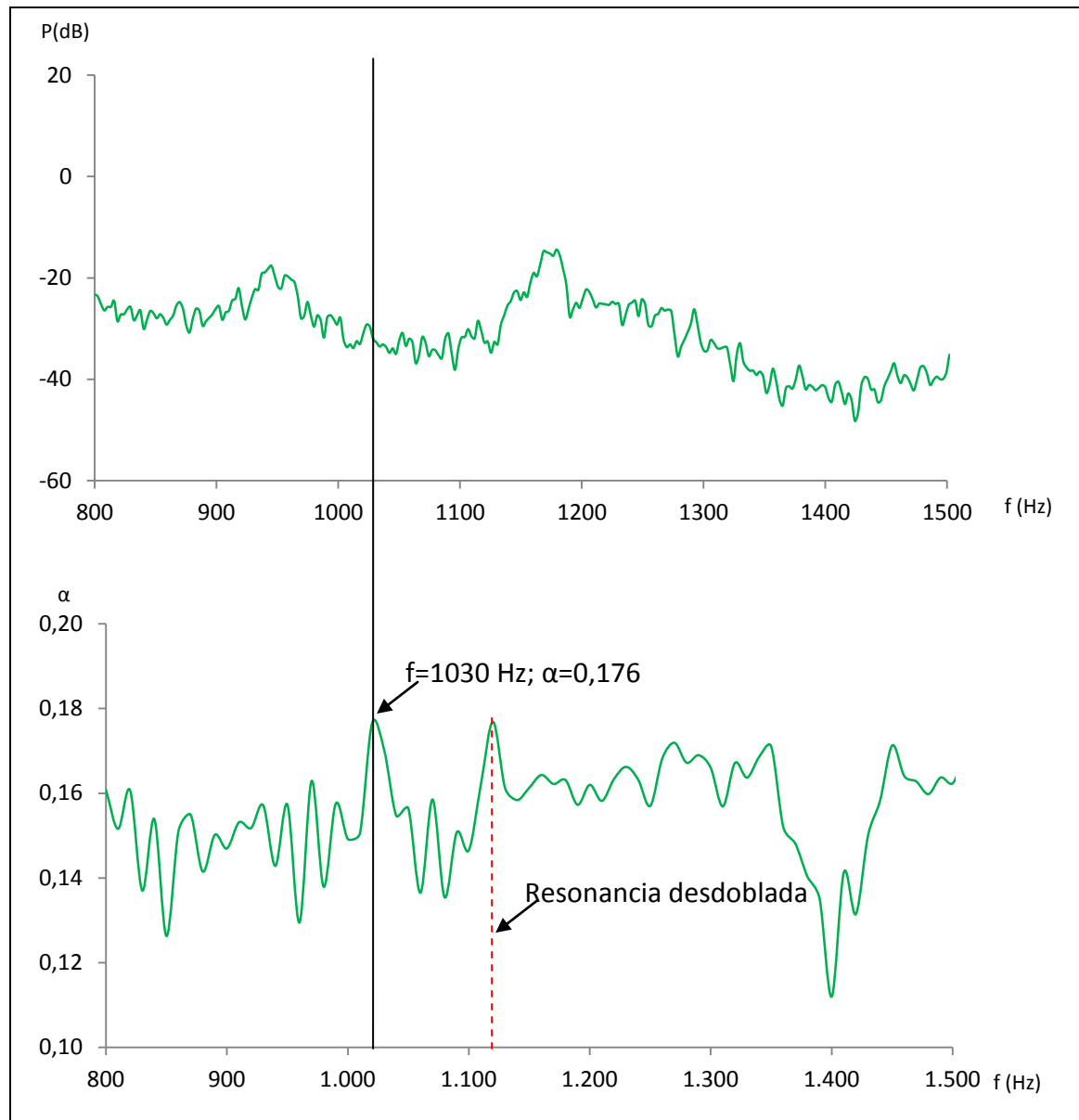
Tabla. 26. Datos para la determinación del residuo, que permite determinar el coeficiente de Poisson para el hormigón reciclado H1.

A partir de los datos el residuo converge y nos da un coeficiente $c_b = 1,9$. Interpolando, y considerando la relación de aspecto s , tenemos un coeficiente de Poisson de $\nu = 0,22$. Con el resultado obtenido podemos determinar el módulo de Young, y el módulo elástico transversal dando los siguientes valores respectivamente, $E = 7,33 GPa$, y $G = 3,02 GPa$. Las características que presenta el material son las adecuadas para la aplicación del método, sin embargo se puede mejorar la precisión si la diferencia entre tamaños de probeta fuera mayor, para que el residuo tenga una convergencia más rápida. Comparando el valor del módulo elástico longitudinal, con el



obtenido en el proyecto [30], los resultados son muy similares entre sí; por lo que el método acústico empleado con las condiciones dadas de material, resulta óptimo.

Serie H8



Gráfica. 35. Espectro de absorción (abajo) y espectro de presión sonora (arriba), del hormigón reciclado H8.



Con los datos obtenidos de la gráfica 35, se realiza el cálculo de los factores de pérdida; para determinar el módulo de compresibilidad isotérmico que presentan las probetas de la serie H8.

Hormigón reciclado H1 (Módulo de compresibilidad)	
$f(Hz)$	1030
α	0,176
η_{opt}	0,0112
η_r	0,048
η_{opt}^b	0,0027
$K_b(GPa)$	9,22

Tabla. 27. Propiedades para la determinación del modulo de compresión del hormigón reciclado H8.

Hay que destacar que se ha seleccionado la primera resonancia que se ha encontrado en el espectro de absorción, pero muy cercana a ella existe otra resonancia de características similares. La explicación para la aparición de esa segunda resonancia, se debe a que el espectro estudiado es un promedio para todas las muestras obtenidas. Sin embargo en esta serie, si observamos los datos de la regresión de Weibull, y los datos extraídos del proyecto [30]; vemos que existen dos tendencias en los datos del módulo elástico. De tal forma, el espectro lo que sufre es un desdoblamiento de los datos obtenidos, y por este motivo aparecen estas dos resonancias tan similares.

