



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales

## **TESIS DOCTORAL**

DESARROLLO DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO  
ACÚSTICO Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE  
MATERIALES ELABORADOS CON ALIGERANTES PARA  
LA CONSTRUCCIÓN. APLICACIÓN A SISTEMAS DE  
CONTROL DE RUIDO

**Presentada por:**

D. Tomás Vicente Esquerdo Lloret

**Dirigida por:**

Dr. D. Francisco David Denia Guzmán

Dr. D. Antonio Vicente Nadal Gisbert

**Diciembre de 2015**



# Resumen

La memoria aquí presentada se centra en el estudio del comportamiento acústico de materiales granulares de estructura rígida obtenidos a partir de productos naturales. En el sector de la edificación se dispone de materiales con baja densidad que se emplean asiduamente en la construcción. Entre ellos, los productos que son extraídos directamente de cantera, procesados en planta de tratamiento industrial para obtener las propiedades adecuadas, no suponen una carga medioambiental desde el punto de vista de la naturaleza del material. Productos como la arlita y la vermiculita se encuentran disponibles en el mercado con distintas granulometrías. Estos materiales tienen propiedades muy interesantes: presentan alta porosidad, soportan altas temperaturas, son ventajosos desde un punto de vista económico y disponen de baja densidad.

Estos materiales ligeros se utilizan en diversas aplicaciones como material suelto para diversos fines: jardinería, relleno de terraplenes o aislante térmico, entre otros ejemplos. Sin embargo, la obtención de productos granulares porosos mediante la utilización de agregados de arlita o vermiculita en la preparación del mortero de cemento abre un gran campo de posibilidades: pantallas acústicas para reducción del impacto acústico en zonas públicas o residenciales, material absorbente de aporte visto u oculto en paredes y techos, etc. El potencial que ofrecen estos materiales granulares en la construcción es muy importante ya que permiten la conformación de paneles prefabricados con múltiples geometrías estéticas obtenidas en base a unos moldes de encofrado. En la presente Tesis Doctoral se plantea además la utilización de este tipo de materiales compuestos con vistas a aumentar la atenuación sonora en dispositivos de control de ruido industriales, tales como los silenciadores utilizados en plantas de producción de energía, motores de combustión, sistemas de ventilación y aire acondicionado.

Para ello, se lleva a cabo la obtención de propiedades y parámetros acústicos y no acústicos de diversas granulometrías con arlita y vermiculita y se evalúan las posibilidades acústicas de estos productos porosos mediante el análisis detallado del coeficiente de absorción. La alta resistencia a la temperatura del material granular obtenido posibilita su uso en un amplio abanico de aplicaciones industriales, entre las que se incluyen las comentadas anteriormente en el ámbito de los dispositivos de control de ruido industriales. La viabilidad de las soluciones

estudiadas y propuestas en esta Tesis Doctoral como material fonoabsorbente a utilizar en el interior de silenciadores es un aspecto a tener en cuenta y se estudia su aplicación en este sector.

Resulta significativo destacar que es importante obtener un producto granular con suficiente consistencia. Como se muestra en el trabajo realizado, la cantidad de cemento empleada en la preparación del mortero configura el tamaño de grano del producto final y es determinante para obtener un material ligero y con resistencia adecuada para aplicaciones prácticas. Se analiza la influencia de la dosificación de las materias primas en la preparación de la mezcla, estudiando su efecto en mayor detalle sobre la vermiculita ya que es muy sensible a pequeños cambios en las dosificaciones. Por su parte, la arlita, tiene un comportamiento totalmente distinto, resultando un material muy resistente en comparación con la vermiculita.

Tras un proceso exhaustivo, se han seleccionado 5 compuestos granulares (2 de arlita y 3 de vermiculita) con distinto tamaño de grano para ser analizados y estudiados en detalle desde un punto de vista acústico en diversas campañas de mediciones experimentales. Dada su relevancia, se ha determinado el coeficiente de absorción acústica y la resistividad al flujo. Otros parámetros no acústicos, como la porosidad, la tortuosidad y la distribución de tamaño de poro se han determinado de modo experimental. La implementación de estos parámetros en un modelo teórico de comportamiento acústico ha permitido cuantificar la absorción acústica de forma rápida y precisa sin tener que recurrir al tubo de impedancia. De los diversos enfoques y metodologías disponibles en la bibliografía, se ha seleccionado el modelo de predicción acústica para materiales granulares propuesto por Horoshenkov y Swift. La selección de éste se ha debido fundamentalmente a su precisión y al reducido número de parámetros vinculados, así como a la posibilidad de obtener dichos parámetros con equipamiento experimental accesible al equipo investigador dentro del cual se enmarca esta Tesis Doctoral. El potencial y la viabilidad de los compuestos granulares desarrollados para su utilización en aplicaciones industriales relacionadas con dispositivos de control de ruido industriales (silenciadores utilizados en plantas de producción de energía, motores de combustión, sistemas de ventilación, etc.) se analiza en el banco de ensayos disponible en el Departamento.

**Palabras clave:** material granular, arlita, vermiculita, acústica, atenuación sonora, control de ruido, silenciadores disipativos.

## Resum

La memòria ací presentada es centra en l'estudi del comportament acústic de materials granulars d'estructura rígida obtinguts a partir de productes naturals. En el sector de l'edificació es disposa de materials amb baixa densitat que s'empren assíduament en la construcció. Entre ells, els productes que són extrets directament de pedrera, processats en planta de tractament industrial per a obtenir les propietats adequades, no suposen una càrrega mediambiental des del punt de vista de la naturalesa del material. Productes com l'arlita i la vermiculita es troben disponibles en el mercat amb distintes granulometries. Estos materials tenen propietats molt interessants: presenten alta porositat, suporten altes temperatures, són avantatjosos des d'un punt de vista econòmic i disposen de baixa densitat.

Estos materials lleugers s'utilitzen en diverses aplicacions com a material solt per a diversos fins: jardineria, farcit de terraplens o aïllant tèrmic, entre altres exemples. No obstant això, l'obtenció de productes granulars porosos per mitjà de la utilització d'agregats d'arlita o vermiculita en la preparació del morter de ciment obri un gran camp de possibilitats: pantalles acústiques per a reducció de l'impacte acústic en zones públiques o residencials, material absorbent d'aportació vist o ocult en parets i sostres, etc. El potencial que oferixen estos materials granulars en la construcció és molt important ja que permeten la conformació de panells prefabricats amb múltiples geometries estètiques obtingudes basant-se en uns motles d'encofrat. En la present Tesi Doctoral es planteja a més la utilització d'este tipus de materials compostos amb vista a augmentar l'atenuació sonora en dispositius de control de soroll industrials, com ara els silenciadors utilitzats en plantes de producció d'energia, motors de combustió, sistemes de ventilació i aire condicionat.

Per a això, es du a terme l'obtenció de propietats i paràmetres acústics i no acústics de diverses granulometries amb arlita i vermiculita i s'avaluen les possibilitats acústiques d'estos productes porosos per mitjà de l'anàlisi detallat del coeficient d'absorció. L'alta resistència a la temperatura del material granular obtingut possibilita el seu ús en un ampli camp d'aplicacions industrials, entre les que s'inclouen les comentades anteriorment en l'àmbit dels dispositius de control de soroll industrials. La viabilitat de les solucions estudiades i proposades en esta Tesi

Doctoral com a material fonoabsorbent a utilitzar en l'interior de silenciadors és un aspecte a tindre en compte i s'estudia la seua aplicació en este sector.

Resulta significatiu destacar que és important obtindre un producte granular amb suficient consistència. Com es mostra en el treball realitzat, la quantitat de ciment empleada en la preparació del morter configura la grandària de gra del producte final i és determinant per a obtindre un material lleuger i amb resistència adequada per a aplicacions pràctiques. S'analitza la influència de la dosificació de les matèries primeres en la preparació de la mescla, estudiant el seu efecte en major detall sobre la vermiculita ja que és molt sensible a xicotets canvis en les dosificacions. Per la seua banda, l'arlita, té un comportament totalment distint, resultant un material molt resistent en comparació amb la vermiculita.

Després d'un procés exhaustiu, s'han seleccionat 5 compostos granulars (2 d'arlita i 3 de vermiculita) amb distinta grandària de gra per a ser analitzats i estudiats en detall des d'un punt de vista acústic en diverses campanyes de mesuraments experimentals. Donada la relevancia, s'ha determinat el coeficient d'absorció acústica i la resistivitat al flux. Altres paràmetres no acústics, com la porositat, la tortuositat i la distribució de grandària de porus s'han determinat de manera experimental. La implementació d'estos paràmetres en un model teòric de comportament acústic ha permés quantificar l'absorció acústica de forma ràpida i precisa sense haver de recórrer al tub d'impedància. Dels diversos enfocaments i metodologies disponibles en la bibliografia, s'ha seleccionat el model de predicció acústica per a materials granulars proposat per Horoshenkov i Swift. La selecció d'este s'ha degut fonamentalment a la seua precisió i al reduït nombre de paràmetres vinculats, així com a la possibilitat d'obtindre els paràmetres amb equipament experimental accessible a l'equip investigador dins del qual s'emmarca esta Tesi Doctoral. El potencial i la viabilitat dels compostos granulars disenrotllats per a la seua utilització en aplicacions industrials relacionades amb dispositius de control de soroll industrials (silenciadors utilitzats en plantes de producció d'energia, motors de combustió, sistemes de ventilació, etc.) s'analitza en el banc d'assajos disponible en el Departament.

**Paraules clau:** material granular, arlita, vermiculita, acústica, atenuació sonora, control de soroll, silenciador disipatiu.

## Abstract

The work presented here focuses on the study of the acoustic behavior of rigid structure granular materials derived from natural products. Lightening materials are employed in construction. Several products are extracted directly from quarry, being processed in industrial treatment plants to obtain the required properties. These materials do not contribute to environmental pollution from the point of view of the product nature. Products as arlite and vermiculite are available in the market with different particle sizes. These materials have very interesting properties: they exhibit high porosity, withstand high temperatures, have advantages from an economic point of view and their density is low.

These lightweight materials are used in applications as loose material for various purposes: gardening, filling landfills or thermal insulation, among other examples. However, porous granular products obtained from expanded clay aggregates or vermiculite in cement mortar open a wide field of possibilities: acoustic screens to reduce acoustic impact in public or residential areas, absorbent material seen or hidden for walls and ceilings, etc. The potential of these granular materials in construction is interesting as they allow formation of prefabricated panels with multiple aesthetic geometries obtained under formwork molds. In this thesis the use of such composites is proposed in order to increase the sound attenuation in industrial noise control devices, such as silencers used in energy production plants, combustion engines, ventilation systems and air conditioning.

To do this, the evaluation of properties as well as acoustic and non-acoustic parameters is carried out of various particle sizes obtained with arlite and vermiculite and the acoustic absorption coefficient is also obtained. The high temperature resistance of the granular material enables their use in several industrial applications, including those discussed above in the field of industrial noise control devices. The feasibility of the solutions examined and proposed in this PhD thesis as sound-absorbing material to use inside silencers is an aspect to consider and its application in this sector is studied.

It is interesting to obtain a granular product with sufficient consistency. As it is shown in the work , the amount of cement used in the preparation of the mortar sets the grain size of the final product and is decisive for a lightweight strength

material in practical applications. The influence of the dosing of raw materials in the preparation of the mixture is analyzed. This effect is very important in vermiculite.

After an exhaustive process, five granular compounds (2 from arlite and 3 from vermiculite) with different grain size are analyzed and acoustically studied. Sound absorption coefficient and flow resistivity are experimentally measured. Other non-acoustic parameters such as porosity, tortuosity and pore size distribution were experimentally determined. The implementation of these parameters in a theoretical model to predict acoustic performance has allowed the quantification of the sound absorption quickly and accurately without using the impedance tube. Of the various approaches available in the literature, Horoshenkov and Swift model for acoustical prediction in granular materials is selected due to its accuracy and the reduced number of parameters involved, as well as the possibility of obtaining these parameters with the available experimental equipment of the research team within which this PhD thesis is framed. The potential and viability of these developed granular products for noise control in industrial applications (mufflers used in power production plants, engines, ventilation systems, etc.) is analyzed in the test bench available at the Department.

**Keywords:** granular material, arlite, vermiculite, acoustics, sound attenuation, noise control, dissipative muffler.



*A la memoria de mi padre,  
fuente y ejemplo de trabajo y constancia.*

*A mi madre y hermana.*



## Agradecimientos

En primer lugar mis directores de tesis: Francisco Denia y Antonio Nadal, que me han permitido llegar a este punto. Dejando atrás la dedicación prestada en otros campos de investigación, a Javier Fuenmayor por haberme dado la oportunidad de iniciarme, en un primer momento, en los silenciadores de la mano de Francisco Denia, quien me ha acogido y me ha dado su visión crítica, su capacidad de trabajo y me ha apoyado desde la distancia. A Antonio Nadal por haberme animado a emprender este estudio para finalizar una etapa paralizada y por su apoyo constante en seguir adelante.

Con ellos, Jaime y Jesús. A Jaime por haberme tendido la mano, permitir que las numerosas campañas de medición hayan sido posibles y por su interés en todo momento. A Jesús por su paciencia, constancia y asesoramiento en tantas y tantas visitas a su Universidad. Una parte muy importante de este trabajo se debe a la ayuda de ambos y ha permitido establecer un lazo de unión entre compañeros de distintas Áreas de Conocimiento y Universidades, salvando la distancia que separa a los tres Campus.

A los compañeros del DIMM que me han ayudado en algún modo. A R. Guarinos y M. A. Peydró por su dominio de las máquinas herramientas y preparación de moldes. A J. Sanfeliu por ayudarme y facilitarme las cosas en mis desplazamientos al Departamento en el Campus de Vera y a J. E. Crespo y M. Monzó por su ayuda en algunas fases del trabajo.

Sin lugar a dudas, a mi familia que me ha alentado para acabar un ciclo y ha sufrido tácitamente mi falta de dedicación.

Por último, a aquellos que de forma indirecta han hecho su aportación.



## ÍNDICE GENERAL

<i>RESUMEN</i>	<i>I</i>
<i>RESUM</i>	<i>III</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>V</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>IX</i>
<i>LISTADO DE SÍMBOLOS</i>	<i>XXV</i>
<i>CAPÍTULO 1.- MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES. OBJETIVOS.</i>	<i>1</i>
<b>1.1.- MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.- OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<i>CAPÍTULO 2.- PROBLEMÁTICA ACÚSTICA. CONCEPTOS TEÓRICOS.</i>	<i>7</i>
<b>2.1.- CONTAMINACIÓN ACÚSTICA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.- MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.- PROPIEDADES ACÚSTICAS DE MATERIALES ABSORBENTES.....</b>	<b>15</b>
2.3.1.- <i>IMPEDANCIA DE UN MATERIAL Y COEFICIENTE DE ABSORCIÓN...</i>	<i>17</i>
2.3.2.- <i>RESISTIVIDAD AL FLUJO .....</i>	<i>26</i>
2.3.3.- <i>POROSIDAD.....</i>	<i>29</i>
2.3.4.- <i>TORTUOSIDAD.....</i>	<i>35</i>
2.3.5.- <i>ÁREA ESPECÍFICA.....</i>	<i>38</i>
<b>2.4.- ESPESOR DE AGLUTINANTE.....</b>	<b>40</b>
<b>2.5.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</b>	<b>41</b>
<i>CAPÍTULO 3.- MODELOS ACÚSTICOS DE MATERIALES POROSOS.</i>	<i>43</i>
<b>3.1.- INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS.....</b>	<b>45</b>

3.2.-	<b>MATERIALES POROSOS DE MATRIZ RÍGIDA.....</b>	<b>48</b>
3.3.-	<b>MODELOS EN MATERIALES POROSOS.....</b>	<b>52</b>
3.4.-	<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</b>	<b>70</b>
 <b>CAPÍTULO 4.- MATERIALES GRANULARES DE MATRIZ RÍGIDA.</b>		<b>71</b>
4.1.-	<b>ALIGERANTES EN CONSTRUCCIÓN. NATURALEZA, USOS Y APLICACIONES.....</b>	<b>73</b>
4.2.-	<b>MINERALES EXPANDIDOS EXFOLIADOS.....</b>	<b>77</b>
4.3.-	<b>LA ARLITA.....</b>	<b>79</b>
4.4.-	<b>LA PERLITA.....</b>	<b>81</b>
4.5.-	<b>LA VERMICULITA.....</b>	<b>82</b>
4.6.-	<b>REFERENCIAS SOBRE MATERIALES EXPANDIDOS Y EXFOLIADOS.....</b>	<b>87</b>
4.7.-	<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</b>	<b>91</b>
 <b>CAPÍTULO 5.- CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ALIGERADOS. RESULTADOS EXPERIMENTALES.</b>		<b>93</b>
5.1.-	<b>MATERIALES EMPLEADOS.....</b>	<b>95</b>
5.2.-	<b>GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>96</b>
5.3.-	<b>CONDICIONANTES EN LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....</b>	<b>103</b>
5.4.-	<b>ESTRUCTURA INTERNA DEL MATERIAL.....</b>	<b>123</b>
5.5.-	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES PREVIOS.....</b>	<b>128</b>
5.5.1.-	<b>PROPIEDADES ACÚSTICAS EN ESTUDIO PRELIMINAR.....</b>	<b>128</b>
5.5.2.-	<b>PROPIEDADES NO ACÚSTICAS EN ESTUDIO PRELIMINAR.....</b>	<b>136</b>
5.6.-	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>143</b>
5.6.1.-	<b>ESPESOR DE AGLUTINANTE.....</b>	<b>147</b>
5.6.2.-	<b>GRANULOMETRÍA DE LAS COMPOSICIONES.....</b>	<b>148</b>
5.6.3.-	<b>ESTUDIO MORFOLÓGICO DE LA GRANULOMETRÍA.....</b>	<b>149</b>
5.6.4.-	<b>ENSAYO EN TUBO DE IMPEDANCIA.....</b>	<b>152</b>
5.6.5.-	<b>RESISTIVIDAD AL FLUJO.....</b>	<b>174</b>
5.6.6.-	<b>POROSIDAD.....</b>	<b>186</b>
5.6.7.-	<b>TORTUOSIDAD.....</b>	<b>191</b>
5.6.8.-	<b>ÁREA ESPECÍFICA.....</b>	<b>195</b>
5.6.9.-	<b>RESISTENCIA MECÁNICA.....</b>	<b>199</b>
5.7.-	<b>PREDICCIÓN ACÚSTICA CON MODELO MATEMÁTICO.....</b>	<b>203</b>
5.8.-	<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</b>	<b>208</b>

<i>CAPÍTULO 6.- APLICACIÓN AL CASO DE DISPOSITIVOS DE CONTROL DE RUIDO.</i>	209
<b>6.1.- ATENUACIÓN DEL RUIDO EN APLICACIONES INDUSTRIALES Y VEHICULARES .....</b>	<b>211</b>
<b>6.2.- ÍNDICE DE PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN EN SILENCIADOR CILÍNDRICO CON MATERIAL GRANULAR.....</b>	<b>215</b>
6.2.1.- CUANTIFICACIÓN DEL TL EN SILENCIADOR SIMPLE MEDIANTE MODELIZACIÓN.....	216
6.2.2.- ENSAYO EXPERIMENTAL DE SILENCIADOR HÍBRIDO CON MATERIAL GRANULAR.....	226
<b>6.3.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</b>	<b>232</b>
 <i>CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.</i>	 235
7.1.- CONCLUSIONES .....	237
7.2.- TRABAJOS FUTUROS.....	240
 <i>BIBLIOGRAFÍA.</i>	 243
RESUMEN DE REFERENCIAS POR PROCEDENCIA.....	245
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	247
APORTACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DE LA ELABORACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.....	273
 <i>ANEXO 1.</i>	 275









## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Quejas de ciudadanos por fuente de ruido (fuente: Observatorio Salud y Medio Ambiente. Núm. 3, 2012, [215]).	9
Figura 2.2.- Campo audible en dB y frecuencias (fuente: Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes).	10
Figura 2.3.- Tipos de material empleado para atenuación acústica.	13
Figura 2.4.- Longitud de onda $\lambda$ y amplitud $A$ en una onda acústica.	14
Figura 2.5.- Energía sonora en una superficie.	16
Figura 2.6.- Reflexión y transmisión de ondas planas en superficie plana.	19
Figura 2.7.- Dispositivo experimental para el coeficiente de absorción.	20
Figura 2.8.- Esquema de ensayo en el método de la matriz de transferencia.	22
Figura 2.9.- Montaje experimental para resistividad al flujo.	28
Figura 2.10.- Tipos de poros en un material.	30
Figura 2.11.- Modelo de Zwicker y Kosten para la tortuosidad.	35
Figura 2.12.- Similitud eléctrico-acústica para determinar la tortuosidad.	36
Figura 2.13.- Montaje para determinar la tortuosidad.	38
Figura 2.14.- Montaje experimental propuesto por Leclair et al. [163].	40
Figura 4.1.- Materiales exfoliados de origen mineral disponibles en el DIMM.	78
Figura 4.2.- Arlita tomada en microscopio óptico (x15) del DIMM.	79
Figura 4.3.- Mortero de cemento aligerado con arlita. Material obtenido de restos en reforma de vivienda.	80
Figura 4.4.- Foto de perlita en microscopio óptico (x16).	81
Figura 4.5.- Roca virgen de vermiculita.	82
Figura 4.6.- Láminas exfoliadas en vermiculita Tipo 3 (x20).	83
Figura 4.7.- Distribución del uso de la vermiculita [fuente: Elaboración propia]..	84
Figura 4.8.- Producción mundial de vermiculita en $10^6$ kg. [Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados de Mineral Commodity Summaries, USGS y Index Mundi].	85
Figura 5.1.- Tamizadora disponible en el laboratorio. Tamices según norma UNE 7050-3 [281].	97
Figura 5.2.- Tamizado de arlita.	98
Figura 5.3.- Distribución media de arlita en tamices.	98
Figura 5.4.- Distribución media de arlita fina en tamices.	99
Figura 5.5.- Tamizado de vermiculita tipo 2.	100
Figura 5.6.- Distribución media de vermiculita tipo 2 en tamices.	100
Figura 5.7.- Tamizado de vermiculita tipo 3.	101
Figura 5.8.- Distribución media de vermiculita tipo 3 en tamices.	102
Figura 5.9.- Imágenes (x8 aumentos). (a) Arlita, (b) V2 y (c) V3.	104

Figura 5.10.- Molde de preparación y probetas extraídas. ....	105
Figura 5.11.- Probeta V2 35-56-28 con cemento habitual de baja resistencia. ....	106
Figura 5.12.- Fragilidad con cemento de baja resistencia (32.5 R).....	107
Figura 5.13.- Baja consistencia en probetas de V2 con cemento 52.5 R. ....	107
Figura 5.14.- Probetas de vermiculita V2 humectada. ....	108
Figura 5.15.- Tamaño de grano según tipo de vermiculita.....	109
Figura 5.16.- Diferencia entre amasado manual y mecánico en V2 20-80-64. ....	110
Figura 5.17.- Batidora mecánica para el amasado. ....	110
Figura 5.18.- Granulometría en V2 20-110-50 (amasado automático y manual). ....	111
Figura 5.19.- Apelmazamiento de varios granos por exceso de agua. ....	112
Figura 5.20.- Probetas con falta de consistencia y escasa porosidad en distintas proporciones v-c-a. Efecto sobre la cohesión. ....	116
Figura 5.21.- Probetas con adhesión y porosidad para distintas v-c-a. ....	118
Figura 5.22.- Fracción de variedad de composiciones y dimensiones en probetas para estudio de la dosificación. ....	121
Figura 5.23.- Probeta de arlita con cohesión y sin porosidad Arl 100-50-50.....	122
Figura 5.24.- Morfología granular de probetas en microscopio óptico (x10). ....	124
Figura 5.25.- Microscopio óptico en el DIMM.....	124
Figura 5.26.- Metalizador y microscopio electrónico del DIMM. ....	125
Figura 5.27.- Imágenes tomadas en microscopio óptico (SEM). ....	127
Figura 5.28.- Fotografías en microscopio electrónico (2000 aumentos).....	127
Figura 5.29.- Probetas y portamuestras para estudio preliminar. ....	128
Figura 5.30.- Banco de ensayos acústicos disponible en el DIMM. ....	130
Figura 5.31.- Vista de la probeta enrasada a la derecha. ....	131
Figura 5.32.- Coeficiente de absorción en muestras humectadas. ....	132
Figura 5.33.- Coeficiente de absorción en muestras de V2 de 50 mm. ....	133
Figura 5.34.- Coeficiente de absorción en muestras de V2 de 100 mm.....	134
Figura 5.35.- Coeficiente de absorción en muestras de V3 de 50mm.....	135
Figura 5.36.- Coeficiente de absorción en muestras de V3 de 100mm.....	136
Figura 5.37.- Molde para las probetas de 30 y 100mm de diámetro.....	137
Figura 5.38.- Probetas obtenidas con molde. ....	137
Figura 5.39.- Muestras según la composición en vermiculita V2.....	139
Figura 5.40.- Muestras según la composición y tipo en vermiculita V3.....	140
Figura 5.41.- Coeficiente de absorción en V2.....	142
Figura 5.42.- Coeficiente de absorción en V3.....	142
Figura 5.43.- Molde para las probetas de 72 mm de diámetro.....	144
Figura 5.44.- Probetas según la composición y tipo de material.....	145
Figura 5.45.- Total de muestras en estudio experimental. ....	146
Figura 5.46.- Pesos retenidos en cada tamiz. ....	148
Figura 5.47.- Captura de pantalla en software (unidades en píxel).....	150

Figura 5.48.- Ensayo en tubo de impedancia. ....	152
Figura 5.49.- Portamuestras fabricado en aluminio y terminación rígida. ....	153
Figura 5.50.- Detalle del montaje del portamuestras y micrófonos. ....	153
Figura 5.51.- Coeficiente de absorción de probetas con arlita gruesa en banda fina (posición a y b). ....	154
Figura 5.52.- Coeficiente de absorción en arlita gruesa (valores promedio). ....	155
Figura 5.53.- Rangos del coeficiente de absorción en arlita gruesa en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava). ....	155
Figura 5.54.- Coeficiente de absorción de probetas con arlita fina en banda fina (posición a y b). ....	156
Figura 5.55.- Coeficiente de absorción en arlita fina (valores promedio). ....	157
Figura 5.56.- Rangos del coeficiente de absorción en arlita fina en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava). ....	157
Figura 5.57.- Coeficiente de absorción en V3 en banda fina (posición a y b). ....	158
Figura 5.58.- Coeficiente de absorción en V3 (valores promedio). ....	159
Figura 5.59.- Rangos del coeficiente de absorción en V3 en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava). ....	159
Figura 5.60.- Coeficiente de absorción de probetas con V2 gruesa en banda fina (posición a y b). ....	160
Figura 5.61.- Coeficiente de absorción en V2 gruesa (valores promedio). ....	161
Figura 5.62.- Rangos del coeficiente de absorción en V2 gruesa en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava). ....	161
Figura 5.63.- Coeficiente de absorción en V2 fina en banda fina (posición a y b). ....	162
Figura 5.64.- Coeficiente de absorción en V2 fina (valores promedio). ....	163
Figura 5.65.- Rangos del coeficiente de absorción en V2 fina en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava). ....	163
Figura 5.66.- Coeficiente de absorción medio en cada material. ....	164
Figura 5.67.- Coeficiente de absorción máximo y frecuencia en posición "a". ....	165
Figura 5.68.- Coeficiente de absorción máximo y frecuencia en posición "b". ....	165
Figura 5.69.- Coeficiente de absorción máximo y frecuencia promedio. ....	166
Figura 5.70.- Coeficiente de absorción máximo promedio. ....	166
Figura 5.71.- Coeficiente de absorción máximo y ancho de banda en posición "a" - "b". ....	167
Figura 5.72.- Coeficiente de absorción máximo promedio y ancho de banda. ....	168
Figura 5.73.- Ancho de banda promedio y frecuencia para coeficiente de absorción máximo. ....	168
Figura 5.74.- Relación en peso de los componentes. ....	169
Figura 5.75.- Coeficiente de absorción máximo en posición a (negro) y b (coloreada) en función de la densidad aparente. ....	170
Figura 5.76.- Factor de calidad en función de la densidad aparente. ....	171

Figura 5.77.- Absorción máxima y Factor de Calidad.....	171
Figura 5.78.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en Arl_gruesa.	176
Figura 5.79.- Funciones de transferencia en Arl_gruesa.....	176
Figura 5.80.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en Arl_fina. ..	177
Figura 5.81.- Funciones de transferencia en Arl_fina.....	177
Figura 5.82.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en V3.....	178
Figura 5.83.- Funciones de transferencia en V3. ....	178
Figura 5.84.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en V2_gruesa.	179
Figura 5.85.- Funciones de transferencia en V2_gruesa.....	179
Figura 5.86.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en V2_fina.....	180
Figura 5.87.- Funciones de transferencia en V2_fina.....	180
Figura 5.88.- Resistividad al flujo en posición “a”.....	184
Figura 5.89.- Resistividad al flujo en posición “b”.....	184
Figura 5.90.- Resistividad al flujo promedio de los materiales.....	185
Figura 5.91.- Balanza de precisión disponible en DIMM.....	187
Figura 5.92.- Porcentaje relativo de agua retenida en los 50 minutos.....	188
Figura 5.93.- Evolución del porcentaje relativo de agua retenida en el tiempo....	189
Figura 5.94.- Recipiente para la medición de porosidad.....	189
Figura 5.95.- Porosidad media de los materiales analizados.....	190
Figura 5.96.- Montaje para la determinación experimental de la tortuosidad.....	191
Figura 5.97.- Resistencia eléctrica experimental en arlita gruesa.....	192
Figura 5.98.- Resistencia eléctrica experimental en arlita fina.....	192
Figura 5.99.- Resistencia eléctrica experimental en V3.....	193
Figura 5.100.- Resistencia eléctrica experimental en V2 gruesa.....	193
Figura 5.101.- Resultados experimentales de la resistencia eléctrica en V2 fina.	194
Figura 5.102.- Agua retenida en muestras humectadas.....	196
Figura 5.103.- Porcentaje de agua retenida en muestras humectadas.....	196
Figura 5.104.- Fracción de volumen de líquido obtenido experimentalmente en función de la presión.....	197
Figura 5.105.- Distribución de tamaño de poro. Las líneas discontinuas indican el ajuste mediante la expresión (2.89).....	198
Figura 5.106.- Máquina Universal de Ensayos disponible en el DIMM.....	199
Figura 5.107.- Fracturas características de las probetas en máquina de compresión de las muestras preliminares.....	200
Figura 5.108.- Ejemplo de ensayo de compresión en muestra caracterizada.....	200
Figura 5.109.- Resultados de compresión en muestras preliminares de V2.....	201
Figura 5.110.- Resultados de compresión en muestras preliminares de V3.....	201
Figura 5.111.- Resultados de compresión de las muestras caracterizadas.....	202
Figura 5.112.- Coeficiente de absorción en Arl_gruesa. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [128].....	206

Figura 5.113.- Coeficiente de absorción en Arl_fina. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [128].	206
Figura 5.114.- Coeficiente de absorción en V3. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [128].	207
Figura 5.115.- Coeficiente de absorción en V2_gruesa. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [128].	207
Figura 5.116.- Coeficiente de absorción en V2_fina. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [128].	208
Figura 6.1.- Ejemplos de silenciadores reactivos: a) Cámara de expansión simple, b) cámara con salida doble, c) cámara con conductos extendidos.	212
Figura 6.2.- Silenciador disipativo con conducto central perforado.	213
Figura 6.3.- Probetas de Arl_gruesa y V3 para determinar la impedancia característica y el número de onda.	216
Figura 6.4.- Fibra de vidrio de Owens Corning.	217
Figura 6.5.- Coeficiente de absorción de Arl_gruesa, V3 y fibra de vidrio en probetas de 52 mm de diámetro y 100 mm de longitud.	217
Figura 6.6.- Montaje para calibración de los micrófonos.	218
Figura 6.7.- Captura de pantalla del software de adquisición y caracterización experimental del silenciador.	219
Figura 6.8.- Parte real de $\rho_{eq}$ . Comparación entre longitudes.	220
Figura 6.9.- Parte imaginaria de $\rho_{eq}$ . Comparación entre longitudes.	221
Figura 6.10.- Parte real de $c_{eq}$ . Comparación entre longitudes.	222
Figura 6.11.- Parte imaginaria de $c_{eq}$ . Comparación entre longitudes.	223
Figura 6.12.- $TL$ teórico (MEF) en silenciador disipativo simple con arlita.	225
Figura 6.13.- $TL$ teórico en silenciador disipativo simple con V3.	225
Figura 6.14.- Geometría de silenciador cilíndrico híbrido.	227
Figura 6.15.- Molde y probeta para fabricación de prototipo a medir en banco de ensayo.	227
Figura 6.16.- Montaje del silenciador híbrido con tubo extendido en la salida (posición a) y en la entrada (posición b).	228
Figura 6.17.- Utillaje para montaje y detalle del silenciador con tubo extendido y anillo externo.	229
Figura 6.18.- $TL$ obtenido mediante el MEF para V3 y comparación con resultado experimental.	230
Figura 6.19.- $TL$ experimental en silenciador híbrido multicámara con vermiculita. Comparación de geometrías, sin conducto extendido en resonador tipo "folded" ( $L_d=0$ , marcado con *) y con conducto extendido.	231
Figura A.1.- V2 35-49-24.5. Cemento 32.5 R, 50 mm, baja consistencia.	278
Figura A.2.- V2 35-51.5-26.3. Cemento 32.5 R, 50 mm, baja consistencia.	278

Figura A.3.- V2 35-56-28. Cemento 32.5 R, 50 mm, baja consistencia. ....	279
Figura A.4.- V2 35-49-49, 50 mm, baja consistencia. ....	279
Figura A.5.- V2 35-52.5-26.3, 50 mm, baja consistencia. ....	280
Figura A.6.- V2 35-56-28, 50 mm, baja consistencia. ....	280
Figura A.7.- V2 35-59.5-29.8, 50 mm, baja consistencia. ....	281
Figura A.8.- V2 17.5-34.5-44.5, 50 mm, baja consistencia. ....	281
Figura A.9.- V2 20-100-50, 50 mm, sin consistencia. ....	282
Figura A.10.- V2 20-75-37.5, 50 mm, sin consistencia. ....	282
Figura A.11.- V2 20-50-25, 50 mm, sin consistencia. ....	283
Figura A.12.- V2 20-100-50, 50 mm, con consistencia. ....	283
Figura A.13.- V2 20-60-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	284
Figura A.14.- V2 20-60-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	284
Figura A.15.- V2 20-70-49, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	285
Figura A.16.- V2 20-70-49, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	285
Figura A.17.- V2 20-70-56, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	286
Figura A.18.- V2 20-70-56, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	286
Figura A.19.- V2 20-80-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	287
Figura A.20.- V2 20-80-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	287
Figura A.21.- V2 20-80-64, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	288
Figura A.22.- V2 20-80-64, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	288
Figura A.23.- V2 20-100-60, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	289
Figura A.24.- V2 20-100-60, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	289
Figura A.25.- V2 20-110-55, 50 mm, sin consistencia. ....	290
Figura A.26.- V2 20-110-55, 50 mm, amasado manual. ....	290
Figura A.27.- V2 20-125-75, 50 mm, humectada, sin porosidad. ....	291
Figura A.28.- V2 60-300-150, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar. ....	291
Figura A.29.- V2 120-100-50, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar. ....	292
Figura A.30.- V2 120-100-10, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar. ....	292
Figura A.31.- V2 120-100-0, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar. ....	293
Figura A.32.- V2 120-50-0, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar. ....	293
Figura A.33.- V2 20-70-56, 100 mm, amasado manual. ....	294
Figura A.34.- V2 20-80-64, 50 mm, amasado manual, analizada en estudio preliminar. ....	294
Figura A.35.- V2 20-80-64, 100 mm, amasado manual, analizada en estudio preliminar. ....	295



Figura A.36.- V2 20-70-56, 100 mm, amasado manual, analizada en estudio preliminar.....	295
Figura A.37.- V3 20-60-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	296
Figura A.38.- V3 20-60-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	296
Figura A.39.- V3 20-70-49, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	297
Figura A.40.- V3 20-70-49, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	297
Figura A.41.- V3 20-70-56, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	298
Figura A.42.- V3 20-70-56, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	298
Figura A.43.- V3 20-80-64, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	299
Figura A.44.- V3 20-80-64, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	299
Figura A.45.- V3 20-80-64, 100 mm, amasado manual.....	300
Figura A.46.- V3 20-80-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	300
Figura A.47.- V3 20-80-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	301
Figura A.48.- V3 20-100-60, 50 mm, analizada en estudio preliminar. ....	301
Figura A.49.- V3 20-100-60, 100 mm, analizada en estudio preliminar. ....	302







## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Nivel sonoro para distintas actividades y efecto sobre el oído (fuente: Elaboración propia).....	12
Tabla 3.1.- Parámetros en algunos modelos acústicos de materiales porosos .....	69
Tabla 4.1.- Tipos de vermiculita comercializada.....	84
Tabla 4.2.- Análisis químico de la vermiculita.....	85
Tabla 4.3.- Producción de vermiculita por país en 10 <sup>6</sup> kg. [Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados de Mineral Commodity Summaries, USGS y Index Mundi]. .....	86
Tabla 5.1.- Proporciones vermiculita-cemento-agua con cohesión.....	118
Tabla 5.2.- Dosificación de probetas preliminares con arlita.....	122
Tabla 5.3.- Ficha técnica del SEM.....	126
Tabla 5.4.- Probetas de vermiculita V2 en primer ensayo preliminar.....	129
Tabla 5.5.- Probetas de vermiculita V3 en primer ensayo preliminar.....	136
Tabla 5.6.- Valores experimentales de porosidad, resistividad al flujo y tortuosidad.....	141
Tabla 5.7.- Cantidades básicas para cada tipo de probeta de cemento (c), agua (a) y material (mat).....	144
Tabla 5.8.- Pesos (g) obtenidos en cada probeta.....	146
Tabla 5.9.- Longitudes (mm) en cada probeta.....	146
Tabla 5.10.- Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) en cada probeta.....	147
Tabla 5.11.- Estimación del espesor (mm) de aglutinante.....	147
Tabla 5.12.- Porcentajes retenidos en cada tamiz.....	149
Tabla 5.13.- Parámetros geométricos de las partículas en Arl_gruesa (164 partículas).....	150
Tabla 5.14.- Parámetros geométricos de las partículas en Arl_fina (129 partículas).....	150
Tabla 5.15.- Parámetros geométricos de las partículas en V3 (177 partículas). ...	151
Tabla 5.16.- Parámetros geométricos de las partículas en V2_gruesa (117 partículas).....	151
Tabla 5.17.- Parámetros geométricos de las partículas en V2_fina (185 partículas).....	151
Tabla 5.18.- Valores promedio de resultados en tubo de impedancia.....	172
Tabla 5.19.- Cuadro resumen de los datos experimentales en ensayo en tubo de impedancia.....	173

Tabla 5.20.- Valores de resistividad al flujo en Arl_gruesa (Pa·s/m <sup>2</sup> ).....	181
Tabla 5.21.- Valores de resistividad al flujo en Arl_fina (Pa·s/m <sup>2</sup> ). .....	182
Tabla 5.22.- Valores de resistividad al flujo en V3 (Pa·s/m <sup>2</sup> ).....	182
Tabla 5.23.- Valores de resistividad al flujo en V2_gruesa (Pa·s/m <sup>2</sup> ). .....	183
Tabla 5.24.- Valores de resistividad al flujo en V2_fina (Pa·s/m <sup>2</sup> ). .....	183
Tabla 5.25.- Valores de resistividad al flujo (Pa·s/m <sup>2</sup> ). Tratamiento con  H <sub>12</sub>  . ....	185
Tabla 5.26.- Valores de resistividad al flujo (Pa·s/m <sup>2</sup> ). Tratamiento  imag(H <sub>12</sub> ) . 185	
Tabla 5.27.- Porcentajes relativos en peso del agua retenida.....	188
Tabla 5.28.- Porosidad de los materiales. ....	190
Tabla 5.29.- Tortuosidad en método experimental y modelos de predicción. ....	195
Tabla 5.30.- Valores de desviación estándar de tamaño de poro. ....	198
Tabla 5.31.- Resumen de parámetros no acústicos de los materiales. ....	199
Tabla 5.32.- Rigidez en ensayo de compresión.....	203
Tabla 5.33.- Resumen de parámetros para modelo. ....	205
Tabla A.1.- Probetas con cemento 32.5R en V2 sin cohesión. ....	277

## Listado de símbolos

$\alpha$	Coefficiente de absorción
$\tau$	Coefficiente de transmisión
$r$	Coefficiente de reflexión
$C(\omega)$	Compresibilidad del fluido (Pa)
$\Gamma$	Constante de propagación compleja
$\alpha$	Parte real de la constante de propagación
$\beta$	Parte imaginaria de la constante de propagación
$\rho_0$	Densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho(\omega), \rho_{eq}$	Densidad de fluido equivalente ( $\text{kg/m}^3$ )
$L$	Desplazamiento en máquina universal de compresión (mm)
$\sigma$	Desviación estándar
$D$	Diámetro de probetas. Diámetro interior en tubo de impedancias (mm)
$Q$	Factor de calidad
$f$	Frecuencia (Hz)
$F$	Fuerza en máquina universal de compresión (kN)
$Z_s$	Impedancia superficial ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ )
$Z_0$	Impedancia del aire $Z_0 = \rho_0 c_0$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ )
$Z$	Impedancia característica compleja ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ )
$I$	Intensidad eléctrica (A)
$\lambda$	Longitud de onda (m)
$k$	Número de onda complejo ( $\text{rad/m}$ )
$K$	Módulo de compresibilidad dinámico (Pa)
$\Psi$	Parte real de la impedancia característica ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ )
$X$	Parte imaginaria de la impedancia característica ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ )
$TL$	Pérdidas por transmisión (dB)
$\phi$	Porosidad
$R_f$	Resistencia al flujo de aire ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}^3$ )
$R_s$	Resistencia específica al flujo de aire ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ )
$R$	Resistividad al flujo ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$ )
$\rho_{mat}$	Resistividad eléctrica con material y electrolito ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
$\rho_{elect}$	Resistividad eléctrica del electrolito ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
$U$	Tensión eléctrica (V)
$\alpha_\infty, T$	Tortuosidad
$c_0$	Velocidad del sonido en el aire (m/s)
$c_{eq}$	Velocidad del sonido equivalente en el medio poroso (m/s)

En el capítulo de revisión de modelos teóricos de materiales granulares se ha mantenido la nomenclatura original en las referencias bibliográficas, indicándose la simbología utilizada para cada uno de los términos. Esto queda justificado por la gran variedad de simbología empleada en la documentación consultada.



# **Capítulo 1.- Motivación y antecedentes. Objetivos.**

*En este capítulo se da a conocer la procedencia del uso generalizado de los materiales base que se analizan en la Tesis Doctoral. Se describen los capítulos en que se divide este trabajo y los objetivos fundamentales. Desde un punto de vista acústico, los dispositivos industriales de control de ruido, tales como los silenciadores utilizados en plantas de producción de energía, motores de combustión, etc., son, a priori, un campo de aplicación potencialmente interesante. La reducción de los niveles de emisión sonora en estos sistemas con materiales empleados de forma generalizada en el sector de la construcción, además de su bajo coste, facilidad de preparación y materia prima biodegradable, abre un nuevo campo de aplicación.*



### **1.1.- MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES**

Este trabajo surge como una colaboración de dos Áreas de Conocimiento del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universitat Politècnica de València. La obtención de materiales compuestos que corresponde al Área de Ciencia de los Materiales junto con la dilatada experiencia del Área de Ingeniería Mecánica en el estudio del comportamiento acústico de los sistemas de escape, permite unir dos Áreas de Conocimiento íntimamente relacionadas en dos campus universitarios: Valencia y Alcoy. Por otra parte, la ausencia de una línea de investigación consolidada en la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) y la falta de equipamiento experimental necesario para caracterizar acústicamente un material requiere de un esfuerzo en iniciar esa tarea. En este sentido, el Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de Señal de la Universidad de Alicante ha ofrecido una colaboración muy importante para la adquisición de medidas experimentales en el uso del equipamiento de que dispone.

Continuamente se investiga en nuevos materiales dirigidos al aislamiento acústico y vibracional. En el sector de la construcción, donde es conveniente reducir el peso de algún elemento de la edificación, se emplean de forma habitual materiales aligerados que no comprometan la resistencia estructural. Entre estos materiales, los minerales a base de silicatos ofrecen ventajas interesantes: bajo coste y densidad, así como buen comportamiento acústico y térmico. Materiales como la arlita y vermiculita son productos derivados ligeros obtenidos a partir de áridos naturales que ofrecen buenas propiedades térmicas y acústicas, por lo que es susceptible de ser utilizados en el ámbito de la acústica de la edificación. El árido empleado en la preparación del mortero puede ser sustituido por estos compuestos y generar productos porosos. El empleo de estos elementos no supone una carga contaminante, a excepción de la contaminación producida en su fabricación, y su procesado y tratamiento final como producto derivado de residuos de demolición de edificaciones no requiere de instalaciones especiales ni mano de obra especializada. Con el uso de energías renovables durante el tratamiento en planta industrial es posible reducir la carga contaminante en todo el proceso productivo de estos materiales ligeros.

Las propiedades físicas de esos materiales ligeros se aprovechan en múltiples usos: la arlita se emplea como material de relleno en desniveles, aislante en techos y, añadido en el mortero, se emplea como aligerante en soleras donde el peso es un factor a considerar. La vermiculita es empleada habitualmente como sustrato en jardinería y horticultura. Sin embargo, en ambos materiales, la capacidad de resistir

altas temperaturas favorece su uso como aislante térmico, como es el caso de aislante en los hornos.

Emplear estos materiales de baja densidad como material aligerante en la preparación de morteros de cemento comparte varias ventajas en un mismo producto. El bajo precio de mercado y las características provenientes de ser un producto derivado de roca mineral, junto a su baja densidad, les confiere como un producto idóneo para la preparación de la masa de mortero de cemento. La fabricación de elementos con porosidad puede ser interesante desde un punto de vista térmico y acústico. En el trabajo aquí desarrollado se ha prestado interés a la aplicación acústica. En este sentido, la colocación de paneles porosos como material aislante entre paredes, techos o pantalla de aislamiento acústico pueden ser un campo de aplicación práctico de estos materiales y abre un nuevo ámbito de aplicación.

Además, la generación de ruido en plantas de producción de energía, motores de combustión, sistemas de ventilación y aire acondicionado, etc., es un problema que requiere soluciones que reduzcan los niveles de emisión. Como es sabido, los gases de escape y/o el flujo de estos sistemas pasan a través de dispositivos de control de ruido, tales como silenciadores, para reducir el nivel sonoro que se emite al exterior. La variedad de configuraciones de los silenciadores es muy numerosa: dimensiones, tipo de sección transversal, conductos y placas internos, extensión y perforación de los tubos de su interior, tipo y ubicación del material absorbente, subcámaras internas, etc. Las temperaturas que alcanzan los gases de escape de un motor junto a la necesidad de absorción acústica confieren a estos materiales aligerantes con cemento como material aglutinante un campo de aplicación muy atractivo.

La experiencia en el estudio de la atenuación acústica en el sistema de escape de vehículos a motor es muy dilatada por parte de compañeros del Departamento. Si a esto se le une la caracterización de un nuevo material compuesto donde la Ciencia de los Materiales tiene su fundamento, surge un binomio de colaboración entre dos áreas de conocimiento del DIMM: Ciencia de los Materiales e Ingeniería Mecánica.

## **1.2.- OBJETIVOS**

El interés de este trabajo se centra en la caracterización acústica de mezclas de materiales ligeros expandidos (arrita y vermiculita) empleados como material de aporte en morteros de cemento y su viabilidad como material fonoabsorbente en sistemas de control de ruido.

La memoria de este trabajo se apoya en tres aspectos: dosificación necesaria de cada material de aporte para obtener un material adecuado en cuanto a resistencia y material granular, caracterización experimental de parámetros acústicos y no acústicos junto al empleo de un modelo matemático de predicción de la respuesta acústica y por último, viabilidad de estos productos como alternativa potencial a los materiales utilizados habitualmente en dispositivos de control de ruido, tales como silenciadores.