En cuanto al cálculo del coeficiente de Poisson, las probetas seleccionadas aleatoriamente para el cálculo del residuo son, H8-8, H8-14, y la H8-19. Estas probetas aportan los siguientes datos.

Datos empleados para la determinación del residuo		
	$f(Hz)$	$H(mm)$
Probeta H8-8	1030	10,01
Probeta H8-14	970	9,81
Probeta H8-19	1070	10,32



Tabla. 28. Datos para la determinación del residuo, que permite determinar el coeficiente de Poisson para el hormigón reciclado H8.

Considerando estos datos, se obtienen un coeficiente de $c_b = 1,7$, interpolando para los valores de la tabla, y considerando la relación de aspecto; tenemos que el coeficiente de Poisson es $\nu = 0,21$. Con este valor se obtienen los siguientes resultados para el módulo de Young $E = 8,19 \text{ GPa}$, y el módulo elástico transversal $G = 3,38 \text{ GPa}$. Los resultados obtenidos son mayores que los de la serie H1, el motivo es las características del polvo de partida, que consigue un mayor apilamiento y como se ha visto la porosidad es menor. Esto conlleva que aumente ligeramente la rigidez del material, y por lo tanto el módulo elástico longitudinal. Los resultados obtenidos, se han comparado con los resultados promediados del proyecto [30]. Dando comparativamente unos valores muy similares a los obtenidos para el módulo elástico longitudinal. De esta forma se puede indicar, que el procedimiento utilizado para la medida de propiedades elásticas; resulta satisfactorio para materiales con cierta porosidad, y homogeneidad de la muestra.

De todo lo expuesto en estos resultados, y discusión, podemos concretar:

Los materiales reciclados de este trabajo, con respecto los materiales convencionales de los que proceden los residuos para fabricarlos, tienen una respuesta aceptable para las propiedades de absorción acústica. Sin embargo esta serie de materiales ha sido diseñada para dar respuesta a propiedades mecánicas, por lo que un diseño centrado en aumentar el coeficiente de absorción daría en el caso del hormigón reciclado una mejor respuesta, ya que actualmente está bastante caracterizado, y se tiene el conocimiento suficiente como para manipular los parámetros enfocados a esta mejora. En lo que respecta al ladrillo reciclado, no podemos afirmar lo mismo, debido a que todavía no conocemos con total seguridad a qué modelo responde, y por lo tanto no se conocen los parámetros manipulables. Aunque también hay que indicar que este material en el estado actual, se puede emplear con un cierto grado de éxito en el acondicionamiento acústico de aquellas frecuencias donde desarrolla su absorción, y unido a esto se tiene constancia de que las propiedades mecánicas



también son aptas. En lo respectivo a la comparación con los materiales convencionales también se ha obtenido información de interés. La presencia de impurezas e inclusiones de gran tamaño, es determinante para que el comportamiento acústico de absorción se arruine; y esto en los materiales reciclados por sus características de procesado no se produce. Esta situación es de gran importancia ya que evita la dispersión en las propiedades acústicas, y es la mayor ventaja de estos materiales. Finalmente indicar que la aplicación de métodos para la determinación elástica mediante el tubo de impedancia, está actualmente muy limitada. Debido a que solo en condiciones muy particulares el método se puede utilizar, y la determinación del coeficiente de Poisson no desprende resultados aceptables.



19. TABLA RESUMEN

	MATERIALES CONVENCIONALES			MATERIALES RECICLADOS		
	Hormigón	Probetas LN	Probetas LC	Probetas H1	Probetas H8	Probetas L9
Tipo de material acústico	(1)	(1)	(2)	(3)	(3)	(4)
Comportamiento acústico	Reflexión	Reflexión	Mixto	Absorción	Absorción	Mixto
Densidad ρ (g/cm^3)	2,20*	1,99	1,98	1,05	1,10	1,83
Propiedades acústicas						
Coefficiente de absorción α	0,01	0,08	0,13	0,23	0,18	0,21 (0,50**)
Impedancia acústica específica Z ($Pa \cdot s/m$)	X	7,65E3-j4,03E3	9,04E3-j4,47E3	6,35E3-j3,01E3	9,24E3-j4,72E3	6,32E3-j2,99E3
Reducción de emisión sonora R_w (dB/cm)	3,2	2,9	3,5	0,11	0,08	X
Frecuencia crítica acústica f_c (Hz)	1800	3800	4000	Fuera de espectro	Fuera de espectro	5000
Estadística de la fiabilidad de propiedades						
Módulo de Weibull β	X	2,17	7,31	5,27	6,10	8,50
Correlación r	X	0,951	0,968	0,978	0,988	0,973
Propiedades de diseño						
Resistencia al flujo estático de aire σ ($N \cdot s/m^4$)	X	X	6,40E6	2,68E6	4,00E6	7,53E6***
Tortuosidad α_∞	X	X	1,087	1,332	1,168	X
Porosidad ϕ	X	X	0,121	0,296	0,262	X
Longitud característica viscosa Λ (μm)	X	X	14,0	24,4	19,9	X
Longitud característica térmica Λ' (μm)	X	X	27,9	48,8	39,8	X
Propiedades intrínsecas						
Resonancia de absorción f_a (Hz)	X	X	900	1020	1030	X
Factor de pérdidas óptimo η_{opt}	X	X	0,0071	0,0118	0,0112	X
Factor de pérdidas corregido η_{opt}^b	X	X	0,0011	0,0033	0,0027	X
Módulo compresibilidad isotérmico K_b (GPa)	X	X	16,39	8,37	9,22	X
Coefficiente de Poisson ν	X	X	0,20****	0,22	0,21	X
Módulo elástico longitudinal E (GPa)	X	X	15,00	7,33	8,19	X
Módulo elástico transversal G (GPa)	X	X	6,25	3,02	3,38	X

Notas:

(1) Material rígido, (2) Material rígido; y capa vitrificada porosa abierta y rígida, (3) Material poroso rígido, apilamiento esférico, (4) Material densificado, porosidad cerrada.

* Según datos bibliográficos.