En primer lugar se definen los conceptos y la problemática acústica en el entorno cotidiano e industrial. De esta manera, en el capítulo 2 se repasan conceptos acústicos que son necesarios en el desarrollo del trabajo y se realiza un estudio detallado de referencias bibliográficas en las que se indican las metodologías para cuantificar las propiedades y parámetros relevantes.

En el capítulo 3 se describen los modelos matemáticos de predicción de respuesta acústica en materiales granulares. Se hace hincapié en las metodologías aplicadas a materiales granulares de matriz rígida, como es el caso de los estudiados en la presente Tesis Doctoral.

En el siguiente capítulo se hace un estudio bibliográfico muy detallado de los materiales empleados como aligerantes. Se dedica especial atención a los materiales expandidos tales como: perlita, arlita y vermiculita. Se muestran sus propiedades físicas y se realiza una revisión bibliográfica de estudios técnicos acerca de sus propiedades, usos y aplicaciones.

El capítulo 5 está dedicado a la obtención de resultados experimentales. El estudio acústico requiere la elaboración de probetas para ser ensayadas en los equipos de medición. Como primera parte de este trabajo se lleva a cabo una labor exhaustiva y detallada para la selección de las composiciones adecuadas con vista a preparar el mortero de cemento. Esta tarea de laboratorio requiere la elaboración de un número importante de probetas con el fin de obtener productos con resistencia suficiente para garantizar su integridad durante la manipulación propia en los ensayos acústicos. A esto debe unirse que dichos materiales deben formar

compuestos granulares y por tanto, han de presentar conductos interconectados internamente para favorecer la atenuación acústica (pérdida de energía) al ser atravesados por una onda acústica. Se presentan los resultados de estudios previos realizados sobre las vermiculitas, que confirman la viabilidad de estos materiales en usos acústicos. Seguidamente se estudian en profundidad determinando parámetros acústicos y no acústicos de 5 tipos de granulometrías. Dos corresponden a material de aporte con arlita, una con vermiculita V3 y dos con vermiculita V2. Este capítulo es el más extenso e incluye los resultados del modelo matemático seleccionado y su comparación con los resultados experimentales del coeficiente de absorción, así como un análisis de la resistencia a compresión de los productos estudiados.

El último capítulo corresponde a la aplicación práctica de estos compuestos granulares como alternativa a los materiales absorbentes utilizados habitualmente en dispositivos de control de ruido a nivel industrial, tales como, por ejemplo, silenciadores del sistema de escape en motores de combustión. Este apartado permite dar respuesta a la hipótesis inicial planteada acerca del uso de estos productos cementicios como materiales absorbentes acústicos, que constituyan una alternativa a las fibras habituales en los silenciadores. Además, este capítulo justifica la viabilidad en el planteamiento de nuevas líneas de trabajo sobre estos materiales u otros a estudiar en el futuro, así como sobre nuevas configuraciones de dispositivos de control de ruido.

El capítulo siguiente recoge las conclusiones obtenidas de esta Tesis Doctoral y se proponen diversos trabajos que pueden ser interesantes para explotar las ideas fundamentales de esta aproximación inicial.

En el apartado de bibliografía se incluye el listado completo de la literatura técnica correspondiente a las consultas realizadas. A modo de resumen se incluye una tabla con las referencias clasificadas según la fuente bibliográfica y por tipo de materia.

Finalmente se acompaña en anexo un conjunto de imágenes de probetas fabricadas durante el desarrollo de la Tesis Doctoral. Se trata de una mera ilustración de las composiciones que han sido realizadas en el trabajo de laboratorio, con lo que pretende mostrar la sensibilidad que presenta el producto final a las dosificaciones de los materiales de aporte en el amasado. También se incluyen las imágenes de las probetas de vermiculita (corta de 50 mm y larga de 100 mm) que se han analizado en el estudio preliminar.

## **Capítulo 2.- Problemática acústica. Conceptos teóricos.**

*Se plantea la problemática acústica medioambiental y se formulan los parámetros y propiedades característicos que definen un material granular. En este capítulo de carácter teórico se exponen las expresiones matemáticas que permiten determinar los parámetros acústicos y no acústicos para caracterizar un material. Se hace una revisión y una descripción de las diversas metodologías experimentales que pueden emplearse para obtener estos parámetros. El conocimiento de estas técnicas experimentales permitirá seleccionar el método más adecuado según la necesidad de equipamiento necesario para cuantificarlos de modo experimental.*





## 2.1.- CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

El sonido es una perturbación provocada por la vibración de las partículas del medio elástico de propagación, ya sea gaseoso, líquido o sólido y que se propaga en forma de onda sonora. El sonido audible por el oído humano responde a la sensación que detecta el aparato auditivo provocado por las variaciones rápidas de la presión del medio.

La evolución del ambiente acústico sigue una tendencia progresiva hacia niveles más elevados en todo el rango de frecuencias audibles para el ser humano en el entorno de la ciudad. Un análisis del grado de exposición de la población al ruido de España en su vivienda o en la zona donde reside muestra que el 70% no está expuesta a ruidos, mientras que el 21% está poco expuesta y el 9% se encuentra muy expuesta [212].

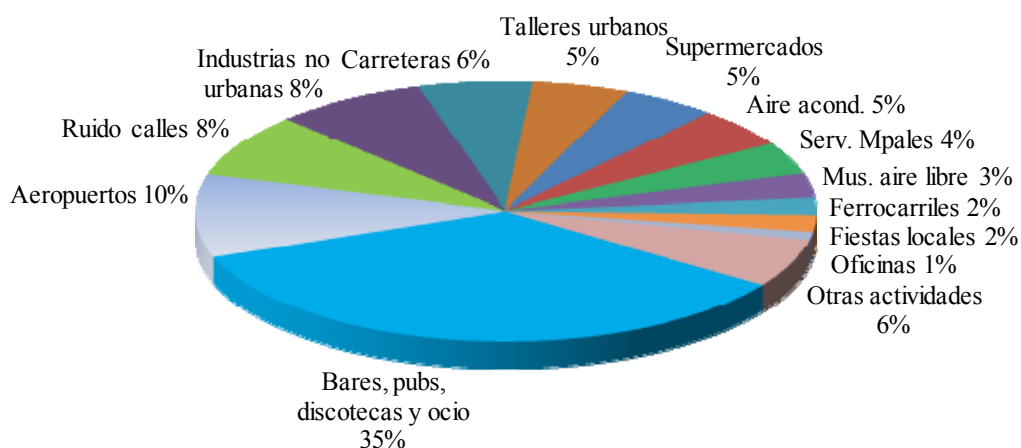


Figura 2.1.- Quejas de ciudadanos por fuente de ruido (fuente: Observatorio Salud y Medio Ambiente. Núm. 3, 2012, [212]).

Cada instante de la vida cotidiana está rodeado de sonidos procedentes de distintas fuentes: electrodomésticos como refrigeradores o aires acondicionados, movimiento de ascensores, conversaciones de individuos adyacentes, manipulación de objetos y/o máquinas por operarios a cielo abierto, trabajos y máquinas en la actividad industrial en ambiente cerrado, tráfico rodado, tráfico suburbano o tranvías, motores de combustión o música en locales de ocio. El interior de los edificios se encuentra expuesto a ruidos procedentes del interior como a ruidos

intrusivos que tienen su origen en el exterior. El sonido es la impresión fisiológica, medido en decibelios (dB), producida en el oído por las vibraciones elásticas de los cuerpos y se propaga en todos los medios materiales en forma de ondas esféricas. La velocidad de propagación es distinta en cada medio, dependiendo también de la temperatura y de la presión atmosférica.

La Ley del Ruido (37/2003, de 17 de noviembre) define la contaminación acústica como la presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que impliquen molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente.

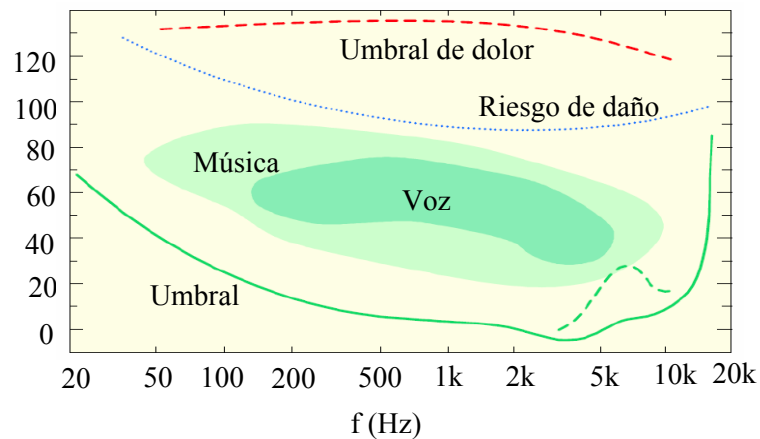


Figura 2.2.- Campo audible en dB y frecuencias (fuente: Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes).

La unidad de medida para expresar el nivel de potencia y el nivel de intensidad acústica es el decibelio (dB). Se expresa en escala logarítmica ya que la sensibilidad que ofrece el oído humano a las variaciones de intensidad sonora se puede aproximar a una escala logarítmica.

Generalmente, en los casos de sonidos indicados anteriormente no generan molestia o malestar en los individuos, ya que la intensidad se ubica en la zona media de frecuencia y con niveles relativamente bajos. En ocasiones el sonido queda confundido con el ruido. El ruido es un sonido molesto que genera sensación de incomodidad y malestar. El modo de aislar estos ruidos no es el mismo y

depende de la naturaleza que lo genera. La generación de ruido puede deberse a distinta naturaleza:

- Ruido aéreo que se transmite por el aire y se propaga en los edificios a través de cerramientos (tabiques, forjados, fachadas o cubiertas). Se propagan tanto desde el exterior al interior (tráfico rodado, aeronaves) como desde el interior al exterior (conversaciones entre vecinos, televisor).

- Ruido de impacto generado por las vibraciones en la estructura convirtiéndose en un foco de emisión sonora, como puede ser el caso de cierre de puertas, pasos de las personas, movimientos de muebles o caídas de objetos.

- Ruido de las instalaciones. En esta categoría se agrupan las perturbaciones provocadas por las propias instalaciones: fontanería, ascensores, sistemas de climatización y aire acondicionado o salas de máquinas de bombeo.

El modo más rápido para combatir el ruido es interponer una masa suficiente que sirva de barrera de propagación entre la fuente emisora y el recinto receptor (ruido de impactos), o materiales con flexibilidad y estanqueidad para cerrar huecos de transmisión (ruido aéreo). Lo más conveniente es emplear aislamiento acústico con materiales que aportan absorción acústica.

La mejora en la calidad de vida en los ambientes expuestos a estos sonidos molestos depende de la actuación en dos aspectos: 1.- reducción del nivel sonoro en la fuente emisora del ruido y 2.- reducción del nivel sonoro en el entorno del receptor. La reducción acústica en el origen se puede realizar con elementos amortiguadores del ruido como son antivibratorios, materiales absorbentes o encapsamiento de la máquina generadora de ruido.

En ocasiones no se puede combatir el problema del ruido actuando directamente sobre la fuente que lo produce (caso del tráfico rodado) o es muy costosa, por lo que el control del ruido en el lugar en el que se produce la molestia suele ser más efectivo. En este caso, la atenuación del sonido se puede realizar de forma pasiva con material altamente absorbente del sonido (en paredes y techos de edificaciones) o pantallas acústicas antiruido que provocan un rebote de la onda incidente, como ocurre en el caso del tráfico rodado en cercanías a núcleos residenciales de habitantes. Otra solución que se ha mostrado eficaz consiste en la utilización de sistemas activos, como en el caso del control de ruido transmitido en aberturas de ventanas, cuyo estudio ha sido planteado por Pàmies et al. [220].

Tabla 2.1.- Nivel sonoro para distintas actividades y efecto sobre el oído (fuente: Elaboración propia).

Actividad	Nivel (dB)	Efecto
Turbinas, trueno	130	Doloroso
Grupos generadores, bocina de auto (1 m)	120	Esfuerzo vocal
Discotecas, Taladro neumático	110	Muy fuerte
Tráfico, restaurante tumultuoso, secador de pelo, oficina de negocios, Camión pesado (10 m)	70-90	Molesto
Conversación normal, aire acondicionado	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Normal
Biblioteca, despachos, conversación voz baja	30-40	Tranquilo
Pisada, estudio de grabación	10-20	Silencioso

Una aplicación ejemplar es el caso de los vehículos de motor de combustión interna alternativo (MCIA). Es evidente el número de vehículos en el parque automovilístico y las molestias que ocasionan. El vehículo en su conjunto puede considerarse como un foco emisor muy complejo [119]. Los usuarios y fabricantes demandan mayores umbrales de comodidad y confort. La Legislación Comunitaria Directiva 70/157/CEE [83] sobre nivel sonoro admisible en escapes en los vehículos a motor, en este aspecto es determinante para reducir el impacto acústico de los vehículos: limitaciones de nivel acústico en los escapes y en el ruido generado entre rueda y pavimento, son algunos ejemplos.

Los motores se encuentran encerrados entre el capó y la estructura autoportante del automóvil. Para reducir el nivel sonoro y generar mayor confort para los ocupantes del habitáculo se incluyen superficies porosas que aíslan a los ocupantes del ruido del motor, así como al entorno que le rodea: peatones y viviendas. La estructura y capó se recubren con fieltros y materiales de carácter fibroso. En este caso, parte de la energía sonora se intenta reducir en el foco emisor. Sin embargo, el ruido que se genera en las explosiones internas durante el funcionamiento del motor también se propaga por el tubo de escape hasta el exterior, impulsado por los gases de escape de la combustión. Es por ello que el silenciador en el tubo de escape de vehículos de motor de combustión desempeña un papel importante para reducir el nivel sonoro de las explosiones del motor y sirve de barrera acústica para ocupantes y transeúntes. Este elemento pone de manifiesto un claro ejemplo de reducción acústica.

En cualquier caso, la reducción del ruido y el acondicionamiento acústico se obtiene con el empleo de materiales absorbentes que atenúan y reducen el nivel sonoro hasta valores aceptables para el oído humano. Es determinante conocer los mecanismos de propagación del sonido a través de estos materiales y con ello cuantificar la capacidad absorbente de cada material.

## 2.2.- **MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS**

En los productos absorbentes empleados, el mecanismo de absorción radica en transformar la energía acústica, principalmente, en energía calorífica por medio de procesos de fricción interna. Dependiendo de la naturaleza del material, las tipologías empleadas son: materiales fibrosos (obtenidos a partir de fibras o textiles), materiales porosos (generados con triturados o áridos) y materiales perforados (obtenidos con perforaciones de distinta geometría a partir del material base que puede ser obtenido por diversas materias primas: reciclado de plásticos, triturado de madera, corcho, materiales vegetales o reutilización de neumático).

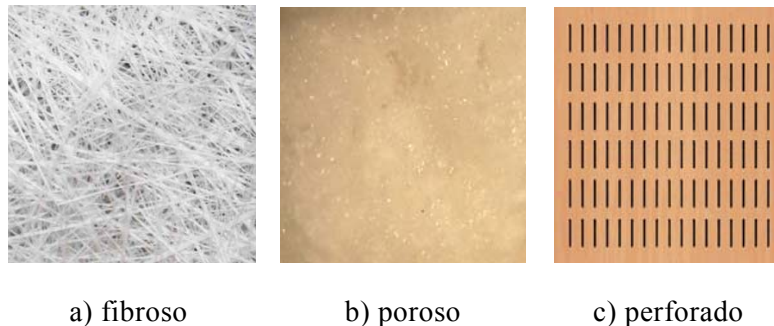


Figura 2.3.- Tipos de material empleado para atenuación acústica.

Los materiales absorbentes porosos se emplean en Acústica Arquitectónica [195] para controlar los tiempos de reverberación de salas y mejorar la acústica, como son el caso de las salas de conciertos, conferencias y exposiciones y espacios diáfanos [68].

Los valores del nivel de absorción, además de variar en función de las frecuencias del sonido incidente, dependen del espesor, densidad del material (aunque este último no es un factor especialmente condicionante) y de la distancia de colocación respecto al tabique o elemento de obra (junto con su situación respecto a la fuente y el ángulo de incidencia, entre otras). La absorción depende básicamente de su espesor y en menor medida de su densidad. El aumento del espesor del material absorbente provoca varios resultados [241]:

- Aumenta el nivel de absorción en todo el rango de frecuencias. Esto es debido a que el camino que recorre la onda sonora en el interior del material es mayor, con el consiguiente incremento de la fricción en su trayecto, aumentando la energía transformada en calor en la estructura porosa interna.

- Se obtiene un aumento de la absorción en frecuencias bajas. Esto se debe a que cuanto mayor sea la velocidad de desplazamiento de las moléculas del aire, mayor es la fricción y, en consecuencia, más eficaz será la absorción. Así, para una frecuencia determinada, caracterizada por su longitud de onda  $\lambda$ , la velocidad máxima se desarrolla a una distancia de  $\lambda/4$  de la pared rígida. La longitud de onda es la distancia real que recorre una perturbación en un determinado intervalo de tiempo. Representa la distancia entre dos puntos homólogos de la onda de propagación y es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda. Por ello, un incremento en el espesor del material absorbente inducirá una capacidad de absorción a mayores longitudes de onda (frecuencias más bajas). De este modo, cuando se intenta absorber un elevado porcentaje de la energía acústica que posee una determinada frecuencia problemática y el espesor del material colocado resulta inferior a un cuarto de la longitud de onda de tal frecuencia, la absorción a esa frecuencia no alcanzará el máximo rendimiento.

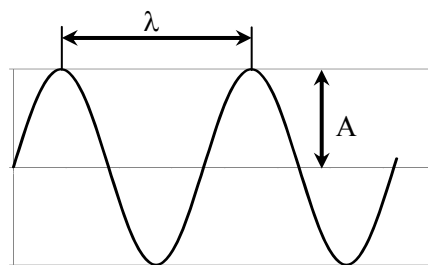


Figura 2.4.- Longitud de onda  $\lambda$  y amplitud  $A$  en una onda acústica.

### 2.3.- PROPIEDADES ACÚSTICAS DE MATERIALES ABSORBENTES

A medida que un elemento vibrante modifica su posición de equilibrio estático, impulsa el fluido que lo rodea y lo comprime. Al mismo tiempo, se presenta un vacío en la parte inmediatamente posterior al elemento y el fluido se precipita para llenar este espacio. De este modo, la compresión del fluido se transfiere a partes distantes y el fluido se pone en movimiento en forma de ondas sonoras, generando una perturbación acústica. Para el oído humano, el sonido es la sensación auditiva producida por la perturbación del aire. Tanto los fluidos como los sólidos poseen inercia y elasticidad, por lo que ambos transmiten las ondas sonoras.

La propagación de una perturbación acústica a través de un material está cuantificada por la impedancia característica compleja del material  $Z$  y la constante de propagación  $\Gamma$

$$Z = \alpha + j\beta \quad (2.1)$$

$$\Gamma = \Psi + jX \quad (2.2)$$

La componente real  $\alpha$  de la impedancia está asociada con las pérdidas energéticas, mientras que la parte imaginaria  $\beta$  se asocia con los cambios de fase. Con respecto a la constante de propagación, la componente  $\Psi$  es la constante de atenuación y  $X$  es la constante de fase. En muchos modelos matemáticos, estas características del material se determinan a partir de la resistividad al flujo  $R_f$ , aunque también pueden encontrarse modelos que se basan en la porosidad  $\phi$ , la tortuosidad  $T$ , tamaño de poro o la resistencia al flujo  $R_f$ .

Las ondas sonoras son longitudinales. Esto significa que las partículas se mueven en la dirección del movimiento de la onda. La propagación de las ondas sonoras implica el transporte de energía a través del espacio. La energía total que transportan las ondas sonoras es un balance entre la energía cinética y la potencial. La primera de ellas se debe al movimiento de las partículas del medio y la segunda al desplazamiento de las partículas.

Cuando una onda sonora incide en un panel, las moléculas de aire en contacto con la superficie interior se ven afectadas por variaciones de presión haciendo que el panel vibre, es decir, la vibración del panel transforma a éste en

una superficie radiante, transmitiendo energía sonora. Por tanto, la transmisión del sonido se realiza a través de las ondas de vibración. La superficie sobre la que incide el sonido en forma de onda, refleja parcialmente esta onda y el resto se absorbe y transmite internamente por esta superficie en forma de ondas sonoras o en forma de energía calorífica. Realmente la energía se disipa en energía mecánica debida a la elasticidad del material y a su posterior disipación en forma de calor, debido a la fricción interna por viscosidad entre el aire y el material en los intersticios comunicados de la estructura.

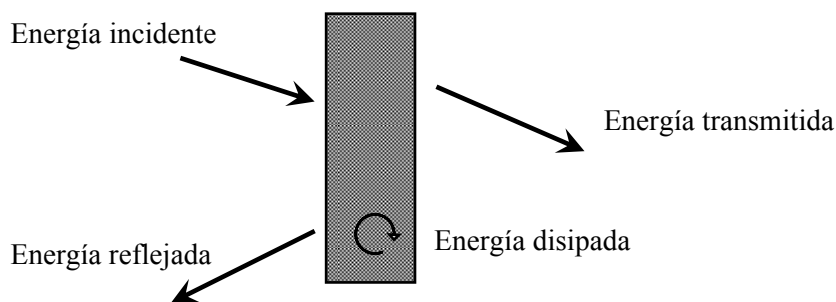


Figura 2.5.- Energía sonora en una superficie.

Los factores que influyen en la transmisión del sonido son principalmente: frecuencia, densidad del material y espesor de la placa, entre otros. Resulta interesante estudiar la vibración de la propia placa con el objetivo de eliminar o al menos reducir la vibración de la placa y por tanto de la radiación acústica. La aplicación de estos tipos de paneles es muy diversa, dependiendo del material del propio panel. Así, puede ser de interés en la propia construcción, sector industrial (transmisión de ruido en máquinas) o en el transporte de viajeros (automóviles, autobuses, transporte marítimo, ferroviario o aviación).

El dominio audible de frecuencias se encuentra en el intervalo 20-20000 Hz. En acústica es habitual realizar un análisis en bandas de frecuencias, determinando el nivel sonoro a cada banda. Las bandas pueden ser de dos tipos:

- De ancho constante, con incrementos de frecuencia constantes

$$\Delta f = k = cte \quad (2.3)$$

- De ancho proporcional a la frecuencia central.



$$\frac{\Delta f}{f_{central}} = k = cte \quad (2.4)$$

Este último caso es el más empleado y corresponde al análisis por filtros de octava y por filtros de tercio de octava. Los fabricantes de materiales acústicos dan los coeficientes de absorción por lo menos en resolución de una octava. El término de “octava” procede de la escala musical y corresponde al intervalo entre dos sonidos que tienen una relación de frecuencias igual a 2 y que corresponde a ocho notas de dicha escala musical. Si la primera nota “Do” en una escala está afinada en 440 Hz, el segundo “Do” de la escala estará en 880 Hz y corresponde a la primera nota de la siguiente octava, ya que al cambiar de octava debe haber una relación de frecuencias igual a 2. Las bandas de tercio de octava se utilizan habitualmente porque se asemejan al modo de percepción del oído. Cada octava y tercio de octava está definida por el valor de la frecuencia central.

En el caso de filtros de octava, el ancho de frecuencia es  $f_2 - f_1 = 0.707 f_c$ , siendo  $f_2 = 2f_1$ , y  $f_1, f_2$  las frecuencias límite de cada banda y  $f_c$  la frecuencia central. En el caso de tercio de octava, siendo  $f_2 = \sqrt[3]{2}f_1$ , el ancho de banda resulta:

$$f_2 - f_1 = 0.232 f_c \quad (2.5)$$

Por tanto, las frecuencias en cada intervalo de octava son: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz. Para el caso de tercios de octava, cada frecuencia se divide en tres partes resultando las siguientes frecuencias de corte: 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500 y 16000 Hz.

### 2.3.1.- Impedancia de un material y coeficiente de absorción

La impedancia acústica  $Z$  es un parámetro que indica cuánta presión se genera por una onda acústica y por tanto depende de la frecuencia. La impedancia específica  $Z_s$  está expresada como el cociente entre la presión acústica  $P$  y la velocidad  $u$  asociada a la partícula vibrante y es una propiedad característica del medio y del tipo de onda.

$$Z_s = \frac{P}{u} \quad (2.6)$$

En función del tipo de material o recubrimiento de la superficie, varía la cantidad de energía acústica transmitida y absorbida. Esto permite definir el concepto de coeficiente de absorción sonora  $\alpha$  como el cociente entre la energía absorbida por el material y la energía que incide sobre el material y varía con la frecuencia. El máximo coeficiente de absorción está determinado por un valor de 1, donde toda la energía que incide en el material es absorbida por el mismo, y el mínimo es 0, donde toda la energía es reflejada.

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.7)$$

Aplicando el teorema de conservación de energía, la energía que no se refleja es absorbida por el material, pudiendo ser disipada en el interior del material y transmitida al exterior. Considerando el ejemplo de la Figura 2.5 con una onda plana incidente [20], el campo de presión sonora está compuesto por una onda progresiva y otra reflejada.

En un conducto de pared rígida con su eje paralelo a la dirección  $z$  [76], considerando que la propagación solo depende de esta coordenada, al considerar un comportamiento armónico, la presión  $p$  puede considerarse de la forma  $p = P e^{j\omega t}$ , donde  $j$  es la unidad imaginaria,  $P$  la amplitud compleja de la presión acústica y  $\omega$  la frecuencia angular, expresada como  $\omega = 2\pi f$ :

$$P(z) = P^+ e^{-jk_0 z} + P^- e^{jk_0 z} \quad (2.8)$$

donde  $P^+$  y  $P^-$  son las amplitudes complejas de las ondas progresivas y regresivas,  $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$  es el número de onda y  $c_0$  es la velocidad del sonido en el aire.

La expresión (2.8) muestra que la presión acústica en un punto es suma de una componente que avanza en el sentido de la propagación y de otra que viaja en dirección opuesta. La velocidad acústica viene dada por la expresión [76]:

$$V = \frac{1}{\rho_0 c_0} (P^+ e^{-jk_0 z} - P^- e^{jk_0 z}) \quad (2.9)$$

donde  $Z_0 = \rho_0 c_0$  representa la impedancia característica del fluido en el que se propaga la onda acústica (aire).

Retomando la expresión (2.8) y considerando que la presión es armónica  $P(z, t) = P(z)e^{j\omega t}$ , la presión de la onda incidente y reflejada pueden expresarse en forma reducida:

$$P_{\text{incidente}}(z) = Ae^{j(\omega t - k_0 z)} \quad (2.10)$$

$$P_{\text{reflejada}}(z) = Be^{j(\omega t + k_0 z)} \quad (2.11)$$

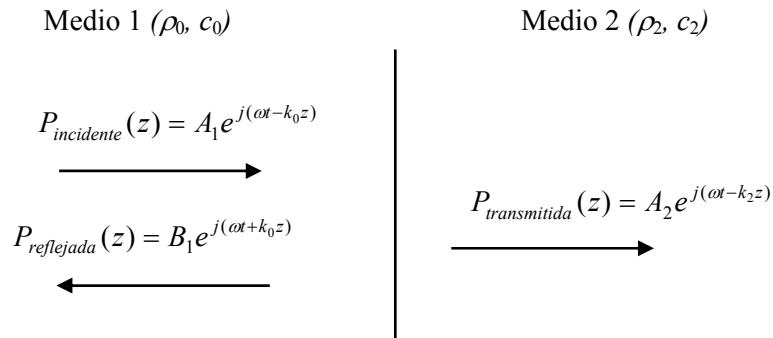


Figura 2.6.- Reflexión y transmisión de ondas planas en superficie plana.

El coeficiente de transmisión de presión  $\tau$  y reflexión  $r$  están definidos por las siguientes expresiones:

$$\tau = \frac{P_{\text{transmitida}}(z)}{P_{\text{incidente}}(z)} \Big|_{z=0} = \frac{A_2}{A_1} \quad (2.12)$$

$$r = \frac{P_{\text{reflejada}}(z)}{P_{\text{incidente}}(z)} \Big|_{z=0} = \frac{B_1}{A_1} \quad (2.13)$$

El coeficiente de absorción queda expresado como:

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (2.14)$$

y la impedancia acústica específica resulta:

$$Z_s = \rho_0 c_0 \frac{1+r}{1-r} \quad (2.15)$$

En la norma UNE–EN ISO 10534-2 [81] se indica el procedimiento para determinar el coeficiente de absorción acústica en incidencia plana aplicando el método de la función de transferencia.

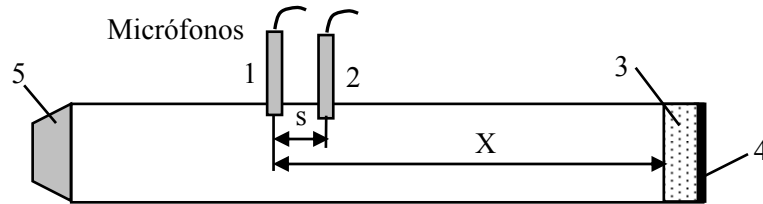


Figura 2.7.- Dispositivo experimental para el coeficiente de absorción.

En la Figura 2.7 se ilustran las posiciones de los micrófonos (1) y (2) y la muestra (3) en los ensayos en tubo de impedancia. La cara externa de la probeta (no expuesta a la onda acústica) incluye una terminación rígida (4). El altavoz (5) de membrana se ubica en la terminación opuesta al portamuestras (4). También se indica la separación entre micrófonos  $s$  y la distancia entre estos y la cara expuesta de la probeta  $X$ .

Siendo  $P_1$  y  $P_2$  las transformadas de Fourier de las presiones acústicas captadas en ambos micrófonos, la función de transferencia  $H_{12}$  desde la posición del micrófono 1 al 2 está definida por el cociente complejo:

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.16)$$

El tubo de impedancia debe ser macizo y no permitir la entrada de vibraciones de señales acústicas desde el exterior. En tubos metálicos se recomienda que el espesor sea aproximadamente el 5% del diámetro. Las frecuencias de trabajo para el tubo vienen determinadas por la frecuencia inferior  $f_{inf}$  que la determina el equipo de procesamiento de señal y la superior  $f_{sup}$  que evita la propagación de frecuencias no planas:

$$f_{inf} < f < f_{sup} \quad (2.17)$$

La condición para  $f_{sup}$  está dada por la expresión:

$$f_{sup}d < 0.58c_0 \quad (2.18)$$

donde  $d$  es el diámetro interior del tubo y probeta (m) y  $c_0$  es la velocidad del sonido en el aire (m/s).

La velocidad del sonido en el aire se determina mediante la condición:

$$c_0 = 343.2\sqrt{T/293} \quad (2.19)$$

siendo  $T$  la temperatura (K)

La distancia de separación entre micrófonos  $s$  se elige de manera que

$$f_{sup}s < 0.45c_0 \quad (2.20)$$

La frecuencia inferior depende de la separación entre micrófonos y la precisión del sistema de adquisición. Se recomienda que esta distancia debe ser superior al 5% de la longitud de onda de la frecuencia más baja.

La determinación de los coeficientes de reflexión y transmisión, número de onda e impedancia característica, pueden determinarse también con la técnica de las Dos Fuentes o de los 4 Micrófonos. Requiere instalar dos pares de micrófonos (1 y 2) que registran la presión acústica aguas arriba del elemento acústico a caracterizar, midiendo la presión acústica incidente, y el otro par de micrófonos (3 y 4) colocados aguas abajo registrando la presión acústica transmitida a través del elemento. Los micrófonos relacionan la medida de la función de transferencia entre la señal generada por el altavoz y la presión acústica de cada uno de ellos. Para evitar la reflexión de ondas en la terminación, la salida debe ser anecoica.

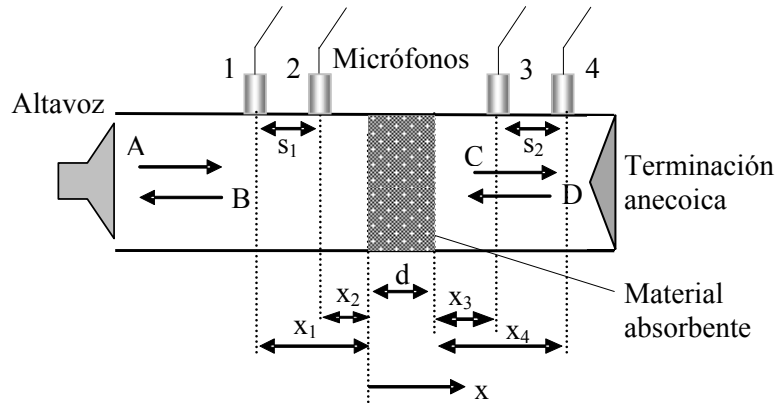


Figura 2.8.- Esquema de ensayo en el método de la matriz de transferencia.

La matriz de transferencia que relaciona la presión y velocidad en ambos lados del material absorbente es:

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

siendo  $P_1$  y  $P_2$  las presiones acústicas y  $V_1$  y  $V_2$  las velocidades acústicas. A, B, C y D son los coeficientes que representan los sentidos positivos y negativos de propagación de las ondas acústicas.

Los cuatro micrófonos registran las presiones acústicas  $P_1$  a  $P_4$  en cuatro localizaciones ( $x_1$  a  $x_4$ ):

$$P_1 = (Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1})e^{j\omega t} \quad (2.22)$$

$$P_2 = (Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2})e^{j\omega t} \quad (2.23)$$

$$P_3 = (Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3})e^{j\omega t} \quad (2.24)$$

$$P_4 = (Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4})e^{j\omega t} \quad (2.25)$$

donde  $k = \omega/c_0$  representa el número de onda del aire. Las presiones complejas  $P_1$  a  $P_4$  pueden descomponerse en dos ondas que viajan en el sentido positivo (onda progresiva) y negativo (onda regresiva) en la dirección del eje  $x$ , Figura 2.6. Los coeficientes de la matriz de transferencia son:

$$A = \frac{P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1}}{2 \operatorname{sen}[k(x_1 - x_2)]} \quad (2.26)$$

$$B = \frac{P_2 e^{-jkx_1} - P_1 e^{-jkx_2}}{2 \operatorname{sen}[k(x_1 - x_2)]} \quad (2.27)$$

$$C = \frac{P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3}}{2 \operatorname{sen}[k(x_3 - x_4)]} \quad (2.28)$$

$$D = \frac{P_4 e^{-jkx_3} - P_3 e^{-jkx_4}}{2 \operatorname{sen}[k(x_3 - x_4)]} \quad (2.29)$$

Particularizando la condición (2.21) para ambas caras del material, es decir,  $x=0$  y  $x=d$ :

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{Bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{Bmatrix}_{x=d} \quad (2.30)$$

$$P_{x=0} = A + B \quad (2.31)$$

$$U_{x=0} = \frac{A - B}{\rho_0 c_0} \quad (2.32)$$

$$P_{x=d} = C e^{-jkd} + D e^{jkd} \quad (2.33)$$

$$V_{x=d} = \frac{C e^{-jkd} - D e^{jkd}}{\rho_0 c_0} \quad (2.34)$$

donde  $\rho_0$  es la densidad ambiente del aire y  $c_0$  es la velocidad del sonido.

Por tanto, cuando las componentes de la onda son conocidas, basándonos en las medidas de la presión acústica compleja en las cuatro localizaciones, la presión y la velocidad de la partícula en las dos superficies de la muestra de material poroso pueden determinarse.

La expresión (2.30) representa dos ecuaciones con 4 incógnitas ( $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$  y  $T_{22}$ ), por lo que se requieren dos condiciones adicionales que pueden conseguirse, por ejemplo, haciendo una segunda medida tras cambiar la terminación del tubo de impedancia, lo que se conoce como método de las dos cargas.

Sin embargo, en lugar de hacer una segunda medida es posible aprovecharse de la naturaleza recíproca de una capa de material poroso homogéneo e isótropo para generar dos ecuaciones adicionales. Pierce [230] demostró que la reciprocidad requiere que el determinante de la matriz de transferencia sea la unidad. Allard [14] comprueba que esta condición se sigue directamente de la necesidad de que el coeficiente de transmisión de un sistema acústico plano sea igual en ambas direcciones. Es más, Pierce [230] remarca que para sistemas simétricos,  $T_{11} = T_{22}$  se puede ver fácilmente que la propiedad anterior se sigue cuando los coeficientes de reflexión de las dos superficies son los mismos. Por tanto, dada la reciprocidad y simetría, se tiene:

$$T_{11} = T_{22} \quad (2.35)$$

$$T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = 1 \quad (2.36)$$

Estas condiciones completan las cuatro ecuaciones necesarias para resolver los elementos de la matriz de transferencia.

Combinando las ecuaciones (2.30), (2.31) a (2.34) y (2.35) y (2.36), los elementos de la matriz de transferencia pueden expresarse directamente en términos de la presión y velocidad en las dos superficies de la capa de material poroso.

$$T_{11} = \frac{P_{x=d}V_{x=d} + P_{x=0}V_{x=0}}{P_{x=0}V_{x=d} + P_{x=d}V_{x=0}} \quad (2.37)$$

$$T_{12} = \frac{P_{x=0}^2 - P_{x=d}^2}{P_{x=0}V_{x=d} + P_{x=d}V_{x=0}} \quad (2.38)$$

$$T_{21} = \frac{V_{x=0}^2 - V_{x=d}^2}{P_{x=0}V_{x=d} + P_{x=d}V_{x=0}} \quad (2.39)$$

$$T_{22} = \frac{P_{x=d}V_{x=d} + P_{x=0}V_{x=0}}{P_{x=0}V_{x=d} + P_{x=d}V_{x=0}} \quad (2.40)$$

Para una muestra de espesor  $d$  y con terminación anecoica (D es despreciable frente a C en el conducto aguas abajo del material), considerando una onda plana de amplitud unitaria, la presión acústica y la velocidad acústica de la partícula en las dos superficies de la muestra de material poroso son:



$$P_{x=0} = 1 + R \quad (2.41)$$

$$V_{x=0} = \frac{1 - R}{\rho_0 c_0} \quad (2.42)$$

$$P_{x=d} = T e^{-jkd} \quad (2.43)$$

$$V_{x=d} = \frac{T e^{-jkd}}{\rho_0 c_0} \quad (2.44)$$

siendo  $R = \frac{B}{A}$  y  $T = \frac{C}{A}$  los coeficientes de reflexión y transmisión, respectivamente.

Considerando que la matriz de transferencia para incidencia normal de una capa de material poroso homogéneo e isótropo de espesor finito es

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kd & jZ \operatorname{sen} kd \\ \frac{j}{Z} \operatorname{sen} kd & \cos kd \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

donde  $Z$  es la impedancia característica del material,  $k$  es el número de onda y  $d$  es el espesor del material poroso, los cuatro elementos de la matriz de transferencia se pueden asociar directamente con propiedades acústicas del material poroso. En particular, el número de onda puede evaluarse como

$$k = \frac{1}{d} \arccos(T_{11}) \quad (2.46)$$

$$k = \frac{1}{d} \arcsen(\sqrt{-T_{21} T_{21}}) \quad (2.47)$$

y la impedancia característica se puede calcular directamente como

$$Z = \rho c = \sqrt{T_{12} / T_{21}} \quad (2.48)$$

Por tanto, conocidos  $k$  y  $Z$ , la velocidad compleja equivalente del fluido en el medio y la densidad compleja equivalente se pueden determinar mediante las expresiones:

$$c_{eq} = \frac{\omega}{k} \quad (2.49)$$

$$\rho_{eq} = \frac{Z}{c_{eq}} \quad (2.50)$$

Finalmente, el coeficiente de absorción puede conocerse mediante la expresión:

$$\alpha = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0}; \quad Z_s = -jZ \cot(kd) \quad (2.51)$$

### 2.3.2.- Resistividad al flujo

La propagación del sonido en un medio poroso puede ser descrita a partir de la dificultad que ofrece este material al paso de una corriente de aire: resistencia al flujo. Este parámetro aparece en todos los modelos matemáticos y es clave para conocer el comportamiento del material.

La resistencia al flujo de aire  $R_f$  está definida como el cociente entre la diferencia de presión en ambas caras de sección recta de un material y el caudal volumétrico  $q_v$  que atraviesa la muestra, es decir:

$$R_f = \frac{\Delta P}{q_v} \quad (2.52)$$

donde  $\Delta P$  es la diferencia de presión a través del espesor del material poroso entre las dos caras, en  $N/m^2$  y  $q_v$  es el caudal volumétrico que atraviesa la superficie de la muestra ( $m^3/s$ ).

La resistencia específica al flujo  $R_s$  se define como el cociente entre la diferencia de presión en ambos lados de la muestra y la velocidad del flujo. Siendo  $A$  la sección de paso se puede expresar mediante:

$$R_s = \frac{\Delta P}{v} = R_f \cdot A \quad (2.53)$$

La resistividad al flujo  $R$  o resistencia al flujo por unidad de longitud se expresa como la resistencia específica al flujo por unidad de espesor  $d$  del material, resultando:

$$R = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta P}{vd} \quad (2.54)$$

La norma UNE-EN 29053 [3] indica dos métodos para determinar la resistencia al flujo de aire de materiales porosos empleados para aplicaciones acústicas: un primer método con el empleo de un flujo de aire unidireccional y un segundo método con un flujo de aire alterno. El ensayo consiste en determinar la diferencia de presión en ambas caras de la probeta cuando es atravesada por una corriente de aire.

Puede encontrarse diversa documentación para determinar la resistividad de materiales porosos. En 1942, Brown y Bolt [53] presentan un trabajo pionero en la cuantificación de la resistividad en materiales porosos al hacer pasar un flujo de aire que será implementado en la medición según normativa. Dragonetti et al. [85] se basan en el segundo de los métodos propuestos por la norma UNE-EN 29053 empleando altavoces para generar un flujo alterno. La medición se realiza mediante micrófonos y el nivel de presión sonora se controla con el voltaje de alimentación del altavoz.

Otros trabajos, como Picard et al. [229] y Stinson y Daigle [274], hacen referencia a la analogía eléctrica. Estos métodos presentan la ventaja de realizar la medición rápidamente. En este último, se emplea el concepto de divisor de tensión, es decir, la resistencia de la muestra se obtiene por comparación con respecto a la resistencia conocida de un elemento de referencia colocado en serie con el sistema de medición. Sebaa et al. [254] resuelven el problema inverso para ondas reflejadas medidas mediante un sistema acústico, obteniendo valores próximos a los métodos tradicionales. Este método es simple, rápido y eficiente.

Una alternativa al uso de una corriente de aire para cuantificar la resistencia al flujo que ofrece un material es el método basado en el tubo de ondas estacionarias con dos micrófonos: Método de Ingard-Dear propuesto en 1985 [132]. La aplicación de esta metodología, Figura 2.9, se basa en suponer que la caída de presión en el interior del tubo es lo suficientemente pequeña para considerar que la velocidad del aire es igual en ambas caras de la probeta y que su espesor es mucho menor que la longitud de onda (suposición de que la velocidad es constante en el interior del material).

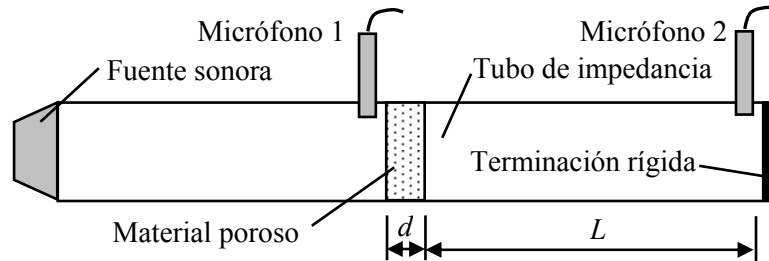


Figura 2.9.- Montaje experimental para resistividad al flujo.

Para Ingard y Dear, la condición de onda plana se cumple si la sección del tubo es pequeña comparada con la longitud de onda  $\lambda$ , es decir,  $\lambda \gg 1.7D$ , siendo  $D$  el diámetro del tubo y la distancia  $L$  entre la probeta y la terminación rígida debe ser:

$$L = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.55)$$

Los autores toman  $n=1$ , resultando que la distancia es  $L = \lambda/4$  para una frecuencia de 100 Hz.

La impedancia al flujo normalizada es [132]:

$$\frac{Z}{\rho_0 c_0} = \theta + j\chi = j \frac{1}{H_{12}} (-1)^{n-1} \quad (2.56)$$

siendo  $\rho_0$  la densidad del aire y  $c_0$  la velocidad de la onda en el tubo.

Despejando la parte real e imaginaria queda:

$$\theta = j \operatorname{imag} \left( \frac{1}{H_{12}} \right) = \operatorname{imag} \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \quad (2.57)$$

$$\chi = \operatorname{real} \left( \frac{1}{H_{12}} \right) (-1)^{n-1} = \operatorname{real} \left( \frac{p_1}{p_2} \right) (-1)^{n-1} \quad (2.58)$$

En frecuencias bajas, la reactancia es pequeña comparada con la resistencia al flujo (parte real), por lo que:

$$\theta = \left| \frac{p_1}{p_2} \right| = \left| \frac{1}{H_{12}} \right| \quad (2.59)$$

Considerando los niveles de presión  $L_p$  queda:

$$L_{p_1} - L_{p_2} = 20 \log \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \quad (2.60)$$

Por tanto, a partir de la medición de la presión sonora en los puntos 1 y 2 (Figura 2.9) en las frecuencias de resonancia indicadas, la resistencia al flujo normalizada es:

$$\theta \approx 10^{\left( \frac{L_{p_1} - L_{p_2}}{20} \right)} \quad (2.61)$$

La caída de presión y la velocidad del flujo son complejas, por tanto, la resistencia al flujo también es un número complejo. Según Ingard-Dear esta relación es la impedancia al flujo, siendo la parte real la resistencia al flujo y la parte imaginaria la reactancia al flujo.

### 2.3.3.- Porosidad

Los materiales porosos (fibrosos o de estructura rígida) están formados por partículas en contacto que dejan volúmenes interconectados de aire entre ellas. Cuando una onda acústica atraviesa estos materiales y entra en contacto con estos huecos, el aire de su interior es obligado a moverse, transformándose parte de la energía acústica en calor. Uno de los elementos que resultan determinantes para estudiar y caracterizar el comportamiento acústico de un material es la porosidad.

La porosidad  $\phi$  expresa el porcentaje de volumen de aire  $V_a$  retenido en las oquedades del material con respecto al volumen total del material  $V_T$ , siendo un parámetro adimensional. El volumen total de la muestra está formado por el volumen generado por los huecos interconectados de aire (poros abiertos) y el volumen que ocupa la estructura del material  $V_e$ . En tal caso, la porosidad puede expresarse mediante la condición:

$$\phi = \frac{V_a}{V_T} = \frac{V_a}{V_a + V_e} \quad (2.62)$$

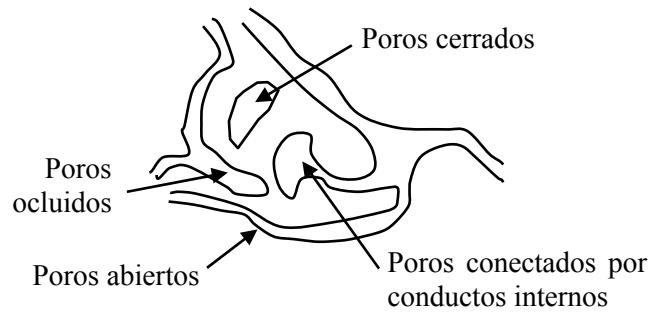


Figura 2.10.- Tipos de poros en un material.

Un material puede incluir poros no interconectados que constituyen los poros cerrados. En este caso, las ondas acústicas no pueden acceder a estas cavidades, por lo que no son de interés en los efectos de atenuación y propagación. Por tanto, en la determinación del volumen total solamente deben considerarse los poros abiertos, constituyendo la porosidad abierta.

La revisión bibliográfica sobre la determinación de la porosidad ofrece diversa documentación y distintas técnicas de estudio. Así, por ejemplo, Champoux et al. [61] se basan en el trabajo pionero de Beranek de 1942 y propone una metodología en que el material poroso se introduce en una cámara sellada. Con un pistón se produce un cambio de volumen que provoca un incremento de presión. A partir de la ley de gases ideales se determina el volumen de aire en los poros abiertos.