** Valor del coeficiente de absorción para 2500 Hz.

*** Valor obtenido para el modelo de Delany-Bazley (Aunque no cumple los límites).

**** Según datos bibliográficos.

Aquellos apartados marcados con X son por falta de disponibilidad de datos, o imposibilidad de ensayo y empleo de métodos.



V. CONCLUSIONES



Podemos indicar de los materiales que han sido objeto de estudio que:

Los materiales reciclados tienen una baja dispersión de propiedades acústicas, factor de gran utilidad para poder manipular dichas propiedades. Sabiendo además que están muy vinculadas al proceso de adecuación del polvo, y posterior sinterizado.

El hormigón reciclado aunque presenta una absorción acústica media/baja, es un material que desde el punto de vista técnico es interesante porque se comporta de forma prácticamente constante en el rango audible estudiado.

El modelo de Johnson-Champoux-Allard muestra que el hormigón reciclado bajo estudio, todavía no alcanza los límites de mejora del material. De esto se concluye que este material puede ser susceptible a mejorar sus propiedades acústicas con facilidad.

El ladrillo reciclado presenta unas características muy óptimas en un rango limitado de frecuencias. Sin embargo aunque está caracterizado, no se ha determinado con exactitud a qué tipo de material y modelo responde. Por lo que esta vía queda abierta a posteriores trabajos.

Respecto a la determinación de propiedades elásticas en materiales porosos, son métodos que actualmente les falta madurez. Debido a que están muy limitados a los modelos poroelásticos de origen, y por ende son pocos los materiales que pueden estudiarse. Siendo la determinación del coeficiente de Poisson la parte más crítica.

Finalmente indicar que el ladrillo reciclado de grado 9, no presenta unas buenas propiedades mecánicas, pero sus propiedades acústicas son buenas. Siendo un material con utilidad para estudiar la porosidad cerrada.



VI. ANEXO



Ladrillo convencional serie LN

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	LN1.1	LN2.1	LN3.1	LN4.1	LN5.1
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,03	0,06	0,00	0,07	0,02
1000,00	0,05	0,04	0,00	0,10	0,07
1250,00	0,06	0,10	0,09	0,05	0,06
1600,00	0,07	0,15	0,16	0,10	0,09
2000,00	0,11	0,17	0,26	0,16	0,15
2500,00	0,12	0,17	0,20	0,24	0,17
3150,00	0,12	0,17	0,12	0,16	0,12
4000,00	0,00	0,00	0,12	0,14	0,12
5000,00	0,12	0,13	0,11	0,12	0,13
6300,00	0,14	0,15	0,03	0,06	0,19

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	LN6.1	LN7.1	LN8.1	LN9.1	LN10.1
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,11
1000,00	0,10	0,16	0,01	0,00	0,00
1250,00	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06
1600,00	0,08	0,06	0,11	0,06	0,09
2000,00	0,09	0,08	0,12	0,07	0,16
2500,00	0,09	0,09	0,17	0,11	0,21
3150,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,14
4000,00	0,00	0,00	0,14	0,15	0,00
5000,00	0,13	0,12	0,15	0,15	0,09
6300,00	0,14	0,21	0,15	0,13	0,25



Ladrillo caravista serie LC

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	L1.1	L2.1	L3.1	L4.1	L5.1
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,08	0,03	0,00	0,03	0,07
1000,00	0,11	0,05	0,00	0,00	0,17
1250,00	0,07	0,04	0,05	0,11	0,06
1600,00	0,07	0,07	0,06	0,15	0,06
2000,00	0,12	0,10	0,10	0,19	0,10
2500,00	0,21	0,19	0,19	0,15	0,15
3150,00	0,27	0,28	0,49	0,12	0,22
4000,00	0,18	0,20	0,31	0,11	0,21
5000,00	0,15	0,17	0,15	0,17	0,14
6300,00	0,11	0,29	0,18	0,34	0,10

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	L6.1	L7.2	L8.2	L9.2	L10.2
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,04	0,10	0,07	0,03	0,04
1000,00	0,00	0,11	0,03	0,03	0,03
1250,00	0,06	0,18	0,02	0,05	0,06
1600,00	0,10	0,14	0,06	0,06	0,09
2000,00	0,14	0,22	0,08	0,08	0,15
2500,00	0,19	0,17	0,10	0,12	0,21
3150,00	0,15	0,13	0,18	0,21	0,18
4000,00	0,12	0,00	0,27	0,24	0,12
5000,00	0,15	0,10	0,29	0,27	0,14
6300,00	0,16	0,11	0,27	0,35	0,18



Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	L11.2	L12.2	L13.3	L14.3	L15.3
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,07	0,08	0,12	0,04	0,13
1000,00	0,08	0,05	0,07	0,10	0,05
1250,00	0,09	0,06	0,06	0,06	0,06
1600,00	0,10	0,09	0,05	0,10	0,08
2000,00	0,11	0,12	0,07	0,19	0,07
2500,00	0,10	0,16	0,09	0,26	0,07
3150,00	0,00	0,19	0,12	0,17	0,00
4000,00	0,00	0,13	0,24	0,12	0,00
5000,00	0,10	0,12	0,37	0,12	0,06
6300,00	0,11	0,12	0,25	0,14	0,11

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	L16.3	L17.3	L18.3	L19.4	L20.4
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,11	0,15	0,02	0,05	0,01
1000,00	0,03	0,04	0,08	0,04	0,04
1250,00	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
1600,00	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06
2000,00	0,08	0,04	0,06	0,09	0,09
2500,00	0,10	0,05	0,07	0,15	0,14
3150,00	0,12	0,00	0,00	0,41	0,32
4000,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,40
5000,00	0,12	0,07	0,10	0,13	0,19
6300,00	0,17	0,09	0,13	0,06	0,00



Coeficiente de absorción (tercios de octava)				
	L21.4	L22.4	L23.4	L24.4
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,08	0,10	0,00	0,00
1000,00	0,13	0,04	0,09	0,04
1250,00	0,08	0,06	0,06	0,06
1600,00	0,08	0,06	0,07	0,08
2000,00	0,10	0,08	0,10	0,11
2500,00	0,14	0,13	0,13	0,16
3150,00	0,22	0,25	0,21	0,31
4000,00	0,23	0,45	0,23	0,25
5000,00	0,12	0,18	0,21	0,15
6300,00	0,13	0,17	0,25	0,06



Hormigón reciclado serie H1

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	H1_1	H1_2	H1_5	H1_6	H1_8
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,16	0,18	0,10	0,18	0,22
1000,00	0,22	0,19	0,07	0,17	0,27
1250,00	0,27	0,22	0,13	0,13	0,30
1600,00	0,27	0,23	0,13	0,12	0,30
2000,00	0,28	0,25	0,13	0,15	0,28
2500,00	0,25	0,27	0,14	0,16	0,29
3150,00	0,24	0,27	0,15	0,17	0,30
4000,00	0,24	0,25	0,16	0,18	0,31
5000,00	0,25	0,23	0,17	0,19	0,31
6300,00	0,27	0,23	0,21	0,19	0,32

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	H1_9	H1_10	H1_11	H1_13	H1_14
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,18	0,22	0,23	0,13	0,13
1000,00	0,10	0,20	0,27	0,14	0,15
1250,00	0,18	0,24	0,24	0,14	0,19
1600,00	0,19	0,30	0,23	0,16	0,21
2000,00	0,20	0,33	0,24	0,16	0,21
2500,00	0,20	0,30	0,30	0,17	0,23
3150,00	0,19	0,30	0,25	0,19	0,25
4000,00	0,20	0,30	0,27	0,18	0,26
5000,00	0,20	0,31	0,28	0,19	0,27
6300,00	0,21	0,32	0,29	0,22	0,30



Coeficiente de absorción (tercios de octava)				
	H1_15	H1_16	H1_18	H1_20
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,13	0,15	0,12	0,16
1000,00	0,10	0,11	0,09	0,22
1250,00	0,13	0,16	0,15	0,21
1600,00	0,15	0,15	0,15	0,25
2000,00	0,14	0,19	0,19	0,27
2500,00	0,15	0,21	0,20	0,27
3150,00	0,16	0,23	0,21	0,26
4000,00	0,16	0,25	0,23	0,27
5000,00	0,15	0,22	0,24	0,29
6300,00	0,13	0,20	0,27	0,31



Hormigón reciclado serie H8

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	H8_6	H8_7	H8_8	H8_9	H8_10
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,12	0,14	0,15	0,16	0,16
1000,00	0,09	0,19	0,15	0,14	0,07
1250,00	0,14	0,12	0,14	0,19	0,11
1600,00	0,14	0,19	0,14	0,19	0,11
2000,00	0,13	0,16	0,15	0,21	0,13
2500,00	0,15	0,20	0,16	0,21	0,13
3150,00	0,17	0,20	0,18	0,18	0,13
4000,00	0,17	0,21	0,17	0,24	0,13
5000,00	0,16	0,21	0,18	0,27	0,14
6300,00	0,15	0,25	0,19	0,32	0,19

Coeficiente de absorción (tercios de octava)					
	H8_14	H8_15	H8_16	H8_17	H8_19
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,18	0,10	0,22	0,13	0,24
1000,00	0,13	0,09	0,26	0,19	0,18
1250,00	0,16	0,11	0,27	0,14	0,18
1600,00	0,17	0,13	0,24	0,18	0,18
2000,00	0,15	0,10	0,24	0,19	0,20
2500,00	0,17	0,13	0,23	0,19	0,19
3150,00	0,18	0,13	0,24	0,20	0,20
4000,00	0,18	0,13	0,22	0,20	0,18
5000,00	0,16	0,15	0,22	0,20	0,18
6300,00	0,15	0,21	0,22	0,25	0,19



Ladrillo reciclado serie L9

Coeficiente de absorción (tercios de octava)				
	L9_1	L9_2	L9_3	L9_4
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,04	0,07	0,06	0,08
1000,00	0,03	0,05	0,17	0,08
1250,00	0,07	0,11	0,12	0,10
1600,00	0,14	0,17	0,16	0,18
2000,00	0,25	0,37	0,27	0,35
2500,00	0,65	0,78	0,51	0,77
3150,00	0,47	0,33	0,43	0,37
4000,00	0,19	0,00	0,18	0,15
5000,00	0,13	0,00	0,13	0,11
6300,00	0,16	0,14	0,12	0,16

Coeficiente de absorción (tercios de octava)				
	L9_5	L9_6	L9_7	L9_8
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,18	0,00	0,08	0,06
1000,00	0,17	0,03	0,03	0,04
1250,00	0,21	0,06	0,07	0,07
1600,00	0,27	0,07	0,09	0,14
2000,00	0,33	0,13	0,13	0,24
2500,00	0,29	0,16	0,24	0,61
3150,00	0,21	0,40	0,80	0,47
4000,00	0,16	0,54	0,45	0,18
5000,00	0,14	0,37	0,14	0,18
6300,00	0,12	0,09	0,11	0,38



Coeficiente de absorción (tercios de octava)				
	L9_9	L9_10	L9_11	L9_12
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,12	0,08	0,04	0,01
1000,00	0,04	0,05	0,06	0,01
1250,00	0,08	0,11	0,11	0,06
1600,00	0,07	0,17	0,14	0,08
2000,00	0,12	0,31	0,24	0,10
2500,00	0,17	0,53	0,51	0,17
3150,00	0,35	0,35	0,47	0,49
4000,00	0,70	0,17	0,19	0,51
5000,00	0,31	0,14	0,12	0,16
6300,00	0,04	0,18	0,13	0,00

Coeficiente de absorción (tercios de octava)				
	L9_13	L9_14	L9_15	L9_16
f (Hz)	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$	$\alpha(f)$
800,00	0,12	0,09	0,06	0,08
1000,00	0,03	0,05	0,02	0,06
1250,00	0,11	0,11	0,09	0,12
1600,00	0,15	0,17	0,13	0,19
2000,00	0,34	0,34	0,24	0,37
2500,00	0,77	0,74	0,57	0,65
3150,00	0,35	0,48	0,53	0,29
4000,00	0,15	0,19	0,21	0,00
5000,00	0,11	0,13	0,10	0,11
6300,00	0,10	0,10	0,12	0,16