Otros autores se basan en métodos acústicos para determinar la porosidad y tortuosidad en materiales de estructura rígida, empleando técnicas de ultrasonidos con frecuencias alrededor de 12 kHz y ancho de banda entre 3 y 20 Hz. En Umnova et al. [293], la porosidad se determina a partir del límite de alta frecuencia de la velocidad de fase y la tortuosidad, que depende de la porosidad, a partir del límite de altas frecuencias del coeficiente de reflexión. Este planteamiento requiere el

ajuste de las funciones  $\frac{c_0}{c(\omega)}$  y el coeficiente de reflexión a la forma:

$$g(f) = a_1 + a_2 \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (2.63)$$

siendo  $\omega=2\pi f$  la frecuencia angular,  $c_0$  la velocidad del sonido en el aire,  $c(\omega)$  la compresibilidad compleja y  $a_1$  y  $a_2$  términos independientes y con ello determinar los términos independientes, resultando las siguientes expresiones para la porosidad y tortuosidad:

$$\phi = \frac{1-a_1}{1+a_1} \sqrt{T} \quad (2.64)$$

$$T = a_1 \quad (2.65)$$

Siguiendo con el uso de técnicas por ultrasonidos, los trabajos de Fellah et al. ([93] y [94]) emplean un modelo temporal de los efectos de dispersión de ondas transitorias y determinan simultáneamente la porosidad, tortuosidad y longitudes características térmicas y viscosas en materiales de estructura rígida, mediante el análisis de la onda reflejada. Este autor en el trabajo de 2013 [95] determina estos parámetros de forma simultánea mediante una técnica mejorada con una onda incidente normal a la muestra y sin considerar la onda reflejada. Otro planteamiento similar se muestra en Sadouki et al. [245] empleando solo las ondas transmitidas en un dominio temporal para determinar la porosidad con las ondas transmitidas en ultrasonidos y obteniendo la longitud característica térmica independientemente de la longitud viscosa. Este método es rápido y no necesita saturar el material con ningún gas.

Otros autores, como Salissou y Panneton [250] determinan la porosidad abierta a partir de la medición de masas en un recipiente cerrado con cuatro ensayos diferentes: 2 ensayos con la muestra a baja presión y 2 con alta presión. Si la presión final se obtiene lentamente y las condiciones ambientales no varían, pueden suponerse condiciones isoterma. En este caso, a partir de la Ley de gases ideales, la porosidad queda:

$$\phi = 1 - \frac{RT}{V_T} \left( \frac{M_2 - M_1}{P_2 - P_1} - \frac{M_4 - M_3}{P_4 - P_3} \right) \quad (2.66)$$

siendo  $M_1$  la masa del recipiente a baja presión,  $M_2$  la masa del recipiente a alta presión,  $M_3$  la masa del conjunto recipiente-probeta a baja presión y  $M_4$  la masa del conjunto recipiente-probeta a alta presión.

La porosidad puede determinarse mediante un ensayo en estereopícnómetro: pueden ser con intrusión de Mercurio o Helio, aunque su desventaja es la necesidad

de equipamiento específico. En este caso, la porosidad se obtiene con la densidad real  $\rho_{real}$  y aparente de la probeta  $\rho_{ap}$  :

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (2.67)$$

La muestra se introduce en la cámara y se somete a vacío. A continuación se rellena con una cantidad conocida de gas. Seguidamente se aplica presión al gas de forma progresiva para que se introduzca en el material y posteriormente la extrusión (expulsión del gas desde el material) a medida que se reduce la presión. A bajas presiones el gas entra en los conductos porosos de mayor tamaño (cambio pequeño de volumen del gas). Al aumentar la presión el gas se introduce en los poros de menor tamaño y se produce una reducción del volumen. Esta técnica se emplea para materiales porosos de 1 a 2 mm y presiones de  $4 \cdot 10^{-3}$  a 414 MPa [170]. Maderuelo et al. [171] emplean esta metodología sobre materiales granulares formados por partículas sueltas de corcho.

Otras técnicas más sencillas recurren al empleo de métodos volumétricos. Consisten en rellenar los poros con un fluido incompresible y de densidad conocida: habitualmente agua. Conociendo el peso (o volumen) de agua introducido en la estructura rígida del material poroso, la obtención de la porosidad es inmediata, expresión (2.62). En este sentido, los trabajos de Neithalath et al. ([204] y [205]) sobre el estudio de la generación de ruido y la influencia del tipo de textura y superficie en pavimentos de carreteras construidas con hormigón y Sumanasooriya et al. [277] emplean este tipo de técnica. En estos trabajos las probetas cilíndricas se sumergieron en agua durante 24 horas para saturar los poros y la matriz. Después de este tiempo se extraen del agua y se dejan escurrir para obtener una superficie saturada seca. Estas muestras se encierran en una membrana de látex y se sellan con una placa metálica en su base y se obtiene la masa del conjunto  $M_1$ . A continuación se vierte agua hasta enrasar el plano superior de la probeta. Esto asegura que todos los poros interconectados se encuentran saturados. Nuevamente se pesa este sistema junto con el agua  $M_2$ . La diferencia entre estas masas  $\Delta M = M_2 - M_1$  representa la masa de agua en los poros. Convirtiendo esta masa en volumen y expresándose en porcentaje del volumen total del espécimen determina la porosidad.

Vasina et al. [297] emplean un método de saturación de agua en el que por diferencia de la masa de la muestra saturada y sin saturar, se determina la porosidad de forma inmediata. En primer lugar, con el objetivo de eliminar las



burbujas de aire en su interior, las muestras se introducen en una estufa a 70 °C durante 10 días. Pasado este tiempo se pesa la muestra en seco  $m_{seca}$ . A continuación, se introduce en un recipiente cubriéndose completamente con agua y se hace el vacío, dejándose un tiempo suficiente (alrededor de 24h) para que el agua se introduzca en el interior de los poros y se retira y pesa nuevamente obteniendo  $m_{saturada}$ . La porosidad abierta o conectada se obtiene mediante la expresión:

$$\phi = \frac{V_{saturada}}{V_T} \quad (2.68)$$

donde  $V_{saturada}$  es el volumen de agua en la muestra saturada y  $V_T$  es el volumen de la muestra.

El agua que contiene el material poroso se determina mediante la fórmula:

$$V_{saturada} = \frac{m_{saturada} - m_{seca}}{\rho_{agua}} \quad (2.69)$$

Esta metodología se emplea en materiales reciclados de triturados de neumáticos [174], materiales de reciclado de resinas de poliuretano y caucho [173] y fibras de triturado de neumático fuera de uso [172].

Otro planteamiento para estudiar la porosidad en materiales granulares es el tratamiento y análisis de imagen. Wightman et al. [309] analizan la estructura porosa de mezclas granulares, obteniendo parámetros estadísticos: media, varianza y desviación estándar. El estudio de las imágenes de muestras ofrece información interesante sobre la morfología de las partículas o la orientación de los granos. Estos datos son muy útiles en procesos de control durante la fabricación. Fonseca et al. [100] emplean las imágenes digitales para determinar la orientación de los granos.

La porosidad por tratamiento de imágenes 2D se determina en el trabajo de Sumanasooriya et al. [277] sobre probetas de hormigón. En este caso se realizan varios cortes de las muestras que sean representativos de la estructura 3D para la adquisición de las imágenes. La porosidad representa la fracción de área de los poros. En este trabajo se compara el método volumétrico con un tratamiento de imágenes y se concluye que el error entre ambas porosidades es menor del 15%. También se emplea el tratamiento de imágenes para cuantificar la porosidad en Martin et al. [185] donde se emplea Matlab como software de tratamiento de

imágenes. En este caso se recurre a tratar con color de contraste las partes internas y la cara frontal de las probetas para asegurar el contraste entre la estructura y los poros. Sevostianova et al. [257] realiza un tratamiento de imagen obtenida en microscopio con el software ImageJ para comparar la tortuosidad obtenida mediante conductividad eléctrica. La ventaja de este software radica en que es de dominio libre y permite cuantificar otros parámetros de caracterización de los granos-poros, como son las áreas individualizadas de grano y poro, distribución estadística de estas áreas, perímetros y esfericidad, entre otros. Para que el tratamiento sea efectivo es muy importante que la adquisición de la imagen se realice con la mayor calidad posible y se disponga de contraste suficientemente claro y definido entre el área de los poros y la estructura.

A partir de imágenes tomadas en cámara fotográfica, un modo de determinar estos parámetros es mediante la marcación del contorno de los granos empleando las herramientas que incluyen los programas de dibujo. Esto es un proceso muy costoso y laborioso en cuanto a tiempo y resultados. Como alternativa se dispone de múltiples programas de análisis de imágenes. Disciplinas tan diversas como la biología y medicina para el tratamiento de células, la ingeniería de materiales para el estudio de aleaciones y materiales compuestos, la informática de sistemas y computación para el estudio de la visión por computador, emplean programas informáticos para el tratamiento y procesado de imágenes. Pueden encontrarse herramientas informáticas que requieren licencias con diversidad de precios. En algunas ocasiones es necesario proceder a una programación de las instrucciones necesarias para la obtención de los resultados, como es el caso de la herramienta Matlab, siendo una herramienta muy extendida. Sin embargo, también puede encontrarse software específico para tratamiento de imágenes.

Se ha realizado una revisión del software específico disponible, evaluando las ventajas en el procesado y las condiciones de uso. Algunos programas disponibles son Visiolog, ImagePro y Metamorph. La mayoría del software requiere licencia para su empleo siendo escasos los programas de licencia libre. Uno de estos programas de dominio público es el ImageJ desarrollado por National Institutes of Health que ofrece múltiples ventajas: incluye pluggins Java y macros que puede ser programados mediante instrucciones personalizadas por el usuario.

## 2.3.4.- Tortuosidad

Este parámetro adimensional representa las características internas del esqueleto de los materiales porosos absorbentes, estando relacionado con la porosidad, morfología de los poros, variación de la sección recta del poro y las derivaciones y conexiones con otros poros. La tortuosidad fue introducida por Zwikker y Kosten en 1949 [321] en el análisis de la propagación acústica en poros alineados, introduciendo el factor de estructura  $k_s$  que representa la inclinación de los poros (considerados como tubos) con respecto a la dirección de propagación del sonido y posteriormente por Carman ([54] y [55]), como un término para definir la dificultad (sinuosidad) al paso del fluido por el interior del material. [242]

$$k_s = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \quad (2.70)$$

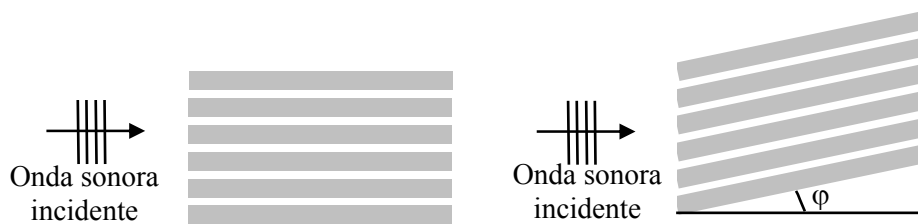


Figura 2.11.- Modelo de Zwikker y Kosten para la tortuosidad.

La determinación de la tortuosidad a partir de modelos matemáticos para materiales porosos resulta desapropiada en la práctica ya que el entramado interno de conductos es imposible de conocer. Entre los métodos experimentales se tiene el trabajo de Johnson et al. [136] en el que se obtiene la tortuosidad mediante métodos acústicos empleando el índice de refracción del Helio. Otras técnicas emplean los ultrasonidos para determinar la tortuosidad en materiales porosos en el aire. Uno de los primeros trabajos es el de Allard et al. [15] en espumas. Posteriormente Mooussatov et al. [198] emplean esta metodología para probetas en cámara a presión. También pueden encontrarse trabajos que proponen modelos para cuantificar la tortuosidad en suelos, Sun et al. [278]. El ensayo se fundamenta en relacionar el paso de corriente que ofrece el material poroso al estar inmerso en un fluido conductor con el paso de un flujo de aire al atravesar el material. En el trabajo de Rodríguez [242] se emplea esta metodología en su estudio sobre caucho granular. Sin embargo, en ausencia del equipo necesario puede determinarse de un modo más accesible.

La metodología extendida para determinar este parámetro se basa en la analogía entre las propiedades acústicas y las eléctricas de materiales granulares no conductores de Brown [52] sobre rocas y suelos de carácter arcilloso. Esta técnica también es empleada por otros autores: Champoux y Stinson [60], Maderuelo et al. ([174] y [173]) y Pfretzschner et al. [228] sobre materiales procedentes de reciclado de neumáticos o corcho [171]. En el trabajo de Sevostianova et al. [257] se determina la tortuosidad microestructural a partir del campo acústico con electrolito y se compara con un análisis en software de tratamiento de imágenes.

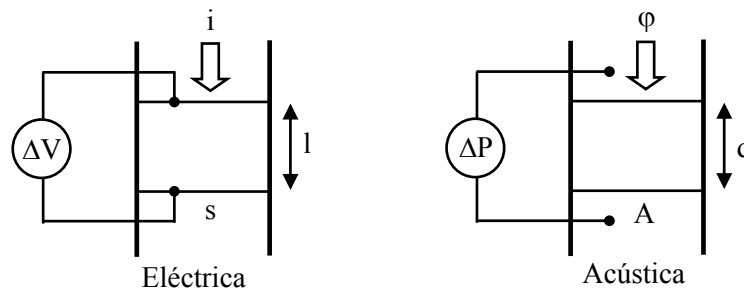


Figura 2.12.- Similitud eléctrico-acústica para determinar la tortuosidad.

La diferencia de presión entre las dos caras de una muestra de un material poroso que es atravesada por un flujo de aire es [242]:

$$\Delta P = R\varphi \quad (2.71)$$

donde  $R$  es la resistencia que muestra el material al paso del flujo de aire y  $\varphi$  es el flujo de aire.

Teniendo en cuenta la similitud con el campo eléctrico, la diferencia de tensión  $\Delta V$  entre ambos lados de la muestra producirá un paso de corriente eléctrica  $I$ , para una resistencia eléctrica del material  $R_{elec}$

$$\Delta V = R_{elec}I \quad (2.72)$$

Partiendo de las definiciones de intensidad de corriente  $i$ , conductividad  $\nu_{elec}$  y campo eléctrico  $E$ , para una sección del material  $s$  y un espesor  $d$  resulta:

$$i = \frac{I}{s} \quad (2.73)$$

$$v_{elect} = \frac{i}{E} \quad (2.74)$$

$$E = \frac{V_B - V_A}{d} \quad (2.75)$$

Operando sobre las expresiones anteriores, la resistencia eléctrica queda [242]:

$$R_{elect} = \frac{1}{v_{elect}} \frac{d}{s} = \rho_{elect} \frac{d}{s} \quad (2.76)$$

siendo  $\rho_{elect}$  la resistividad eléctrica.  $A$  y  $s$  son las secciones y  $l$  y  $d$  son el espesor en cada caso.

Por lo tanto, teniendo en cuenta la analogía eléctrica y acústica se tiene [242]:

$$\text{Campo eléctrico} \quad \Delta V = \left( \rho_{eléct} \frac{d}{s} \right) I \rightarrow \rho_{eléct} = \frac{\Delta V}{I} \frac{d}{s} \quad (2.77)$$

$$\text{Campo acústico} \quad \Delta P = \left( \rho_{acúst} \frac{d}{s} \right) \varphi \rightarrow \rho_{acúst} = \frac{\Delta P}{\varphi} \frac{d}{s} \quad (2.78)$$

La metodología seguida es hacer pasar una corriente que circula a través del electrolito con el material insertado entre los dos electrodos y medir la diferencia de tensión. Posteriormente se repite el ensayo sin el material absorbente. La expresión para determinar la tortuosidad  $\alpha_\infty$  es [52]:

$$\alpha_\infty = \frac{\rho_{mat}}{\rho_{elect}} \phi \quad (2.79)$$

con  $\rho_{mat}$  la resistividad eléctrica con material y electrolito,  $\rho_{elect}$  la resistividad eléctrica del electrolito y  $\phi$  la porosidad.

Las resistividades están relacionadas con la resistencia eléctrica y dependen de la superficie de los electrodos  $s$  y su separación  $d$ .

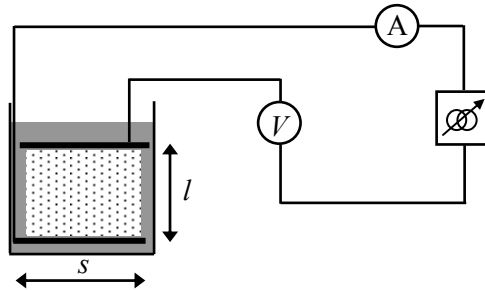


Figura 2.13.- Montaje para determinar la tortuosidad.

$$\rho_{mat} = R_{mat} \frac{s}{d} \quad \rho_{elec} = R_{elect} \frac{s}{d} \quad (2.80)$$

Manteniendo la distancia de separación entre los electrodos y teniendo en cuenta que la sección no cambia en los dos ensayos, la tortuosidad puede determinarse directamente a partir de la resistencia eléctrica:

$$\alpha_{\infty} = \frac{R_{mat}}{R_{elect}} \phi \quad (2.81)$$

Estas resistencias corresponden a la pendiente de una representación gráfica experimental de la variación de la tensión con la intensidad. Para ello se requiere una fuente de alimentación con regulación de la tensión suministrada.

### 2.3.5.- Área específica

En el estudio de materiales granulares es importante conocer el área específica, definida como el área superficial del poro interno por unidad de masa del sólido. El área superficial se obtiene a partir de la cuantificación del trabajo necesario en elevar un fluido por capilaridad y es coincidente con el producto  $PdV$  ( $P$  es la presión y  $dV$  es la variación de volumen)

$$dW = \sigma_a \cos \theta dA = PdV \quad (2.82)$$

Integrando esta expresión para el volumen total, el área específica resulta

$$S = \frac{1}{\sigma_a \cos \theta} \int_0^{V_{total}} PdV \quad (2.83)$$

siendo  $\sigma_a$  la tensión superficial entre aire y agua (N/m),  $dA$  el área mojada por líquido en el poro ( $m^2$ ) y  $\theta$  el ángulo de contacto entre granos. Se considera  $\theta=0$ .

El área específica  $S_s$  se determina dividiendo el área total  $S$  por la masa  $m$  de la probeta:

$$S_s = \frac{S}{m} \quad (2.84)$$

Aplicando la ley de capilaridad, la diferencia de presión está relacionada con el radio de curvatura mediante la expresión:

$$\Delta P = \frac{2\sigma_a \cos\theta}{r} \rightarrow r = \frac{2\sigma_a \cos\theta}{\Delta P} \quad (2.85)$$

Los estudios geofísicos y de propagación del sonido, sugieren que en muchos materiales granulares el tamaño medio de poro y su desviación típica son parámetros importantes en la caracterización acústica de materiales porosos. La desviación típica del tamaño de poro  $\sigma$  representa la dispersión del tamaño de poro respecto del tamaño medio y es un indicador de la distribución de los poros. La desviación estándar se puede determinar mediante un ajuste teórico de distribución del tamaño de poro obtenida a partir del método de succión de agua propuesto por Leclaire et al. [160] mediante la integración de la función de densidad log-normal con la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$FDP(\varphi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(\varphi-\langle\varphi\rangle)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (2.86)$$

siendo  $s$  el tamaño de poro en unidades estándar obtenidas a partir del ensayo experimental.  $\varphi$  y el valor medio  $\langle\varphi\rangle$  están definidos con las expresiones:

$$\varphi = -\log_2 s \quad (2.87)$$

$$\langle\varphi\rangle = -\log_2 \langle s \rangle \quad (2.88)$$

El área específica se determina a partir de un método no acústico y que es aplicable a gran número de materiales sin considerar la forma del poro. El método experimental propuesto por Leclaire et al. en 1998 [160] consiste en determinar la cantidad de agua extraída del interior de una muestra porosa para distintas presiones hidráulicas. Los niveles de presión se determinan variando la altura  $H$

entre la cara superior de la muestra y el extremo de salida del conducto de evacuación mediante la expresión de mecánica de fluidos, con  $\rho_a$  la densidad del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ):

$$P = \rho_a g H \quad (2.89)$$

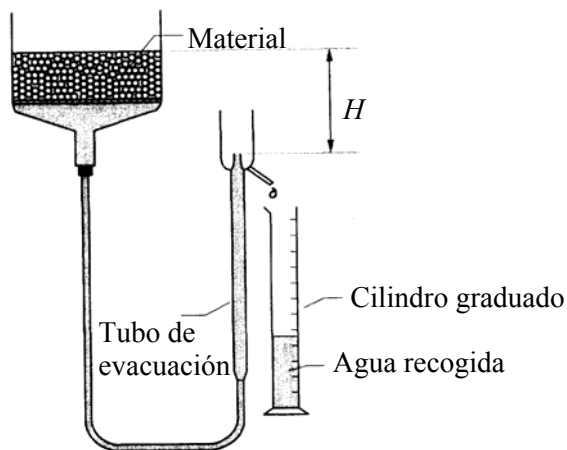


Figura 2.14.- Montaje experimental propuesto por Leclaire et al. [160].

Los resultados obtenidos por este autor sobre elementos esféricos de vidrio suelto indican que el agua remanente en las muestras después del ensayo es inferior al 15% en el peor de los casos.

#### 2.4.- **ESPESOR DE AGLUTINANTE**

La determinación de la cantidad de ligante es crítica para obtener muestras de suficiente resistencia para ser manipuladas con cierta tranquilidad. En el trabajo de Swift et al. [280] se determina el espesor de ligante para resinas en materiales procedentes de triturado de neumático. La expresión matemática que relaciona las masas de material virgen y aglutinante y espesor viene dada por:

$$m_b = m_s \frac{\rho_b}{\rho_s} \left[ \left( 1 + \frac{x}{r_n} \right)^3 - 1 \right] \quad (2.90)$$



siendo  $m_b$  la masa del adhesivo,  $m_s$  la masa del material base,  $r_n$  el radio del grano y  $x$  el espesor del adhesivo.

En el caso de considerar las partículas con forma esférica de radio  $r_n$ , el volumen de aglutinante en cada partícula es  $\frac{4}{3}\pi[(r_n + x)^3 - r_n^3]$ .

## 2.5.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este apartado se ha presentado la situación mediambiental a que se enfrentan los ciudadanos en el entorno habitual o industrial, donde es evidente la necesidad de emplear materiales que sean capaces de reducir el nivel sonoro, según el tipo de entorno que se considere. Para el estudio que se lleva a cabo en esta Tesis Doctoral es necesario conocer los parámetros que relacionan el comportamiento de un material poroso desde un punto acústico con las características del propio material. Previamente se describen los principios de propagación y transmisión del sonido y las propiedades acústicas de los materiales absorbentes y se introducen parámetros de caracterización en acústica como la impedancia, así como las expresiones que definen el campo de presiones y velocidad en la perturbación de una partícula. También se definen otros parámetros no acústicos que caracterizan un material poroso, como son la resistencia al flujo, porosidad, tortuosidad y el área específica. Se describen las diversas metodologías y técnicas que pueden emplearse para cuantificar experimentalmente estos parámetros y que serán útiles para caracterizar los materiales desarrollados en este estudio. Se definen los coeficientes de transmisión, reflexión y absorción. Estos parámetros dan información de la calidad de un material en lo referente a la absorción acústica. Este último coeficiente permitirá comparar la respuesta acústica que presentan los materiales analizados en esta Tesis Doctoral.



## **Capítulo 3.- Modelos acústicos de materiales porosos.**

*En este capítulo se abordan las metodologías de predicción de la respuesta acústica para materiales granulares de matriz rígida. En primer lugar se hace una descripción detallada de la formulación de los modelos matemáticos. Esto permite conocer la dependencia de cada modelo con respecto a propiedades y parámetros que deben determinarse experimentalmente con el correspondiente ensayo en laboratorio o bien de forma indirecta. El modelo matemático seleccionado requiere conocer tan solo cuatro parámetros del material poroso y se comparará posteriormente con resultados experimentales con el fin de valorar su nivel de ajuste para los materiales granulares estudiados en esta Tesis Doctoral.*



### **3.1.- INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS**

El interés por estudiar los materiales porosos aparece en la década de los años 50 del siglo XX, basándose en estudios realizados por Rayleigh en 1877, [242]. Estas teorías se centraban en analizar los mecanismos internos que generan absorción en los materiales fibrosos y se aplicaban los fundamentos de las leyes de la hidrodinámica a modelizaciones en forma de tubos capilares. En 1949, Zwikker y Kosten, obtienen un primer modelo analítico que será completado y desarrollado con expresiones empíricas para muestras de materiales fibrosos [72].

Los estudios sobre propagación en materiales de carácter granular se inician en el campo de la Geofísica aplicando al teoría de Biot [44] sobre la propagación de ondas en medios porosos en la inspección de los fondos marinos para determinar su composición. Con el inicio de la contaminación acústica en los años 60 y 70 hasta niveles sonoros preocupantes, aparece el interés por los medios granulares en acústica. Sin embargo, las teorías desarrolladas hasta el momento (teorías para materiales fibrosos) no justifican el comportamiento de este tipo de material. En los inicios de los años 80, Attenborough ([25] y [26]) adapta las teorías geofísicas a los materiales porosos [242].

La mayoría de las teorías de materiales porosos se centran en los mecanismos de propagación desde un punto de vista global, sin tener en cuenta la granulometría y su efecto sobre la absorción acústica. La caracterización acústica de los materiales requiere determinar parámetros como el coeficiente de absorción, impedancia acústica, coeficiente de reflexión y transmisión, porosidad, tortuosidad o la resistividad al flujo. Existen diferentes metodologías para determinar estos parámetros.

Los métodos directos se basan en definiciones matemáticas de estos parámetros necesitando equipamiento específico para cuantificar estos parámetros y que en la mayoría de los casos no es accesible para los grupos de investigación por su elevado precio [84]. Uno de los primeros trabajos para la medición de la impedancia acústica es el presentado por Beranek en 1942, [40]. Estos métodos requieren dos propiedades intrínsecas del material: densidad efectiva y módulo resistente, que dependen de la porosidad [250], resistividad al flujo [274], tortuosidad [52] y longitud característica térmica  $\Lambda'$ . Las metodologías para determinar estos parámetros se basan en mediciones en tubo de impedancia o ultrasonidos [84].

Una alternativa a este planteamiento es el uso de modelos de predicción que relacionan parámetros del material con las mediciones acústicas en tubo de impedancia o ultrasonidos. Estos pueden dividirse en Métodos indirectos e inversos. Los Métodos indirectos están basados en modelos acústicos que correlacionan las propiedades no acústicas con las mediciones acústicas. Este planteamiento se aplica en los trabajos de Panneton y Olny [221], Olny y Panneton [216], Allard et al. [15] y Leclaire et al. [158]. Los Métodos inversos están basados en un problema de optimización en el que los parámetros desconocidos se ajustan en el modelo para reproducir las mediciones acústicas en tubo de impedancia. Generalmente se modela el coeficiente de absorción o la impedancia característica. Ejemplos de métodos inversos son los trabajos de Doutres et al. [84] y Fellah et al. [92] y Atalla y Panneton [23], Ramis et al. [236] y Alba et al. [10] para materiales fibrosos.

Los parámetros empleados en los modelos para describir el comportamiento acústico y fibroso en materiales porosos se dividen en parámetros no-acústicos (porosidad, resistividad estática, tortuosidad) que relacionan la interconexión entre la fase sólida y el fluido y los parámetros elásticos o vibro elásticos (módulo de Young, coeficiente de Poisson) que solo dependen de la fase sólida.

Cuando una onda acústica atraviesa un material poroso se puede considerar que el esqueleto del material entra en movimiento con la onda o queda en reposo. En el primer caso, la dinámica de las ondas queda descrita por la teoría de Biot [44]. Cuando el fluido de transmisión de las ondas es el aire, las vibraciones de la matriz porosa pueden despreciarse y puede considerarse que el sonido solo se propaga por el aire. Este caso es descrito por el modelo de fluido equivalente y es un caso particular de la teoría de Biot. La interacción fluido-estructura depende [246] de la tortuosidad dinámica del medio  $\alpha(\omega)$  introducida por Johnson et al. [135] (posteriormente revisada por Pride et al. [232]), Lafarge [153] y Lafarge et al. [152]) y la compresibilidad dinámica del aire en el material poroso  $\beta(\omega)$  propuesta por Allard [14], Lafarge [153] y Lafarge et al. [152]. En el dominio de frecuencias, estos factores multiplican la densidad del fluido y su compresibilidad, respectivamente, y representa la desviación del comportamiento libre del fluido con el aumento de la frecuencia [93].

Los modelos de propagación del sonido en materiales porosos pueden clasificarse en tres tipos.

- Los modelos basados en la teoría de Biot (modelos difásicos) justifican correctamente la propagación acústica en el material y en el aire dentro de un

material poroso, pero necesita determinarse gran número de parámetros para la fase sólida y fluida.

- Modelos de fluido equivalente, en el que bajo ciertas condiciones de frecuencia de excitación, el material poroso no es afectado por la vibración acústica y permanece inmóvil.

- En los modelos de sólido equivalente y en ciertas condiciones de excitación acústica, no existe propagación de las ondas acústicas en el fluido.

A frecuencias bajas, los modelos de Biot se ajustan al comportamiento acústico del material, ya que las ondas pueden propagarse en el material y en el fluido. La frecuencia en la que se igualan los efectos inerciales de la matriz porosa con los efectos viscosos de la fase fluido se denomina frecuencia de desacoplamiento de fase. A frecuencias superiores a esta frecuencia de desacoplamiento, las ondas en el fluido no producen excitación sobre la matriz porosa, Zwikker y Kosten [321], por lo que puede considerarse que no hay interacción entre el fluido y el material, que permanece inmóvil (modelos de esqueleto rígido). En este caso, los efectos debidos a la rigidez del material pueden despreciarse frente a los efectos inerciales. Esta frecuencia de desacoplamiento es [321]:

$$f = \frac{\sigma\phi^2}{2\pi\rho} \quad (3.1)$$

siendo  $\sigma$  la resistividad estática del aire,  $\phi$  la porosidad y  $\rho$  la densidad del material.

Cuando un material tiene un peso o espesor mucho mayor que el aire y es excitado por una onda acústica en una frecuencia mucho mayor que la frecuencia de desacoplamiento de fase, el material puede considerarse como rígido e inmóvil. En este caso, las expresiones para la densidad másica equivalente  $\rho_{eq}$  y módulo de rigidez dinámico  $K$  dependen de la frecuencia y forma del poro.

Los primeros desarrollos teóricos para caracterizar acústicamente un material poroso se deben a Rayleigh en 1877 y a Zwikker y Kosten en 1949, que parten de las ecuaciones de continuidad, movimiento y estado de un fluido en la propagación de una onda sonora [242]. Posteriormente, Attenborough [25] realiza un resumen de las teorías en materiales porosos [242]. Los modelos teóricos para el estudio de

la propagación de las ondas acústicas en un medio poroso se establecen en dos categorías: modelos fenomenológicos y micro estructurales.

En los modelos fenomenológicos, el material poroso se trata globalmente como un fluido incompresible con disipación de la energía en el interior de los poros por medio viscoso (viscosidad del fluido al atravesar los poros) y térmico (intercambio entre fluido y matriz). En el caso de los modelos microestructurales se tiene en consideración la forma de los poros para analizar la propagación del sonido en cada poro individual y posteriormente se extiende a todo el volumen [242].

### **3.2.- MATERIALES POROSOS DE MATRIZ RÍGIDA**

Habitualmente se emplean materiales fibrosos (espumas o fibras) como materiales absorbentes acústicos, por lo que es muy abundante la información técnica y estudios de su comportamiento. Por el contrario, la documentación sobre materiales granulares es más reducida y la mayoría de los trabajos se basan en las investigaciones de Zwicker y Kosten, de 1949 y Biot de 1956 aplicadas a la propagación de ondas elásticas en medios porosos saturados de un fluido. En estos modelos matemáticos, las estructuras de los poros se modelan con formas simples (esferas, cilindros o geometrías simples) [228].

Siguiendo la Teoría de Biot, la propagación acústica se realiza con 3 ondas en el material: dos ondas de compresión (una en la fase fluida y otra en la fase sólida del material) y una onda transversal en la fase sólida del material. En una excitación acústica, la fase sólida puede considerarse acústicamente rígida, por tanto, solo la onda de compresión, definida por la ecuación de Hemplholtz se propaga en la fase fluida. El medio poroso puede considerarse como un fluido equivalente con densidad efectiva equivalente y rigidez equivalente que atenúan la onda de compresión en disipación viscosa y térmica. Según Kriiger y Quickert [150], a nivel macroscópico, esta pérdida acústica está relacionada con 5 parámetros: porosidad, resistividad al flujo, tortuosidad y longitudes características viscosa y térmica. Para definir correctamente el comportamiento acústico, Venegas y Umnova [298], se tiende a incluir también el efecto de la porosidad microestructural de los granos.



En el caso de los modelos de esqueleto rígido en el que no existe vibración del material, el tratamiento teórico puede dividirse en tres tipos:

- Modelos empíricos en los que requieren pocos parámetros pero tienen limitaciones para modelizar correctamente el comportamiento acústico, como son el modelo de Delany-Bazley [72] y Miki [192]. Modelos como el de Attenborough [27], Stinson [272] y Wilson [310] introducen factores de forma que en la mayoría de los casos se ajustan a datos experimentales. En el trabajo de Attenborough [28], el autor considera el efecto de la distribución estadística del tamaño de poro, argumentado porque según Horoshenkov y Swift [124], en la mayoría de los materiales, los poros con forma variable obedecen a una distribución característica para cada caso. Continuamente surgen modelos para predecir la respuesta acústica de nuevos materiales, como el presentado por Alba et al. [11]. En este caso, se predice el comportamiento de materiales absorbentes acústicos fibrosos y se realiza un nuevo ajuste al planteado por Delany-Bazley.

- Modelos analíticos que son válidos para formas simples de los poros en un material poroso (poros cilíndricos paralelos de sección circular, triangular, etc.). Modelos teóricos como los de Zwicker y Kosten [321], Biot [44], Attenborough [27] y Stinson [272] modelizan el material poroso como una serie de conductos paralelos. Diversos trabajos experimentales confirman la predicción de esta suposición para ajustarse al comportamiento real del material: Stinson y Champoux [273] y Horoshenkov y Swift [124].

- Modelos semi-fenomenológicos para conductos porosos con topologías complejas. Como ejemplo de este planteamiento se tienen los trabajos de Allard y Champoux [16] y Wilson [310] con expresiones matemáticas complejas que dependen de las funciones de Bessel  $J_1(z)/J_0(z)$  para valores complejos de la impedancia  $Z$ .

Los métodos de predicción se basan en uno o varios parámetros de referencia. Mientras unas tendencias se apoyan en la resistividad al flujo, otras lo hacen con la porosidad del material. Entre los modelos basados en la resistividad al flujo se tiene el modelo empírico para materiales fibrosos de Delany-Bazley [72] y el modelo físico de Allard-Champoux [16] basado en la densidad compleja y el módulo de compresibilidad compleja. Entre los modelos en el dominio de frecuencias que emplea la porosidad como parámetro relevante se tiene los estudios de Voronina ([301] y [302]) y Voronina-Horoshenkov [303].

Puede encontrarse gran variedad de modelos para predecir el comportamiento de la fase fluida. Delany-Bazley [72] y la modificación propuesta por Miki [193] ofrecen modelos para materiales con poros cilíndricos rectos con un solo parámetro (resistividad estática), mientras que en Zwicker y Kosten [321] se utilizan dos parámetros (porosidad y resistividad estática). Miki [192] emplea modelos con tres parámetros (porosidad, resistividad estática y tortuosidad) para materiales con poros cilíndricos paralelos con inclinación conocida.

Inicialmente, Zwicker-Kosten y Biot desarrollaron modelos para estructuras con tubos circulares uniformes, empleando funciones de Bessel y de Kelvin, respectivamente. En la referencia de Wilson de 1993 [310] se destacan las aportaciones de estos autores para el estudio de materiales porosos. Estudios posteriores han adaptado estas metodologías a conductos más similares a la realidad, introduciendo el término de factor de forma, como son los trabajos de Attenborough [26] y Allard y Champoux [16] basados en los trabajos anteriores, respectivamente. También pueden encontrarse trabajos con poros de secciones uniformes en forma triangular y rectangular.

En el trabajo presentado por Johnson et al. en 1987 [135] se describen los efectos disipativos viscosos en el interior de materiales porosos, mostrando un modelo semi-fenomenológico para describir la densidad compleja en materiales porosos de matriz rígida conteniendo poros de sección arbitraria. Este modelo, modelo Johnson-Koplik-Dashen, incluye 4 parámetros: porosidad, resistividad estática, tortuosidad y longitud característica viscosa. La limitación que ofrece esta propuesta es que no proporciona resultados exactos para la densidad dinámica en bajas frecuencias. Continuando con el trabajo anterior, para describir los efectos disipativos térmicos, Champoux y Allard [59] presentan una formulación (modelo Champoux-Allard) para el módulo de rigidez dinámico empleando dos parámetros (porosidad y longitud característica térmica), dando valores erróneos para bajas frecuencias. Partiendo de los modelos anteriores de Johnson-Koplik-Dashen y Champoux-Allard, el modelo semi-fenomenológico de Johnson-Champoux-Allard de 1991 [59], describe los efectos disipativos en materiales fibrosos y materiales con poros continuos de sección arbitraria empleando 5 parámetros (resistividad estática, porosidad, tortuosidad y longitud característica térmica y viscosa) para materiales con poros de sección no uniforme y sección arbitraria.

También Pride et al. en 1993 [232] han propuesto una modificación para la densidad dinámica (modelo de Pride-Morgan-Gangi) y posteriormente modificada por Lafarge en 1993 [153]. El modelo de Johnson-Champoux-Allard-Lafarge [153] basado en los trabajos de Johnson-Koplik-Dashen de 1987 [135], Champoux-Allard

[59] y Lafarge-Lemarinier-Allard-Tarnow de 1997 [152] representa una herramienta de carácter semi-fenomenológico con 6 parámetros (resistividad estática, porosidad, tortuosidad, longitud característica térmica y viscosa y permeabilidad térmica estática) para materiales con poros de sección no uniforme y sección arbitraria. En el trabajo de Lafarge et al. [152] presenta un modelo semi-fenomenológico con 8 parámetros (resistividad estática, porosidad, tortuosidad, longitud característica térmica y viscosa, permeabilidad térmica estática, tortuosidad viscosa estática y tortuosidad térmica estática). Sin embargo, estas expresiones no resultan prácticas ya que es necesario caracterizar demasiados parámetros. Por otra parte, en 1993, Wilson [310] emplea un modelo para materiales fibrosos y materiales porosos con 4 parámetros (límite en altas frecuencias de la densidad dinámica, relajación de la vorticidad, límite en altas frecuencias del módulo de rigidez y relajación de la entropía).

En el caso de materiales de esqueleto rígido [125] puede emplearse el planteamiento de fluido equivalente para obtener las expresiones que caracterizan el comportamiento acústico de un material poroso: impedancia característica  $Z(\omega)$  y número de onda complejo  $k(\omega)$ .

$$Z(\omega) = \sqrt{\rho(\omega) / C(\omega)} \quad (3.2)$$

$$k(\omega) = \omega \sqrt{\rho(\omega) C(\omega)} \quad (3.3)$$

siendo  $\omega$  la frecuencia angular,  $\rho(\omega)$  la densidad del fluido equivalente y  $C(\omega)$  la compresibilidad del fluido.

Estos parámetros están representados por la fricción viscosa y los mecanismos de pérdida térmica en la paredes de los poros, y están relacionados con el tamaño de los poros y la proporción de poros abiertos a través  $\rho(\omega)$  y  $C(\omega)$ .

La impedancia superficial  $Z_s$  y el coeficiente de absorción  $\alpha$  para una muestra de espesor  $h$  con incidencia normal de una onda acústica se pueden determinar a partir de las expresiones [125]:

$$Z_s = Z \coth(-jkh) \quad (3.4)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (3.5)$$

siendo  $\rho_0$  la densidad del medio de propagación y  $c_0$  la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el fluido (aire).

### 3.3.- MODELOS EN MATERIALES POROSOS

#### 3.3.1.- Modelo de Delany-Bazley

Entre los modelos empíricos destaca el trabajo de Delany-Bazley [72] de 1970 para la estimación de la impedancia y el número de onda para materiales fibrosos con porosidad próxima a 1, partiendo de mediciones experimentales de la resistividad al flujo. Aunque ofrece limitaciones de validez en frecuencias y resistividad al flujo, por su simplicidad se ha convertido en un modelo de referencia que ofrece buenos resultados para aplicaciones en la ingeniería acústica. La impedancia característica y la constante de propagación son [242]:

$$Z(\omega) = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0.0571 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j 0.0870 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (3.6)$$

$$\Gamma(\omega) = \frac{\omega}{c_0} \left[ 1 + 0.0978 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.70} - j 0.1890 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (3.7)$$

siendo  $\sigma$  la resistividad estática del aire en la dirección de propagación de la onda acústica por unidad de espesor,  $\rho_0$  y  $c_0$  densidad del aire y la velocidad del sonido en el aire y  $\omega = 2\pi f$  la frecuencia angular.

El rango de validez de estas expresiones es:

$$0.01 < \frac{f}{\sigma} < 1 \quad (3.8)$$

#### 3.3.2.- Modelo de Delany-Bazley-Miki

En el caso de elementos con múltiples capas, Miki [193] observó que en ocasiones la parte real de la impedancia con las expresiones de Delany-Bazley adquiere valores negativos en bajas frecuencias, mostrando resultados no físicos, proponiendo un modelo modificado. Al igual que el modelo de Delany-Bazley, se consideran materiales fibrosos con alta porosidad (cercana a la unidad), observando la validez de estas expresiones en un amplio rango de frecuencias dado por la condición  $\frac{f}{\sigma} < 0.01$

$$Z(\omega) = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0.070 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} - j 0.107 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \right] \quad (3.9)$$

$$\Gamma(\omega) = \frac{\omega}{c_0} \left[ 0.160 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} + j \left( 1 + 0.109 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right) \right] \quad (3.10)$$

### 3.3.3.- Modelo de Allard-Champoux

Estos autores modifican las expresiones de Delany-Bazley, siendo válidas para bajas frecuencias. En este modelo [16] se establece la dependencia de la propagación del sonido con respecto al diámetro de las fibras y la densidad del material. Los autores indican que los modelos anteriores no tienen en cuenta la geometría de los materiales y que las expresiones propuestas son válidas para incidencia normal y para materiales con porosidad y tortuosidad elevados.

La impedancia característica  $Z(\omega)$  y la constante de propagación  $\Gamma(\omega)$  están dadas por:

$$Z(\omega) = \sqrt{\rho(\omega)K(\omega)} \quad (3.11)$$

$$\Gamma(\omega) = j\omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad (3.12)$$

donde  $\rho(\omega)$  es la densidad equivalente del fluido y  $K(\omega)$  es el módulo de compresibilidad dinámico.

$$\rho(\omega) = 1.2 + \sqrt{-0.0364 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-2} - j 0.1144 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-1}} \quad (3.13)$$

$$K(\omega) = 101320 \frac{j 29.64 + \sqrt{2.82 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-2} + j 24.9 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-1}}{j 21.17 + \sqrt{2.82 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-2} + j 24.9 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-1}} \quad (3.14)$$

con  $f$  expresada en Hz y  $\sigma$  en rayl/m.

### 3.3.4.- Modelo de Attenborough

El modelo propuesto por este autor [27] considera un material poroso con conductos circulares de sección uniforme de sección  $A$ , tortuosidad  $q$  y porosidad  $\phi$ , obteniendo la impedancia característica mediante la expresión:

$$Z(\omega) = \frac{\omega \rho(\omega)}{k(\omega)} \quad (3.15)$$

$$\rho(\omega) = \frac{q^2}{\Omega} \left( \frac{\rho_0}{1 - \frac{2T\lambda\sqrt{j}}{\lambda\sqrt{j}}} \right) \quad (3.16)$$

$$k(\omega) = q \left( \frac{\omega}{c_0} \right) \left( \frac{1 + 2(\eta - 1)T\sqrt{N_{pr}}\lambda\sqrt{j}}{\sqrt{N_{pr}}\lambda\sqrt{j}} \right)^{0.5} \left( \frac{1 - \frac{2T\lambda\sqrt{j}}{\lambda\sqrt{j}}}{1 - \frac{2T\lambda\sqrt{j}}{\lambda\sqrt{j}}} \right) \quad (3.17)$$

$$\lambda = \frac{1}{s_f} \sqrt{\frac{8\rho_0 q^2 \omega}{\Omega \sigma_p}} \quad (3.18)$$

$$T = \frac{J_1(z)}{J_0(z)} \quad (3.19)$$

siendo  $\eta$  la relación de calores específicos,  $N_{pr}$  el número de Prandtl,  $\rho_0$  la densidad del aire y  $s_f$  el factor de forma del poro.  $J_0$  y  $J_1$  son las funciones de Bessel de orden 0 y 1, respectivamente.

### 3.3.5.- Modelo de Miki generalizado

En este caso [192], el autor se basa en el trabajo de Attenborough de 1985 y propone un modelo empírico generalizado con respecto a la porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo y la forma del poro. Considerando un material poroso formado por conductos paralelos circulares de sección  $A$  y con resistividad al flujo  $R$ :

$$Z(\omega) = \frac{q}{\Omega} \left[ 1 + 0.070 \left( \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.632} - j0.107 \left( \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.632} \right] \quad (3.20)$$

$$\Gamma(\omega) = \frac{\omega q}{c_0} \left[ 0.160 \left( \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.618} + j \left( 1 + 0.109 \left( \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.618} \right) \right] \quad (3.21)$$

$$\sigma_e = \frac{\Omega}{q^2} \sigma_p; \quad \sigma_p = \frac{Aq^2 R}{\Omega} \quad (3.22)$$

### 3.3.6.- Modelo de Johnson-Champoux-Allard

En la propuesta de Johnson-Koplik-Dashen [135] sobre materiales porosos de estructura rígida, se muestra que el efecto de la viscosidad sobre el desplazamiento del aire en el interior de un material poroso puede ser tenido en cuenta reemplazando la densidad del aire por una densidad efectiva equivalente. Los autores proponen un modelo semi-fenomenológico, ([135] y [59]), para la densidad compleja y módulo de rigidez dinámico en materiales porosos con matriz rígida y poros con geometría arbitraria. Sin embargo, no describe el comportamiento exacto de la densidad dinámica a valores bajos de frecuencia. En este caso la componente real o imaginaria de la densidad equivalente no es correcta con los datos experimentales. El módulo de rigidez dinámico y la densidad dinámica puede expresarse como [14]:

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[ 1 + \frac{8\eta}{j\Lambda'^2 N_{pr} \omega \rho_0} \sqrt{1 + j \frac{\Lambda'^2 N_{pr} \omega \rho_0}{16\eta}} \right]^{-1}} \quad (3.23)$$

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{j\omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + j \frac{4\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (3.24)$$

siendo  $\phi$  la porosidad,  $\gamma$  el calor específico del aire,  $\sigma$  la resistividad estática del aire,  $\alpha_\infty$  la tortuosidad,  $\eta$  la viscosidad dinámica del aire,  $N_{pr}$  el número de Prandtl del aire,  $\Lambda$  la longitud característica viscosa,  $\Lambda'$  la longitud característica térmica y  $P_0$  la presión atmosférica.

### 3.3.7.- Modelo de Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge

El planteamiento de Johnson-Koplik-Dashen [135] es redefinido por Pride-Morgan-Gangi y Lafarge en 1993 para considerar los efectos de las

estrangulaciones en los poros internos. En el trabajo de Lafarge et al. [152] se indica que la expresión para la densidad dinámica es función de 5 parámetros: resistividad estática  $\sigma$  (o permeabilidad viscosa estática  $k_0 = \eta/\sigma$ ), porosidad  $\phi$ , tortuosidad  $\alpha_\infty$ , longitud característica viscosa  $\Lambda$  y la tortuosidad viscosa estática  $\alpha_0$ . En el caso del módulo de rigidez dinámico se necesitan 4 parámetros: porosidad  $\phi$ , longitud característica térmica  $\Lambda'$ , la permeabilidad estática térmica  $k_0'$  y la tortuosidad térmica estática  $\alpha_0'$ .

Pride-Morgan-Gangi [232] expresan la densidad equivalente, expresión (3.25), en función de la tortuosidad dinámica  $\tilde{\alpha}(\omega)$  y el módulo de rigidez dinámico, expresión (3.29), en función de la compresibilidad dinámica del aire  $\beta(\omega)$  [152].