VII. REFERENCIAS



20. Bibliografía

- [1] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, Fundamentals of acoustics, Ed. John Wiley & Sons, (2000, 4ª edición), Cap. 5, 6, 8, 10, 12.
- [2] H.J. Pain, The physics of vibrations and waves, Ed. John Wiley & Sons, (2005, 6ª edición), Cap. 1, 2, 3.
- [3] A.P.French, Vibrations and waves, Ed. The MIT introductory physics series , (1971, 9ª edición), Cap. 4, 6, 7.
- [4] Karl F. Graff, Wave motion in elastic solids, Ed. Dover Publications, (1975, 6ª edición), Cap. 2, 3, 5.
- [5] P. Filippi, D. Habault, JP. Lefebvre, A. Bergassoli, Acoustics basic Physics, theory and methods, Ed. Academic Press, (1999, 2ª edición), Cap. 2.
- [6] Licencia creative commons, Acoustics The science of sound, Ed. Wikibooks, (2006, 1ª edición), Cap. 1.
- [7] F. Alton Everest, Ken C. Pohlmann, Master Handbook of acoustics, Ed. Mc Graw Hill, (2009, 50ª edición), Cap. 1, 2, 5, 6, 7, 8, 12, 13.
- [8] Thomas D. Rossing, Handbook of acoustics, Ed. Springer, (2007, 5ª edición), Cap. 3, 9, 11.
- [9] Manuel Recuero, Ingeniería acústica, Ed. Paraninfo, (1995, 1ª edición). Cap. 5, 15.
- [10] Michel Möser, Engineering acoustics: An introduction to noise control, Ed. Springer, (2009, 2ª edición). Cap. 5, 6, 7, 8.
- [11] Frank Fahy, Foundations of engineering acoustics, Ed. Academic Press, (2005, 3ª edición). Cap. 4, 7.



- [12] Licencia creative commons, Engineering acoustics, Ed. Wikibooks, (2006, 1ª edición), Cap. 3.
- [13] Manuel Recuero, Acústica arquitectónica, Ed. Paraninfo, (2000, 2ª edición), Cap. 1, 2.
- [14] Marshall Long, Architectural acoustics, Ed. Academic Press, (2006, 8ª edición), Cap. 7.
- [15] Tor Erik Vigran, Building acoustics, Ed. Taylor & Francis, (2008, 2ª edición), Cap. 3, 5.
- [16] Federico Miyara, Control de ruido, Ed. UNR, (1999), Cap. 7.
- [17] Randall F. Barron, Industrial noise control and acoustics, Ed. Marcel Dekker (2003, 4ª edición), Cap. 4.
- [18] C.M. Harris, Manual de medidas y control del ruido, Ed. Mc Graw Hill, (1998), Cap. 2, 3, 4.
- [19] Mark Kahrs, Karlheinz Brandenburg, Applications of digital signal processing to audio and acoustics, Ed. Kluwer academic publishers, (2002, 3ª edición), Cap. 9.
- [20] Trevor J. Cox, Peter D' Antonio, Acoustic absorbers and diffusers, Ed. Taylor & Francis, (2009, 2ª edición), Cap. 1, 3, 5, 6, 7, 12.
- [21] U. Ingard, Notes on sound absorption technology, Ed. Noise control foundation, (1994, 3ª edición), Cap. 3, 4.
- [22] Marina Camarasa Rius, Contribución a la teoría de Biot sobre propagación de ondas acústicas en sedimentos saturados en una mezcla de fluidos: Teoría generalizada de Biot, Ed. Instituto acústica CSIC, (1992), Cap. 1.
- [23] Emmanuel Detournay, Alexander H. D. Cheng, Fundamentals of Poroelasticity, Ed. Pergamon Press, (1993), Cap. 4, Apendice A.



- [24] Ernesto Juliá Sanchis, Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para uso en acústica arquitectónica, Ed. Universidad politécnica de Valencia, (2008), Cap. 3, 4.
- [25] María Isabel Torres Picazo, Modelado acústico de silenciadores con material absorbente, Ed. Universidad politécnica de Valencia, (2006), Cap. 3.
- [26] Julián Rodríguez Montes, Lucas Castro Martínez, Juan Carlos del Real Romero, Procesos industriales para materiales no metálicos, Ed. VisionNET, (2006, 2ª edición), Cap. 3.
- [27] Juan Morales Güeto, Tecnología de los materiales cerámicos, Ed. Diaz de Santos, (2005, 2ª edición), Cap. 2, 4, 5, 6.
- [28] R. A. Terpstra, P. P. A. C. Pex, A. H. De Vries, Ceramic Processing, Ed. Chapman & Hall, (1995, 1ª edición), Cap. 3, 4, 5.
- [29] Xavier Elías Castells, Reciclaje de residuos industriales, Ed. Díaz de Santos, (2000, 4ª edición), Cap. 2, 3.
- [30] Rubén Blanco González, Comportamiento frente a compresión de materiales cerámicos, fabricados mediante moldeo a partir de residuos de construcción, PFC Escuela politécnica superior de Zamora, (2011), Cap. 4, 5.
- [31] EN ISO 10534-2, Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia, (Primera edición 1998, Junio 2001).
- [32] EN ISO 266, Acústica. Frecuencias normales, (Primera edición 1975, Octubre 1997).
- [33] ASTM E1875-00, Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by sonic resonance, (Primera edición 1958, 2000).



- [34] ASTM E1876-07, Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration, (Primera edición 1974, 2007).
- [35] ASTM C1198-96 Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by sonic resonance, (Primera edición 1968, 1996)
- [36] RD 105/2008 legislación vigente para la regulación de los residuos procedentes de la construcción, (2008).
- [37] UNE 67019:1996 Cerámica. Control de calidad de fabricación de elementos cerámicos de tierra cocida para la construcción, (Primera edición 1978, 1996).
- [38] Jaime Andrés Castañeda, Héctor Álvaro González, Medición del coeficiente de absorción del sonido, Rev. Scientia Et Technica, Vol. 10, (2004), Pags. 101-106.
- [39] Pedro Muñoz Díaz, Determinación de la absorción e impedancia acústica del corcho: Método del tubo de impedancia, Rev. AITIM, (1989).
- [40] Hideo Utsuno, Toshimitsu Tanaka, Takeshi Fujikawa, Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials, Mechanical engineering research laboratories of Japan, Vol. 2, (1989).
- [41] Francisco José Jiménez-Espadafor, José A. Becerra Villanueva, Miguel Torres García, Elisa Carvajal Trujillo, Antonio Muñoz Blanco, Optimal design of acoustic material from tire fluff, Rev. Materials and Design, Vol. 32, (2011), Pags. 3608-3616.
- [42] J. A. González Ganso, C. García Serrada, M. A. Morcillo López, M^a J. Hernández Echegaray, Propiedades acústicas intrínsecas de los asfaltos porosos: Porosidad, tortuosidad y resistividad al flujo estático de aire. Diseño optimo de un asfalto, Rev. Acústica, Vol. 20, (2008).
- [43] José Andrés González Ganso, Beatriz Cesteros Morante, Roberto Cordero Izquierdo, Caracterización de propiedades intrínsecas acústicas de materiales porosos mediante métodos indirectos, Rev. TecniAcustica, (2006).



- [44] Dásil Fernández, Pablo Luque, Jaime Pfretzschner, Francisco Simón, Calculo inverso de la resistividad al flujo de aire de lanas minerales, Rev. TecniAcustica, (2005).
- [45] Francesco Pompoli, Paolo Bonfiglio, Tecniche avanzate di caratterizzazione fisicoacustica di materiali porosi, Rev. Associazione Italiana di acústica, (2008).
- [46] Youssef Atalla, Raymond Panneton, Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements, Rev. Canadian acoustics, Vol.33, (2005).
- [47] Paolo Bonfiglio, Francesco Pompoli, Comparison of different inversion techniques for determining physical parameters of porous media, Rev. ICA, (2007).
- [48] P. Shrivage, P. Bonfiglio, F. Pompoli, Hybrid inversion technique for predicting geometrical parameters of porous materials, Rev. Acoustics, (2008).
- [49] X. Olny, R. Panneton, J. Tran Van, Experimental determination of the acoustical parameters of rigid and limp materials using direct measurements and analytical solutions, Rev. Canadian acoustics, Vol. 43, (2007).
- [50] Chao.Nan Wang, Jiunn-Hwan Torng, Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials, Rev. Applied acoustics, Vol. 62, (2001).
- [51] F. Chevillotte, R. Panneton, Elastic characterization of closed cell foams from impedance tube absorption tests, Rev. Acoustical society of America, Vol. 122, (2007).
- [52] N.Antón, F. Velasco, E.Gordo, J.M. Torralba, Statistical approach to mechanical behavior of ceramic matrix composites based on Portland clinker, Rev. Ceramics International, Vol. 27, 391-399, (2001).
- [53] J. Hernández, N. Antón, J. Escuadra, M. L. Pérez-Delgado, Estudio estadístico sobre las operaciones de acondicionamiento en procesos de reciclado de las virutas de aluminio por vía metalúrgica, Congreso Nacional de Pulvimetalurgia Sevilla, (2012).



- [54] N. Antón, R. Blanco, A. A. García, J. Escuadra, M. L. Pérez-Delgado, Comportamiento a compresión y fiabilidad de materiales procedentes de residuos de ladrillo fabricados mediante método STARCH, Congreso Nacional de Pulvimetalurgia Sevilla, (2012).
- [55] Rosa María Rodríguez Montejano, Reciclado de neumáticos usados para su utilización como materiales acústicos, Rev. Instituto de Acústica-CSIC, Vol 71, (1998).
- [56] R. del Rey, J. Alba, J. Ramis, V. J. Sanchís, Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico, Rev. Materiales de construcción, Vol. 61, (2010).
- [57] María Blanes Company, Begoña Francés Gisbert, Textiles para aislamiento y acondicionamiento acústico, Rev. CaatValencia, (Enero 2008).
- [58] Carlos Martínez Bertrand, Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización, Congreso nacional del medio ambiente (España), (2009).
- [59] J. Rincón López, M. Romero Pérez, Materiales cerámicos en sistemas constructivos de la edificación, Instituto CC Construcción E. Torroja,CSIC, (2006).
- [60] Fred F. Lunge, Powder processing science and technology for increased reliability, Rev. Journal of the American ceramic society, Vol. 72, (1989).
- [61] R. Moreno, Tendencias en el conformado de suspensiones cerámicas, Rev. Boletín de la sociedad Española de cerámica y vidrio, Vol.39, (2000).
- [62] Emilio Galán, Patricia Aparicio, Materias primas para la industria cerámica, Universidad de Sevilla.
- [63] Marcado CE para piezas de arcilla cocida HD (Ladrillo cerámico caravista), Ref. 771018, (2007).
- [64] Alava Ingenieros, ACUPRO Sistema de medida de propiedades acústicas de materiales. Spectronics Inc.



- [65] José Andrés González Ganso, Caracterización, simulación, y experimentación de materiales vibroacústicos: absorción y aislamiento, Cidaut, (2004).
- [66] David Casadevall i Planas, Acústica, AcusticaWeb,
<http://acusticaweb.com/blog/teoria-acustica.html>
- [67] David Casadevall i Planas, Impedancia acústica, AcusticaWeb,
<http://acusticaweb.com/blog/teoria-acustica.html>
- [68] David Casadevall i Planas, Generación de ruido, AcusticaWeb,
<http://acusticaweb.com/blog/teoria-acustica.html>
- [69] José Damián Mellado Ramírez, Marcos Vera Coello, Introducción a los conceptos fundamentales de la acústica, Universidad Carlos III de Madrid, (2005).
- [70] Luc Jaouen, Acoustical porous material recipes, Matelsys,
<http://apmr.matelsys.com/>
- [71] Elba M. Sepúlveda, Introducción a las ondas, (2005).
- [72] Ficha técnica DSC150, Ingeniería y control del ruido Luzea, (2010).
- [73] Guia rápida ISOVER de aislamiento acústico PYL, ISOVER, (2009).
- [74] Francisco Blanco Álvarez, Sinterización en estado sólido, Universidad de Oviedo, (2007).
- [75] Gestión de los residuos de construcción y demolición (RCDs), Gobierno de Cantabria, consejería de medio ambiente, (2010).
- [76] Alejandro Boada Ortiz, El reciclaje una herramienta no un concepto, Universidad del externado de Colombia, (2003).
- [77] Suministro de maquinaria para procesado cerámico, Maquitech Andina S.A.
- [78] Instalaciones de fabrica de procesado cerámico, RefraTechnik.
- [79] Productos cerámicos convencionales, Cerámica La Oliva.