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha(\omega) \quad (3.25)$$

$$\alpha(\omega) = \alpha_\infty \left[ 1 + \frac{1}{-Cj\bar{\omega}} F(\omega) \right] \quad (3.26)$$

$$F(\omega) = 1 - P + P \sqrt{1 - \frac{C^2}{2P^2} j\bar{\omega}} \quad (3.27)$$

$$P = \frac{C}{4\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_\infty} - 1\right)} \quad (3.28)$$

$$K(\omega) = \frac{k_a}{\beta(\omega)} \quad (3.29)$$

$$\beta(\omega) = \gamma - (\gamma - 1) \left[ 1 + \frac{1}{jC'\bar{\omega}'} F'(\omega) \right]^{-1} \quad (3.30)$$

$$F'(\omega) = 1 - P' + P' \sqrt{1 - \frac{C'^2}{2P'^2} j\bar{\omega}'} \quad (3.31)$$

$$P' = \frac{C'}{4(\alpha_0' - 1)} \quad (3.32)$$

Las expresiones para las funciones se proponen en Lafarge et al. [152]



$$\bar{\omega} = \frac{\omega \rho_0 k_0 \alpha_\infty}{\eta \phi}; \quad \bar{\omega}' = \frac{\omega k_0'}{\eta' \phi'} \quad (3.33)$$

$$C = \frac{8k_0 \alpha_\infty}{\phi \Lambda^2}; \quad C' = \frac{8\alpha_\infty k_0'}{\phi \Lambda'^2} \quad (3.34)$$

donde  $\rho_0$  es la densidad del aire,  $k_a$  es el módulo de compresibilidad adiabático del aire,  $\eta$  es la viscosidad del aire,  $\gamma$  es el calor específico del aire,  $k_0$  es la permeabilidad viscosa estática y  $k_0'$  es la permeabilidad térmica estática.

La correlación entre el modelo de Johnson-Champoux-Allard-Lafarge y Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge viene dada por  $C' = P = P' = 1$ .

### 3.3.8.- Modelo de Wilson

Este modelo [310] se basa en 4 parámetros para definir el comportamiento en poros de sección arbitraria. La densidad compleja y el módulo de rigidez resultan:

$$\tilde{\rho}(\omega) = \rho_\infty \frac{[1 - j\omega\tau_{vor}]^{1/2}}{[1 - j\omega\tau_{vor}]^{1/2} - 1} \quad (3.35)$$

$$\tilde{K}(\omega) = K_\infty \frac{[1 - j\omega\tau_{ent}]^{1/2}}{[1 - j\omega\tau_{ent}]^{1/2} + \gamma - 1} \quad (3.36)$$

siendo  $\rho_\infty$  la densidad dinámica en el límite de frecuencia,  $\tau_{vor}$  el modo de vorticidad de relajación en el tiempo,  $K_\infty$  el módulo de rigidez en el límite de frecuencia,  $\tau_{ent}$  el modo de entropía de relajación en el tiempo y  $\gamma$  la correlación de calores específicos.

### 3.3.9.- Modelo de Brennan-To

Los autores introducen un modelo [50] para la impedancia y número de onda teniendo en cuenta la masa acústica, rigidez y amortiguamiento.

$$Z(\omega) = \left( \frac{\alpha_\infty}{2\gamma\Omega} \right)^{1/2} \left\{ \left[ (\Omega^2 + 1)^{1/2} + \Omega \right]^{1/2} - j \left[ (\Omega^2 + 1)^{1/2} - \Omega \right]^{1/2} \right\} \quad (3.37)$$

El número de onda está dado por la expresión:

$$k(\omega) = \left( \frac{\alpha_\infty \gamma}{2\Omega} \right)^{1/2} \left\{ \left[ (\Omega^2 + 1)^{1/2} + \Omega \right]^{1/2} - j \left[ (\Omega^2 + 1)^{1/2} - \Omega \right]^{1/2} \right\} \quad (3.38)$$

con

$$\Omega = \frac{\omega}{\frac{\phi \eta}{k_0 \rho_0 \alpha_\infty}} \quad (3.39)$$

$\gamma$  es el cociente de calor específico del material y del aire,  $\eta$  es la viscosidad del medio de propagación,  $\rho_0$  es la densidad del fluido de propagación,  $\alpha_\infty$  es la tortuosidad y  $\phi$  es la porosidad.

### 3.3.10.- Modelo de Umnova-Attenborough-Li

El modelo que introducen estos autores [292] se basa en otros trabajos anteriores. Umnova et al. [291] consideran materiales porosos con granos en forma circular. La impedancia característica y constante de propagación se expresan en función de la densidad compleja  $\rho(\omega)$  y la compresibilidad compleja  $C(\omega)$ . La constante de propagación es:

$$K(\omega) = \omega \sqrt{\rho(\omega)C(\omega)} \quad (3.40)$$

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{C(\omega)}} \quad (3.41)$$

El coeficiente de reflexión es:

$$R_p = \left| \frac{Z_1(\omega) - 1}{Z_1(\omega) + 1} \right| \quad (3.42)$$

La impedancia superficial está expresada como:

$$Z_1(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\rho_0 c_0 \phi} \coth(jK(\omega)d) \quad (3.43)$$

siendo  $\rho_0$  la densidad del fluido,  $c_0$  la velocidad del fluido y  $d$  el espesor de la muestra.

El coeficiente de absorción se puede obtener mediante: [125]

$$\alpha = 1 - |R_p| \quad (3.44)$$

La densidad dinámica queda definida como el cociente entre el gradiente de presiones y la aceleración causada por esta presión, mientras que la compresibilidad compleja se define como la relación entre el cambio de densidad del fluido producido por la onda al atravesar el material y el cambio de presión sonora [125]. La resistividad al flujo resulta:

$$\sigma = \frac{9\eta(1-\phi)}{2R^2\phi^2} \frac{5(1-\theta)}{5-9\sqrt[3]{\theta}+5\theta-\theta^2} \quad (3.45)$$

$$\theta = \frac{3}{\pi\sqrt{2}}(1-\phi) \approx 0.675(1-\phi) \quad (3.46)$$

$\eta$  es la viscosidad dinámica del aire y  $R$  el radio equivalente de los granos.

La longitud característica térmica para materiales con granos esféricos puede tomarse en la forma:

$$\Lambda' = \frac{2\phi}{3(1-\phi)}R \quad (3.47)$$

$$\Lambda' = \frac{3}{2\alpha_\infty(1-\theta)}\Lambda \quad (3.48)$$

$$k_0' = \frac{3}{2(1-\theta)}k_0 \quad (3.49)$$

siendo  $R$  el radio medio del grano,  $\phi$  la porosidad,  $k_0$  la permeabilidad viscosa del material y  $k_0'$  la permeabilidad térmica del material.

La tortuosidad en partículas esféricas del modelo de Umnova está dada por la condición:

$$\alpha_\infty = 1 + \frac{1-\phi}{2\phi} \quad (3.50)$$

En el trabajo de estos autores del año 2000 [291], la longitud característica viscosa se expresa mediante:

$$\Lambda = \frac{4 \left[ 1 - \left( \frac{R}{b} \right)^3 \right] \phi \alpha_{\infty}}{9(1-\phi)} R \quad (3.51)$$

donde  $b$  es el radio celular.

### 3.3.11.- Modelo de Horoshenkov-Swift

Aunque este modelo [126] corresponde a material granular suelto de caucho, se ha tenido en cuenta porque resulta importante tener en consideración el tratamiento que realiza el autor sobre la distribución de tamaño de poro. En este modelo se considera el efecto de la compactación y porcentaje de aglutinante sobre la porosidad, observándose una reducción en la porosidad con el aumento del aglutinante y el grado de compactación, obteniendo expresiones de predicción de respuesta acústica. El grado de compactación no tiene efecto sobre las muestras que se han planteado, dado que en la preparación de las muestras no se ha tenido en cuenta este efecto. Por el contrario, debe tenerse en consideración el efecto que produce la cantidad de aglutinante sobre la porosidad o el tamaño de grano obtenido.

$$\Omega = \Omega_0 - \beta \frac{\rho_m}{\rho_r} (1 - \phi_0) \quad (3.52)$$

$\Omega$  es la porosidad del material granular compactado y  $\Omega_0$  es la porosidad del material suelto. Esta porosidad para materiales granulares, sin aglutinante, procedentes de neumáticos reciclados, se obtiene por inmersión en agua:

$$\Omega_0 = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_r} \quad (3.53)$$

$\rho_m$  es la densidad de la mezcla granular,  $\rho_r$  es la densidad de los granos y  $\beta = \frac{m_b}{m_r}$ , donde  $m_b$  es la masa del aglutinante y  $m_r$  es la masa del material granular virgen.

En la mayoría de los materiales porosos el tamaño de grano es variable, y generalmente dispone de una distribución normal con porosidad media  $\langle \phi \rangle$  y desviación standard  $\sigma$  dada por la expresión (3.54), siendo  $r$  el tamaño de poro.

$$\phi = -\log_2 r \quad (3.54)$$

El tamaño medio del poro es:

$$r_m = 2^{-\langle\phi\rangle} \quad (3.55)$$

La resistividad al flujo es sensible al tamaño de granos pequeños, ya que es proporcional a la superficie interna, la cual es inversamente proporcional al cuadrado del tamaño de grano. La resistividad al flujo dada por Attenborough en 1993 [28] es función de la forma del grano,  $s$ :

$$\sigma = \frac{s\eta q^2}{\Omega_c \langle r \rangle^2} e^{-2(\sigma \ln 2)^2} \quad (3.56)$$

donde  $s$  depende de la forma de los poros,  $q$  es la tortuosidad,  $\sigma$  es la desviación del tamaño de poro y  $\eta$  es la viscosidad dinámica del aire.

### 3.3.12.- Modelo de Voronina para alta porosidad y matriz rígida.

En este primer trabajo de Voronina [301] se estudian los materiales porosos de matriz rígida con alta porosidad, con las expresiones para la impedancia característica,  $W(\omega)$ , y el coeficiente de atenuación,  $\gamma(\omega)$ :

$$W(\omega) = 1 + Q - j \frac{Q}{2 + \frac{Q}{(1 + \sqrt{Q})^2}} \quad (3.57)$$

$$\gamma(\omega) = \alpha + j\beta \quad (3.58)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación y  $\beta$  es la constante de fase expresada mediante:

$$\alpha(\omega) = \frac{2kQ}{2 + \frac{Q}{(1 + \sqrt{Q})^2}} \quad (3.59)$$

La constante de fase es:

$$\beta = k(1 + Q(1 + B)) \quad (3.60)$$

donde  $B$  es un coeficiente que depende de la característica estructural del material.

La característica estructural del material  $Q$  viene dada por la condición:

$$Q = \frac{1-\phi}{\phi D} \sqrt{\frac{200\mu}{k\rho_0 c_0}} \quad (3.61)$$

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (3.62)$$

siendo  $D$  el diámetro del poro,  $\rho_0$  la densidad del aire,  $c_0$  la velocidad del sonido,  $\mu$  la viscosidad dinámica del aire,  $k$  el número de onda y  $f$  la frecuencia.

### 3.3.13.- Modelo de Voronina para baja porosidad y matriz rígida

Para el caso de materiales de baja porosidad, [302], las expresiones para la impedancia característica  $W(\omega)$  y el coeficiente de atenuación  $\gamma(\omega)$  en materiales porosos de matriz rígida quedan:

$$W(\omega) = 1 + Q - j \frac{Q}{1 + \phi^2 \left[ 1 + \frac{10\sqrt{Q}(1-\phi)}{\phi(1+Q^2)} \right]} \quad (3.63)$$

$$\gamma(\omega) = \alpha + j\beta \quad (3.64)$$

El coeficiente de atenuación  $\alpha$  y la constante de fase  $\beta$ , siendo  $k$  el número de onda, están dadas por:

$$\alpha(\omega) = \frac{kQ\sqrt{\phi}}{1 + \frac{(1-\phi)^2}{\phi\sqrt{Q}}} \quad (3.65)$$

$$\beta = jk(1 + \phi Q) \quad (3.66)$$

La característica estructural del material  $Q$ , conocida la porosidad y la resistividad al flujo es:

$$Q = \sqrt{\frac{\sigma(1+\phi^2)}{\rho_0 c_0 k \sqrt{\phi} (1 + \sqrt{\phi} + \phi^2)}} \quad (3.67)$$

con  $\sigma$  la resistividad al flujo,  $\rho_0$  la densidad del aire y  $c_0$  la velocidad del sonido en el aire.

3.3.14.- Modelo de Horoshenkov-Swift

Horoshenkov y Swift [125] presentan un modelo de predicción de la impedancia característica en función de la porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo y la desviación típica del tamaño de poro. El modelo considera una distribución normal para determinar la densidad de fluido equivalente y la compresibilidad del fluido. La impedancia característica y el coeficiente de propagación están dados por las expresiones:

$$Z_s = \omega \frac{\rho(\omega)}{k(\omega)} = \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{C_b(\omega)}} \quad (3.68)$$

$$C_b(\omega) = \phi C_x(\omega) \quad (3.69)$$

siendo  $C_b(\omega)$  la compresibilidad compleja del material

$$C_x(\omega) = \frac{1}{\gamma P_0} \left( \gamma - \frac{\rho_0(\gamma-1)}{\phi \rho_x(N_{pr}\omega)} \right) \quad (3.70)$$

$$\rho_x(\omega) = \rho_0 \left( 1 - \frac{R}{j\omega\rho_0} F(\omega) \right) \quad (3.71)$$

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \left( \rho_0 - \frac{\phi R}{j\omega\alpha_\infty} F(\omega) \right) \quad (3.72)$$

donde  $\gamma$  es el cociente de calores específicos,  $P_0$  es la presión atmosférica,  $N_{pr}$  es el número de Prandtl,  $\phi$  es la porosidad,  $k$  es la resistividad al flujo y  $F(\omega)$  es la función de corrección de la viscosidad que, tomando la aproximación de Padé, resulta:

$$F(\omega) \approx \frac{1 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2}{1 + b_1\varepsilon} \quad (3.73)$$

$$a_1 = \frac{\theta_1}{\theta_2}; \quad \theta_2 = \theta_1; \quad b_1 = a_1 \quad (3.74)$$

En partículas circulares:

$$\theta_1 = \frac{4}{3} e^{4(\sigma_{poro} \ln 2)^2} - 1; \quad \theta_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{\frac{3}{2}(\sigma_{poro} \ln 2)^2} \quad (3.75)$$

$\sigma_{poro}$  es la desviación estándar del tamaño de poro.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{-j\omega\rho_0\alpha_\infty}{R\phi}} \quad (3.76)$$

Este modelo será estudiado en la caracterización de los materiales granulares analizados en esta Tesis Doctoral. Horoshenkov y Swift [125] aplican estas expresiones sobre materiales granulares de estructura rígida obtenidos a partir de espumas de poliuretano procedente de reciclado del sector del automóvil y también sobre compuestos porosos obtenidos con partículas de sílex y aglomerante epoxi. También aplica este modelo sobre productos no consolidados con esferas de vidrio de 0.68 y 1.64 mm de diámetro. Analizando los resultados sobre los materiales consolidados, el coeficiente de absorción que obtienen estos autores sobre los compuestos con sílex se ajustan a los obtenidos experimentalmente en todo el rango de frecuencias (0 a 6000 Hz).

Atendiendo al ajuste obtenido por los autores en los materiales de esta referencia bibliográfica, número de parámetros implicados en el modelo y las posibilidades para cuantificar en laboratorio estos parámetros se optó por seleccionar el modelo de Horoshenkov y Swift. Con pocos parámetros (porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo y distribución del tamaño medio de poro) es posible predecir el comportamiento acústico de estos materiales granulares.

También se han analizado otros modelos de predicción del coeficiente de absorción en algunas muestras granulares estudiadas en esta Tesis Doctoral para comparar los resultados, como el modelo Johnson-Koplik-Dashen [135], modelo de Attenborough [27]. La predicción de estos modelos resultó bastante similar, observándose que el modelo de Attenborough proporcionaba valores ligeramente más elevados que el resto de modelos, mientras que el de Attenborough prácticamente copiaba al de Horoshenkov y Swift.

### 3.3.15.- Modelo de Voronina–Horoshenkov

Aunque este modelo [303] es desarrollado para materiales granulares sueltos sin material de adhesión, se ha incluido por la relevancia de los estudios de estos autores en materiales granulares. Se obtiene la tortuosidad experimentalmente a partir del coeficiente de refracción presentado por Allard et al. en 1994 [15] y por ultrasonidos, propuesto en 1996 por Leclaire et al. [159].



La tortuosidad puede deducirse a partir de la componente real de la impedancia característica  $W_a$  en valores superiores a la frecuencia crítica [26]:

$$W_a|_{frec\_critica} = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \quad (3.77)$$

La característica estructural del material  $Q$  se relaciona con la impedancia característica  $W$  y la constante de propagación  $\gamma$ :

$$W = 1 + Q + j \frac{Q\phi}{1 + \frac{Q\phi}{\sqrt{Q}}} \quad (3.78)$$

$$\gamma(\omega) = \frac{kQ\phi}{1 + \frac{(1-\phi)M}{1+Q}} + jk \left[ 1 + Q\phi \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{Q(1+\phi)(1+Q^2M)}} \right) \right] \quad (3.79)$$

$M$  es un parámetro adimensional expresado mediante:

$$M = \frac{\rho_g}{10^3 \rho_0} \quad (3.80)$$

$$Q = \frac{0.2(1-\phi)(1+\phi)^2}{\phi \sqrt{kD\xi}} \quad (3.81)$$

$$D = \sqrt{V_g / 0.5233} \quad (3.82)$$

$$\xi = \frac{D\rho_0 c_0}{\eta} 10^{-4} \quad (3.83)$$

siendo  $D$  la dimensión característica,  $k$  el número de onda,  $V_g$  el volumen de material granular,  $\rho_0$  la densidad del aire,  $c_0$  la velocidad del sonido,  $\eta$  la viscosidad dinámica del aire,  $\rho_g$  la densidad del material virgen y  $V_g$  el volumen de material virgen.

$$f_{crit} = \frac{200\eta(1-\phi)^2(1+\phi)^4}{\pi\rho_0 D^2 (\alpha_\infty - \phi)^2} \quad (3.84)$$

La resistividad al flujo resulta:

$$\sigma = \frac{400(1-\phi)^2(1+\phi)^5 \eta}{\phi D^2} \quad (3.85)$$

3.3.16.- Modelo de Vasina et al.

Sobre muestras de materiales granulados obtenidos a partir de arcilla expandida con distintas proporciones de cemento y agua se determina una expresión empírica [297] que relaciona la resistividad al flujo  $\sigma$  con el tamaño de los granos  $D$  del material granular, sin considerar el grado de compactación, ya que las muestras son incompresibles.

$$\log_{10}\sigma = -1.83\log_{10}D + 4.53 \quad (3.86)$$

La impedancia característica y número de onda complejo se retoman de Horoshenkov y Swift [125], introduciendo por separado los efectos viscosos (densidad dinámica) y térmicos (compresibilidad dinámica)

$$Z(\omega) = \frac{1}{\rho_0 c_0} \sqrt{\frac{\rho_b(\omega)}{C_b(\omega)}} \quad (3.87)$$

El número de onda es:

$$k_b(\omega) = \omega \sqrt{\rho_b(\omega) C_b(\omega)} \quad (3.88)$$

siendo  $\rho_0$  la densidad del fluido,  $c_0$  la velocidad del fluido,  $\rho_b$  la densidad dinámica del fluido y  $C_b$  la compresibilidad del fluido.

Considerando que el material está formado por tubos paralelos, adoptado anteriormente por Stinson-Champoux [273] y por Horoshenkov-Swift [125], se tiene:

$$\rho_b(\omega) = \rho_0 \frac{\alpha_\infty}{\phi} \left( 1 + \frac{F(\varepsilon)}{\alpha_\infty \varepsilon^2} \right) = \rho_0 \frac{\alpha_\infty}{\phi} \rho_x(\varepsilon) \quad (3.89)$$

$$C_b(\omega) = \frac{\phi}{\gamma P_0} \left[ \gamma - \frac{\gamma - 1}{\rho_x(\varepsilon N_{pr})} \right] \quad (3.90)$$

donde  $\gamma$  es el cociente de calores específicos,  $P_0$  es la presión atmosférica,  $N_{pr}$  es el número de Prandtl,  $\sigma$  es la resistividad al flujo y  $F(\varepsilon)$  es la función de corrección de la viscosidad descrita por Horoshenkov y Swift [125].

El coeficiente de reflexión es:

$$R_p = 1 - \left| \frac{Z_1(\omega) - 1}{Z_1(\omega) + 1} \right|^2 \quad (3.91)$$

donde la impedancia superficial está expresada como:

$$Z_1(\omega) = Z(\omega) \coth(-jk_b(\omega)h) \quad (3.92)$$

siendo  $\rho_0$  la densidad del fluido,  $c_0$  la velocidad del fluido y  $h$  el espesor de la muestra.

### 3.3.17.- Simplificación de Johnson-Koplik-Dashen

Pfretzschner et al. [228] en su trabajo de 1999 aplican las siguientes expresiones para determinar las propiedades acústicas en granulares de neumáticos fuera de uso.

$$Z(\omega) = \sqrt{\rho(\omega)K(\omega)} \quad (3.93)$$

donde  $\rho(\omega)$  es la densidad dinámica y  $K(\omega)$  es el módulo de rigidez dinámico.

$$\rho(\omega) = \alpha_\infty \rho_0 \left( 1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0\alpha_\infty} c \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{16}} \right) \quad (3.94)$$

$$\lambda = c \sqrt{\frac{8\alpha_\infty\rho_0\omega}{\sigma\phi}} \quad (3.95)$$

En estas expresiones  $c$  es un parámetro de ajuste que en poros cilíndricos se considera  $c=1$ ,  $\sigma$  es la resistividad al flujo y  $\phi$  es la porosidad.

Tomando la expresión de Kosten-Zwikker [321] y la simplificación de Johnson-Koplik-Dashen [135], el módulo de rigidez queda:

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left[ \gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \frac{c'\sigma\phi}{jN_{pr}\omega\rho_0\alpha_\infty} \sqrt{1 + jN_{pr} \left( \frac{\lambda}{4cc'} \right)^2}} \right]^{-1} \quad (3.96)$$

donde  $c'$  es un parámetro de forma, que puede expresarse en la forma  $c=1/c'$

El número de onda del material es:

$$k(\omega) = \sqrt{\rho(\omega) / K(\omega)} \quad (3.97)$$

La impedancia superficial es:

$$Z_s(\omega) = -jZ(\omega)\cotag(k(\omega)h) \quad (3.98)$$

donde  $h$  es el espesor de la muestra.

El coeficiente de reflexión es:

$$R(\omega) = \frac{Z(\omega) - \rho_0 c_0}{Z(\omega) + \rho_0 c_0} \quad (3.99)$$

En la expresión anterior  $\rho_0 c_0$  es la impedancia del aire y el coeficiente de absorción es:

$$\alpha(\omega) = 1 - |R(\omega)|^2 \quad (3.100)$$

En la Tabla 3.1 se resumen brevemente las características de algunos modelos que, según la bibliografía consultada, se emplean para la caracterización acústica de materiales porosos. Se puede observar la dependencia con los parámetros que deben determinarse y la dificultad que implica sin equipamiento específico disponible.

Tabla 3.1.- Parámetros en algunos modelos acústicos de materiales porosos

Delany-Bazley Allard- Champoux Delany-Bazley- Miki	Brennan-To	Miki	Attenborough	Johnson- Champoux-Allard	Johnson-Champoux- Allard-Pride-Lafarge	Wilson
Empírico	Empírico	Empírico	Empírico	Semi- fenomenológico	Semi- fenomenológico	Semi- fenomenológico
Materiales fibrosos	Efectos de amortiguación y rigidez	Poros cilíndricos con inclinación	Poros de forma arbitraria sin cambios importantes	Materiales fibrosos. Poros de forma arbitraria sin cambios importantes	Poros de forma arbitraria con cambios importantes	Materiales fibrosos o materiales con poros de forma arbitraria sin cambios importantes
1 parámetro	2 parámetros	3 parámetros	4 parámetros	5 parámetros	8 parámetros	4 parámetros
$\sigma$	$\sigma, \phi$	$\sigma, \phi, \alpha_{\infty}$	$\sigma, \phi, \alpha_{\infty},$ factor de forma	$\sigma, \phi, \alpha_{\infty}, \Lambda,$ $\Lambda'$	$\sigma, \phi, \alpha_{\infty},$ $\Lambda, \Lambda', k_0', \alpha_0, \alpha_0'$	$\rho_{\infty}, \tau_{vor}, K_{\infty},$ $\tau_{ent}$

### 3.4.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La revisión de la bibliografía consultada aporta mucha información sobre el estudio de productos acústicos de carácter fibroso. En este sentido, resulta un campo con referencias numerosas y con diversos tratamientos teóricos para predecir el comportamiento de materiales de diversa procedencia: textiles, espumas o productos naturales. Sin embargo, para materiales porosos de matriz rígida esta información no es tan abundante. La complejidad que presenta la matriz rígida en un material granular poroso, requiere tratamientos que ayuden a la modelización. Así, pueden encontrarse modelos de predicción de comportamiento acústico que consideran los conductos de la red porosa como conductos cilíndricos, como el modelo de Zwikker y Kosten, o con ligera inclinación, como el de Miki, secciones no uniformes, como los modelos de Attenborough, Wilson y Johnson-Champoux-Allard-Lafarge o conductos no uniformes con estrangulaciones, como el modelo de Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge. A medida que se consideran conductos más complejos, también aumenta el número de parámetros necesarios para la modelización y la necesidad de equipamiento para cuantificarlos.

En general, los métodos de predicción se basan en varios parámetros para definir la respuesta del material. Unos se basan en la resistividad al flujo y otros en la porosidad. El análisis de los modelos descritos en este capítulo, permite seleccionar un modelo de predicción que sea válido para estudiar compuestos granulares de matriz rígida con un número reducido de parámetros determinados experimentalmente. Se ha seleccionado el modelo de Horoshenkov y Swift ya que requiere determinar experimentalmente tan solo cuatro parámetros para predecir la respuesta acústica de materiales porosos de matriz rígida. La validación de este modelo sobre los compuestos estudiados en esta Tesis Doctoral se realiza mediante la determinación del coeficiente de absorción con ensayo experimental, observándose que este modelo puede utilizarse para conocer la respuesta acústica.

## **Capítulo 4.- Materiales granulares de matriz rígida.**

*Este capítulo aborda los materiales aligerantes empleados en la construcción, prestando mayor atención a los de tipo expandido. Se realiza una revisión de aquellos trabajos bibliográficos relevantes por su estudio de los materiales utilizados para hormigones aligerados, así como diversas aplicaciones de los materiales expandidos. Se describen las propiedades físicas de la arlita y vermiculita atractivas para su uso en compuestos cementicios con vistas a lograr una adecuada atenuación acústica.*





#### **4.1.- ALIGERANTES EN CONSTRUCCIÓN. NATURALEZA, USOS Y APLICACIONES**

En la sociedad actual se genera gran cantidad de residuos. La industria de la construcción requiere de nuevos materiales que ofrezcan ventajas frente a los materiales habituales: resistentes, ligeros y propiedades que ayuden al confort. De forma constante surgen nuevos materiales utilizados para el aislamiento acústico y vibracional que dependiendo de su naturaleza ofrecen distinto comportamiento: resistencia, durabilidad, consistencia, acabado superficial, estética y comportamiento térmico y/o acústico. Estas características determinan el sector industrial al cual pueden ser de aplicación. Es creciente el interés por reciclar materiales fuera de uso, con el fin de reducir la cantidad de residuos y preservar el medioambiente. La materia prima para producir estos nuevos materiales tiene un origen muy diverso. En el trabajo de Asdrubali et al. [22] se presenta un estudio actualizado sobre las propiedades acústicas de materiales sostenibles, tanto naturales como de materiales reciclados y en el de Núñez [211] se estudia el empleo de materiales procedentes de reciclado de neumáticos y fibra naturales como absorbentes acústicos en salas.

Pueden encontrarse diversos estudios sobre triturados de neumáticos, como los presentados por Meshgin et al. [189], Ho et al. [121], Maderuelo et al. ([173] y [174]), biomasa, como en Ramis et al. [236], Ardanuy et al. [19], Zhu et al. [320], poliestireno expandido y Xu et al. [313], deshechos de fundición, Malhotra y Tehri [178] o material de derribo, Leiva et al. [161].

El empleo de aligerantes está justificado por la reducción en peso del producto final. Sin embargo, el material resultante suele ofrecer algunas características interesantes, mientras que otras quedan en desventaja. Un ejemplo de sector atractivo es el caso de la construcción. Los materiales de acabado estético y relleno deben favorecer el confort ambiental de las edificaciones, por lo que deben ofrecer buenas propiedades resistentes y también buen comportamiento aislante, tanto térmico como acústico. En Catai et al. [58] se realiza un estudio de los tipos de materiales aligerantes como absorbentes acústicos y se comentan ejemplos prácticos de edificaciones con estos materiales para mejorar el comportamiento acústico, como son la lana de vidrio, de roca, espuma elastomérica, vermiculita y fibra de coco.

Desde las primeras construcciones realizadas con hormigón ya se mostró interés en el empleo de un hormigón con alta capacidad resistente, pero que a su

vez resultara ligero. Esta inquietud sigue existiendo en la actualidad pero redireccionada al uso de materiales reutilizados o que ofrezcan una ventaja claramente diferenciada. Pueden localizarse estudios científicos en los que se busca aligerar el cemento con formas muy diversas. Seguidamente se citan algunas alternativas para la construcción. Dependiendo de la capacidad resistente del hormigón, puede ser necesaria la adición de partículas de refuerzo para aumentar su resistencia, como se deja claro en Hassanpour et al. [118].

La inclusión de aditivos en el hormigón (elementos de refuerzo o aligerantes) surgen con la Revolución Industrial apareciendo avances significativos. A finales del s. XIX se comercializa el amianto y rápidamente se emplea en la construcción como fibrocemento. Desde un primer momento parecía un material perfecto: coste reducido, material aislante, buenas propiedades mecánicas, inerte a ataques químicos y resistente al calor y al fuego. Sin embargo, el tiempo indicó que producía efectos adversos y perjudiciales para la salud, con lo que se prohibió su uso en la segunda mitad del s. XX. A principios del s. XX se desarrollan fibras discontinuas de acero como refuerzo del hormigón, empezando a utilizarse a nivel industrial en la década de 1960. El interés de esta propuesta reside en transferir la resistencia a tracción y a flexión de estas fibras al hormigón a un coste aceptable. En los años 50, en la URSS, se intentó emplear fibras de vidrio discontinuas, pero la reacción de los álcalis del hormigón con las fibras impediría su aplicación en el sector de la construcción. Los trabajos se centraron en el empleo de fibras de vidrio resistentes a los álcalis, empleando zirconio. Algún trabajo reciente intenta emplear perlita: Bektasa et al. [36]. El empleo de fibras de vidrio se reduce a elementos no resistentes (enfoscados o fachadas) y no como elemento de hormigonado en masa (pilares, muros o forjados). Con la aparición de las fibras textiles (nylon, fibras de carbono, kévlar, acero inoxidable, poliéster, polipropileno o poliestireno) ha habido intentos por aplicarlas en el hormigón como un sustituto del antiguo fibrocemento.

Es altamente interesante el empleo de fibras de carbono en el hormigón, ya que además de las ventajas resistentes que añade al hormigón, Chung ([65] y [66]), posee propiedades dieléctricas (apantallamiento de ondas electromagnéticas debido a la conductividad eléctrica de los filamentos, reflejando o absorbiendo las ondas), protección catódica de la armadura de acero en el hormigón armado para evitar la corrosión (tradicionalmente se aplica un voltaje de modo que los electrones se dirigen a la armadura, actuando como cátodo, pero el hormigón no es buen conductor de la electricidad y la fibras aumentarían la conductividad del hormigón), autosensores de capacidad de carga y límite tensional. Los materiales compuestos que están formados por una matriz aislante y fibras conductoras presentan piezorresistividad, con lo que cambia la conductividad al aplicar una

carga sobre el material, Wen y Chung [308]. En tracción, las fibras se alejan y disminuye la conductividad y en compresión ocurre el efecto contrario. Ejemplos de construcciones con aditivos en el hormigón son la construcción de un puente en Reachmond (Virginia), Waldron et al. [304] y las edificaciones de hormigón con fibra de carbono en el edificio ARK de Tokio y el Al Shaheed de Irak.

Las propiedades que ofrece el hormigón, Shanang [259], con todo tipo de aditivos requieren un estudio pormenorizado. Así se estudian las propiedades mecánicas (Weigler y Karl [307], Türkmen y Kantarci [289], Nawel et al. [203], Xu et al. [314] y Reis et al. [238]), comportamiento resistente a altas temperaturas (Wona et al. [311] y Hossain et al. [127]), efecto de la porosidad en la resistencia (Rößler et al. [244], Bouguerra et al. [46] y Kearsley y Wainwright [142]), condiciones durante el fraguado (Atiş [24]), influencia del curado en la resistencia (Ferreira et al. [96] y Silva et al. [266]), influencia de los aligerantes sobre la densidad y absorción de agua del hormigón (Lanzón et al. [157]), cantidad de aligerante (Wu et al. [315]), propiedades acústicas según el aligerante (Kim y Lee [146]) y según la inclusión de huecos generados por los gasificantes (Vinokur [300] y Kim y Lee [145]).

Entre los aligerantes de carácter plástico para los morteros de cemento se emplea el poliestireno expandido (Wang y Meyer [306], Madandoust et al. [169], Babu et al. [30] y Bouvard et al. [47]), polipropileno (Song et al. [269], Karahan y Atis [139] y Chidiac y Mihaljevic [63]), PET (Byung et al. [134], Choi et al. [64], Albano et al. [12], Akçaözoglu et al. [9], Hannawi et al. [116], Frigione et al. [102], Mahdi et al. [175], Pereira y Castro [226], Foti et al. [101], Reis et al. [238], Safi et al. [247], Akçaözoglu et al. [8] y Rahmani et al. [235]), plástico procedente del recubrimiento de cables eléctricos (D'Alessandrto et al. [70]) o las espumas de poliuretano (Gadea et al. [103] y Junco et al. [138]).

El mortero de cemento también puede aligerarse con la adición de agentes gasificantes durante la preparación (Narayanan y Ramamurthy [202] y Kim et al. [144]), pero de un modo más general, el mortero de cemento se aligera con gran variedad de materiales reciclados (Uysal y Sumer [295]). Destaca el empleo del plástico como aligerante, ocupando una posición predominante (Siddique et al. [261], Corinadelsi y Moriconi [67], Saskia y Brito [248] y Nguyen et al. [210]), ya que el empleo cotidiano de este material genera gran cantidad de residuos. También pueden encontrarse morteros aligerados con neumáticos reciclados (Momtazi et al. [196], Pelisser et al. [225], Pacheco et al. [219], Marques et al. [182]), fibras de vidrio (Chidiac y Mihaljevic [63] y Tan y Du [283]), materiales cerámicos (Giese et al. [109]), arenas de fundición (Li y Zhao [164], Ozkan et al. [218], Binici et al.

[43], Kayali [141], Kumar et al. [151], Berndt [42], Ugur y Ozturan [290], Siddique y Kaur [260], Bernal et al. [41] y Li et al. [165]), piedra pómez (Aydin y Baradan [29]), arenas volcánicas (Khandaker y Anwar [143, Gündüz et al. [115], Libre et al. [166], Topçua y Isikdag [286], Bouguerra et al. [46], Demirboga et al. [73], Nawel et al. [203] y Hossain et al. [127]), perlita (Bekir y Is-ikdag [35]) o diatomita procedente de yacimientos de Turquía (Unal et al. [294]).

Para mejorar la habitabilidad y el confort en las edificaciones se emplean materiales aislantes térmicos y acústicos de carácter fibroso, como pueden ser el caso de las fibras de vidrio o las lanas de roca. Estos materiales aunque ofrecen buenas propiedades térmicas y acústicas no permiten soportar esfuerzos resistentes y requieren un tratamiento específico para su reciclado. Continuamente surgen nuevos materiales aligerados que reducen el peso o también reutilizan materiales procedentes del reciclado (Corinadelsi y Moriconi [67], Hassani et al. [117] y Santos et al. [253]). Puede encontrarse estudios sobre las propiedades mecánicas de ladrillos aligerados (Benk y Coban [38]) en distintas proporciones con papel reciclado (Sutcu y Akkurt [279]), caucho procedente de triturado de neumático (Turgut y Yesilata [287]), poliestireno expandido (Xu et al. [313]), desechos de altos hornos (Malhotra y Tehri [178]) o perlita expandida (Gandage et al.[104]).

Existen muchos trabajos que estudian el comportamiento acústico de materiales procedentes de desechos o reciclado (Branco y Godinho [49]). También se abordan estudios acústicos sobre materiales obtenidos a partir de fibras naturales (Oldham et al. [213] y Glé et al. [110]), reciclado de maderas o cáscara de arroz (Stumpf et al. [275]), celulosa (Neithalath et al. [206]) o capacidad absorbente del asfalto de las carreteras con reciclado de neumáticos fuera de uso (Wang et al. [305]). La gran cantidad de residuos generados por la construcción también es un sector con interés (Chen et al.[62] y Randonjanin et al. [234]). Aunque desde un punto de vista sanitario, el reciclado de neumáticos incorpora elementos tóxicos (Llompert et al. [167]), se dispone de gran información sobre la acústica en materiales con triturado de reciclado de neumático (Pfretzschner et al. [228], Asdrubali et al. [21], Pfretzschner [227], Benkreira et al. [39], Maderuelo ([172] y [173]), Sobral et al. [268], Hong et al. [123], Swift et al. [280] y Holmes et al. [122]).

#### **4.2.- MINERALES EXPANDIDOS EXFOLIADOS**

Entre los minerales de origen natural formados por silicatos de hierro y magnesio se encuentra el grupo de las micas, que está presente en rocas ígneas (enfriamiento lento del magma bajo la superficie terrestre), como los granitos. La mica se muestra en láminas superpuestas (conocidas como libros) y cristaliza en forma de monoclinicas imperfectas y a veces macladas, es decir, con deformación uniforme de los monocristales. La característica principal de las micas es la facilidad que presentan para ser exfoliadas en láminas delgadas con propiedades dieléctricas y aislantes, [194]. Desde un punto de vista comercial cabe distinguir dos grandes grupos: mica en láminas y mica en fragmentos, además de una serie de productos industriales derivados cuyas aplicaciones abarcan un amplio espectro. Las láminas de mica son muy flexibles y elásticas más que cualquier otro mineral. Tienen un brillo intenso variando su color desde el blanco, en las micas que contienen potasio, al negro en las ferromagnesianas [194].

Aunque existen muchas variedades de micas, suelen dividirse en micas blancas y negras. Atendiendo al color de la mica, entre las micas blancas, ricas en álcalis, destacan la moscovita (mica común y transparente), flogopita (mica ámbar), vermiculita, lepidolita y sericita. La moscovita se encuentra generalmente en las rocas silíceas. Los mayores depósitos de esta variedad están en India, Sudáfrica y Estados Unidos. La sericita es una variedad de la moscovita en pequeñas láminas; se produce como consecuencia del desgaste por la acción de los agentes atmosféricos sobre esquistos y gneis. La flogopita, que se encuentra en rocas calcáreas, se concentra en Madagascar. Existen grandes depósitos de vermiculita en Estados Unidos. El principal valor de la lepidolita radica en su gran contenido de litio y rubidio, [194]. En las micas negras, cuyo principal representante es la biotita, abunda el hierro y magnesio.

Materiales como la arlita, la perlita o la vermiculita son un producto secundario como resultado de la alteración morfológica por expansión de la roca virgen. Este proceso consiste en elevar rápidamente la temperatura de la roca triturada hasta valores en torno a los 300 a 1000 °C, que pueden alterar la composición final del material, (Rennó et al. [239], Marcos y Rodríguez [179] y Díaz et al. [82]). Las partículas de agua inmersas en la roca provocan la expansión de los granos y la obtención de materiales muy ligeros, aumentando el volumen hasta 30 veces, con densidad entre 60–130 kg/m<sup>3</sup>. Estos materiales fueron desarrollados inicialmente para aligerar morteros de cemento.

Debido a la naturaleza de estos compuestos, las posibilidades que ofrecen las arlitas, perlitas y vermiculitas son muy interesantes: baja densidad, dieléctrica, aislante térmico (alto punto de fusión) y acústico, bajo coste, reciclabilidad y no generan residuos tóxicos para el medioambiente. La Figura 4.1 muestra la morfología de los granos de arlita, perlita y vermiculita tomadas en el Laboratorio de Materiales del DIMM. Puede observarse la similitud entre las partículas de arlita y perlita y la diferencia con la vermiculita.



Figura 4.1.- Materiales exfoliados de origen mineral disponibles en el DIMM.

Los usos de las micas son muy diversos. En el sector doméstico o industrial se pueden encontrar en: planchas, condensadores, hornos y estufas de combustión lenta. Por su propiedad dieléctrica, se emplea ampliamente en la industria aeronáutica, cables eléctricos, neumáticos, electrodos soldados, cartón bituminado, pinturas refractarias y plásticos, lubricantes secos, recubrimientos dieléctricos y aisladores ignífugos, zapatas de frenos en automoción y discos de embrague. Se utiliza también como material aislante térmico de edificaciones metálicas (naves industriales) en una combinación de perlita y vermiculita, para evitar la reducción de resistencia mecánica del acero a temperaturas superiores a 500 °C. En hormigones armados de pilares y forjados, tabiquería, fachadas, estructuras de madera, conductos metálicos o túneles también sirve como protección al fuego.

Sin embargo, durante la manipulación de las micas puede producirse electricidad estática que puede descargarse sin peligro. Durante la extracción en la cantera se desprenden polvos de cuarzo, silicatos y feldespato, por lo que la inhalación prolongada puede causar silicosis, irritación del aparato respiratorio, asbestosis, cáncer de pulmón y mesotelioma (células cancerosas en la pleura o peritoneo). En caso de ingestión puede causar cáncer de estómago e intestino, [194]. En el trabajo de Addison [4] se realiza una revisión detallada sobre los efectos nocivos que presentan los trabajos de explotación y manipulación de la vermiculita y otros estudios, como el presentado en 2011 por Stembirek et al. [271], han demostrado que la vermiculita no es tóxica, según test con ratas.

#### 4.3.- LA ARLITA

La arlita es un árido de gran ligereza obtenido a partir de arcilla extraída en cantera a cielo abierto. Tras un primer triturado de la materia para conseguir tamaños de micras, se almacena en naves cerradas para su homogenización y secado. El tiempo en esta nave de acumulación puede ser de varios meses. Este polvo es aspirado y humedecido con agua para formar partículas de varios milímetros. En algunos casos, previamente se somete a un proceso de mezcla con materia orgánica. Seguidamente se introduce en un horno rotatorio para cocer las bolas de pasta. El horno tiene una pequeña inclinación de 8°, un diámetro de 2 m y puede alcanzar los 100 m de longitud. Está dividido en tres zonas: fase de precalentamiento, expansión y enfriamiento. En la primera fase se alcanzan alrededor de los 700 °C y posteriormente en la fase de expansión se eleva la temperatura hasta los 1200 °C durante unos 20 segundos para generar un choque térmico y provocar la combustión de la materia orgánica en el interior de la arcilla. Los gases de la combustión generan una expansión de la arcilla aumentando hasta 5 veces el tamaño original. Los granos adquieren un tono gris oscuro con tamaño variable entre 0 y 20 mm. Tras un cribado se comercializa en distintas granulometrías en sacos de 50 a 100 litros o a granel. Dependiendo del fabricante pueden encontrarse distintas granulometrías: 2-3 mm empleada de forma minoritaria, 3-8 mm, 4-8 mm y 8-20 mm (más demandada).

La denominación de este material cambia según fabricantes. Puede encontrarse como Arlita o Leca, abreviación de la denominación en inglés de Light Expanded Clay Aggregate, estando registradas por el fabricante de material de construcción Weber Saint-Gobain, o también puede encontrarse como Argex, abreviación de Argile Expansée, Gravelite (Sikora y Turkiewicz [263]), Cinasita (Priszkulnik [233]) o Laterlite, comercializada con este nombre por Uralita.

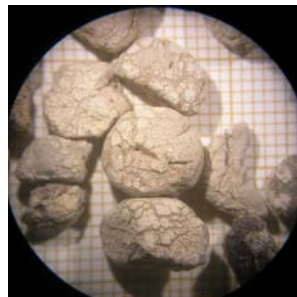


Figura 4.2.- Arlita tomada en microscopio óptico (x15) del DIMM.

Algunas propiedades de la arlita son:

- Densidad 325-750 kg/m<sup>3</sup>, dependiendo de la granulometría.
- Temperaturas máximas de utilización: 1150 °C.
- Absorción de agua: < 38%.
- Conductividad térmica: 0.084 W/(m°C) para una temperatura de 20 °C.
- Inerte, inalterable por el agua y el tiempo y resistente a las heladas y altas temperaturas.
- Resistente a los ácidos. Estable frente a ataques químicos.
- Es un material natural, 100% reciclable.
- No se degrada.



Figura 4.3.- Mortero de cemento aligerado con arlita. Material obtenido de restos en reforma de vivienda.

Su baja densidad y capacidad térmica y acústica convierte a este material como idóneo para material de relleno en morteros de cemento, aislante exterior en cubiertas y como sustituto de la grava, favoreciendo una reducción muy significativa en el peso, especialmente para forjados ligeros. Es apta en jardinería mezclándose con tierra al 50%, favoreciendo el crecimiento de la vegetación y preservándola de heladas. Por su estabilidad en el tiempo es frecuente encontrar aplicaciones como material virgen para drenaje de suelos, aislamiento en cámaras de aire entre paredes o relleno en cubiertas. También es indicada como material de relleno para suelos de poca carga resistente, nivelación de terrenos y como terraplén (Boudaghpour y Hashemi [45]). Es muy empleada en el sector de la construcción aprovechando su baja densidad: ladrillos ligeros hormigonados (Bastos et al. [33]), construcción de cerramientos portantes y no portantes reemplazando los áridos del hormigón por arlita, resultando más ligeros. En el



trabajo de Sikora y Turkiewicz [262] se determina el coeficiente absorción acústico en materiales granulares, considerando la arlita entre uno de los materiales estudiados y obteniendo valores altos de absorción acústica.

Como curiosidad cabe destacar el empleo de este material como agregado para la construcción de embarcaciones (Priszkulnik [233]). En Europa se construyeron barcazas de hormigón para ríos a finales del s. XIX. Durante la I y II Guerra Mundial, debido a la escasez del acero, por parte de los EEUU se fabricaron pequeñas flotas de barcos para travesías oceánicas.

#### 4.4.- LA PERLITA

La perlita es una roca volcánica compuesta de un 65 a un 75 % con dióxido de silicio, 10 a 20 % de óxido de aluminio, 2 a 5 % de agua y pequeñas cantidades de sosa, potasa y cal. Se caracteriza por una pequeña estructura globular y su alto porcentaje de agua combinada ligeramente. El mineral extraído de la cantera se tritura y se le somete a un proceso de calentamiento a unos 1200 °C. En este proceso, la perlita se ablanda y el agua atrapada se transforma en vapor y se expande en el interior formando microceldas esponjosas, aumentando 20 veces su volumen y adquiriendo un color blanquecino. Los tipos de perlita expandida comercializados se clasifican según su granulometría, desde polvo-1.5 mm hasta los 3-5 mm. Se comercializa en sacos de 100, 125 y 170 litros o a granel.



Figura 4.4.- Foto de perlita en microscopio óptico (x16).

Las propiedades de la perlita son:

- Densidad aparente: 50-125 kg/m<sup>3</sup>, según granulometrías.
- Conductividad térmica: 0.106 kcal/(hm°C) para una temperatura de 20 °C.

- Resistencia a altas temperaturas: no funde hasta 1000 °C.
- Insoluble en agua y solventes orgánicos, inocuo, inodoro, inerte y estéril.
- No tóxica: no irrita la piel ni los pulmones y no presenta peligro de silicosis.

La perlita se emplea en el sector agrícola, en horticultura, construcción, textil y en la industria química.

#### **4.5.- LA VERMICULITA**

La vermiculita es un mineral formado por silicatos de aluminio, hierro y magnesio, de estructura y aspecto similar a la mica, y que pertenece al grupo de las flogopitas hidratadas y también al de las biotitas. Se caracteriza por su estructura foliada y su presentación en placas cristalinas de color amarillento que pueden medir hasta 228.6 mm a lo largo y 152.4 mm de grosor. Esta presentación brillante en láminas convierte su superficie en un gran reflector de la radiación solar, lo cual dispersa el calor y aumenta la capacidad de aislamiento térmico en el material. Es un producto ecológico y no representa carga medioambiental. [131]



Figura 4.5.- Roca virgen de vermiculita.

La vermiculita fue descrita por primera vez en 1824 en EEUU, pero sus propiedades específicas no fueron utilizadas industrialmente hasta 1921. La denominación "vermiculita" proviene del latín *vermiculari* (crin gusanos). Fue T.H. Webb en 1824 en Milbury, cerca de Worcester, Massachussets, quien describió y nombró este mineral por primera vez, fijándose en su dilatación parecida al

movimiento de un gusano y la diferencia con las micas. Tiene estructura y aspecto similar a la mica, de cuya meteorización procede en la mayoría de los casos. Sin embargo, la propiedad determinante del uso de la vermiculita a escala industrial es su expansión en dirección perpendicular a las láminas cuando se calienta. Estos filamentos convierten las escamas del mineral en células microscópicas cerradas conteniendo aire inmóvil y deshidratado en su interior. Es en este proceso cuando adquiere un color pardo [91].

El proceso de producción es similar a las perlitas y arlitas. Las condiciones de presión, temperatura, Marcos et al. [180] y contenido en agua (Bradley et al. [48]) son importantes para la estratificación de la vermiculita. La roca extraída de la cantera se limpia de impurezas y se tritura para su clasificación en los diferentes tamaños. La exfoliación se obtiene con un tratamiento térmico controlado a temperaturas entre los 800 y 1100 °C (temperatura de producción menor que la de la arlita) durante 1 minuto en hornos verticales, donde las partículas de agua del mineral se transforman en vapor aumentando su volumen de 8 a 15 veces y de 15 a 20 el espesor original. En algunos casos la exfoliación comienza a temperaturas bajas, en torno a los 150 °C. Ciertas vermiculitas se expanden, también, cuando se introducen, sin necesidad de calentamiento, en peróxido de hidrógeno u otros agentes oxidantes, como una mezcla de permanganato potásico y ácido clorhídrico. En estos casos la expansión está causada por la liberación de oxígeno [91].



Figura 4.6.- Láminas exfoliadas en vermiculita Tipo 3 (x20).

A nivel doméstico, con 1 m<sup>3</sup> de vermiculita cruda, se puede aislar una vivienda de dos plantas con 200 m<sup>2</sup> de superficie útil. Se comercializa en sacos de 125 litros y la densidad viene determinada por la granulometría y sirve de clasificación para la comercialización. La Tabla 4.1 muestra las densidades y granulometrías. Por sus propiedades físicas lo convierte en un material ideal para diferentes actividades:

- Baja densidad aparente: 60 y 140 kg/m<sup>3</sup>, según granulometrías.
- Baja capacidad calorífica: 0.2 J/(kg K).
- Conductividad térmica: 0.061 kcal/(hm°C) para una temperatura de 20 °C.
- Temperatura de reblandecimiento de 1250 °C y punto de fusión en 1370 °C. Mantiene su capacidad de aislamiento entre -200 y 1200 °C.
- Material estable, químicamente neutro (pH 7.2).
- Insoluble en agua y solventes orgánicos, inocuo, inodoro, inerte y estéril.
- No tóxica: no irrita la piel ni los pulmones y no presenta peligro de silicosis.

Tabla 4.1.- Tipos de vermiculita comercializada.

Vermiculita	Granulometría (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Tipo 1	0.5-2	100-120
Tipo 2	0.5-3	85-105
Tipo 3	1-4	85-100
Tipo 4	2-6	70-80

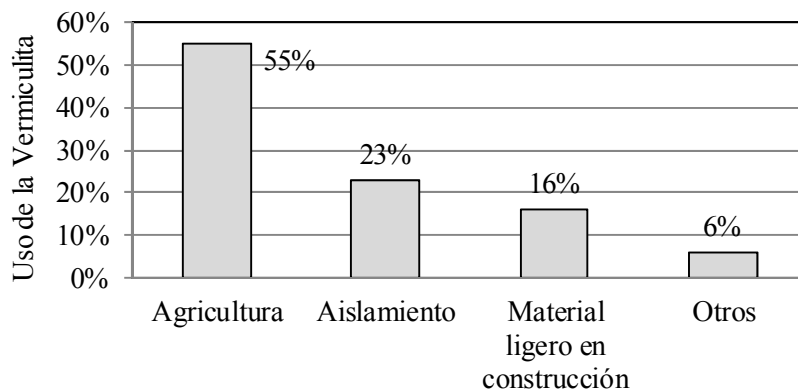


Figura 4.7.- Distribución del uso de la vermiculita [fuente: Elaboración propia].

Tabla 4.2.- Análisis químico de la vermiculita.

Sílice (SiO <sub>2</sub> )	30%
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	11%
Oxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	1.5%
Oxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	2.5%
Oxido de Calcio (CaO)	9%
Oxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )	3%
Oxido de Magnesio (MgO)	15%
Oxido de Férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	14%
Agua libre combinada	11.5%
Otros componentes (NiO, etc.)	2.5%

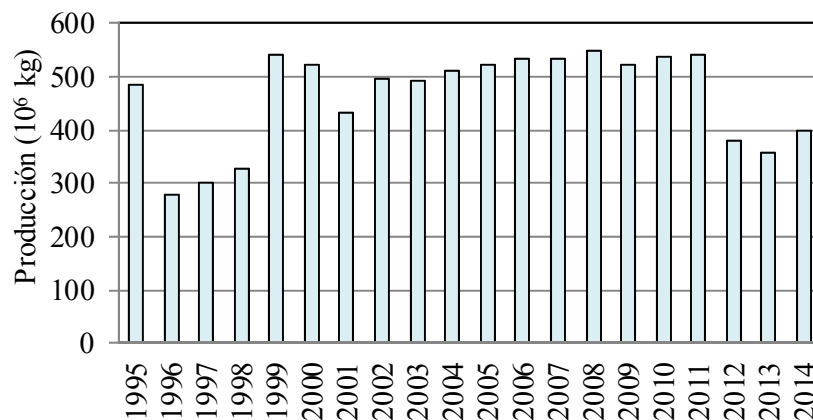


Figura 4.8.- Producción mundial de vermiculita en 10<sup>6</sup> kg. [Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados de Mineral Commodity Summaries, USGS y Index Mundi].

Tabla 4.3.- Producción de vermiculita por país en 10<sup>6</sup> kg. [Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados de Mineral Commodity Summaries, USGS y Index Mundi].

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
EEUU	100	100	100	100	100	100	100	100
Australia	13	13	12	13	13	**	**	**
Brasil	19.0	20.1	20.1	35	50	50	55	50
China	110	120	120	120	120	15	15	50
Egipto	5.8	7.6	12.0	12	5	**	**	**
India	9.6	11.7	12.0	13	13	13	11	15
Rusia	25	25	25	25	25	25	20	25
Sudáfrica	198.5	199.8	193.3	198	170	140	128	130
Uganda	3.5	3.5	3.6	4	20	8	**	**
Otros	25.1	23.9	11.4	16	26	29	29	30

Hasta que en 1990 se cerrara la mina de Lobby (Montana) la mayoría del suministro mundial de vermiculita procedía de este origen. Esta mina tenía un depósito natural de asbestos que causó que la vermiculita estuviese contaminada con dicho material. Por este motivo surgieron los rumores de que la vermiculita contenía trazas de asbestos y era dañina para el ser humano. Hoy en día, la vermiculita es explotada en tres minas de los Estados Unidos y en otros países que tienen bajos niveles de contaminación de asbestos. Los grandes yacimientos de este mineral se localizan en Sudáfrica, con el 90% de su reserva en Palabora, China (su mayor depósito en Xinjiang y Hegbei), Brasil, Zimbawe, EUA (a lo largo de los Apalaches, Carolina del Norte y del Sur, Nevada, Virginia, Texas, Wyoming y Montana), Argentina, Egipto, India, Japón, Kenya, Zimbawe, Rusia, Ucrania, Kazakhstan y Australia. Las reservas y reservas base de las vermiculitas son muy elevadas y al ritmo de crecimiento actual sobrepasan los 150 años.

En España se tiene el yacimiento de Santa Olalla de Cala (Huelva) con una interesante mineralización de vermiculita, con paquetes de láminas de tonos marrones, dorados y verdosos y dimensiones que superan los 10 cm.

#### 4.6.- REFERENCIAS SOBRE MATERIALES EXPANDIDOS Y EXFOLIADOS

Las referencias sobre estos materiales exfoliados son abundantes. El trabajo de Hutcheon [130] es pionero en el empleo de la vermiculita como material aislante en viviendas. El uso de la perlita como aligerante para construcción se ha tratado hace varias décadas. A modo de ejemplo de referencias se tienen los trabajos de Porter y Easterling [231] y Singh y Garg [267]. Es posible encontrar estudios sobre la resistencia de las perlitas según el tamaño de la partículas (Kramar y Bindiganavile ([148] y [149]) y Gül et al. [114]), conductividad térmica (Sengula et al. [256]), la influencia del curado en la resistencia, compactación del mortero (Türkmen y Kantarci [289] y Lanzón y García [156]) o la resistencia del mortero de cemento según la morfología del aligerante expandido (Topçua y Isikdag [286], Cui et al. [69] y Demirboga et al. [74]). Por la naturaleza de este material también está indicado como aislante térmico (Demirboga et al. [73] y Vaou y Panias [296]), estudiando la durabilidad y estabilidad térmica del cemento con vermiculita como aligerante en distintas proporciones (El-Gamal et al. [87]).

Aprovechando la exfoliación característica, la vermiculita es idónea para usos diversos, tal como se muestra en los trabajos de Hoyes [128] y Oliveira y Ugarte [215]. Seguidamente se hace una revisión de la documentación que estudia la vermiculita.

- En los años 80 se tratan sus posibilidades en el sector de la ganadería y agricultura (Fleury [97]), extendiéndose rápidamente su uso como componente base para los sustratos y compost en horticultura. Pueden encontrarse múltiples referencias que abordan su uso en este sector: Afreen-Zobayed et al. [6], Heo et al., [120], Martín et al. [184], Soranz et al. [270], Orioli et al. [217], Tavares et al. [284], Saleh [249] y Vinicius et al. [299].

- Por su capacidad de absorción se emplea como dispersante de herbicida, Rezende et al. [240], o como componente que facilita la biodegradación, Bellia et al. [37].

- Aunque las micas y en menor medida la perlita se han empleado como elemento de absorción de metales: iones metálicos (Alexandre et al. [13]), cobre, zinc, mercurio (Ghassabzadeh et al. [108], Silber et al. [264] y Santos et al. [252]) o torio (Talip et al. [281]) o incluso como dispersantes de aceites (Roulia et al. [243]), la vermiculita tiene un uso más extendido en otros campos de aplicación. Es en este campo de la química donde se encuentra las aplicaciones más numerosas. Aprovechando la capacidad de absorción (Gómez et al. [112], García et al. [105],

Alexandre et al. [13] y Malandrino et al. [176]), la vermiculita se emplea de forma más extendida como agente natural para extraer materiales contaminantes (Abollino et al. [2], Brigattia et al. [51] y Huang et al. [129]), metales pesados: cadmio, zinc, manganeso, cromo, cobre (Ghassabzadeh et al. [108], Fonseca et al. [99] y [98]), Malandrino et al. [177], Stylianou et al. [276], Zheng et al. [319] y Mulange y Garbers [199], atracita (Abate et al. [1]), aceites como el ácido oleico (Moreira et al. [197] y Panuccio et al. [222]), activación química para convertirla en un material orgánico-inorgánico para depuración de agua (Yu et al. [317]), intercambio de componentes: sodio-calcio (Tertre et al. [285]) o absorción de crudo (Silva et al. [265], Oliveira y Ugarte [215] y Garnica et al. [106]).

- Es utilizada como aligerante en morteros de cemento, Affonso et al. [5] y Libre et al. [166].

- Debido a su proceso de exfoliación, la vermiculita permite alcanzar altas temperaturas, Balek et al. [31]. Es por ello que se utiliza como material térmico aislante y como aditivo aligerante en morteros de cemento o yeso (Oliveira et al. [214] y Martias et al. [183]). Los usos en este campo van desde aplicaciones en viviendas (Melo et al. [188]), en el que se consigue una mejora de las condiciones ambientales y se compara con otros materiales, retardantes del fuego, (Amalina et al. [17]), paneles aislantes (Peletskii et al. [224], Xi et al. [312] y Gomes et al. [111]) o material base para calentadores solares domésticos (Li y Yang [163] y Karaipekli y Sari [140]).

Las micas también ofrecen materiales para atenuación acústica. Se dispone de trabajos sobre arlitas, perlitas y vermiculitas con diferentes aglutinantes: cemento (Vasina et al. [297]), resinas sobre arlitas y perlitas (Bartolini et al. [32], Nadal et al. [201], Yilmazer y Ozdeniz [316] y Voronina y Horoshenkov [303]). Otros usos industriales de la perlita cementada puede ser en absorción acústica en vías de ferrocarril, empleándose en losas como agregado para los soportes de las vías (Zhao et al. [318]). Así, pues, los materiales porosos de matriz rígida con material procedente de áridos (arlita, perlita, vermiculita) conforman una matriz rígida con conductos intercomunicados. Este tipo de material puede ser sustituto de los empleados habitualmente (fibras, lanas de roca y espumas) para aplicaciones acústicas ofreciendo mayor resistencia estructural, bajo precio, densidad y buen comportamiento a altas temperaturas. Se ha empleado de forma experimental como material de relleno absorbente en cajas acústicas (Marin et al. [181]), junto a otros materiales. En este caso la vermiculita se ha mezclado con resina en distintas proporciones. Se concluye que la mezcla de vermiculita más porosa ofrece mejor resultado de absorción y mejores resultados que la espuma, felpa, lana de vidrio,



dosificaciones de cromita y el carbonato de calcio. En el sector doméstico es apta como materia base para la elaboración de tableros para muebles (González et al. [113]), con buenas propiedades acústicas, térmicas y comportamiento a la humedad.

La contaminación acústica provocada por la circulación de los vehículos automóviles crece de forma constante. Pueden encontrarse múltiples trabajos que estudian la generación y transmisión del ruido provocado por el contacto directo entre rueda-pavimento. Se ha asociado la contaminación acústica generada por los vehículos al ruido provocado por el motor y los gases de escape. Sin embargo, se ha reducido la emisión al exterior de este ruido mediante la incorporación de materiales (fibras) absorbentes en el chasis y sistemas de escape más eficientes. La reducción del ruido generado por el contacto directo entre rueda y neumático no resulta tan simple. La forma más habitual para la reducción de este ruido es la incorporación de pantallas acústicas que impidan la transmisión del ruido.

Los mecanismos de generación de ruido en la rodadura de un neumático resultan complejos y pueden dividirse en dos grupos, dependiendo del medio de propagación. La primera fuente está relacionada con las vibraciones del neumático resultantes del rozamiento, adherencia y choques del neumático con el asfalto (Nelson [209]), y la segunda con fenómenos aerodinámicos. La contribución de estos fenómenos depende del tipo de neumático, tipo de carretera y velocidad del neumático (Sandberg y Ejsmont [251]). Es conveniente prestar atención al aire que es atrapado por la banda de rodadura. Cuando en su movimiento, el dibujo del neumático deja escapar el aire comprimido en las oquedades, este escapa a gran velocidad generando una parte importante de ruido. Es por ello que disponer de pavimentos que presenten alta porosidad permite una reducción considerable del ruido generado en la rodadura del neumático [207]. Campillo et al. [56] muestran los resultados del nivel sonoro emitido por los neumáticos en condiciones de alta velocidad con técnicas estandarizadas (ISO 3744:1994). Sin embargo, la cuantificación del nivel sonoro que genera el neumático de un vehículo a alta velocidad con técnicas experimentales estandarizadas ofrece cierta dificultad, ya que el neumático debe tratarse como una fuente generadora de ruido. En Campillo et al. [57] se presenta una metodología obteniendo la magnitud sonora de esta fuente sin estar alterada por la atenuación o la distancia entre foco emisor y receptor.

El modo más rápido para la reducción del ruido en el tráfico rodado o ferroviario es la instalación de pantallas y/o materiales que absorban o reduzcan el nivel acústico [86]. En este tipo de elementos es adecuado emplear materiales aligerantes, siendo la arlita expandida muy empleada en este tipo de aplicaciones.

Pueden encontrarse referencias que estudian el uso de la arlita como material de aporte en pavimentos, pantallas acústicas, construcción y rehabilitación de puentes y viaductos e incluso en plataformas de exploración petrolíferas (Priszkulnik et al. [233]). En el trabajo de Decournet [71] se describe el uso de diversas técnicas empleadas para la construcción de pavimentos: empleo en asfalto de cemento poroso, adición de unos centímetros de capas de naturaleza bituminosa o de resinas o arenas ligeras expandidas, obteniéndose una reducción del nivel sonoro entre 3.7 y 5 dB (A), respecto al asfalto de hormigón tradicional. Esto es debido a la absorción que ofrece la porosidad interna del material expandido. Además el firme ofrece otras ventajas como alta capacidad al desgaste, buena adhesión del aglutinante y arlita y como consecuencia menor riesgo al lanzamiento de partículas sueltas por desconchado, escaso deslumbramiento por la luz solar reflejada, buen comportamiento resistente en ciclos de congelación-descongelación, resistente a agentes externos como el vertido de sal en climas fríos y reducción de la cantidad de material necesaria para el asfaltado. Las posibilidades que ofrece la arlita como agregado en productos para el asfalto se indican en el estudio de Losa et al. [168] en el que se realizan ensayos con un 15% en peso de arlita, demostrando que es un material que reduce el impacto ambiental en carreteras urbanas y aumenta la fricción frente a los asfaltos habituales.

En el caso de pantallas acústicas es habitual el empleo de materiales aligerantes, por lo que pueden encontrarse diversas contribuciones. Sikora dispone de documentación relativa a materiales granulares y su aplicación para protección acústica en paredes contra fuentes sonoras externas o internas. Entre otros materiales emplea la arlita, nombrada como gravelita, para el estudio del coeficiente de absorción en tercio de octavas en varios espesores, Sikora et al. [263]. En esta referencia se concluye que los paneles con agregado de arlita presentan un rango estrecho de frecuencias con absorción adecuada, mientras que otros agregados, como pueden ser el reciclado de neumáticos, ofrecen un mayor rango de frecuencias para absorción alta. Otra aplicación de arlita en paneles de absorción acústica se muestra en las referencias de Lakušić et al. ([154] y [155]) y Ahac et al. [7] donde se comparan las capacidades acústicas de paneles con hormigones aligerados con arlita y paneles de madera y se introduce un nuevo producto derivado de la reciclabilidad de neumáticos fuera de uso como material de aporte en el hormigonado. En Turkiewicz y Wszolek [288] se estudia la absorción acústica de placas de hormigón aligerado con arlita en cámara reverberante.

#### **4.7.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO**

En este capítulo se han descrito las propiedades de los materiales expandidos que pueden ser interesantes para la obtención de materiales porosos. De ellos, la arlita y la vermiculita se emplean de forma generalizada en diversos sectores y serán estudiadas más adelante empleándose como material ligero para material poroso de estructura rígida. Se incluye una revisión de la bibliografía encontrada que emplea materiales de aporte en el cemento. En algunos casos, la finalidad es reducir el peso del producto final, como puede ser el empleo de gasificantes y también reducir los residuos de algunos materiales, como es el caso del empleo del poliestireno expandido y otros plásticos. Otros trabajos utilizan materiales procedentes de reciclado para generar productos para otros usos, como puede ser el empleo de triturado de neumático procedente de reciclado con resina como material aglutinante. La consulta de estas referencias también se ha realizado para conocer los usos generales que se dan a estos productos. Se ha encontrado alguna documentación que aborda el comportamiento acústico de estos materiales ligeros con distintos aglutinantes: resinas y cemento, así como estudios sobre la influencia de la arlita en pavimentos para tráfico rodado. En estos, se pone de manifiesto que este material expandido reduce el nivel acústico y proporciona otras ventajas con respecto a los pavimentos habituales. También pueden encontrarse aplicaciones con fines acústicos de paneles aligerados con arlita.



## **Capítulo 5.- Caracterización de materiales aligerados. Resultados experimentales.**

*Partiendo del análisis granulométrico de la arlita y la vermiculita, en este capítulo se realiza un estudio experimental para obtener un material poroso con cemento que presente consistencia y suficiente porosidad. Se efectúa un primer estudio preliminar para analizar las posibilidades acústicas de estos materiales. Para ello, se lleva a cabo un detallado análisis experimental de la respuesta acústica en diversas campañas de medición y se determinan los parámetros de caracterización para cinco materiales elaborados con arlita y vermiculita. Se analiza la predicción acústica de un modelo matemático empleando parámetros experimentales y su ajuste a la absorción acústica experimental.*



### 5.1.- MATERIALES EMPLEADOS

El material base estudiado en este trabajo se ha seleccionado a partir de sus propiedades físicas: ligereza, resistencia térmica a altas temperaturas y buenas propiedades desde un punto de vista medioambiental. Otra característica del material es la posibilidad de emplear cemento como elemento ligante, lo cual confiere variedad en la obtención de formas constructivas. Las probetas se han elaborado con dos tipos de materiales: arlita y vermiculita. El material virgen se encuentra disponible en el mercado. La arlita ha sido comprada en centro de distribución de material de construcción y las vermiculitas, así como la perlita, han sido cedidas sin ningún coste por el fabricante *Perlindustria*.

Dependiendo del fabricante de cada material puede variar la denominación y el tamaño de las partículas, así como su porcentaje. También se suministra de forma diversa: a granel o sacos de 50 litros. En el caso de la vermiculita la denominación está dada a partir del tamaño de las partículas y por comodidad se ha mantenido la misma que ha proporcionado el fabricante. El menor tamaño disponible es la vermiculita Tipo 0 que está formada por partículas muy finas de polvo.

El estudio realizado aquí se centra sobre cinco materiales granulares elaborados con cemento Portland empleando la arlita y la vermiculita como material base. Se ha seleccionado un tamaño de grano medio: Tipo 2 (menor tamaño) y Tipo 3 (mayor tamaño). El estudio granulométrico indica que el tamaño de grano más abundante en estos materiales es de 1 mm y 2 mm, respectivamente, representando alrededor del 50% del total de material. Se han seleccionado dos granulometrías de arlita a partir de la separación en tamizadora y dos granulometrías de vermiculita Tipo 2, configurando muestras de tamaño grueso y fino, respectivamente. En el caso de la vermiculita Tipo 3 el tamizado aglutina la mayor parte de los granos en el tamiz de 2 mm, por lo que representa un solo tipo de grano.

Para conocer las posibilidades acústicas de estos materiales aligerantes se ha realizado un estudio previo experimental sobre probetas con vermiculita tipo 2 y 3 en distintas proporciones y tamaño de grano. Este estudio permitirá analizar el efecto del tamaño de las partículas, proceso de preparación o la proporción v-c-a, entre otros, sobre los resultados acústicos, dando viabilidad a un estudio de caracterización experimental sobre probetas de arlita y vermiculita.

## **5.2.- GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES**

La distribución granulométrica del material virgen se ha obtenido con la tamizadora de tipo electromagnética marca CISA modelo RP09 que se encuentra disponible en el laboratorio del DIMM, empleando los tamices de luz de malla de 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 y 0 mm (norma UNE-EN 933-2 [88]). La tamizadora dispone de cabezal ajustable a la columna de tamices y cierres de sujeción rápida con 1 ó 2 aprietes a las barras verticales. La altura máxima de tamices apilados es de 450 mm, que corresponden a 8 tamices de 50 mm de altura cada uno. El tipo de movimiento es tridimensional, combinando un movimiento vertical de amplitud regulable con una rotación del producto a tamizar por toda la superficie del tamiz. La regulación digital de la amplitud de vibración dispone de 15 niveles de potencia (de 5 a 20) y el temporizador digital permite hasta 99 minutos de tamizado continuo. Cada nivel de intensidad corresponde a 0.1 mm de amplitud de vibración.

La disposición de los tamices se muestra en la Figura 5.1, con un último tamiz denominado “tamiz ciego”, el cual recoge las partículas más pequeñas (prácticamente polvo). Con la agitación provocada por el vibrado se hacen pasar las partículas desde el tamiz superior que tiene mayor luz de malla a los tamices inferiores con menor luz de malla. Esto permite separar en peso las partículas de una muestra en distintos tamaños.

Dependiendo de la forma de los granos algunos tamices resultan bloqueados, por lo que ha sido necesario emplear distintas cantidades durante el tamizado. De forma periódica durante el tamizado se ha comprobado que los tamices no quedaban obstruidos por partículas atrapadas en las mallas, ya que se impide el paso de granos de menor tamaño. En estos casos se ha procedido a liberar la partículas atrapadas y continuar con el tamizado. La intensidad en el tamizado ha sido moderada (nivel 14) y el tiempo empleado en cada proceso ha variado según el material: los tamices se han pesado regularmente cada 5 minutos hasta conseguir una variación mínima. El tamizado de la vermiculita V2 y arlita ha necesitado más tiempo que la vermiculita V3. Por término medio el tiempo en cada una de ellas ha sido de 15 minutos para la vermiculita V2 y 25 minutos para la arlita.

Para garantizar que las cantidades seleccionadas desde el recipiente de almacenamiento ofrecen resultados representativos se ha prestado especial cuidado en que el material se encuentra totalmente removido y no presenta ninguna concentración de un mismo tamaño de grano en el almacenado. Para ello se ha



removido adecuadamente el material almacenado antes de escoger la cantidad para el tamizado. En el caso de la vermiculita esto es muy importante ya que las partículas de menor tamaño (polvo y partículas muy finas) tienden a depositarse en la parte baja del recipiente de almacenamiento.



Figura 5.1.- Tamizadora disponible en el laboratorio. Tamices según norma UNE 7050-3 [282].

#### 5.2.1.- *Arlita gruesa*

Para la arlita se han tamizado 7 cantidades arbitrarias seleccionadas del recipiente de almacenamiento con pesos totales entre 447 y 558 g. La distribución granulométrica indica que el tamaño de grano predominante en la arlita se ubica en los tamices de 2, 4 y 8 mm, representando en término medio el 20.88, 74.07% y 4.48% del material, respectivamente para estos tamices. El resto de tamices indican la ausencia de granos de tamaño inferior a 2 mm, recogiendo también partículas fraccionadas de granos de mayor tamaño.

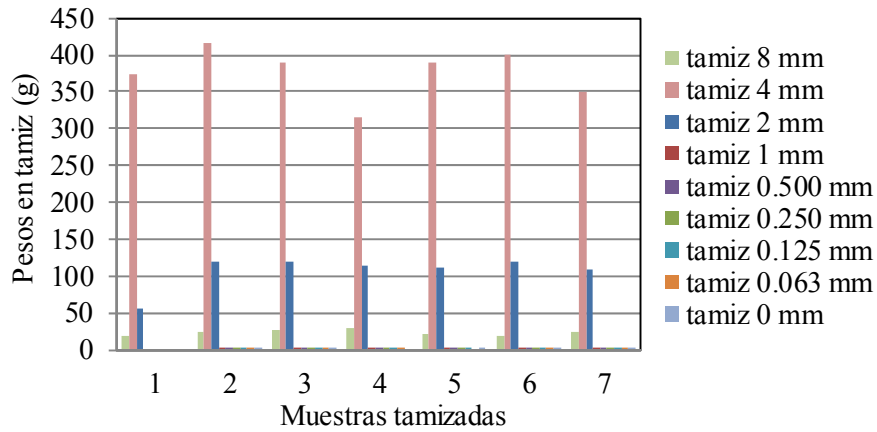


Figura 5.2.- Tamizado de arlita.

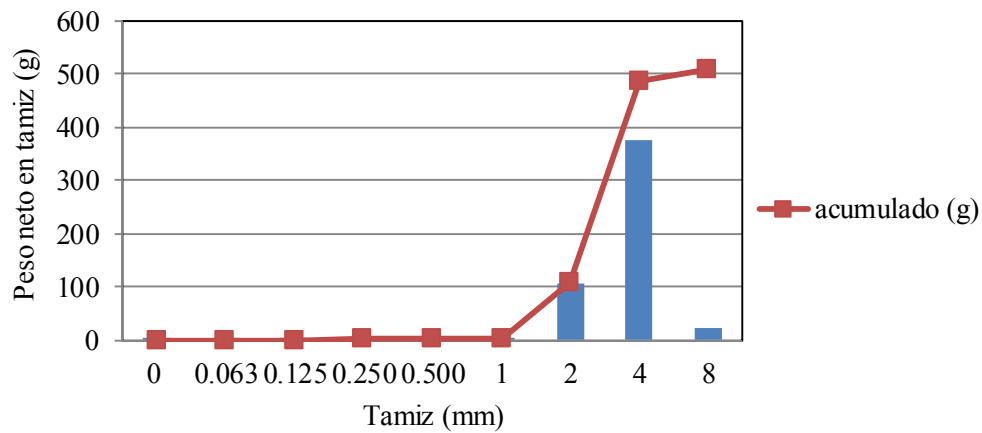


Figura 5.3.- Distribución media de arlita en tamices.

### 5.2.2.- Arlita fina

La selección del material empleado para elaborar las probetas de arlita de menor tamaño (Arl\_fina) se ha realizado intentando obtener tamaño de granos similares a los obtenidos en la vermiculita V3 y entre la V2\_gruesa y V2\_fina. Para

ello se han extraído los granos de arlita de mayor tamaño y tamizando solo hasta el tamiz de 4 mm que es el más representativo (77.52%) y el de 2 mm con el 22.87%. Este tamaño de grano permitirá analizar la respuesta del material en dos tamaños de grano diferentes y con cierta similitud a las V3 y V2\_fina.

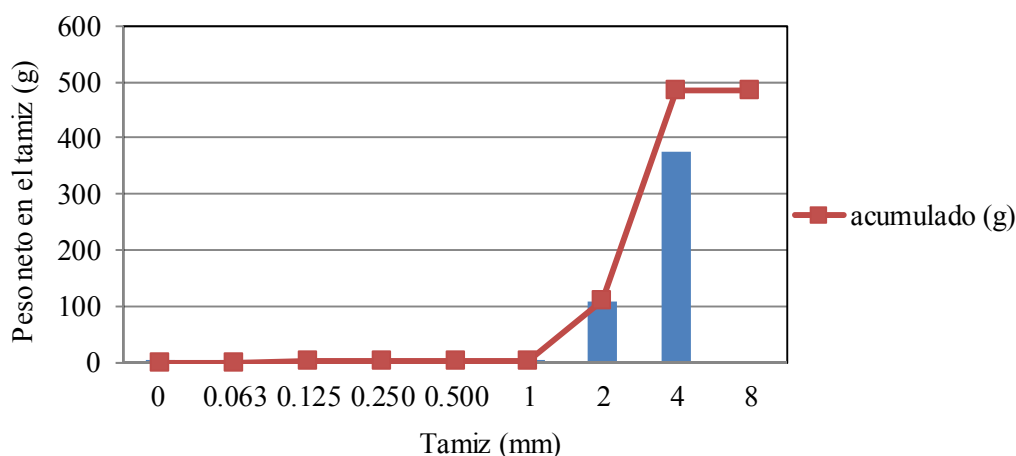


Figura 5.4.- Distribución media de arlita fina en tamices.

### 5.2.3.- Vermiculita V2

En el caso de la vermiculita V2 se han tamizado 8 cantidades aleatorias de 150 g de vermiculita tipo 2. El tamaño de grano predominante es 1 mm, con una distribución porcentual de los tamaños de grano más abundantes se recogen en los tamices de 0.5, 1 y 2 mm, representando el 20.33%, 54.63% y 12.99% del peso retenido en ese tamiz. El resto de tamices, con porcentajes inferiores al 10% en peso retenido, resultan poco representativos. Las figuras siguientes muestran la distribución granulométrica de los tres materiales vírgenes.

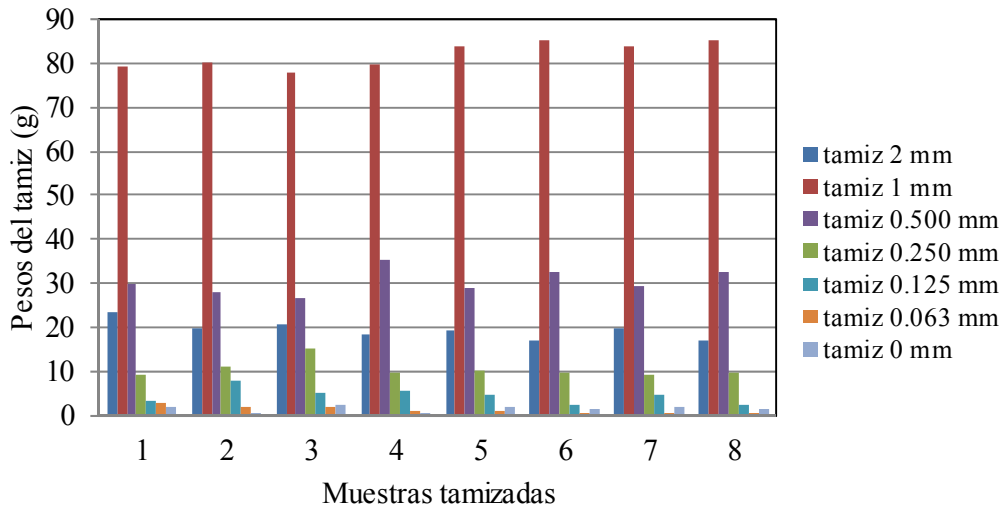


Figura 5.5.- Tamizado de vermiculita tipo 2.

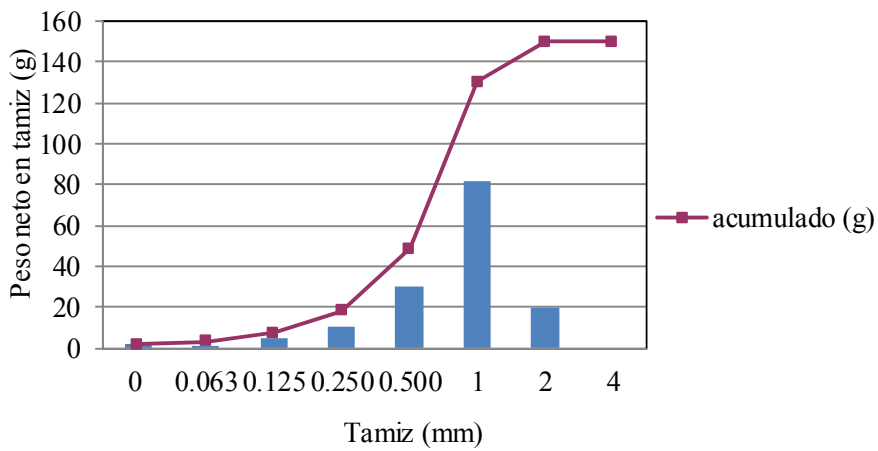


Figura 5.6.- Distribución media de vermiculita tipo 2 en tamices.

## 5.2.4.- Vermiculita V3

El tamizado de la vermiculita tipo V3 se ha realizado con 7 muestras seleccionadas aleatoriamente del almacenamiento y con un peso 150 g cada una de ellas. La distribución que ofrece este tipo de material es similar al obtenido en la vermiculita V2. La mayor cantidad de material virgen se encuentra distribuida entre los tamices de 2, 1, 4 y 0.5 mm de luz de malla. El tamaño de grano más abundante es de 2 mm, representando el 52.68% en peso del material y de 1 mm de luz de malla, con un 28.34%. Los otros dos tamices de 4 y 0.5 mm retienen el 8.4 y 8.09%, respectivamente. El resto de tamices no son representativos.

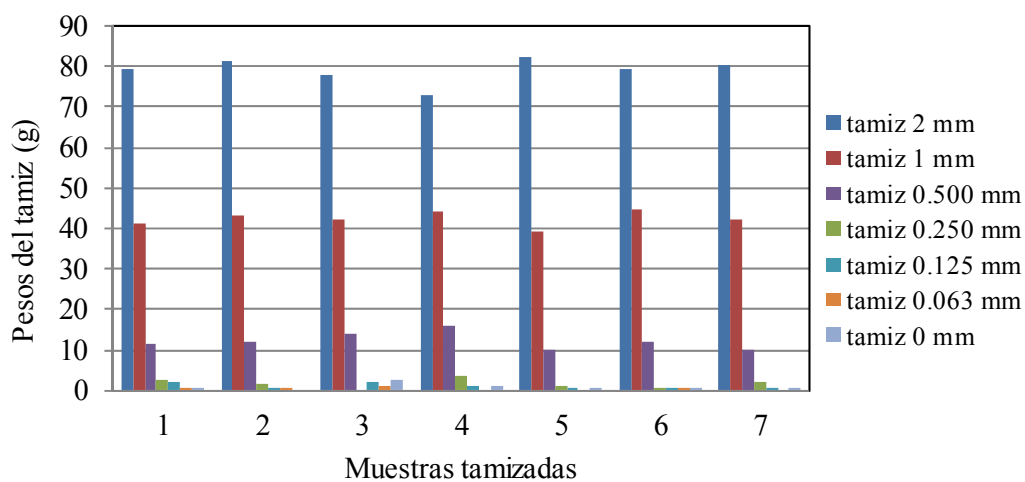


Figura 5.7.- Tamizado de vermiculita tipo 3.

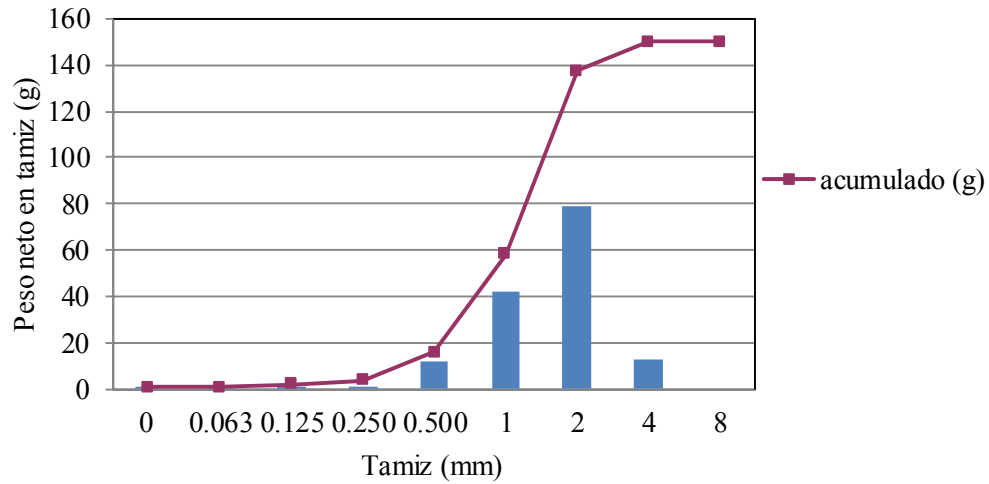


Figura 5.8.- Distribución media de vermiculita tipo 3 en tamices.

Como se observa en la distribución de tamaño de grano, los materiales seleccionados disponen de granulometrías variadas. La arlita concentra su mayor cantidad de granos en el tamiz de 4 mm, mientras que la vermiculita V3 y V2 se ubica en el tamiz de 2 y 1 mm, respectivamente. También se observa que en todos los casos se presenta una distribución normal centrada en estos tamices que recogen la mayor cantidad de material. El resto de tamices almacenan cantidades menos significativas. En consecuencia, con estos materiales se dispone de una variedad de granos entre los compuestos que se analizarán más adelante.

### **5.3.- *CONDICIONANTES EN LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS***

En este apartado se analizan los factores que influyen en mayor o menor grado en la morfología de las muestras. Estos factores intervienen en aspectos como la consistencia y adherencia de los granos de las muestras, manejabilidad y manipulación, tamaño del grano así como tamaño del poro, y como resultado de ello en el comportamiento acústico del material. Con el estudio de estos factores se pretende determinar aquellas dosificaciones que ofrecen muestras aptas para ser estudiadas. Se han realizado una cantidad importante de muestras en las que se ha modificado el tipo de adhesivo, proporciones material-c-a, proceso de elaboración y tiempo de amasado. La nomenclatura empleada hace referencia a las cantidades de material, cemento y agua en cada composición de las probetas que se indican en este trabajo. Para la preparación de las muestras se han pesado en balanza digital las cantidades de material en cada caso.

El procedimiento empleado ha consistido en mezclar el cemento y el agua hasta obtener una pasta, y a esta última se le añade a continuación el aligerante: arlita o vermiculita según el caso. Ocasionalmente, con el fin de observar el efecto resultante, se han mezclado los componentes en forma manual, observándose que la mezcla no resulta homogénea, por lo que es importante el uso de una amasadora mecánica. También se ha procedido a mezclar los componentes en orden distinto: vermiculita con cemento a los que se añade luego el agua, y vermiculita y agua y a continuación el cemento. En estos supuestos se requiere mucho más tiempo de mezclado para obtener una mezcla homogénea y uniforme, obteniendo aglutinaciones de gran tamaño, especialmente con valores altos de agua y/o cemento. En estos materiales granulares se necesitan varios días más para el secado completo en función de la porosidad de la probeta. En el interior de los moldes se ha depositado una capa de silicona de desmolde para facilitar la extracción de las probetas del molde. Sin embargo, algunas muestras con gran porcentaje en peso de cemento presentan gran dificultad para su extracción, teniendo que recurrir a sustituir la silicona por aceite de lubricación, lo que facilita y suaviza la extracción.

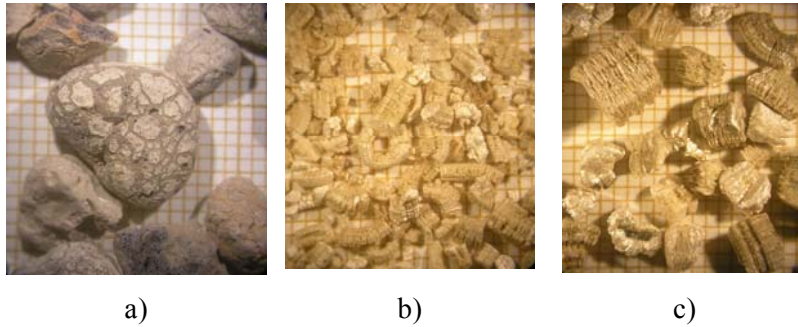


Figura 5.9.- Imágenes (x8 aumentos). (a) Arlita, (b) V2 y (c) V3.

### 5.3.1.- Vermiculita

La alta capacidad absorbente que ofrece la vermiculita, que ha sido indicada en el *Capítulo 4.- Materiales granulares de matriz rígida* en las referencias bibliográficas consultadas y que también se ha comprobado experimentalmente, comparada con la arlita, hace que se comporte de un modo muy distinto frente a las cantidades de agua. Por todo ello, ha sido necesario realizar un estudio más detallado de su comportamiento para garantizar un producto final con suficiente cohesión para ser manipulado con tranquilidad y que no sufra desperfectos durante los numerosos ensayos experimentales y en banco de tubo de impedancia. Se ha observado que la sensibilidad que ofrece la vermiculita a estos factores no se reproduce en el caso de la arlita, ofreciendo en este último caso un producto con alta cohesión entre partículas y muy consistente en la manipulación.

Los factores que han sido analizados en la preparación de las muestras de vermiculita y que influyen en la cohesión del producto final han sido:

- Tipo de aglutinante
- Humectación de la vermiculita
- Granulometría de vermiculita
- Tiempo y modo de preparación
- Proporción vermiculita-cemento-agua



Estos factores inicialmente se han estudiado sobre probetas obtenidas al verter la masa en dos moldes cilíndricos de PVC de 52 mm de diámetro en longitudes de 50 mm y 100 mm, respectivamente. Se ha realizado un gran número de distintas probetas para comprobar y comparar el efecto de estos factores sobre el resultado de la muestra (Véase el Anexo 1).



Figura 5.10.- Molde de preparación y probetas extraídas.

#### 5.3.1.1.- Tipo de aglutinante

La resistencia y naturaleza del aglutinante utilizado es determinante para que el material compuesto disponga de una consistencia adecuada y pueda ser manejado sin que se produzcan desperfectos durante la manipulación. Los adhesivos utilizados han sido: yeso común, cemento Portland habitual para mortero y cemento Portland de alta resistencia.

El empleo del yeso como aglutinante ha generado probetas con escasa o muy baja consistencia. Esta excesiva fragilidad del producto obtenido impedía cualquier manipulación. En algunos casos, el simple roce de la bolsa porta-muestras es suficiente para que se produzca un deterioro y desmoronamiento de la muestra, dejándola inservible. Como alternativa a este adhesivo se ha optado por emplear cemento Portland CEM II/B-L 32.5R de baja resistencia ( $32.5 \text{ N/mm}^2$ ) que se emplea de forma general en el sector de la construcción. En este caso, la consistencia de las muestras es bastante similar a la del yeso como elemento de unión. Con alta dosis de cemento se han obtenido muestras relativamente aptas para su manipulación pero resultan probetas con un peso elevado. Con bajas cantidades de cemento, las muestras no ofrecen la consistencia suficiente. La Figura 5.12 ilustra el estado en que queda la probeta tras algunas manipulaciones.

Con muy bajos porcentajes de aglomerante las probetas apenas tenían consistencia y la extracción desde el molde producía graves desperfectos o incluso el desmoronamiento completo de las probetas. Aumentar la cantidad de cemento no es una alternativa viable ya que el peso de las probetas resultantes sería inadecuado para futuras aplicaciones.



Figura 5.11.- Probeta V2 35-56-28 con cemento habitual de baja resistencia.

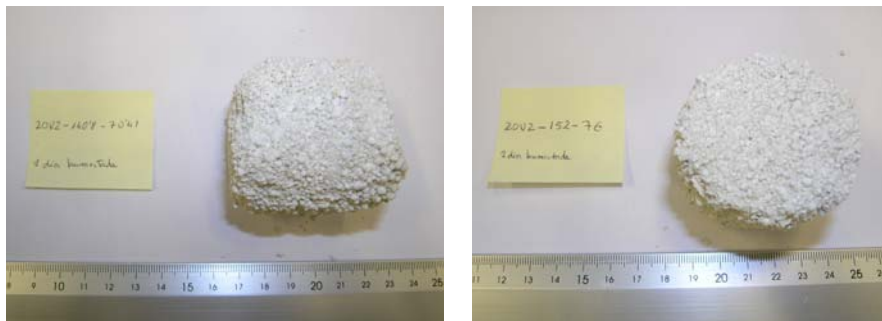
De estos hechos se dedujo que la capacidad resistente del adhesivo repercutía decisivamente en el resultado final de la muestra obtenida. Así, pues, se sustituyó el cemento utilizado por otro de mayor resistencia. Se seleccionó el cemento Portland BL I 52.5 R ( $52.5 \text{ N/mm}^2$ ) de alta resistencia. El color blanco obedece solamente a fines estéticos. Sobre las mismas proporciones v-c-a trabajadas con cemento de baja resistencia, se elaboraron nuevas mezclas con el cemento de alta resistencia, concluyendo que se obtenían muestras con un cambio muy importante en la cohesión entre las partículas. Se observó que dependiendo de la dosificación de v-c-a, algunas muestras eran todavía frágiles para su manejo, lo cual indicaba que era necesario estudiar la influencia de otros factores como son las proporciones de los ingredientes y su efecto sobre la cohesión en las muestras.



a) V2 20-110-55 (tamaño 50 y 110 mm)      b) V2 20-80-48 (tamaño 50 mm)

Figura 5.12.- Fragilidad con cemento de baja resistencia (32.5 R).

Se ha podido comprobar que la resistencia del cemento es más determinante en la cohesión de los granos en el producto final. Incluso con un exceso de agua, el resultado es que las probetas no tienen suficiente cohesión para su posterior manejo.



a) V2 20-140.8-70.41

b) V2 20-152-76

Figura 5.13.- Baja consistencia en probetas de V2 con cemento 52.5 R.