- [80] Características de los materiales porosos Taisei, Taisei Kogyo co., ltd.
- [81] Taller de cerámica, José Luis Torres, Ricardo Escobedo.
- [82] P. Romano, F.J. Velasco, J.M. Torralba, N. Candela, Processing of M2 powder metallurgy high-speed steel by means of starch consolidation, Rev. Materials Science and Engineering: A, Vol. 419, Pags 1-7, (2006).
- [83] N. Antón, J. Escuadra, M.L. Pérez-Delgado, Sinterabilidad de residuos cerámicos procedentes de la construcción: estudio previo, Actas del II Congreso Nacional de Pulvimetalurgia, pags. 123-131, Leganés (Madrid), (2006).
- [84] M^a Victoria Gonçalves Crespo, Estudio de fiabilidad sobre piezas procedentes de residuos de construcción, Escuela politécnica superior de Zamora, Universidad de Salamanca, (2010).



21. Índice de figuras

Figura. 1.	Relación entre el coeficiente de absorción normal (abscisas), y el coeficiente de absorción en campo difuso (ordenadas) [8].	15
Figura. 2.	Mecanismos de interacción de las ondas con el medio[66].	16
Figura. 3.	Espectro que manifiesta la generación de ruido blanco en un intervalo determinado de frecuencias.	19
Figura. 4.	Clasificación esquemática más extendida de los materiales acústicos empleados en la ingeniería.	27
Figura. 5.	Representación esquemática del flujo seguido por un material, desde la extracción de la materia prima [76].	44
Figura. 6.	Opciones de valorización seguidas por el RD 105/2008, para la gestión de residuos de la construcción [75].	50
Figura. 7.	Moldeo en barbotina, fase de vertido de la pasta [81].	55
Figura. 8.	Extrusora de vacío para ladrillos convencionales [77].	56
Figura. 9.	Cambio en la forma y tamaño de los poros durante la sinterización, originado por los procesos de difusión atómica en los cuellos [74].	57
Figura. 10.	En la parte izquierda contacto inicial para comenzar a formar los cuellos, en la parte superior derecha crecimiento de límites de grano y cierre de la porosidad; en la parte inferior redondeo de porosidad y densificación [74].	58
Figura. 11.	Curvas de sinterabilidad de arcillas con distintas proporciones de materia orgánica. [28].	59
Figura. 12.	Mecanismo de consolidación de la pieza en verde mediante almidón [82].	63
Figura. 13.	Aluminio poroso, estructura de celda abierta en el punto límite de formación de redícula [80].	72
Figura. 14.	Conjunto de materiales metálicos obtenidos mediante pulvimetalurgia, que muestran distintos tipos de poros [80].	73
Figura. 15.	Ejemplo de linealización de la distribución de Weibull [52].	84
Figura. 16.	Tipos de cerámica convencional, de izquierda a derecha ladrillo convencional de tabiquería, ladrillo caravista de paramentos exteriores, y bovedilla de forjado [79].	88
Figura. 17.	Línea de producción de ladrillos, proceso de entrada en horno continuo [78].	90



Figura. 18.	Pulidora Struers LaboPol-1, empleada para obtener el grado superficial deseado en las muestras.	92
Figura. 19.	Conjunto de muestras de ladrillo caravista (LC), en el momento en que se efectuaba el corte. Se observa la lámina empleada para evitar las vibraciones.	93
Figura. 20.	Cantos empleados para extraer las muestras de ladrillo caravista (LC).	93
Figura. 21.	Inventario de probetas ensayadas a compresión, empleado para obtener muestras para ensayos acústicos.	96
Figura. 22.	Proceso de secado. Las piezas son retiradas de las bases para facilitar la pérdida de humedad.	99
Figura. 23.	Piezas extraídas de los moldes. Estado de las probetas en verde.	99
Figura. 24.	Conjunto de muestras en verde en el momento que se introducen en el horno de mufla.	101
Figura. 25.	Conjunto de muestras de la serie H1.	102
Figura. 26.	Conjunto de muestras de la serie H8.	102
Figura. 27.	Conjunto de muestras de la serie L9.	103
Figura. 28.	Conjunto de muestras de la serie LC (Ladrillo caravista).	104
Figura. 29.	Conjunto de muestras de la serie LN (Ladrillo convencional).	104
Figura. 30.	Balanza de precisión empleada para determinar la masa de las probetas.	105
Figura. 31.	Vista completa del equipo del tubo de impedancia acústica, en pantalla gráfica de la función de transferencia.	107
Figura. 32.	Zona de posiciones microfónicas de intercambio, y terminación de colocación de la muestra ensayada.	111
Figura. 33.	Reparaciones efectuadas en las muestras para evitar grandes cavidades que originen datos erróneos en los ensayos.	113
Figura. 34.	Testigo de silicona empleado para contrastar los datos de las probetas reparadas. ..	113
Figura. 35.	Revisión a la curva del coeficiente de absorción lineal idealizada.	124
Figura. 36.	Diferencias superficiales de la muestra LC16.3 (Izquierda), y LC3.1 (Derecha).	129
Figura. 37.	Esquema de la posición ideal de las partículas previa a la sinterización.	161