### 5.3.1.2.- Humectación de la vermiculita

Para analizar el efecto de la cantidad de agua en la proporción v-c-a y dado el carácter absorbente de la vermiculita se han analizado también muestras con vermiculita tipo 2 humectada en exceso de agua. La vermiculita presenta facilidad para absorber agua, de forma que al verterla sobre la pasta de cemento-agua, rápidamente se obtiene una mezcla semirreseca que durante el amasado en máquina se vuelve más húmeda y más homogénea: granos bien definidos.

La vermiculita tipo 2 ha sido humedecida en un baño de agua para garantizar una impregnación suficiente. A las 24 horas se ha depositado en un recipiente para que la vermiculita expulse libremente el excedente de agua. Posteriormente se ha amasado en distintas proporciones en peso de v-c-a. La Figura 5.14 muestra algunas probetas realizadas para varias proporciones c/a. A la vista de los resultados se concluye que el exceso de agua conduce a la obtención de bloques macizos de cemento y que un cambio en la proporción vermiculita humectada/cemento no modifica el aspecto de la probeta. En la Figura 5.14 a) se tiene un alto contenido en cemento ( $v/c = 1.6$ ), el cual impregna por completo toda la vermiculita, quedando un bloque completamente macizo sin porosidad. En la Figura 5.14 b) con  $v/c = 1.2$ , se obtiene también un bloque de las mismas características, aunque es posible ver las partículas de vermiculita. De esto se concluye la importancia de la cantidad de agua/cemento en el resultado de la porosidad en la muestra.

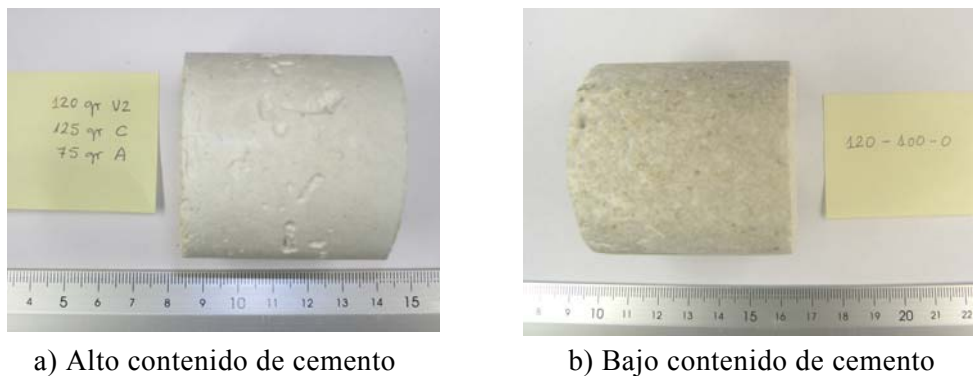


Figura 5.14.- Probetas de vermiculita V2 humectada.

5.3.1.3.- Granulometría de vermiculita

El tamaño del grano de la vermiculita virgen determina el tamaño del grano del producto poroso. Con las proporciones v-c-a indicadas en la Tabla 5.1 se realizaron muestras para la vermiculita V3, al objeto de comparar estos tipos de vermiculita. Los granos que se generan en la vermiculita tipo 3 son mayores y disponen de mayor tamaño de poro que en el caso de la vermiculita tipo 2. En la Figura 5.15 se comparan las probetas para la proporción 20-80-64.

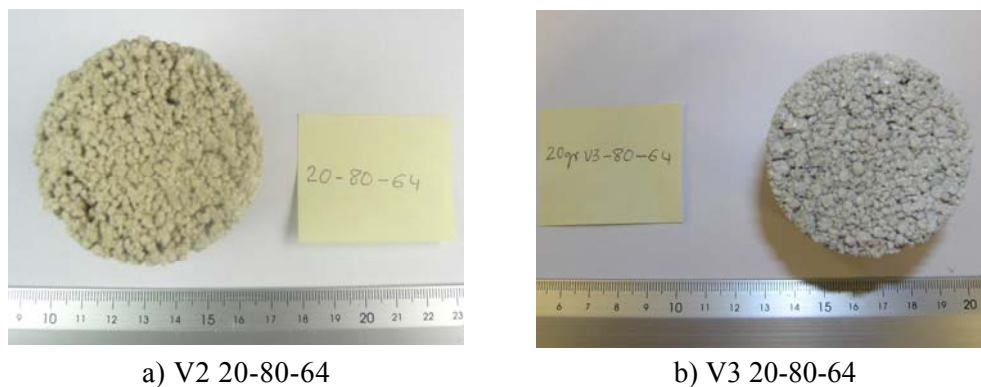


Figura 5.15.- Tamaño de grano según tipo de vermiculita.

5.3.1.4.- Tiempo y modo de preparación de la mezcla

Uno de los factores que es importante señalar es que el proceso de elaboración de las probetas determina el tamaño del grano final. Así, se ha observado que el amasado manual, exceso de agua o un tiempo bajo en la amasadora automática proporciona granos muy apelmazados, que con mayor tiempo de amasado se reducen considerablemente. Para el amasado manual se ha empleado el mismo recipiente que incluye la amasadora y una espátula. La Figura 5.16 ilustra la diferencia observable en el tamaño de grano obtenido y la falta de uniformidad en la muestra elaborada manualmente.



Figura 5.16.- Diferencia entre amasado manual y mecánico en V2 20-80-64.

El amasado automático se ha realizado mediante una amasadora mecánica disponible en el DIMM, de tipo orbital marca BOMANN, modelo CB 332, siguiendo la norma UNE EN 196-1 [190], Figura 5.17. La velocidad de rotación de la pala amasadora ha sido moderada, nivel 2, siendo 6 el nivel máximo. Las rotaciones por minuto en el nivel 2 y 3 son: 68 y 92 rev/min, respectivamente.



Figura 5.17.- Batidora mecánica para el amasado.

A partir de la proporción en peso de vermiculita-cemento-agua, la preparación de las muestras se ha iniciado disolviendo el cemento en el agua hasta conseguir una mezcla homogénea: preparación de la lechada de cemento. Seguidamente se vierte lentamente la vermiculita con rotación de la pala. Para

reducir en lo posible la formación inicial de grumos. Dependiendo de la composición de la mezcla, el tiempo de amasado ha variado entre 10 y 15 min.

En algunas dosificaciones este efecto resulta más claro. A modo de ejemplo, se muestra la composición V2 20-80-64 con tamaño de grano fino realizado con vermiculita tipo 2, ver Figura 5.18, en la que resulta evidente utilizar una amasadora mecánica con un tiempo suficiente para deshacer los grumos. La cantidad de la mezcla también influye sobre el resultado obtenido. Para el caso de utilizar una elevada cantidad de los componentes se obtienen muestras con un alto grado de apelmazamiento formando granos gruesos, necesitando mayor tiempo de amasado.



Figura 5.18.- Granulometría en V2 20-110-50 (amasado automático y manual).

#### 5.3.1.5.- *Proporción vermiculita-cemento-agua*

La cantidad de cemento y agua determina la consistencia. Además, un efecto derivado de estas cantidades determina la morfología de las probetas. En la Figura 5.19 se ilustra un ejemplo de la adhesión de varios granos como consecuencia de un exceso de agua en la preparación de la mezcla resultando un producto con alta cohesión pero sin porosidad. Este efecto se produce en ambos tipos de vermiculitas estudiados.



Figura 5.19.- Apelmazamiento de varios granos por exceso de agua.

A continuación se analiza la influencia de la cantidad de cemento y agua sobre el aspecto de las probetas, manteniendo invariante la cantidad de vermiculita: como peso característico de referencia se ha tomado 20 g. Con esta cantidad se dispone de cantidad suficiente para elaborar muestras cilíndricas representativas.

El ajuste de v-c-a se ha realizado inicialmente sobre la vermiculita tipo 2, ya que debido a su distribución granulométrica ofrece mayor dificultad para garantizar la cohesión de la mezcla. También se ha cuantificado el tiempo de fraguado, encontrándose que el desmoldeo y manipulación cuidadosa se puede realizar a partir de las 48 h. Esto facilita el fraguado interno [191] de las muestras, siendo necesario varios días para que el proceso se realice completamente. El tiempo necesario para el secado depende de la morfología de la muestra (porosidad y tamaño de grano, relacionados con el tipo de material virgen y la relación v-c-a) y la cantidad de agua. El desmoldeo permite el fraguado uniforme de las probetas. Todas las muestras se han dejado secar a temperatura ambiente y sin flujo de aire. Las condiciones atmosféricas se han mantenido estables durante el fraguado: temperatura ambiente entre 23 y 25 °C y una humedad relativa entre 44 y 52%. La Tabla 5.1 recopila las muestras que han resultado consistentes y con porosidad.

La referencia de partida ha sido utilizar la misma proporción árido-cemento-agua que en el caso de la preparación del mortero de construcción. En Jiménez et al. [133] se recomienda que la relación agua/cemento sea tan baja como sea posible y en ocasiones es necesario utilizar mayor cantidad de cemento de la estrictamente necesaria para una adecuada manejabilidad y evitar fenómenos de segregación. La proporción que se recomienda en esta referencia es  $c/a \approx 2$ . Las primeras muestras se han realizado con una proporción similar a la empleada en la preparación del hormigón árido/cemento = 3 y árido/cemento = 2.



Para cuantificar las cantidades necesarias de los distintos materiales para obtener 1 m<sup>3</sup> de hormigón hay que tener en cuenta la contracción que experimenta el hormigón fresco y que se puede estimar en un 2.5%. Esto es debido a que el agua se evapora en una parte, en otra es absorbida por el árido y el resto forma con el cemento una pasta que retrae apreciablemente antes de fraguar [133]. La suma de los volúmenes de los materiales debe ser 1.025 litros para obtener 1 m<sup>3</sup> de hormigón, es decir

$$A + \frac{C}{p} + \frac{G_1}{p_1} + \frac{G_2}{p_2} = 1.025 \quad (5.1)$$

siendo  $A$  la cantidad de agua en litros por metro cúbico de hormigón.  $C$ ,  $G_1$  y  $G_2$  son las cantidades de cemento, arena y grava en kg/m<sup>3</sup>.  $p$ ,  $p_1$  y  $p_2$  son las masas específicas (densidades reales) en kg/dm<sup>3</sup>. En ausencia de datos puede tomarse  $p = 3.1$  y  $p_1 + p_2 = 2.65$ . Mediante la selección de la relación  $C/A$ , la dosificación de grava se obtiene fijando la cantidad de cemento. Los componentes (arena y áridos) que forman la grava se determinan a partir de la distribución granulométrica.

A partir de las primeras muestras y por el gran volumen que representa la vermiculita V2 se obtenía poca consistencia o bien bloques macizos en las probetas resultantes, por lo que se procedió a variar la cantidad de agua y/o cemento.

Partiendo de la proporción en peso  $c/a=2$  se obtiene una dosificación provisional con una distribución de 32.6% en peso de vermiculita, 45.16% de cemento y 22.28% de agua. Se han realizado distintas muestras reduciendo progresivamente la cantidad de cemento para disponer de probetas con el menor peso posible y que presenten porosidad. Se ha determinado que muestras de V2 con proporción V2 20-110-55 disponen de cohesión suficiente y además de cierta porosidad. A partir de este nuevo punto de partida se ha reducido la cantidad de cemento para conseguir un producto lo más ligero posible. Con esta disminución en peso del cemento se ha comprobado que mantener la proporción  $c/a=2$  implica una disminución de la consistencia alcanzada, por lo que se ha procedido a aumentar la cantidad de agua ( $c/a < 2$ ). Esto permite cuantificar la mínima cantidad de cemento que es necesaria para garantizar la cohesión. El aumento de la cantidad de agua está justificado por la fuerte capacidad de absorción de la vermiculita. En comparación con la arena, esta distribución para el caso de la vermiculita no garantiza la cohesión suficiente, como se puede observar en la Figura 5.20.

Las proporciones se han variado bajo tres supuestos:

- Proporción de  $c/a = 2$ . Obtención de cantidades v-c-a más adecuadas:

Manteniendo el peso de vermiculita constante (20 g) se ha variado el peso del cemento y agua, dejando invariante la proporción  $c/a=2$ . Se observa que la consistencia está muy influenciada por la cantidad de cemento. Para casos con una distribución de V2 20-110-55, que equivalen a una proporción en peso de 10.81-59.46-29% la probeta presenta buena consistencia y manipulación. Para valores más elevados de cemento tiende a perder porosidad y convertirse en un bloque de cemento macizo, como por ejemplo para el caso de V2 20-125-62.5 que equivale a 9.64-60.24-30.12%.

Para valores más bajos de cemento apenas se observa cambio en la porosidad. Sin embargo, la consistencia de los granos disminuye rápidamente con menores cantidades de cemento/agua, como es el caso de V2 20-75-37.5 que equivale a 20-75-37.5% en peso. Como muestra representativa se ha encontrado que en V2 20-100-50, equivalentes a 11.76-58.82-29.41% la muestra presenta cierta facilidad para manipularse, aunque debe realizarse con mucho cuidado ya que los granos del contorno tiende a despegarse.

- Proporción de  $c/a < 2$ . Efecto del agua:

Se ha mantenido invariante la cantidad de vermiculita V2 (20 g) y se ha variado la cantidad de cemento y agua con una proporción entre ambas  $c/a < 2$ , para analizar el efecto del agua.

Se ha partido de la muestra más adecuada obtenida en el caso anterior: V2 20-100-50 y se ha variado el agua añadida, observándose que para casos con alto porcentaje de agua V2 20-100-80 que equivalen a 10-50-40 %, la muestra es similar a un bloque de cemento macizo sin porosidad, mientras que con valores más bajos V2 20-100-60, es decir, 11.11-55.56-33.33% aparecen grandes granos apelmazados y fuerte consistencia. Este efecto también aparece para menor cantidad de cemento y proporciones similares, como es el caso de V2 20-80-64 con 12.2-48.78-39.02%. Con proporciones más bajas de agua ( $a/c \approx 2$ ), la probeta presenta mayor porosidad pero apenas tiene consistencia y no puede ser manipulada sin que se produzcan desperfectos o roturas, como es el caso de V2 20-80-48 con 13.51-54.05-32.43%.

- Proporción de  $c/a < 2$ . Efecto del agua sobre el cemento

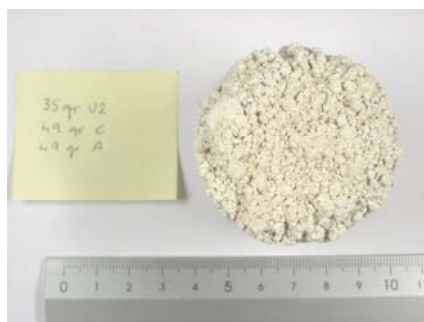
De la muestra más adecuada del caso anterior, es decir, V2 20-80-64, equivalentes a 12.2-48.7-39.12% se ha analizado el efecto de la cantidad de cemento y de agua de forma separada. El objetivo de este estudio ha sido acercarse a muestras con menor peso.

Se han preparado varias muestras en las que se ha mantenido la proporción  $c/a$  y se ha reducido la cantidad de cemento. Se ha observado que para muestras con más cemento, probeta V2 20-80-64, con 12.2-48.78-39%, se obtiene bastante porosidad y cierta manejabilidad, mientras que para valores más bajos de cemento, probeta V2 20-70-56, equivalentes a 13.7-47.95-38.36% y V2 20-60-48 con 15.63-46.88-37.5% la consistencia de las probetas aumenta, así como granos más gruesos.

Por otro lado, con las cantidades de cemento indicadas anteriormente se ha cambiado la cantidad de agua, observándose que las probetas resultantes presentan un tamaño de grano ligeramente mayor y una consistencia aceptable, probetas V2 20-80-64, equivalentes a 12.2-48.78-39.02% y V2 20-80-48 con 13.51-54.05-32.43%. El mismo efecto se observa con menor cantidad de cemento, probetas V2 20-70-56, equivalentes a 13.7-47.95-38.36% y V2 20-70-49, con 14.39-50.36-35.25%.

Se observa que manteniendo las proporciones entre los tres componentes, menor cantidad de cemento proporciona compuestos con granos ligeramente gruesos y con adherencia suficiente para manipularse adecuadamente, probeta V2 20-70-49 equivalentes a 14.39-50.36-35.25%. Esto no ocurre para una muestra de más cemento y mismo porcentaje en peso, probeta V2 20-80-48 con 13.51-54.05-32.43%.

La cantidad elevada de cemento y agua también da probetas con granos apelmazados muy gruesos y con muy buena manejabilidad, como en el caso de probetas V2 20-80-64 (12.2-48.78-39.02), V2 20-100-60 (11.11-55.56-33.33)% y V2 20-60-48 (15.53-46.88-37.50)% en Figura 5.21. La primera de ellas tiene un grano más fino y más oquedades que la segunda de ellas, mientras que la última de ellas tiene un grano mayor y huecos más pronunciados. En todas ellas, con altas dosis de cemento y agua, la consistencia y manejabilidad es excelente.



a) V2 35-49-49



b) V2 35-59.5-39.8



c) V2 35-56-28

Figura 5.20.- Probetas con falta de consistencia y escasa porosidad en distintas proporciones v-c-a. Efecto sobre la cohesión.

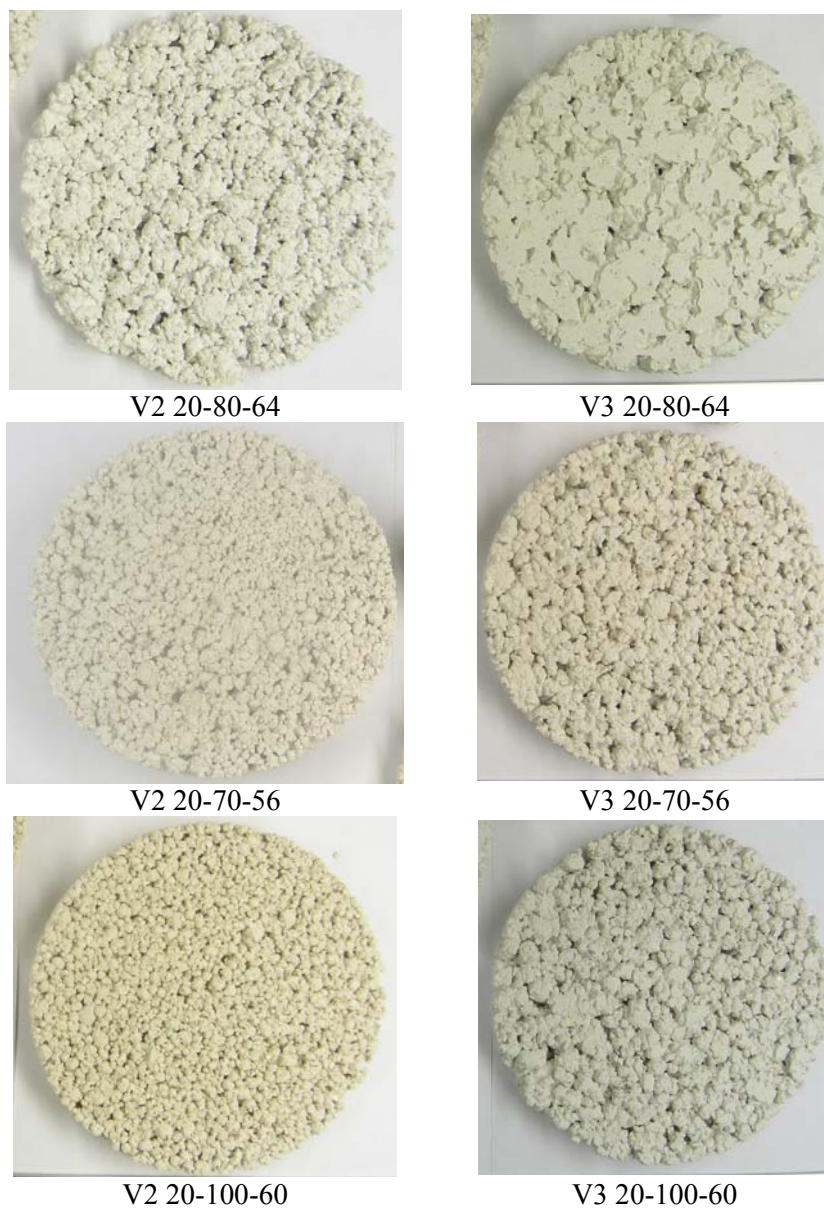


Figura 5.21.- Probetas con adhesión y porosidad para distintas v-c-a.  
(continúa).

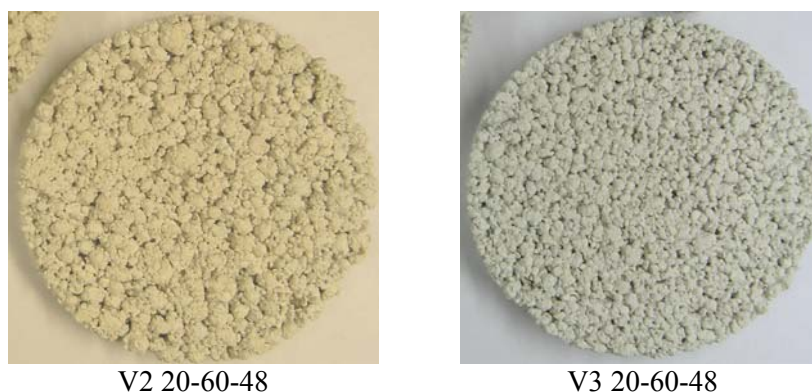


Figura 5.21.- Probetas con adhesión y porosidad para distintas v-c-a.

Tabla 5.1.- Proporciones vermiculita-cemento-agua con cohesión.

Composición de la muestra (g)	v/c	v/a	c/a	% peso vermiculita	% peso cemento	% peso agua
20-100-60	0.20	0.33	1.66	11.11	55.56	33.33
20-80-64	0.25	0.31	1.25	12.20	48.78	39.02
20-80-48	0.25	0.42	1.66	23.51	54.05	32.43
20-70-56	0.28	0.36	1.25	13.70	47.95	38.36
20-70-49	0.29	0.40	1.43	14.39	50.36	35.25
20-60-48	0.33	0.42	1.25	15.63	46.88	37.50

La Figura 5.21 recoge la morfología de las composiciones que han sido seleccionadas en vermiculita tipo 2 y tipo 3 atendiendo a la estabilidad y consistencia en productos con suficiente porosidad.

Aunque en el Anexo 1 se muestra con mayor detalle las imágenes de las probetas previas realizadas con vermiculita tipo 2 y tipo 3 para valorar la cohesión y la porosidad, las figuras siguientes ilustran una parte del número de probetas realizadas en este primer estudio para seleccionar las dosificaciones más adecuadas. Hay que señalar que solamente se ilustra un ejemplo de cada composición; sin embargo, en gran parte de ellas se han elaborado diversas probetas con la misma composición, con lo que el número total de probetas realizado es considerablemente mayor.

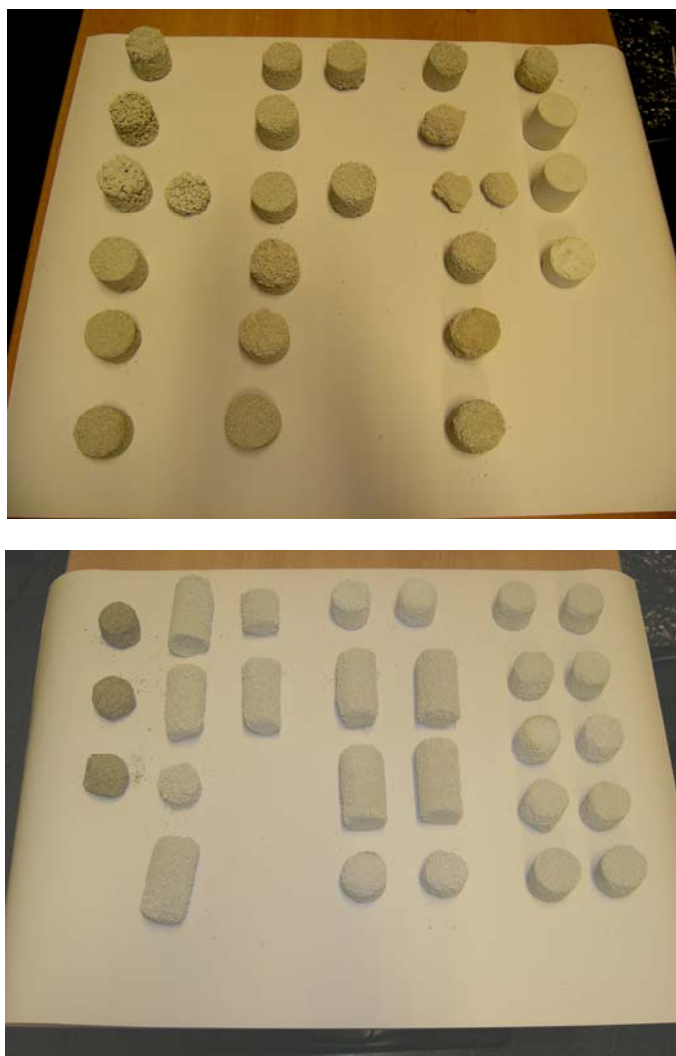


Figura 5.22.- Fracción de variedad de composiciones y dimensiones en probetas para estudio de la dosificación (continúa).

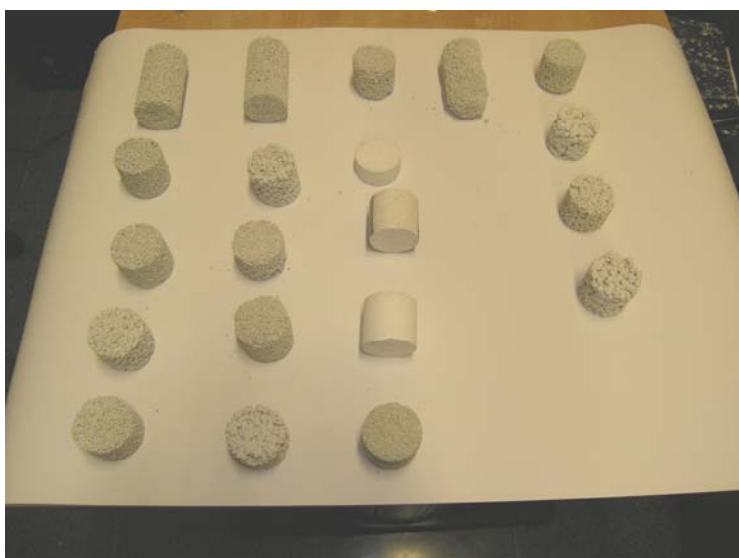
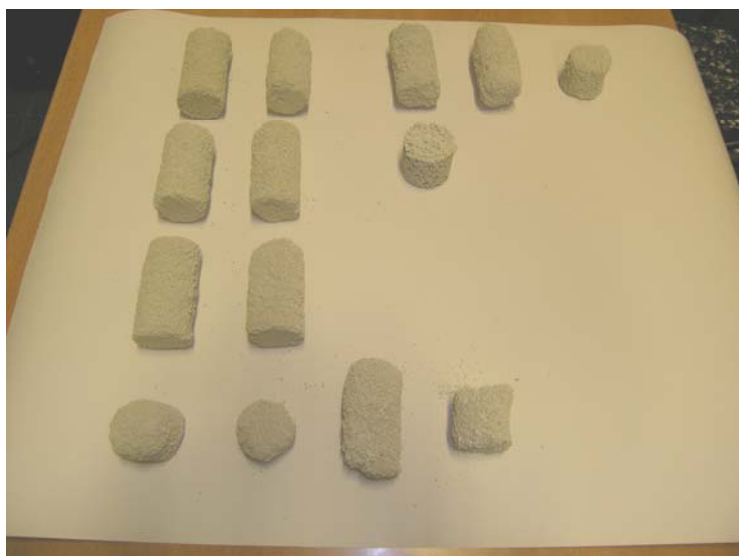


Figura 5.22.- Fracción de variedad de composiciones y dimensiones en probetas para estudio de la dosificación (continúa).



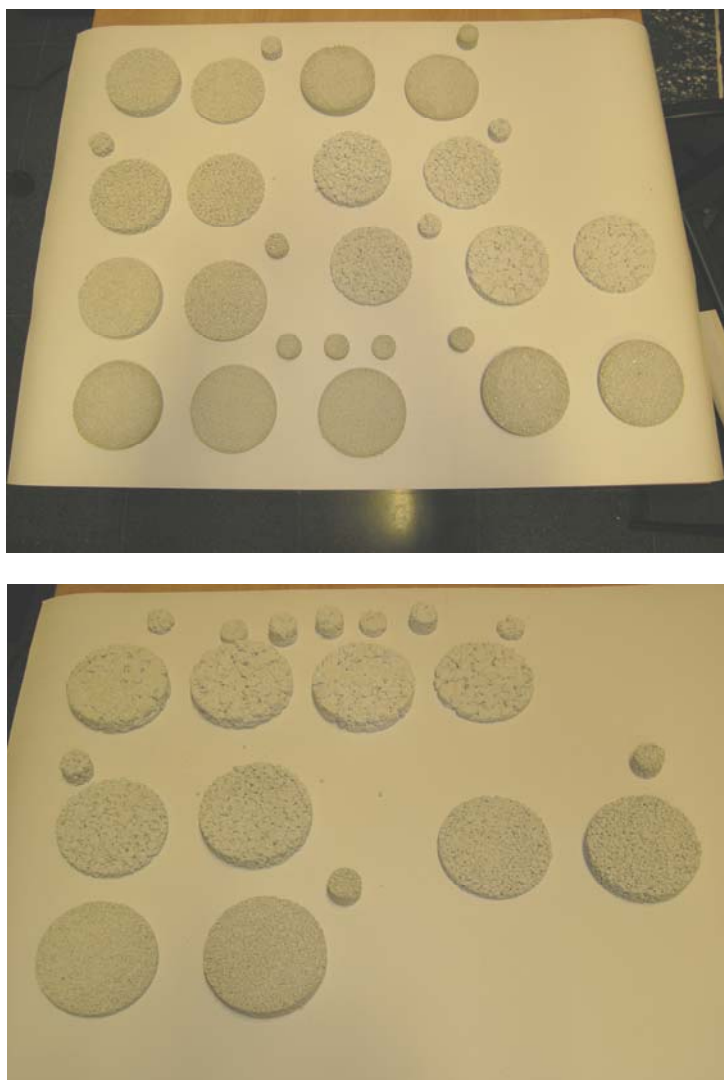


Figura 5.22.- Fracción de variedad de composiciones y dimensiones en probetas para estudio de la dosificación.

5.3.2.- Arlita

La arlita, por su naturaleza, presenta dificultad en absorber líquidos, por lo que no presenta la problemática descrita anteriormente con la vermiculita. La dosificación para la arlita se ha iniciado desde la recomendación en áridos para construcción, con la siguiente condición:

$$Arl = 0.5(C + A) \quad (5.2)$$

siendo *Arl*, *c* y *a* la cantidad de arlita, cemento y agua en gramos.

A partir del resultado obtenido en las probetas fabricadas, se ha buscado la composición que resulta óptima en adherencia y porosidad de forma simultánea. En primer lugar se ha aumentado la dosificación *c + a* para obtener consistencia y seguidamente se ha rebajado la cantidad de agua hasta conseguir porosidad.

Tabla 5.2.- Dosificación de probetas preliminares con arlita

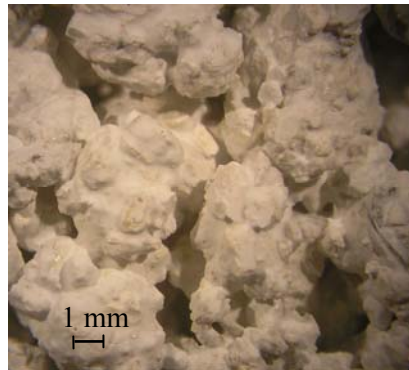
Arl-c-a	Ar/c	Ar/a	c/a	% peso (c+a)	Deficiencias
100-33.3-16.65	3	6	2	50	Sin cohesión
100-40-60	2.5	1.66	0.66	100	Sin porosidad (apelmazamiento)
100-50-50	2	2	1	100	Sin porosidad (apelmazamiento)
100-66.6-33.3	1.5	3	2	100	Porosidad y adherencia



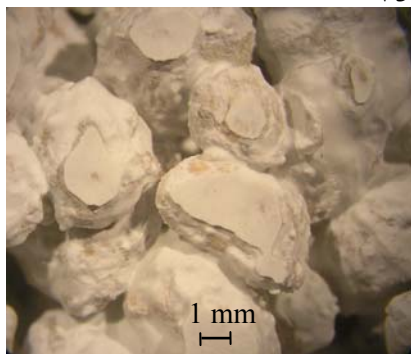
Figura 5.23.- Probeta de arlita con cohesión y sin porosidad Arl 100-50-50.

**5.4.- ESTRUCTURA INTERNA DEL MATERIAL**

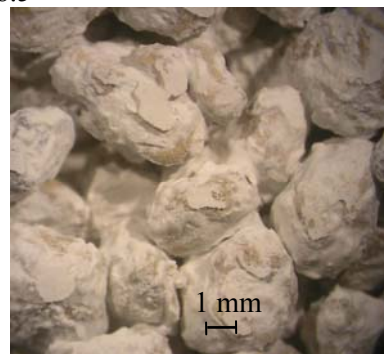
La morfología de las partículas se han observado en microscopía óptica empleando el equipamiento disponible en el laboratorio del DIMM. Las imágenes siguientes muestran fotografías tomadas en microscopio óptico modelo Olympus SZX7 con adaptador lumínico Olympus KL1500LCD. En la arlita, los granos se encuentran bien definidos y están cubiertos por una capa de cemento que sirve de ligante entre diversos granos. En este caso no es significativa la aparición de granos apelmazados entre sí. En las vermiculitas se observa un apelmazamiento de diversos granos para conformar un grano de mayor tamaño y con formas muy aleatorias. Estas diferencias granulares deberían afectar a la interconexión interna entre los conductos y por tanto debe reflejarse en diferentes valores de tortuosidad.



V3 20-100-68.5



Arl\_ gruesa 100-66.6-33.3



Arl\_ fina 100-66.6-33.3

Figura 5.24.- Morfología granular de probetas en microscopio óptico (x10) (continúa).



V2\_gruesa 20-80-64



V2\_fina 20-100-61.5

Figura 5.24.- Morfología granular de probetas en microscopio óptico (x10).



Figura 5.25.- Microscopio óptico en el DIMM.

La estructura interna (macroporos) de los materiales estudiados se ha visualizado en microscopio electrónico de barrido que dispone el DIMM. Para ello se han cortado diversos granos de probetas y se han tomado distintas fotografías a nivel óptico (x24 aumentos) y a nivel microscópico en diferentes aumentos. Las figuras siguientes muestran la característica interna muy diferente entre ambos tipos de material. En la Tabla 5.3 se muestra la ficha técnica del Microscopio electrónico suministrado por FEI, modelo PHENOM de la compañía FEI Company, Eindhoven, Holanda, Figura 5.26, con un voltaje de aceleración de 5 KV. A las muestras se les aplica mediante un metalizador un sputtering de Oro/Paladio con un espesor del orden de nanómetros mediante el equipo de la Figura 5.26.

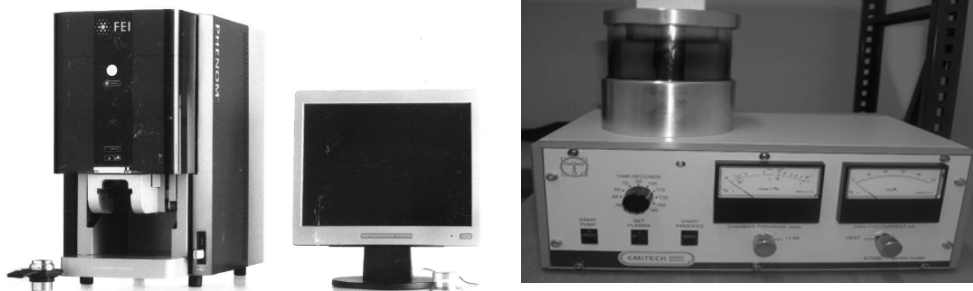


Figura 5.26.- Metalizador y microscopio electrónico del DIMM.

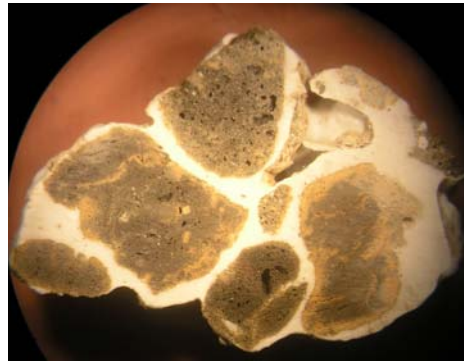
Las imágenes tomadas en microscopio electrónico de barrido, Figura 5.27 y Figura 5.28, muestran que la vermiculita ofrece una estructura plana laminar bien definida y se encuentra rodeada en todo su contorno por cemento, sin la aparición de huecos. En el caso de la arlita la estructura es muy distinta. Se observa un producto esférico más poroso formado por gran número de macroporos. Los huecos en el interior son el resultado del proceso de expansión al elevar la roca triturada a altas temperaturas y está formado por cavidades esféricas. En ambos tipos de materiales (vermiculita y arlita) se puede apreciar buena adhesión con una interfase continua entre cemento-vermiculita y cemento-arlita, apareciendo huecos únicamente en el interior de la arlita y observándose que el cemento no cubre su interior.

Tabla 5.3.- Ficha técnica del SEM.

Monitor de 17" táctil, Mando rotatorio, Bomba de vacío de diafragma, Fuerza suplementaria, 128 MB USB, 2,0 flash drive	Sistema
Aumentos luz Óptica: 24x	Modos de Imagen
Rango de aumentos electrónicos: 52524x (Zoom digital: 12x)	
Luz Óptica: LED'S	Iluminación
Óptica Electrónica: electrones de larga vida termominónicos (5kV Aceleración)	
Cámara CCD color con luz Óptica	Detección de Imagen Digital
Óptica Electrónica: Detector Electrónico de retrodispersión de alta sensibilidad	
JPEG, TIFF, BMP	Formato de Imagen
456x456, 684x684, 1024x1024, and 2048x2048 pixels	Opciones de Resolución de Imágenes
USB 2,0 Flash Drive	Almacenamientos de Datos
25mm / 1 diamx30 mm / 1.18	Tamaño Muestra
Control Ordenador, X y Y monitorizados	Etapa de Muestra
Luz Óptica: < 5s	Tiempo de Carga de Muestra
Óptica Electrónica: < 30s	
Módulo de Imagen: 286 mm / 11x566 mm / 22x495 mm/50 kg	Dimensiones y Peso
Bomba de vacío de diafragma: 145 mm/5.5x220/8.5x213 mm/4.5 kg	
Monitor: 355mm / 14x340 mm / 13x203 mm / 3.2 kg	
Fuerza Suplementaria: 156 mm / 6x300 mm / 12x74 mm / 3kg	
<80%, 15 °C-30 °C	Humedad y Temperatura
Fase Simple AC 110- 240 V, 50/60 Hz, 300 W (máx.)	Fuerza



Grano de V2 (x24 aumentos)



Grano de arlita (x10 aumentos)

Figura 5.27.- Imágenes tomadas en microscopio óptico (SEM).

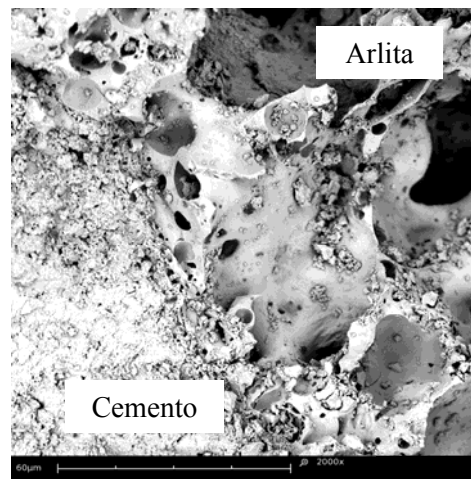
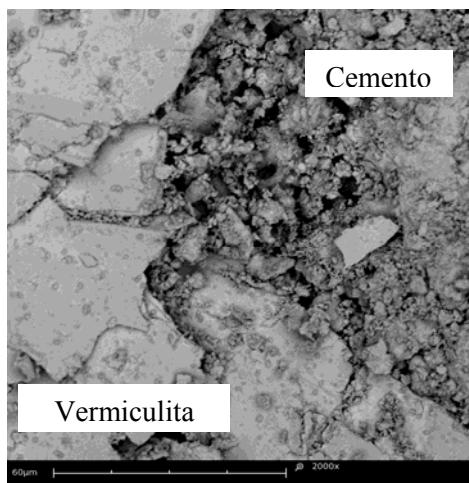


Figura 5.28.- Fotografías en microscopio electrónico (x2000 aumentos).



### 5.5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES PREVIOS

Para estudiar el comportamiento acústico que ofrecen las muestras de vermiculita y su efecto frente a las proporciones de v-c-a, se han preparado diversas probetas cilíndricas para ser analizadas acústicamente. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionan aquellas probetas que presentan suficiente cohesión y ofrecen mejor comportamiento acústico, entendiéndose como valores elevados de absorción acústica y en mayor rango de frecuencias.

Con las dosificaciones de V2 y V3 que resultan más adecuadas, se ha determinado la porosidad, tortuosidad y resistividad al flujo en un segundo estudio preliminar. Para ello se han preparado nuevas probetas con las dimensiones adecuadas para el equipo de medición. Estos estudios preliminares permiten seleccionar las probetas de V2 y V3 más indicadas para ser estudiadas detenidamente junto a las probetas de arlita.

#### 5.5.1.- Propiedades acústicas en estudio preliminar

Las probetas se han realizado utilizando como molde un tubo de PVC de 53.6 mm de diámetro interior. Este valor es coincidente con el diámetro del conducto del banco de ensayos acústicos utilizado para cuantificar el coeficiente de absorción acústica y otras propiedades relevantes. Se han empleado dos longitudes para los moldes: 50 y 100 mm. A modo de ejemplo en la Figura 5.29 se muestran las probetas realizadas en vermiculita V3 para la composición de 20 g de vermiculita, 70 g de cemento y 49 g de agua.



Figura 5.29.- Probetas y portamuestras para estudio preliminar.



Tabla 5.4.- Probetas de vermiculita V2 en primer ensayo preliminar

Muestras V2	Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) (50 y 100 mm)	Longitud (mm) (molde 50 mm)	Masa (g) (molde 50 mm)	Longitud (mm) (molde de 100 mm)	Masa (g) (molde de 100 mm)
120-100-50 (humectada)	0.91	49	98.2	**	**
60-300-150 (humectada)	1.43	50	157.2	**	**
60-300-150 (humectada)	1.48	51	166.1	**	**
120-100-0 (humectada)	1.21	52	138.2	**	**
120-50-0 (humectada)	1.06	50	116.5	**	**
120-100-10 (humectada)	1.18	52	134.9	**	**
20-100-60	0.49-0.50	54	59.6	97	105.2
20-70-56	0.41-0.45	52	51.2	101	90.5
20-80-48	0.52-0.56	52	64	102	116.3
20-80-64	0.44-0.51	52	58	101	98.6
20-70-49	0.53-0.54	51	60.7	101	118.2
20-60-48	0.57-0.6	51	67.9	102	127.7
20-80-64 (manual)	0.65-0.66	53	76.4	102	147.5
20-70-56 (manual)	** -0.82	**	**	104	188.7

La morfología de las probetas depende del proceso de elaboración. El vertido de la mezcla en el molde se ha realizado progresivamente y se ha prestado cuidado para evitar la aparición de huecos indeseados en su interior siendo necesario emplear una espátula para compactar ligeramente la mezcla dentro del molde. La cara superior de la probeta se ha enrasado cuidadosamente. Sin embargo, la forma aleatoria de las partículas genera irregularidad en esta cara según el tamaño de los

granos, lo cual dificulta la toma de medidas en las probetas. Para resolver este inconveniente, se han medido las longitudes en distintos planos longitudinales y el diámetro de las probetas y se ha obtenido la media de 5 mediciones.

La Tabla 5.4 indica las características de las probetas de vermiculita V2 analizadas en este ensayo preliminar. En este se incluyen algunas muestras con un alto grado de humectación de la vermiculita antes de prepararse la masa. Se han ensayado muestras elaboradas manualmente con fines meramente comparativos, ya que no hay garantías de uniformidad en la mezcla y el proceso manual es incontrolable desde un punto de vista de la repetitividad. Las imágenes de estas probetas se muestran en el Anexo 1. La Tabla 5.4 incluye la densidad aparente para las muestras de 50 y 100 mm. Dado que el propio molde de PVC define la forma cilíndrica, no se ha tenido en cuenta la variación del diámetro.

Se ha determinado el coeficiente de absorción de estas probetas en tubo de impedancia disponible en el DIMM con la técnica de 4 micrófonos [81]. Se ha excitado mediante un ruido blanco (ruido cuyo nivel es constante en todas las frecuencias) con contenido en frecuencia en el intervalo de 0 a 5000 Hz. Dadas las dimensiones de los conductos, la primera frecuencia de corte asimétrica es de 3715 Hz, con lo cual se satisfacen las condiciones de propagación de onda plana hasta la máxima frecuencia de interés (aproximadamente 3000 Hz). Las condiciones ambientales de presión y temperatura se han controlado con una estación meteorológica para garantizar que la velocidad del sonido no varía significativamente durante la realización de los ensayos. La temperatura ambiente ha variado entre 23.5 y 29.5 °C durante la medición.



Figura 5.30.- Banco de ensayos acústicos disponible en el DIMM.



Figura 5.31.- Vista de la probeta enrasada a la derecha.

El coeficiente de absorción obtenido se muestra en la Figura 5.32 a Figura 5.36. Para estudios posteriores, con estos resultados obtenidos se han descartado las muestras con coeficiente de absorción bajo o muy irregular.

La señal de ruido blanco de 0-5000 Hz se ha generado con una tarjeta National Instruments PCI-4451 y la adquisición con tarjeta National Instruments PCI-4452. El tubo de impedancia está formado por PVC de 16 atmósferas de presión de 67 mm de diámetro nominal y espesor de 4.7 mm. La terminación del tubo está rellena de material absorbente con densidad creciente con el fin de disponer de una salida anecoica. Los micrófonos de presión son Brüel & Kjaer de 1/4 de pulgada registran la presión acústica y la transforman en una señal eléctrica, a razón de 31.6 mV/Pa. Cada pareja está espaciada una longitud  $s = 0.045$  m, lo cual permite una frecuencia máxima de análisis de 3656 Hz. El analizador-preamplificador disponible es Nexus 2690 fabricado por Brüel & Kjaer que recibe las señales eléctricas provenientes de los micrófonos de presión, las acondiciona, las amplifica y las envía a la tarjeta de adquisición. La señal analógica enviada por la tarjeta de generación es transmitida al altavoz mediante el amplificador monoaural FoneStar M-A 60.

#### 5.5.1.1.- Grado de humectación.

Se ha analizado la influencia de la cantidad de agua en las mezclas con vermiculita tipo 2 humectada. Los resultados obtenidos en el coeficiente de absorción confirman que dado su aspecto de bloque totalmente macizo, apenas se produce absorción de la onda acústica. De esta tipología se han analizado distintas proporciones de v-c-a, en las que no se observa ninguna diferencia. La Figura 5.32

muestra los resultados obtenidos para alto y bajo porcentaje de agua añadida sobre la vermiculita humectada. En esta figura se representan también resultados para probetas con distintos pesos de cemento, viéndose que no ofrece ningún cambio significativo en los resultados obtenidos. Como era de esperar, a partir de la naturaleza de las muestras no hay porosidad y la absorción es despreciable.

Para cuantificar adecuadamente el efecto de la cantidad del agua se han analizado las muestras de vermiculita tipo 2 humectadas sin adición de agua, tan solo la que incluía los granos después de haberlos dejado escurrir previamente a la adición del cemento para el amasado. Se observa que el comportamiento acústico no resulta significativo (muestras V2 120-100-0 y V2 120-50-0 en Figura 5.38).

Se han preparado muestras humectadas de distinta longitud, con la misma cantidad de cemento y con varias cantidades de agua, observándose que desde el punto de vista de la absorción acústica en este tipo de material humectado no se observa ningún cambio en los resultados. La cantidad de agua tan solo influye en la compactación y manejabilidad de la muestra, resultando muy resistente a impactos, observándose este hecho durante la extracción de la probeta del molde de fraguado.