22. Índice de gráficas

Gráfica. 1.	Curva del coeficiente de absorción lineal idealizada.	35
Gráfica. 2.	Coeficiente de absorción lineal de lana de roca [18].	38
Gráfica. 3.	Coeficiente de absorción lineal de mortero de yeso [18].	40
Gráfica. 4.	Coeficiente de absorción lineal de hormigón [18].	41
Gráfica. 5.	Ciclo de calentamiento en el proceso de sinterizado de las muestras L9.	100
Gráfica. 6.	Dispersión de la densidad en las muestras de ladrillo reciclado L9.	122
Gráfica. 7.	Representación porcentual de los defectos encontrados en las muestras L9.	123
Gráfica. 8.	Coeficiente de absorción lineal de las muestras LN (Ladrillo convencional).	125
Gráfica. 9.	Comparación del espectro de absorción lineal de dos muestras de ladrillo normal. ..	127
Gráfica. 10.	Coeficiente de absorción lineal de las muestras LC (Ladrillo caravista).	128
Gráfica. 11.	Comparación del espectro de absorción lineal de tres muestras de ladrillo caravista.	130
Gráfica. 12.	Coeficiente de absorción lineal de las muestras H1 (Hormigón reciclado).	132
Gráfica. 13.	Coeficiente de absorción lineal de las muestras H8 (Hormigón reciclado).	133
Gráfica. 14.	Coeficiente de absorción lineal de las muestras L9 (Ladrillo reciclado).	134
Gráfica. 15.	Impedancia acústica específica de la serie LN, parte real e imaginaria.	136
Gráfica. 16.	Impedancia acústica específica de la serie LC, parte real e imaginaria.	137
Gráfica. 17.	Impedancia acústica específica de la serie H1, parte real e imaginaria.	138
Gráfica. 18.	Impedancia acústica específica de la serie H1, parte real e imaginaria.	139
Gráfica. 19.	Impedancia acústica específica de la serie L9, parte real e imaginaria.	140
Gráfica. 20.	Regresión de la distribución de Weibull de la densidad para las muestras LC.	142
Gráfica. 21.	Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras LN	143
Gráfica. 22.	Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras LC.	144
Gráfica. 23.	Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras H1.	146



Gráfica. 24. H8.	Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras	147
Gráfica. 25. L9.	Regresión de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para las muestras	148
Gráfica. 26. Bazley.	Comparación del coeficiente de absorción de la serie LC con el modelo de Delany- Bazley.	150
Gráfica. 27. Bazley.	Comparación del coeficiente de absorción de la serie H1 con el modelo de Delany- Bazley.	152
Gráfica. 28. Bazley	Comparación del coeficiente de absorción de la muestra H8 con el modelo de Delany- Bazley 153	153
Gráfica. 29. Bazley.	Comparación del coeficiente de absorción de la serie L9 con el modelo de Delany- Bazley.	154
Gráfica. 30.	Comparación del coeficiente de absorción de la serie L con el modelo JCA.	157
Gráfica. 31.	Comparación del coeficiente de absorción de la serie H1 con el modelo JCA.	160
Gráfica. 32.	Comparación del coeficiente de absorción de la serie H8 con el modelo JCA.	162
Gráfica. 33. caravista.	Espectro de absorción (abajo) y espectro de presión sonora (arriba), del ladrillo caravista.	164
Gráfica. 34. reciclado H1.	Espectro de absorción (abajo) y espectro de presión sonora (arriba), del hormigón reciclado H1.	167
Gráfica. 35. reciclado H8.	Espectro de absorción (abajo) y espectro de presión sonora (arriba), del hormigón reciclado H8.	169



23. Índice de tablas

Tabla. 1.	Descripción de los niveles de intensidad del sonido, y sensación generada en el oído humano [68].	11
Tabla. 2.	Operaciones de preconsolidación habituales en los procesos previos al moldeo [27].	53
Tabla. 3.	Valores del coeficiente de Poisson para cada denominador del residuo de la ecuación, y relación de aspecto [49].	82
Tabla. 4.	Propiedades normalizadas de ladrillo caravista [37].	88
Tabla. 5.	Composición de la pasta empleada para la fabricación de cerámica de tabiquería.	89
Tabla. 6.	Propiedades normalizadas de ladrillo convencional.	91
Tabla. 7.	Propiedades determinadas para el hormigón reciclado.	94
Tabla. 8.	Cantidades empleadas en el proceso STARCH para las muestras L9.	98
Tabla. 9.	Condiciones óptimas de molienda determinadas para los materiales reciclados bajo estudio [83,84].	102
Tabla. 10.	Dimensiones, y densidad de las muestras de ladrillo convencional.	116
Tabla. 11.	Dimensiones y densidad de las muestras de ladrillo caravista.	117
Tabla. 12.	Características de reutilización de las muestras empleadas en la serie H1.	119
Tabla. 13.	Dimensiones y densidad de las muestras de hormigón reciclado H1.	119
Tabla. 14.	Características de reutilización de las muestras empleadas en la serie H8.	120
Tabla. 15.	Dimensiones y densidad de las muestras de hormigón reciclado H8.	120
Tabla. 16.	Dimensiones y densidad de las muestras de ladrillo reciclado L9.	121
Tabla. 17.	Valores de los coeficientes de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para los materiales convencionales.	143
Tabla. 18.	Valores de los coeficientes de la distribución de Weibull del coeficiente de absorción para los materiales reciclados.	145
Tabla. 19.	Resultados obtenidos del modelo de Delany-Bazley para la resistencia al flujo estática.	155
Tabla. 20.	Parámetros del modelo JCA para el ladrillo caravista.	157
Tabla. 21.	Parámetros del modelo JCA para el hormigón reciclado H1.	159
Tabla. 22.	Parámetros del modelo JCA para el hormigón reciclado H8.	161



Tabla. 23.	Propiedades para la determinación del modulo de compresión del ladrillo caravista. ...	165
Tabla. 24.	Datos para la determinación del residuo, que permite determinar el coeficiente de Poisson para el ladrillo caravista.	165
Tabla. 25.	Propiedades para la determinación del modulo de compresión del ladrillo caravista. ...	168
Tabla. 26.	Datos para la determinación del residuo, que permite determinar el coeficiente de Poisson para el hormigón reciclado H1.	168
Tabla. 27.	Propiedades para la determinación del modulo de compresión del hormigón reciclado H8.	170
Tabla. 28.	Datos para la determinación del residuo, que permite determinar el coeficiente de Poisson para el hormigón reciclado H8.	171