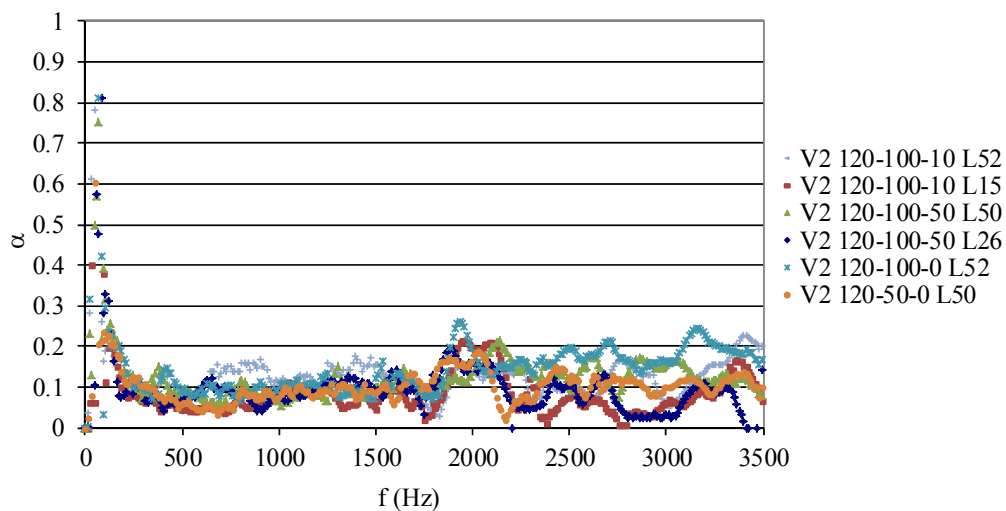


Figura 5.32.- Coeficiente de absorción en muestras humectadas.

La densidad de estas muestras varía entre 0.91 y 1.48, véase Tabla 5.4, obteniéndose un coeficiente de absorción  $\alpha$  muy bajo, oscilando entre 0.1 y 0.2, en todo el rango de frecuencias. En casi todas las muestras se experimenta ligera mejoría de absorción en el rango 1800 a 2100 Hz. Aun variando las masas de v-c-a y manteniendo las proporciones ( $v/c = 0.2$ ,  $v/a = 0.4$  y  $c/a = 2$ ) no hay alteración importante del coeficiente de absorción. Tampoco es relevante el tamaño de la muestra. Las muestras con la mitad de espesor ofrecen resultados similares. Por tanto, puede concluirse que el coeficiente de absorción en muestras de V2 humectada no es apto como producto absorbente acústico, produciéndose un rebote de la energía acústica.

#### 5.5.1.2.- Irregularidad del grano debido al proceso de amasado.

El amasado manual o con amasadora automática tiene un efecto importante en el comportamiento acústico de las probetas obtenidas. En el caso de las muestras V2 20-80-64 y V2 20-70-56, marcadas con “\*” en la Figura 5.33 y Figura 5.34, también se han amasado de forma manual. En este caso, se obtienen coeficientes de absorción irregulares en el rango de frecuencias. Aunque en zonas muy concretas alcanzan valores próximos a la unidad, la absorción baja a valores que carecen de interés. Presentan una tendencia distinta al resto de probetas realizadas y han sido descartadas. Este efecto se produce conjuntamente en las muestras de 5 y 10 cm.

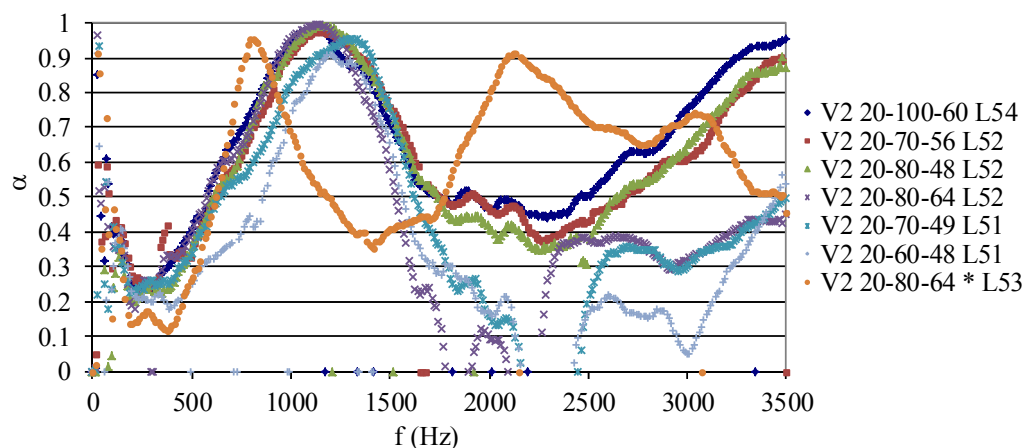


Figura 5.33.- Coeficiente de absorción en muestras de V2 de 50 mm.

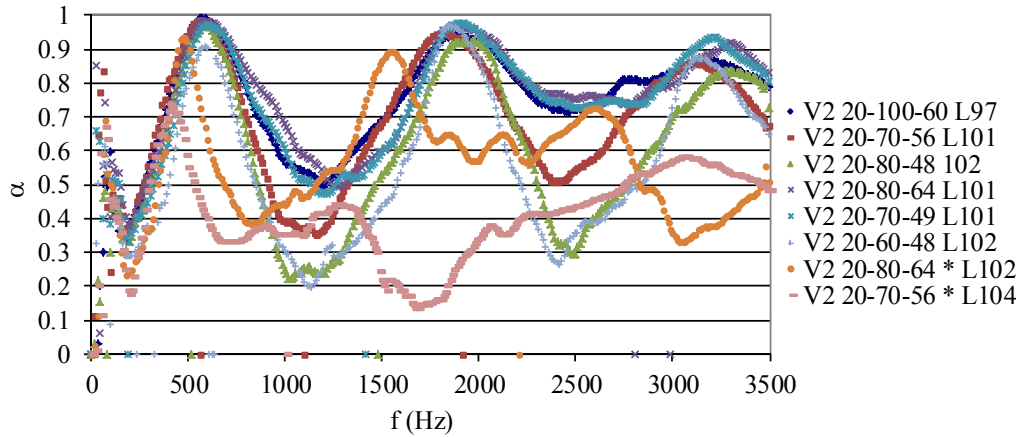


Figura 5.34.- Coeficiente de absorción en muestras de V2 de 100 mm.

5.5.1.3.- Uniformidad del tamaño de grano.

Las composiciones que han sido elaboradas con la amasadora mecánica y con suficiente tiempo para el amasado ofrecen un coeficiente de absorción similar en todo el rango de frecuencias, exceptuando algunas muestras que no tienen un buen comportamiento acústico en tamaño de 50 y 100 mm, como son las muestras de V2 20-80-48 que tiene buen comportamiento solo en muestras de 50 mm y las muestras de V2 20-80-64 y V2 20-70-49 que tienen buen comportamiento solo en muestras de 100 mm. Véase Figura 5.33 y Figura 5.34.

En general, la respuesta de absorción es similar, observándose que el tamaño de la muestra es importante. El valor máximo del coeficiente de absorción ( $\alpha=0.98$ ) en las probetas de 50 mm de espesor se alcanza en frecuencias en torno a 1200 Hz, mientras que para la muestra de 100 mm de espesor se alcanza en 562.5 Hz ( $\alpha=0.99$ ). Esto concuerda con el espesor de las muestras, dado que el tamaño es el doble entre ambas y la densidad es prácticamente la misma: 0.49 y 0.5, respectivamente. Esto parece indicar que la configuración interna del material es muy semejante, quedando pendiente el estudio de tortuosidad  $T$  y porosidad  $\phi$ . Tras este máximo localizado se produce una bajada progresiva de la absorción hasta valores bajos entre 0.2 y 0.5, según composiciones. Este mínimo se presenta en frecuencias de 2200 Hz para probetas de 50 mm y en 1100 Hz para probetas de 100 mm. A frecuencias mayores se incrementa nuevamente la absorción hasta valores próximos al máximo anterior, obteniéndose en frecuencias cercanas a 3500 y 1900

Hz para 50 y 100 mm, respectivamente. En estas últimas se experimenta una suave bajada de la absorción en torno a los 2500-2700 Hz y un aumento de la absorción a frecuencias mayores.

Los cambios en el comportamiento acústico  $\alpha$  y sus valores máximos en la muestra de menor tamaño se reproducen en las muestras del doble de espesor en la mitad de frecuencias. También se observa que en probetas de 100 mm. los máximos de absorción son ligeramente inferiores y los mínimos son más elevados con el aumento de frecuencia.

#### 5.5.1.4.- Tipo de vermiculita.

Seleccionando las composiciones anteriores de V2 que ofrecen valores aceptables de absorción, se han preparado probetas con V3 en ambas dimensiones: 50 y 100 mm. La Figura 5.35 y Figura 5.36 muestran la absorción obtenida experimentalmente con este material. La Tabla 5.5 incluye la densidad de las probetas de 50 y 100 mm, respectivamente.

Las probetas de 50 mm ofrecen menor oscilación de la absorción con el aumento de la frecuencia. Ocasionalmente, las probetas V3 20-100-60, V3 20-80-64 y V3 20-60-48 presentan uniformidad en la absorción en las dos dimensiones analizadas.

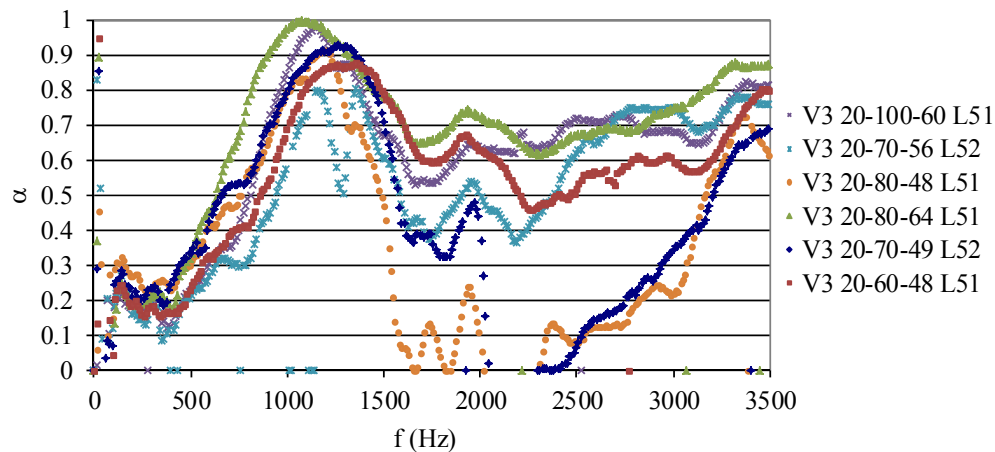


Figura 5.35.- Coeficiente de absorción en muestras de V3 de 50mm.

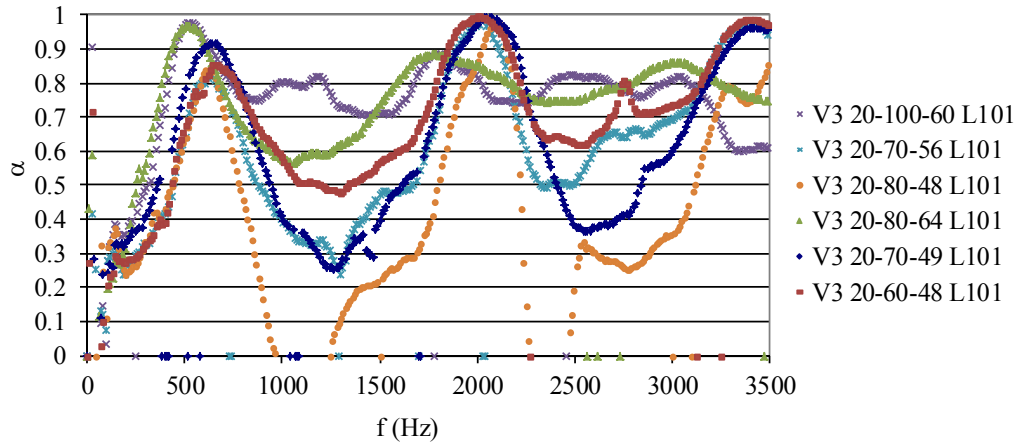


Figura 5.36.- Coeficiente de absorción en muestras de V3 de 100 mm.

Tabla 5.5.- Probetas de vermiculita V3 en primer ensayo preliminar

Muestras V3	Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) (50 y 100 mm)	Longitud (mm) (molde 50 mm)	Masa (g) (molde 50 mm)	Longitud (mm) (molde de 100 mm)	Masa (g) (molde de 100 mm)
20-100-60	0.64 - 0.69	51	72.1	101	153.5
20-70-56	0.48 - 0.53	52	55.6	101	118.1
20-80-48	0.53 - 0.55	51	59.5	101	122
20-80-64	0.6 - 0.63	51	67.8	101	139.7
20-70-49	0.51 - 0.52	52	58.8	101	114.8
20-60-48	0.41 - 0.4	51	46.6	101	89.2

5.5.2.- *Propiedades no acústicas en estudio preliminar*

Conocidos los resultados acústicos de las muestras que ofrecen buen comportamiento y permiten manipularse con cierta tranquilidad se han determinado las propiedades no acústicas: porosidad, tortuosidad y resistividad al flujo. Para ello es necesario realizar nuevas probetas que se ajusten a las dimensiones del equipamiento experimental. Se ha empleado un molde elaborado en silicona con el que se obtienen cuatro muestras: 30 y 100 mm de diámetro con espesores de 10 y



20 mm. El uso del molde de silicona está justificado por la facilidad para desmoldar las probetas generadas después de su fraguado con el aglutinante y evitando desmoronamientos o roturas. Para limitar la adherencia con las paredes del molde se procede a adherir una capa de silicona de desmolde.

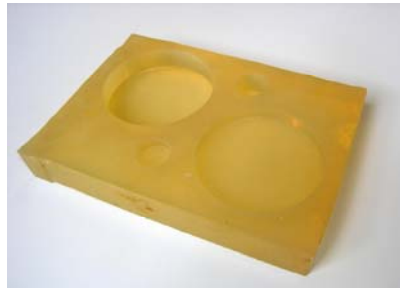


Figura 5.37.- Molde para las probetas de 30 y 100 mm de diámetro.



Figura 5.38.- Probetas obtenidas con molde.

La porosidad se ha obtenido experimentalmente en un ensayo de estereopícnometría de Helio. Se ha utilizado el equipo Quantachrome SPY-3, con una celda calibrada con un volumen de  $153.59 \text{ cm}^3$ , mediante el método propuesto por Voronina y Horoshenkov [303]. Para cada una de las muestras se han realizado cinco medidas de ambas densidades obteniendo el promedio. Para eliminar posibles burbujas de aire o humedad en el interior de las muestras, antes de realizar las medidas, las muestras se introducen en una estufa durante 15 días a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este método presenta valores más precisos que los obtenidos con el método de saturación de agua, que emplean algunos autores para materiales granulares, Vasina et al. [297], debido a las pequeñas dimensiones atómicas del helio, que le permiten

acceder al interior de los poros, aumentando de esta forma el valor obtenido para la porosidad abierta de la muestra.

La medida de la tortuosidad se ha determinado mediante el procedimiento especificado con el uso de electrolito de sulfato de cobre al 10% de disolución propuesto por Brown [52]. La resistividad al flujo se ha obtenido por el método de medida basado en el tubo de ondas estacionarias con dos micrófonos [132] a partir de la función de transferencia. Este método parte de la hipótesis de que la caída de presión en el interior del tubo es lo suficientemente pequeña como para considerar que la velocidad del aire es la misma en las caras anterior y posterior de la muestra. También se supone que el espesor de la muestra es mucho menor que la longitud de onda, para que la velocidad pueda considerarse constante a través del material.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.6. A la vista de los datos, no parece existir una relación directa entre los valores  $v/c$ ,  $v/a$  y  $c/a$  con las propiedades acústicas del material obtenido. La porosidad obtenida indica la presencia de un material altamente poroso y con resistencias al flujo elevadas para los dos tipos de vermiculita. La relación entre porosidad y tortuosidad parece indicar que en el caso de ambos tipos de muestras (V2 y V3) el incremento de la porosidad va acompañado de un incremento de la tortuosidad. Parece en principio haber una relación cuasi constante entre la densidad real y aparente, como consecuencia de las relaciones  $v-c-a$  y el proceso de elaboración y fraguado, hecho este que se podría confirmar observando que los valores medios de la resistividad al flujo son similares para ambos tipos de vermiculita. Los valores de resistividad obtenidos en muestras de vermiculita V2 y V3 no marcan ninguna tendencia: probetas con porosidad y tortuosidad similar ofrecen resistividad al flujo muy diversa y con distintivo material. Ejemplos de esto son las probetas V3 20-80-48, V2 20-100-60 en la Tabla 5.6.

Estos resultados son meramente orientativos ya que el espesor requerido en el equipamiento y las dimensiones de la granulometría y poros de algunas muestras no son representativos. Sobre estas muestras también se ha realizado el ensayo en tubo de impedancias para cuantificar nuevamente la absorción en tubo de impedancia en el rango de frecuencias de 100 a 6400 Hz. Esto permite analizar el efecto de la repetitividad en la elaboración de las probetas y la respuesta acústica para menor espesor en las probetas. Las condiciones ambientales en la realización de los ensayos han sido: presión atmosférica de 1013.25 hPa, temperatura de 23 °C y una humedad del 34%, la densidad del aire 1.202 kg/m<sup>3</sup>, velocidad del sonido 343.24 m/s e impedancia característica del aire 412.6 Pa s/m.

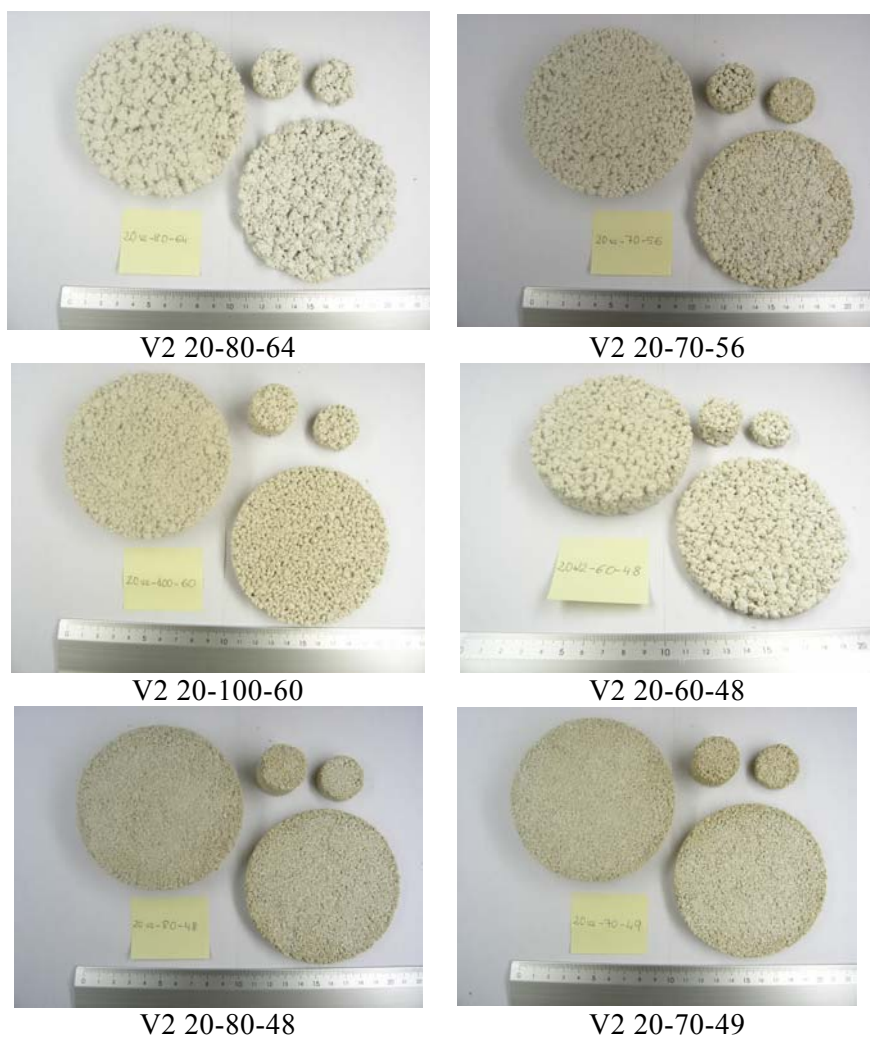


Figura 5.39.- Muestras según la composición en vermiculita V2.

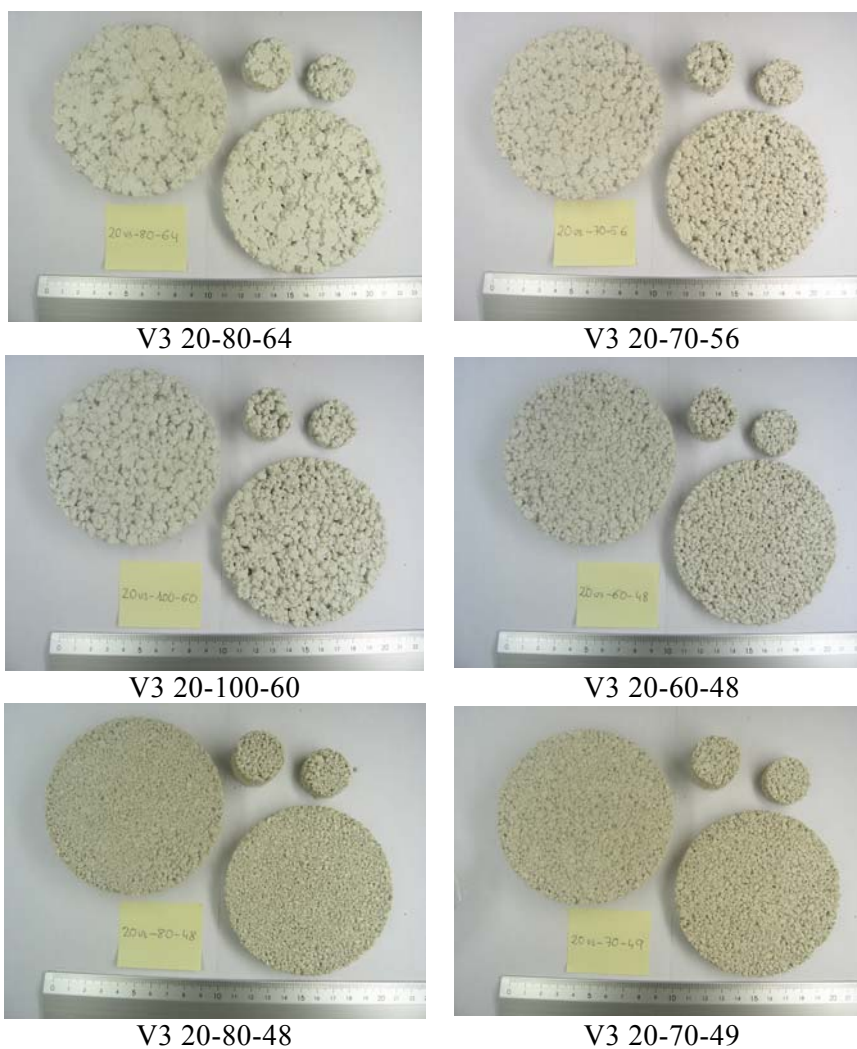


Figura 5.40.- Muestras según la composición y tipo en vermiculita V3.

Tabla 5.6.- Valores experimentales de porosidad, resistividad al flujo y tortuosidad.

Muestra	Porosidad (%)	Resistividad al flujo (Pa·s/m <sup>2</sup> )	Tortuosidad
V2 20-70-49	0.76	7612	1.33
V2 20-80-64	0.82	2154	1.56
V2 20-70-56	0.77	4736	1.63
V2 20-100-60	0.72	5433	1.59
V2 20-80-48	0.74	8923	1.78
V2 20-60-48	0.87	2630	2.21
V3 20-70-49	0.76	7944	1.72
V3 20-80-64	0.79	3117	1.47
V3 20-70-56	0.80	3241	1.68
V3 20-100-60	0.77	2924	1.65
V3 20-80-48	0.73	7760	1.42
V3 20-60-48	0.83	3706	1.86

El análisis del coeficiente de absorción (Figura 5.41 y Figura 5.42) indica que estos materiales granulares presentan un valor alto de absorción en frecuencias muy localizadas: 2600 Hz, presentándose mayor dispersión en el caso de composiciones de V2. A medida que aumenta la frecuencia, la absorción decrece rápidamente a valores próximos entre todas las composiciones, con un mínimo en torno a los 4900 Hz. Este mínimo se presenta a mayor frecuencia en la composición con V3. A mayores frecuencias, la absorción se recupera, aunque con valores inferiores al primer máximo. Estos resultados se ajustan a los obtenidos en el ensayo anteriormente con longitudes de probetas de 50 y 100 mm y diámetro de 53.6 mm. El efecto de la densidad del material sobre el coeficiente de absorción no implica cambios apreciables. Probetas con distinta densidad, como V2 20-70-56 y V2 20-80-48 con 0.45 y 0.56 g/cm<sup>3</sup> muestran un comportamiento similar (Figura 5.33 y Figura 5.34). Esto parece indicar que la densidad no es un factor tan importante como la porosidad, tortuosidad o el tamaño de los granos sobre el comportamiento acústico del material.

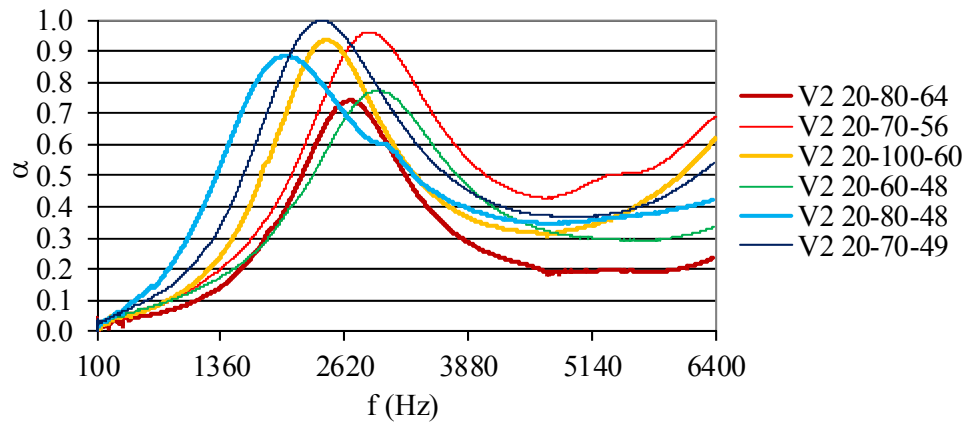


Figura 5.41.- Coeficiente de absorción en V2.

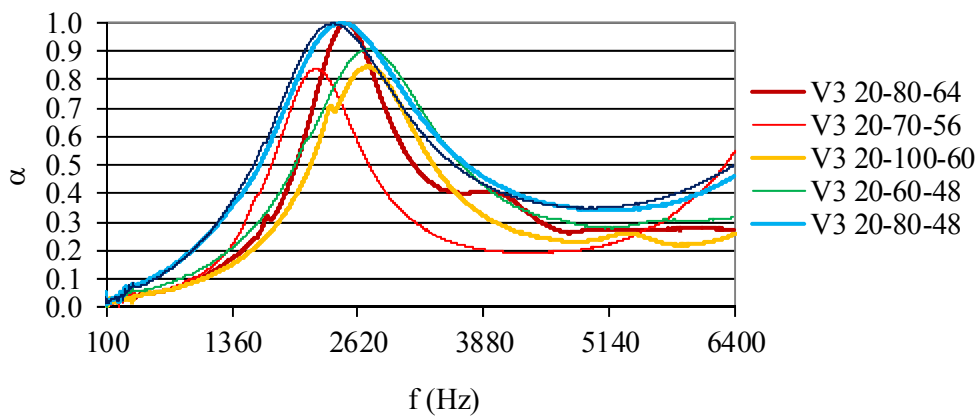


Figura 5.42.- Coeficiente de absorción en V3.

### 5.6.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez analizados los resultados acústicos de las composiciones de vermiculita se deduce que estos compuestos granulares ofrecen una respuesta que puede ser interesante en aplicaciones prácticas. A partir de los estudios preliminares indicados anteriormente sobre la cohesión y porcentajes de cada componente (material-cemento-agua) se observa que la variación en peso de estos componentes permite obtener distintas granulometrías del material poroso. Con el fin de disponer de materiales granulares con tamaño de grano relativamente similar obtenidos a partir de dos materiales básicos distintos (arrita y vermiculitas) y considerar el porcentaje en la preparación de la mezcla, se han seleccionado dos composiciones para V2 que generan material poroso con tamaño de grano comparable con los obtenidos a partir de la arlita y V3.

Se han preparado probetas de arlita y vermiculita para ser estudiadas y caracterizadas detenidamente. Se han seleccionado dos granulometrías para las arlitas, dos de V2 y una de V3 con tamaños de granos similares a los obtenidos en las arlitas. La denominación de las muestras de V2 gruesa y fina obedece al tamaño de grano obtenido en la mezcla final. De cada tipo de material se han elaborado 6 muestras. Esto permite tener suficiente información para contrastar los resultados entre muestras de un mismo tipo. Además, teniendo en cuenta los resultados preliminares sobre el tamaño de las probetas, se ha tomado un espesor suficientemente representativo (50 mm) con respecto al tamaño de huecos y granos. Las muestras y su denominación son:

- Arlita grano grueso y fino (**Arl\_gruesa** con tamaño  $\leq 8$  mm, **Arl\_fina** con tamaño  $\leq 4$  mm)
- Vermiculita V3 (**V3**)
- Vermiculita V2 en grano grueso y fino (**V2\_gruesa**, **V2\_fina**)

Las cantidades de material utilizadas, porcentajes y densidad promedio en cada tipo de probeta son las indicadas en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7.- Cantidades básicas para cada tipo de probeta de cemento (c), agua (a) y material (mat).

	Material virgen (g)	c (g)	a (g)	mat (%)	c (%)	a (%)	mat/c	mat/a	c/a
Arl_gruesa	100	66.6	33.3	0.50	0.33	0.17	1.50	3.00	2.00
Arl_fina	100	66.6	33.3	0.50	0.33	0.17	1.50	3.00	2.00
V3	20	100	58.5	0.11	0.56	0.33	0.20	0.34	1.71
V2-gruesa	20	80	64	0.12	0.49	0.39	0.25	0.31	1.25
V2_fina	20	100	61.5	0.11	0.55	0.34	0.20	0.33	1.63

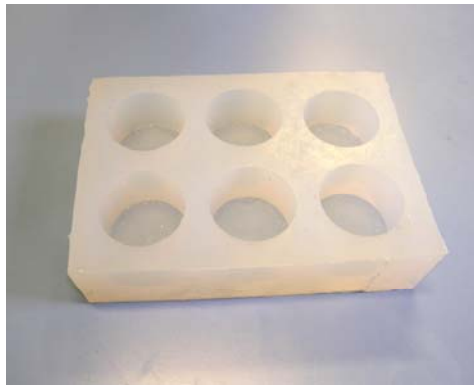


Figura 5.43.- Molde para las probetas de 72 mm de diámetro.

La disposición aleatoria de los poros dificulta la toma de medición sobre las probetas. Esto proporciona diversos espesores de las probetas dependiendo del plano de la medición. Las longitudes de las probetas se han obtenido mediante el promedio de 5 mediciones realizadas en distintos planos diametrales.





Arl\_gruesa 100-66.6-33.3



Arl\_fina 100-66.6-33.3



V2\_gruesa 20-80-64



V2\_fina 20-100-61.5



V3 20-100-68.5

Figura 5.44.- Probetas según la composición y tipo de material.



Figura 5.45.- Total de muestras en estudio experimental.

Tabla 5.8.- Pesos (g) obtenidos en cada probeta.

Medición	Arl_gruesa	Arl_fina	V3	V2_gruesa	V2_fina
1	144.4	133.6	142	112.6	133.2
2	141.8	143.2	147	113	128
3	149	131.6	150.8	121.2	131.8
4	146.4	133.2	145.6	118	140
5	140.6	132.6	142.2	108.6	132
Peso medio (g)	143.0	135.0	144.2	114.9	134.5
Desviación típica	4.60	4.25	4.60	4.45	5.37

Tabla 5.9.- Longitudes (mm) en cada probeta.

Medición	Arl_gruesa	Arl_fina	V3	V2_gruesa	V2_fina
1	51.7	50.8	50.5	49.3	49.6
2	50.8	51	50.8	50.5	51.1
3	50.3	51.3	51.1	50.5	50.7
4	51.2	51.1	51	51.2	50.4
5	49.9	50.5	50.8	52	50.5
Longitud media (mm)	50.7	51.0	50.9	50.5	50.6
Desviación típica	0.71	0.27	0.23	1.02	0.56

Tabla 5.10.- Densidad ( $\text{g/cm}^3$ ) en cada probeta.

Medición	Arl_gruesa	Arl_fina	V3	V2_gruesa	V2_fina
1	0.72	0.65	0.71	0.57	0.63
2	0.66	0.63	0.73	0.56	0.61
3	0.68	0.64	0.68	0.55	0.66
4	0.68	0.65	0.66	0.52	0.68
5	0.75	0.64	0.71	0.58	0.64
6	0.72	0.68	0.68	0.55	0.63
Densidad Promedio ( $\text{g/cm}^3$ )	0.70	0.65	0.69	0.56	0.64
Desviación típica	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03

5.6.1.- *Espesor de aglutinante*

A partir de la expresión indicada por Swift et al. [280] se ha determinado el espesor del cemento en cada material, considerando el tamaño del grano promedio según la distribución porcentual de la distribución granulométrica indicada anteriormente. Se ha determinado también la densidad del material virgen y del cemento según la dosificación.

Tabla 5.11.- Estimación del espesor (mm) de aglutinante.

	Arl_gruesa	Arl_fina	V3	V2_gruesa	V2_fina
Masa de material (g)	100	100	20	20	20
Masa_aglutinante (g)	99.9	99.9	160	144	160
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	439.64	451.28	128.54	122.02	122.02
Densidad cemento+agua ( $\text{kg/m}^3$ )	1453.05	1453.05	1153.22	1128.69	1153.22
Tamaño grano promedio (mm)	1.87	1.77	0.86	0.46	0.46
Espesor aglutinante (mm)	0.17	0.17	0.20	0.10	0.11

Los resultados obtenidos indican valores que se aproximan relativamente en el caso de la arlita. Sin embargo, en el caso de las vermiculitas esta aproximación está fuera de lugar dado su alto poder absorbente, por lo que requiere dosis más ricas en cemento y agua, lo cual no cumple con la predicción indicada sobre compuestos con resinas propuesta por Swift et al. [280].

### 5.6.2.- Granulometría de las composiciones

La distribución granulométrica de las composiciones elaboradas se ha obtenido tamizando las muestras. En este caso se han tenido que desprender manualmente los granos. Esto presenta cierta dificultad ya que la adhesión de algunos granos para formar un grano de mayor volumen resulta muy complicado debido a su fuerte resistencia, especialmente en el caso de las arlitas y más predominante en la arlita de tamaño grueso. En la Figura 5.46 se indica el peso retenido en cada tamiz.

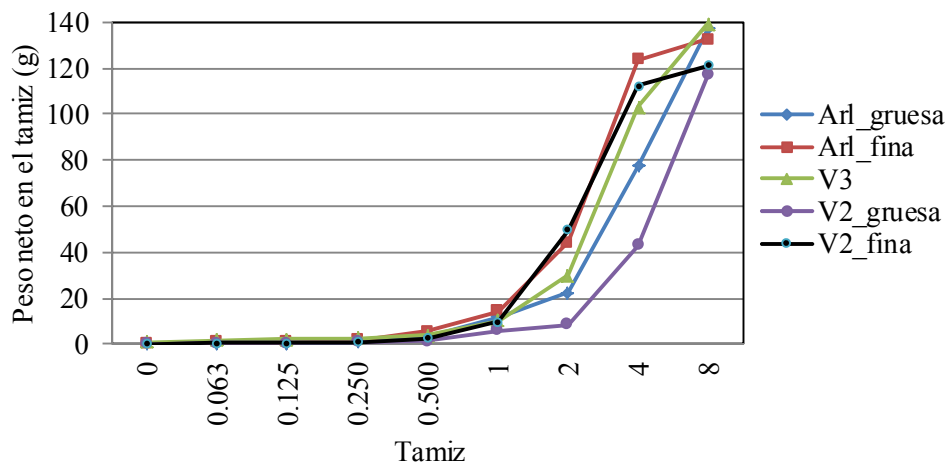


Figura 5.46.- Pesos retenidos en cada tamiz.

Los valores obtenidos indican que el tamaño de grano predominante en las composiciones estudiadas es superior a 2 mm. La composición que tiene mayor tamaño de grano es la V2\_gruesa con el 63.25% en tamiz de 8 mm y la Arl\_gruesa con el 83.79% repartido entre los tamices de 4 y 8 mm. La Arl\_fina y V2\_fina tiene una distribución muy similar con porcentaje mayoritario alrededor del 50% de tamaño de granos de 4 y 2 mm. En el caso de la vermiculita V3, el tamaño más abundante se ubica en 4 mm seguido de 8 mm con un 25.86%.

Tabla 5.12.- Porcentajes retenidos en cada tamiz.

Tamiz (mm)	0	0.063	0.125	0.250	0.500	1	2	4	8
Arl_gruesa	0.00	0.15	0.15	0.29	2.04	5.99	7.59	40.29	43.50
Arl_fina	0.15	0.45	0.15	0.60	2.71	6.64	22.78	59.73	6.79
V3	0.57	0.57	0.29	0.43	1.01	4.45	14.08	52.73	25.86
V2_gruesa	0.17	0.17	0.17	0.17	0.34	4.10	2.22	29.40	63.25
V2_fina	0.17	0.17	0.17	0.33	1.32	5.78	33.00	51.65	7.43

### 5.6.3.- Estudio morfológico de la granulometría

Aunque el tamizado de los granos de las muestras elaboradas proporciona información para conocer la distribución o porcentaje del tamaño realmente obtenido en cada composición, esta información es incompleta ya que no da información del aspecto de las partículas. Para conocer la morfología que disponen los granos sueltos es necesario recurrir a otros métodos de análisis. El empleo de técnicas informáticas permite determinar parámetros característicos de la topología granular, como pueden ser el área y el perímetro.

El estudio de la morfología de los granos se ha realizado con el programa informático de tratamiento y análisis de imágenes ImageJ. Entre otros parámetros, este software permite cuantificar diversos parámetros típicos de la morfología de las partículas: área  $A$ , perímetro  $p$  o la circularidad  $C$ . El índice de circularidad está definido como  $C = 4\pi A/p^2$  y representa la aproximación al círculo, tomando el valor de 1 para granos circulares, mientras que valores bajos representan formas alargadas de las partículas.

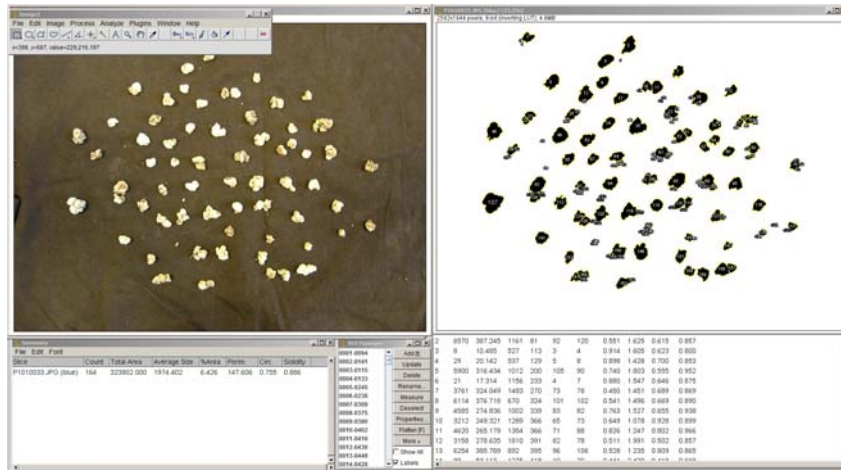


Figura 5.47.- Captura de pantalla en software (unidades en píxel).

El procesado de imágenes se ha realizado a partir de imágenes fotográficas tomadas en cámara fotográfica óptica digital Olympus C5060WZ con resolución horizontal y vertical de 72 ppp y resolución de 2592x1944 píxeles. Posteriormente estas imágenes han sido cargadas con el software y han sido tratadas. Se ha seleccionado una conversión de la imagen digital a 8 bits, lo que supone  $2^8 = 256$  tonos de gris diferentes, obteniendo una imagen para ser analizada. Para cuantificar cada parámetro es necesario calibrar la imagen a partir de una longitud conocida de un objeto de la imagen. Con ello se relaciona la medida con los píxeles que ocupa ese objeto en la pantalla, resultando muy útil para comparar tamaños de granos de diferentes muestras. La Figura 5.47 ilustra los resultados mostrados en pantalla durante el tratamiento y procesado de la imagen.

Tabla 5.13.- Parámetros geométricos de las partículas en Arl\_groesa (164 partículas).

	Área (mm <sup>2</sup> )	p (mm)	C
promedio	34.34	19.47	0.75
$\sigma$	41.99	17.76	0.16

Tabla 5.14.- Parámetros geométricos de las partículas en Arl\_fina (129 partículas).

	Área (mm <sup>2</sup> )	p (mm)	C
promedio	26.61	19.12	0.79
$\sigma$	20.69	9.16	0.10

Tabla 5.15.- Parámetros geométricos de las partículas en V3 (177 partículas).

	Área (mm <sup>2</sup> )	p (mm)	C
promedio	26.68	18.06	0.77
$\sigma$	29.21	12.29	0.11

Tabla 5.16.- Parámetros geométricos de las partículas en V2\_gruesa (117 partículas).

	Área (mm <sup>2</sup> )	p (mm)	C
promedio	61.54	29.22	0.76
$\sigma$	53.58	15.80	0.10

Tabla 5.17.- Parámetros geométricos de las partículas en V2\_fina (185 partículas).

	Área (mm <sup>2</sup> )	p (mm)	C
promedio	23.62	17.97	0.77
$\sigma$	22.31	9.70	0.11

Los resultados obtenidos indican que los granos de las composiciones V2\_gruesa y Arl\_gruesa disponen de tamaño de grano mayores que el resto de composiciones y con gran diversidad del tamaño de las partículas. El resto de muestras ofrecen un tamaño de grano similar. En el caso de la V3 y la V2\_fina, pueden encontrarse partículas de gran tamaño que son resultado de la adhesión de varios granos más pequeños y que no resultan divisibles fácilmente. En el caso de las probetas de mayor tamaño de grano (Arl\_gruesa y V2\_gruesa), este apelmazamiento de varios granos, implica mayor dispersión del área en los resultados experimentales obtenidos. El perímetro de la V2\_gruesa es también más alto que el resto de las composiciones, como resultado de tamaños de partículas más grandes. En general la dispersión del perímetro respecto al valor medio es relativamente alta. Todas las partículas obtenidas se pueden considerar relativamente próximas a elementos circulares. Esto era de esperar en las partículas de arlita ya que durante la preparación del amasado estas son recubiertas por una capa de cemento. Sin embargo, en el caso de las vermiculitas la forma circular se obtiene a partir del proceso de emulsionado de varios granos en la amasadora.

Durante las tareas experimentales realizadas para el tratamiento se ha observado que es muy importante la calidad de la imagen fotográfica. Aspectos como la luminosidad del entorno, configuración del contraste fotográfico de la cámara, contraste entre granos y fondo, configuración de los modelos de ajuste en el software o el filtrado de resultados son de la máxima importancia para que el

tratamiento y la detección del contorno de la partículas se realice con nitidez y exactitud. La obtención de resultados correctos está determinada por la imagen digital de partida y su posterior tratamiento en el software.

Con programas de análisis de imágenes bidimensionales no es posible determinar la relación volumen/superficie del grano. La morfología de los materiales analizados no es uniforme y dispone de granos de topología amorfa, con lo que la colocación del grano para una foto bidimensional solamente proporciona información sesgada en un plano. Con técnicas de tratamiento de imágenes 3D se consigue un estudio completo de la granulometría, sin embargo, esto requiere de equipamiento específico: cámaras fotográficas 3D.

#### 5.6.4.- *Ensayo en tubo de impedancia*

La impedancia acústica y el coeficiente de absorción del material poroso se han determinado experimentalmente a partir de un ensayo en tubo de impedancia [81]. Para ello se ha adaptado un tubo metálico y se ha construido un portamuestras que ajusta exactamente con las muestras y da continuidad al tubo de diámetro interior 72 mm. La distancia entre el altavoz y la muestra es 1600 mm. Con esto se puede garantizar un frente de onda plano en el material poroso. Las longitudes del dispositivo experimental, véase Figura 2.7 son  $s = 60$  mm y  $X = 160$  mm. Para el ensayo se ha empleado un acondicionador acústico de señal de ruido blanco modelo TASCAM Teac Profesional US-144MKII de dos canales de salida y dos micrófonos Behringer ECM8000 con respuesta de frecuencia de 15 Hz a 20 kHz y sensibilidad combinada de 70 dB.



Figura 5.48.- Ensayo en tubo de impedancia.





Figura 5.49.- Portamuestras fabricado en aluminio y terminación rígida.



Figura 5.50.- Detalle del montaje del portamuestras y micrófonos.

En el estudio de la respuesta acústica en ensayo en tubo de impedancia, Figura 5.51 a Figura 5.65, las muestras se han ensayado en dos posiciones: “a” y “b”, analizando el comportamiento que ofrece el material para ondas acústicas que inciden en las dos caras. La identificación “a” indica la posición de la probeta en el portamuestras con la cara más plana y uniforme en contacto directo con la terminación rígida. La identificación “b” indica que la cara más rugosa se encuentra en contacto con la terminación rígida. La absorción de cada material se ha cuantificado mediante el promedio de la medición acústica entre ambas caras. También se incluye el coeficiente de absorción en frecuencias a 1/3 de octava, observándose la variación de comportamiento entre distintos materiales.

5.6.4.1.- Arlita gruesa.

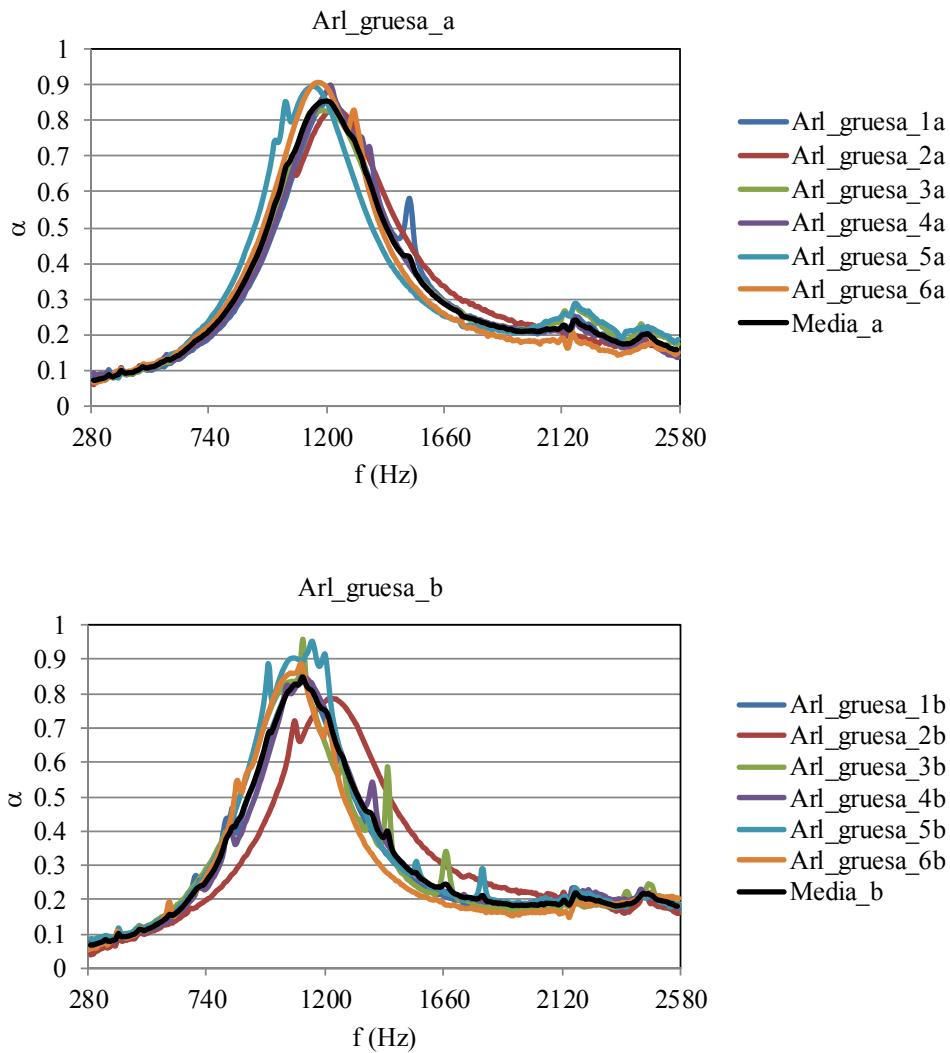


Figura 5.51.- Coeficiente de absorción de probetas con arlita gruesa en banda fina (posición a y b).

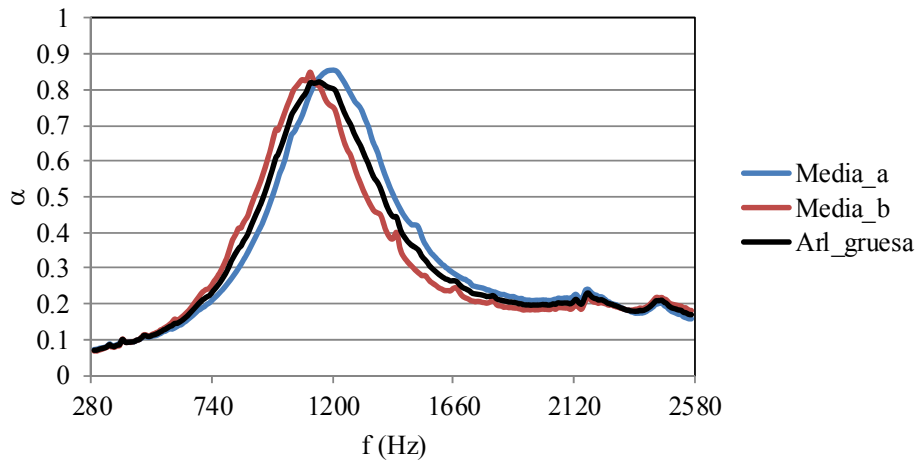


Figura 5.52.- Coeficiente de absorción en arlita gruesa (valores promedio).

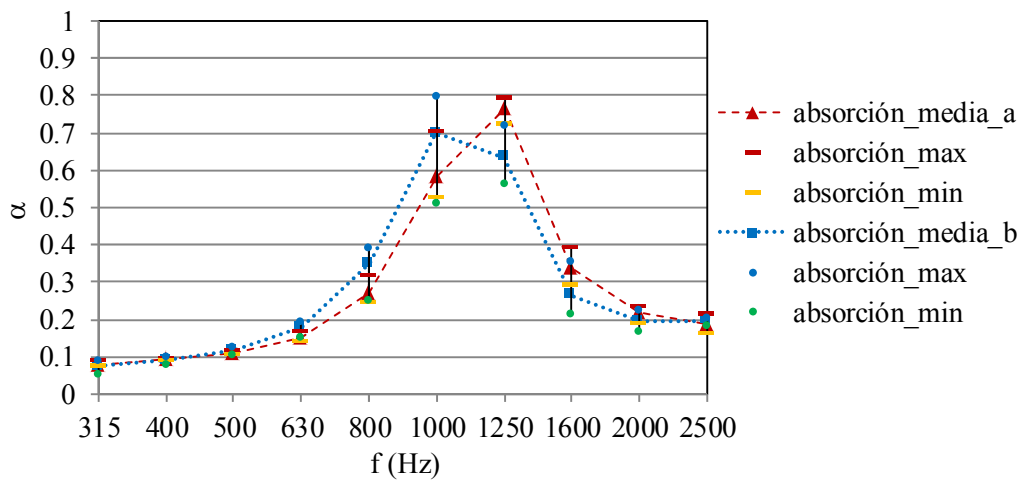


Figura 5.53.- Rangos del coeficiente de absorción en arlita gruesa en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava).

5.6.4.2.- Arlita fina.

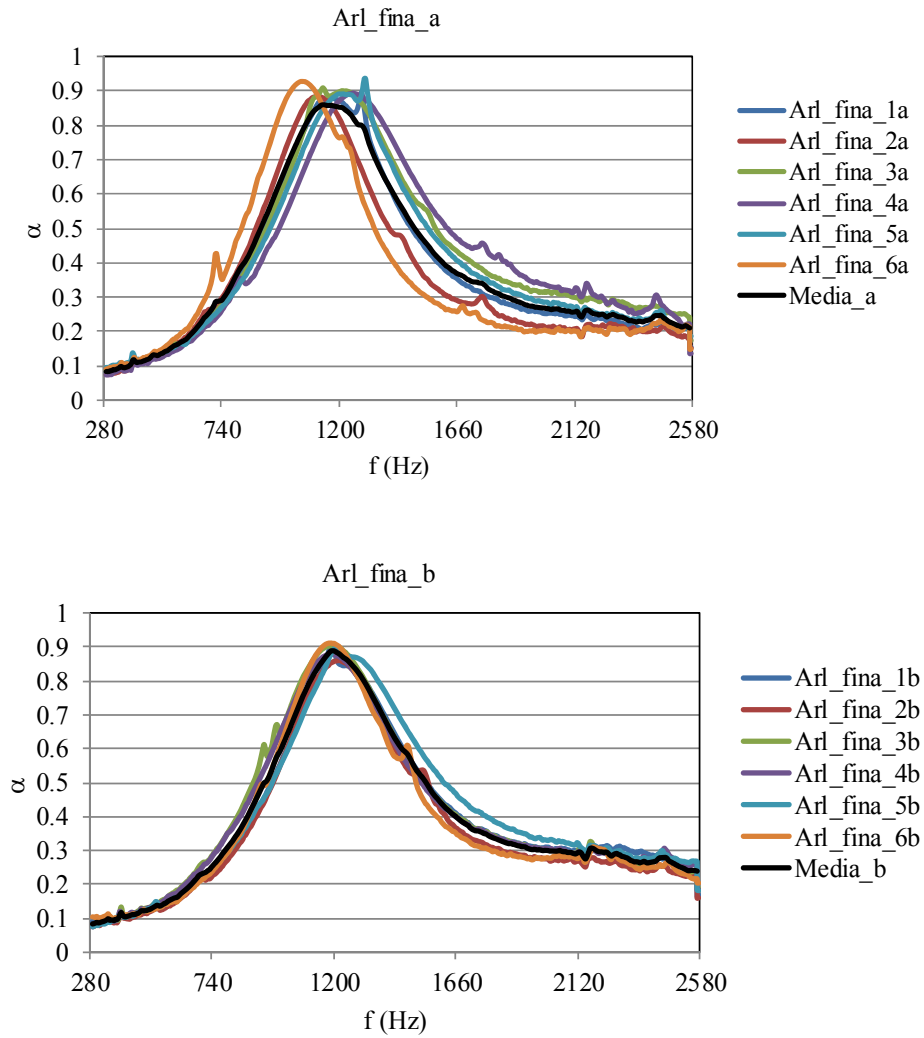


Figura 5.54.- Coeficiente de absorción de probetas con arlita fina en banda fina (posición a y b).

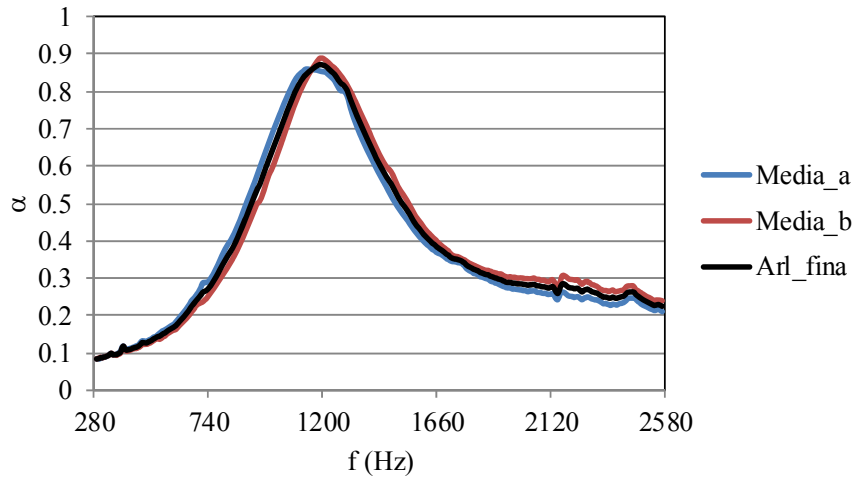


Figura 5.55.- Coeficiente de absorción en arlita fina (valores promedio).

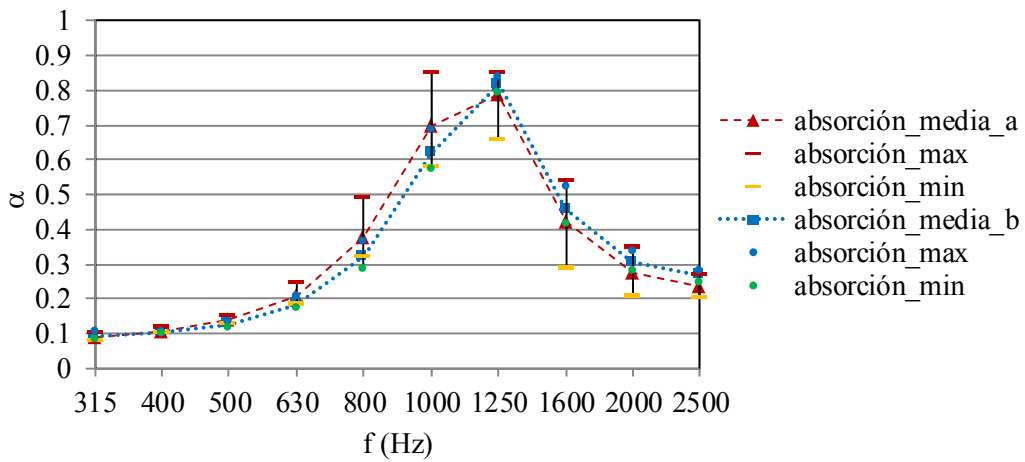


Figura 5.56.- Rangos del coeficiente de absorción en arlita fina en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava).

5.6.4.3.- Vermiculita Tipo 3

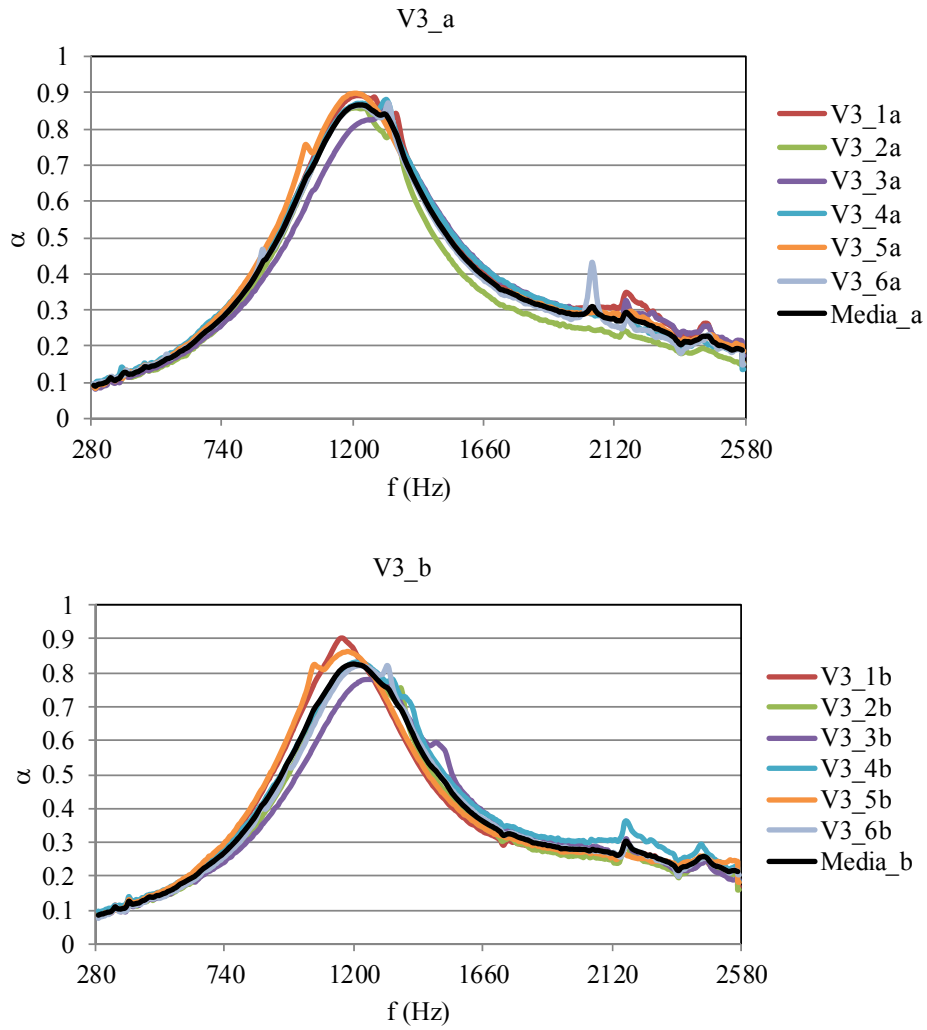


Figura 5.57.- Coeficiente de absorción en V3 en banda fina (posición a y b).

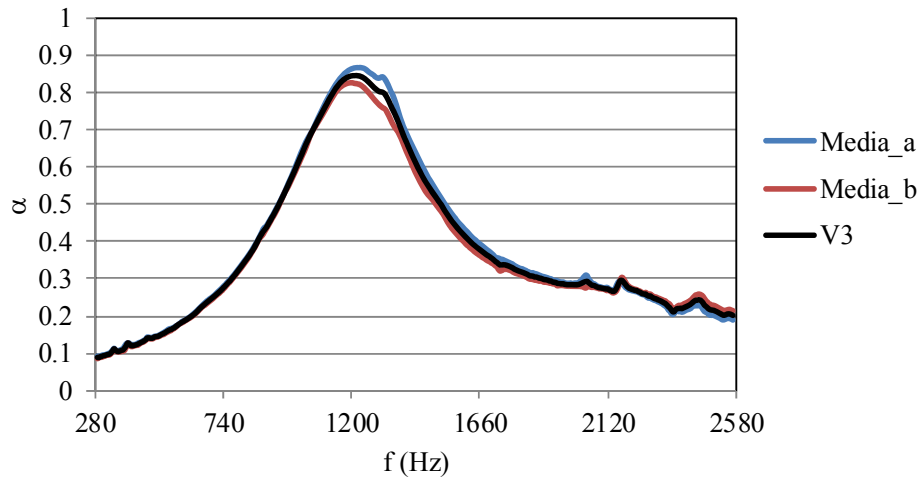


Figura 5.58.- Coeficiente de absorción en V3 (valores promedio).

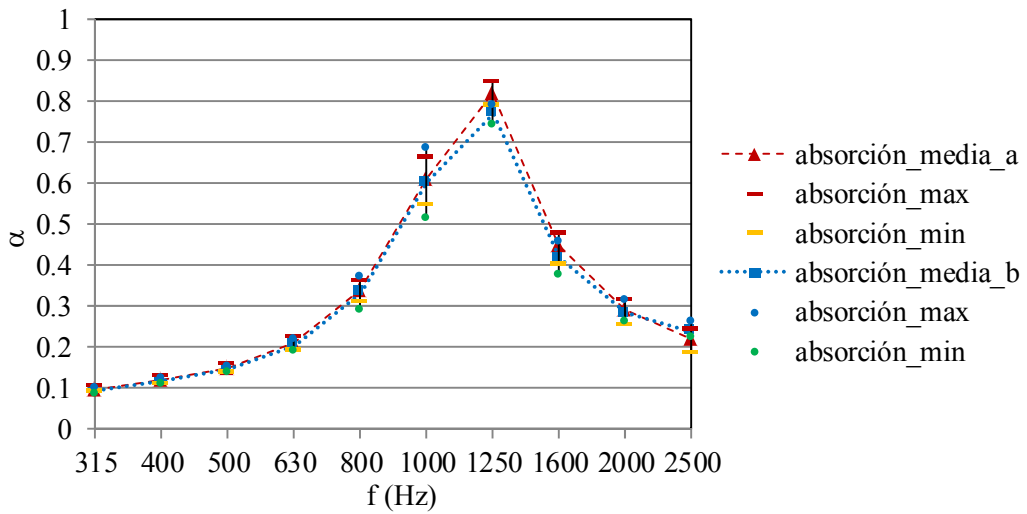


Figura 5.59.- Rangos del coeficiente de absorción en V3 en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava).

5.6.4.4.- Vermiculita Tipo 2 gruesa

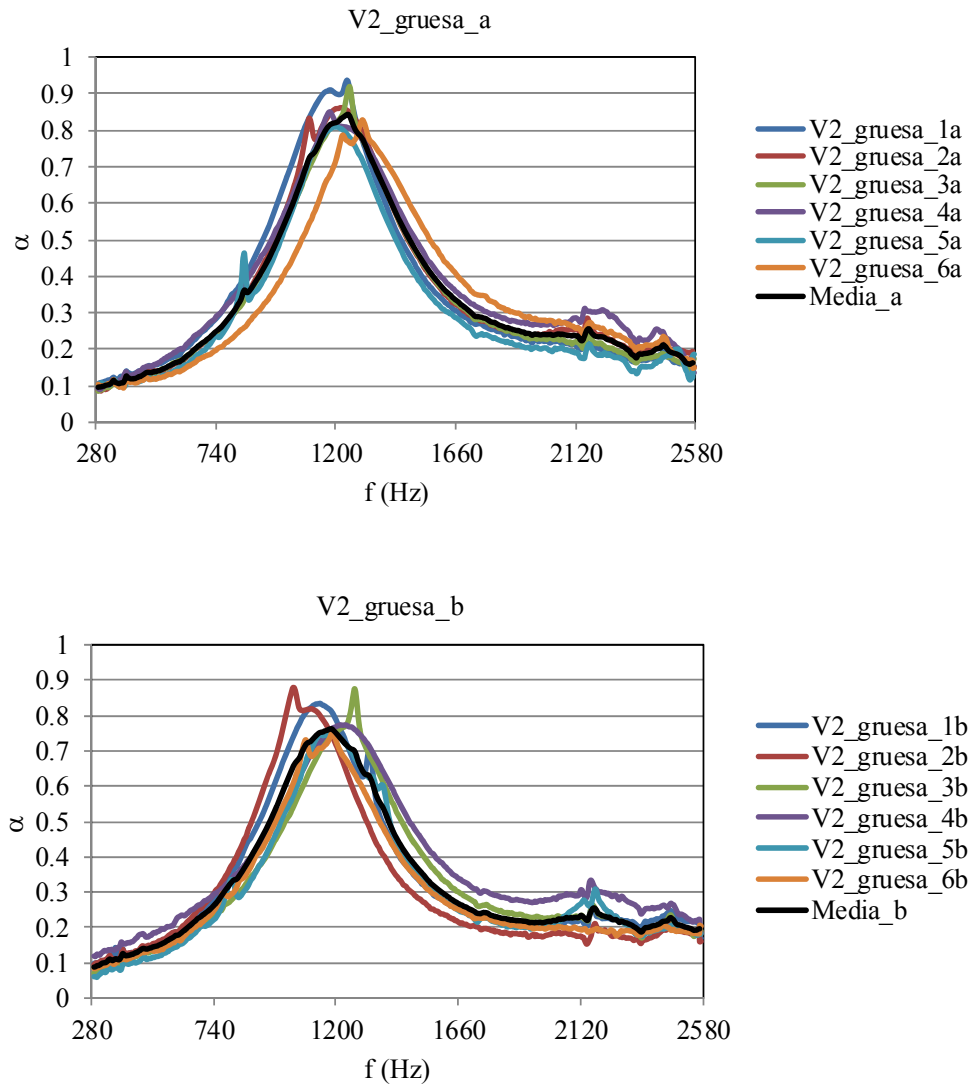


Figura 5.60.- Coeficiente de absorción de probetas con V2 gruesa en banda fina (posición a y b).



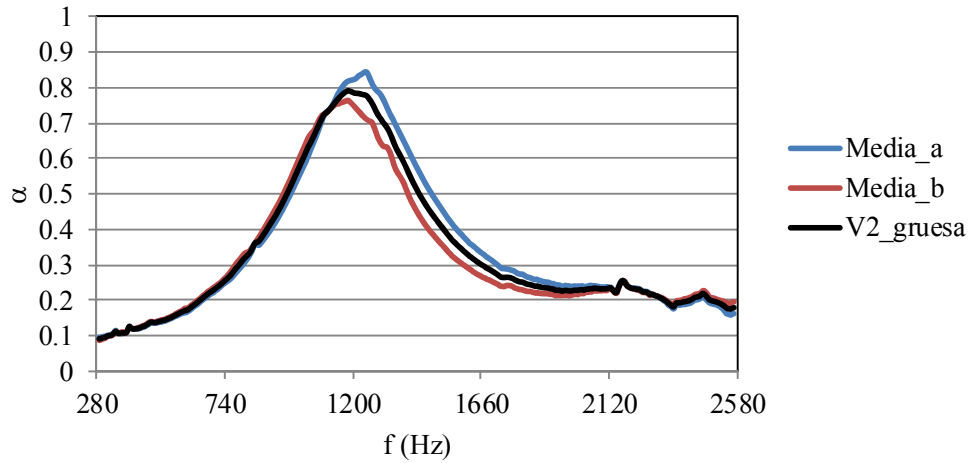


Figura 5.61.- Coeficiente de absorción en V2 gruesa (valores promedio).

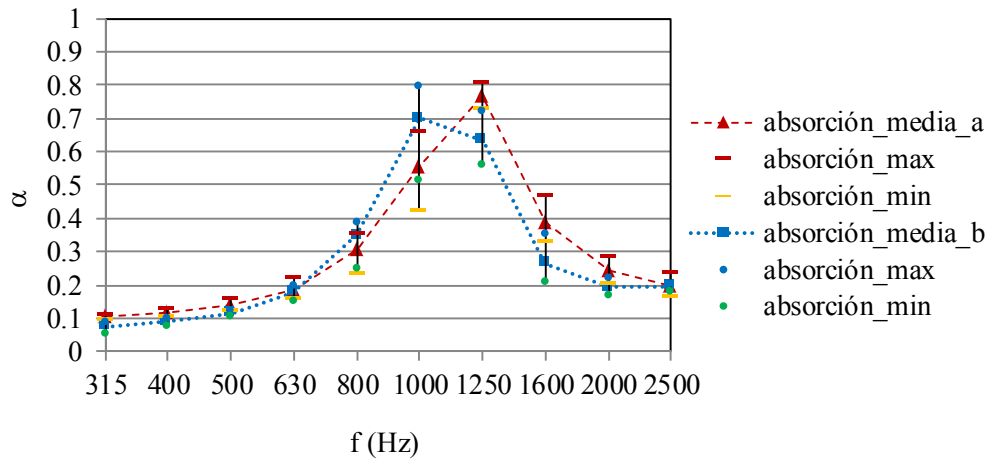


Figura 5.62.- Rangos del coeficiente de absorción en V2 gruesa en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava).

5.6.4.5.- Vermiculita Tipo 2 fina

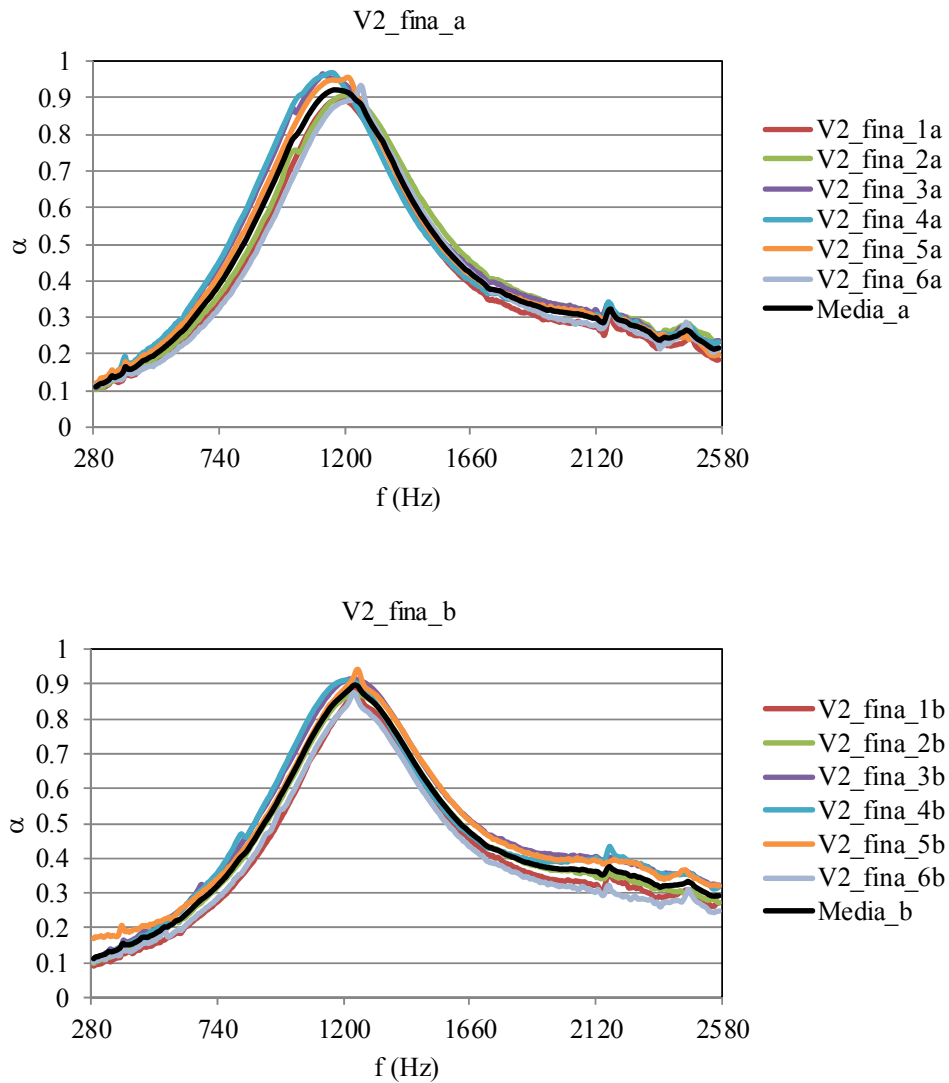


Figura 5.63.- Coeficiente de absorción en V2 fina en banda fina (posición a y b).

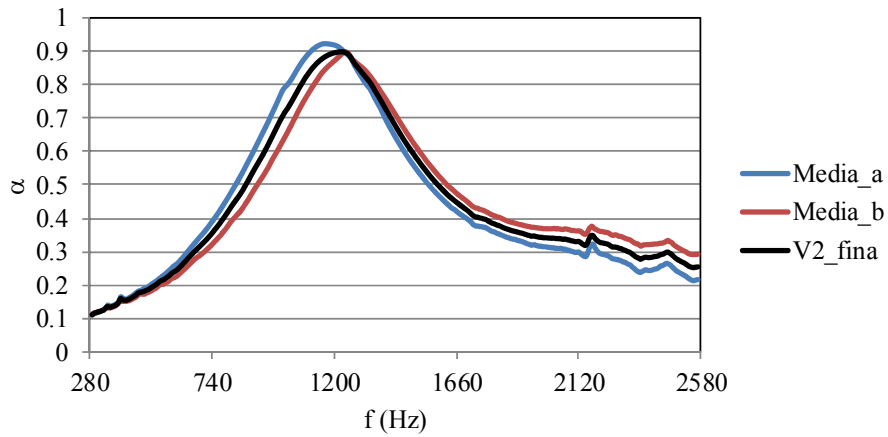


Figura 5.64.- Coeficiente de absorción en V2 fina (valores promedio).

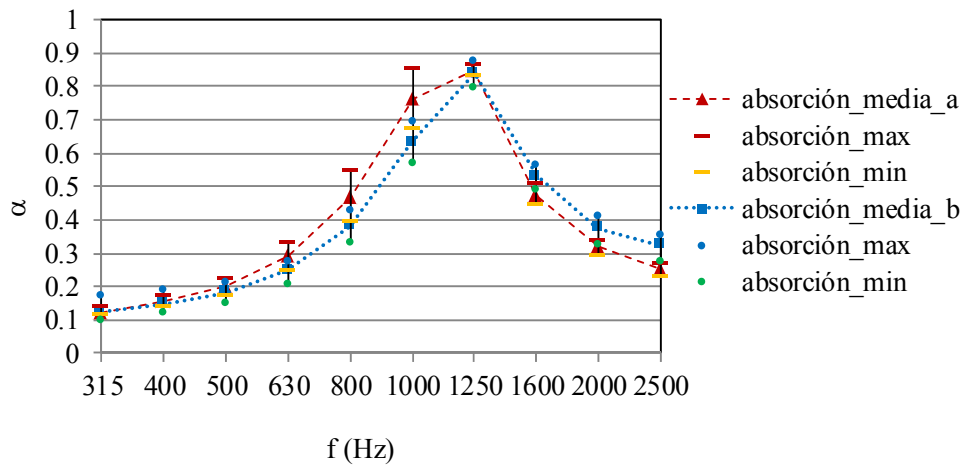


Figura 5.65.- Rangos del coeficiente de absorción en V2 fina en posición a y b (frecuencias a 1/3 octava).

Las muestras con granos más gruesos (Arl\_gruesa y V2\_gruesa) presentan mayor dispersión en el coeficiente de absorción para las 6 muestras en ambas posiciones, Figura 5.51 y Figura 5.60, siendo la posición “b” la que ofrece mayor variación del comportamiento. Esta dispersión de resultados viene determinada por la irregularidad de la superficie superior (cara “b”) en contacto con la terminación

rígida en el ensayo en tubo de impedancias, lo que imposibilita la condición de “terminación rígida“. Exceptuando las probetas de Arl\_fina en posición “a”, las muestras de grano fino (Arl\_fina en Figura 5.54 y V2\_fina en Figura 5.63) presentan uniformidad de respuesta en frecuencia de las 6 muestras para el coeficiente de absorción y además en ambas posiciones. Este hecho también se reproduce en el caso de la V3, Figura 5.57, que, aunque tiene grano grueso, muestra un comportamiento uniforme en ambas posiciones. La absorción en probetas de grano grueso es más irregular, ofreciendo la misma respuesta en casi la totalidad de las muestras. En algunos casos puntuales (Arl\_gruesa\_2b, Arl\_fina\_2a, Arl\_fina\_6a en Figura 5.51) se obtiene una ligera dispersión de los resultados con respecto al resto de probetas del mismo material. Esta variación de comportamiento viene determinada por la heterogeneidad del material y el proceso de elaboración.

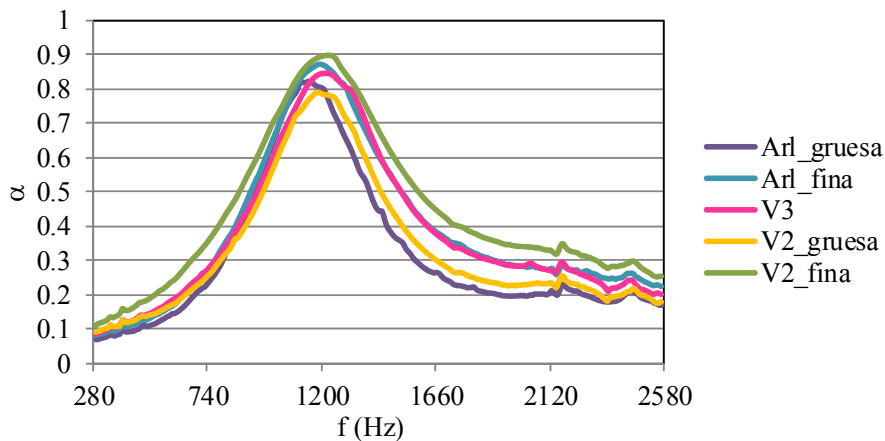


Figura 5.66.- Coeficiente de absorción medio en cada material.

Los cinco tipos de muestras analizadas ofrecen una respuesta muy similar en el rango de frecuencias estudiado desde 285 hasta 2600 Hz. La Figura 5.66 resume la variación del coeficiente de absorción con la frecuencia para los cinco materiales. En todas las muestras el coeficiente de absorción alcanza un máximo muy localizado alrededor de 1200 Hz, llegando a valores elevados, lo que confirma que estos tipos de materiales son válidos como absorbentes acústicos en un rango determinado de frecuencias. En las probetas de vermiculita, estos resultados son muy similares a los obtenidos en los estudios preliminares. En la Figura 5.67, Figura 5.68 y Figura 5.69 se indica la frecuencia asociada al coeficiente de absorción máximo en cada material. En algunas muestras el coeficiente de absorción es moderado con valor de 0.76 (caso de la V3\_gruesa en la posición “b”,

Figura 5.68) mientras que en otros alcanza un coeficiente muy elevado de 0.9 (caso de la V2\_fina en las dos posiciones).

En general, la posición “a”, con la cara más uniforme en contacto directo con la terminación rígida da mejores resultados de absorción y en frecuencias ligeramente más altas que en la posición “b”. Los valores máximos de absorción se obtienen en el rango (1162, 1248) Hz.

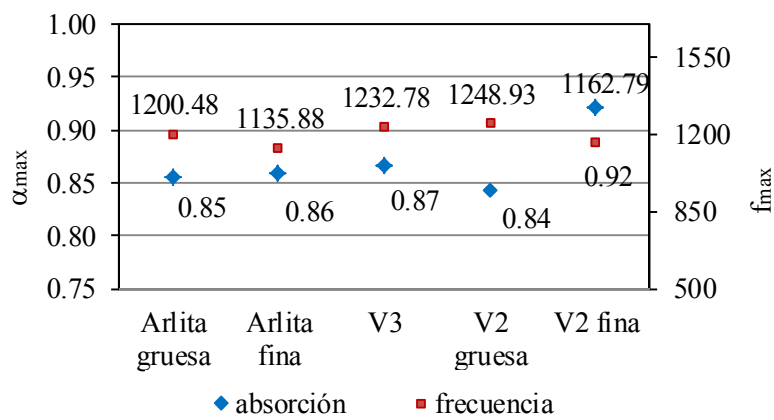


Figura 5.67.- Coeficiente de absorción máximo y frecuencia en posición “a”.

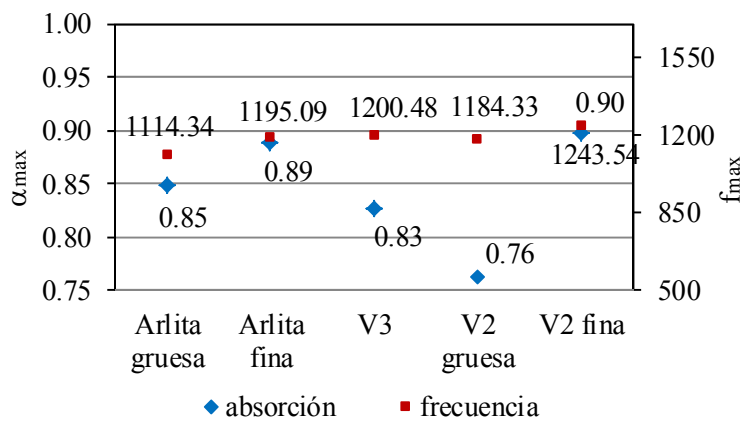


Figura 5.68.- Coeficiente de absorción máximo y frecuencia en posición “b”.

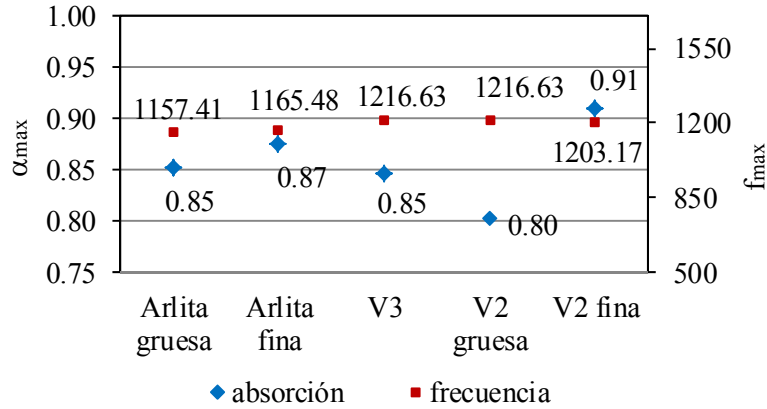


Figura 5.69.- Coeficiente de absorción máximo y frecuencia promedio.

Con respecto a las dos caras de las probetas, cabe destacar que la arlita gruesa no presenta variación entre ambas orientaciones, mientras que el resto de probetas hay diferencia entre ambas caras. La absorción de ambas caras es ligeramente diferente, encontrando que la V2\_gruesa presenta mayor variación de la respuesta, Figura 5.70.

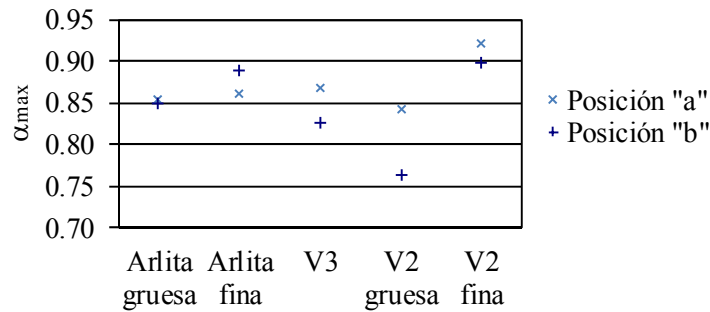


Figura 5.70.- Coeficiente de absorción máximo promedio.

La Figura 5.71 muestra el ancho de banda en el que se obtiene más del 50% de la absorción máxima del material para cada posición estudiada, mientras que la Figura 5.72 representa los valores promedios en cada tipo de material. En las muestras de grano grueso (arlita y vermiculita tipo 2) la absorción se encuentra más localizada en un rango menor de frecuencias, mientras que las muestras de grano

fino y Vermiculita tipo 3 este ancho de banda aumenta, especialmente en el caso de la vermiculita tipo 2 de grano fino que presenta el mayor rango de absorción acústica. Este comportamiento de los materiales es común para las dos posiciones lo cual indica que no hay diferencia de comportamiento acústico para los dos sentidos de propagación y solamente resulta interesante desde un punto de vista estético y acabado superficial.

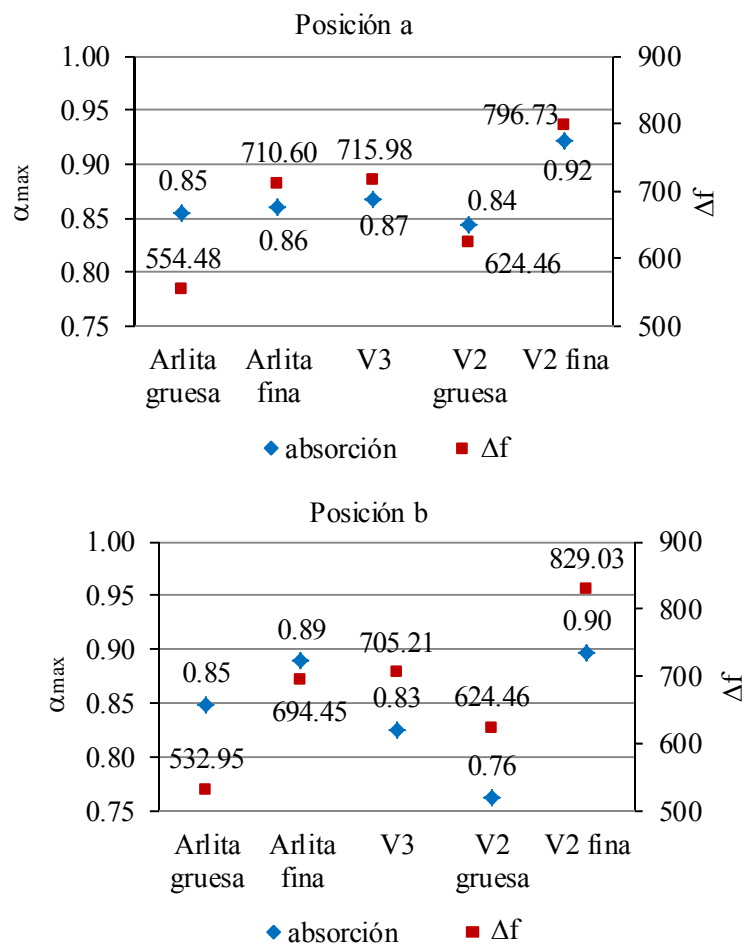


Figura 5.71.- Coeficiente de absorción máximo y ancho de banda en posición “a” - “b”.

El ancho de banda promedio, Figura 5.73, indica que las muestras de grano grueso presentan menor aprovechamiento acústico, mientras que las muestras de grano fino y la vermiculita tipo 3 aumentan ligeramente el rango de frecuencias de absorción. También se observa que las muestras de vermiculita obtienen su máximo de absorción a mayor frecuencia que las muestras de arlita.

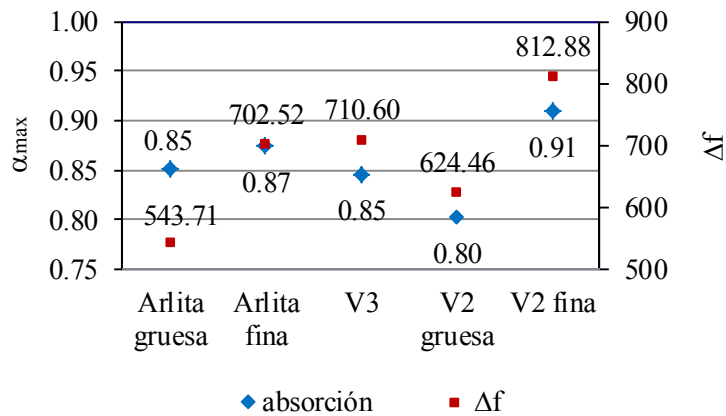


Figura 5.72.- Coeficiente de absorción máximo promedio y ancho de banda.

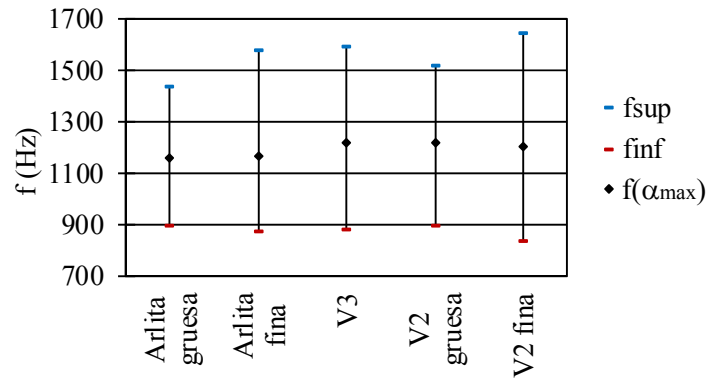


Figura 5.73.- Ancho de banda promedio y frecuencia para coeficiente de absorción máximo.



Puede afirmarse que las composiciones de tamaño de grano más fino presentan mejor comportamiento acústico (mayor coeficiente de absorción y mayor rango de frecuencias) que las muestras de grano mayor. El estudio morfológico de estas composiciones indica que el grado de circularidad y el área promedio es muy similar entre ellas. Por otro lado las composiciones de mayor tamaño de grano (Arl\_gruesa y V2\_gruesa) presentan menor coeficiente de absorción en todo el rango de frecuencias estudiado. En este caso, el comportamiento de la vermiculita, con tamaño de partículas muy superior al de la arlita, es un poco mejor.

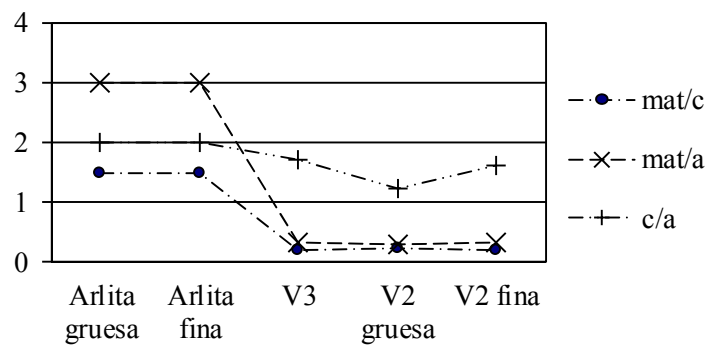


Figura 5.74.- Relación en peso de los componentes.

Con respecto a la proporción en peso de mat/c, mat/a y c/a (Figura 5.74) no aparece una relación clara con respecto al coeficiente de absorción máximo o el rango en ancho de banda. Exceptuando la composición de arlita gruesa, la relación c/a parece seguir la misma tendencia que el coeficiente de absorción y el ancho de banda. Sin embargo, a partir de la Figura 5.72 se puede desprender que valores altos del coeficiente de absorción llevan asociados mayores ancho de banda.

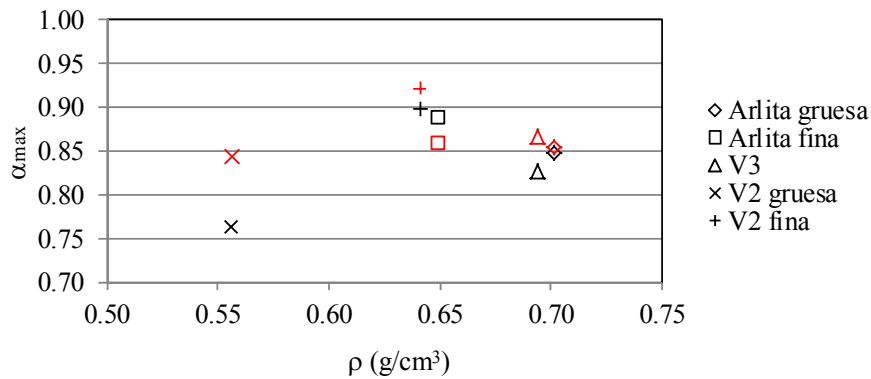


Figura 5.75.- Coeficiente de absorción máximo en posición a (negro) y b (coloreada) en función de la densidad aparente.

La rugosidad superficial de las probetas en el ensayo en tubo impedancia ofrece ligeras variaciones del coeficiente de absorción máximo. La Figura 5.75 muestra el coeficiente de absorción en función de la densidad ( $\text{g/cm}^3$ ) de las muestras en las posiciones ensayadas, observándose que aparece cierta dependencia entre ambas. Exceptuando el caso de V2 gruesa, el resto de materiales quedan agrupados en valores de densidad entre 0.65 y 0.7  $\text{g/cm}^3$  y valores de absorción máxima muy similar de 0.83 a 0.9. En el caso de la vermiculita de tamaño grueso, la diferencia en la absorción entre ambas caras es más significativo y puede ser debido a la alta rugosidad de la cara en contacto directo con la terminación rígida, lo cual provoca un espacio entre muestra y terminación rígida que favorece la atenuación acústica, quedando parte de la señal acústica atrapada en este hueco. Como excepción a la pauta observada, la arlita de grano fino invierte ligeramente esta tendencia, mostrando valores más bajos de absorción para la posición “b”. Este hecho puede ser debido a algún apelmazamiento de las partículas en la parte inferior de la probeta durante el moldeo. La inspección ocular de las probetas de arlita de grano fino no muestra diferencia significativa apreciable entre ambas caras. También se observa que valores bajos de densidad proporcionan valores ligeramente más bajos en el coeficiente de absorción.

El Factor de Calidad es un parámetro que mide la relación entre la energía almacenada y la disipada. Se ha determinado como la relación entre la frecuencia para absorción máxima y el rango de frecuencias en tercio de octavas en que el coeficiente de absorción supera el 50% de la máxima absorción. El Factor de pérdidas es el inverso del Factor de Calidad. El análisis del Factor de Calidad, Figura 5.76 decrece con el aumento de la densidad del material, aunque este descenso mantiene el Factor de Calidad en valores próximos entre los cinco compuestos estudiados.

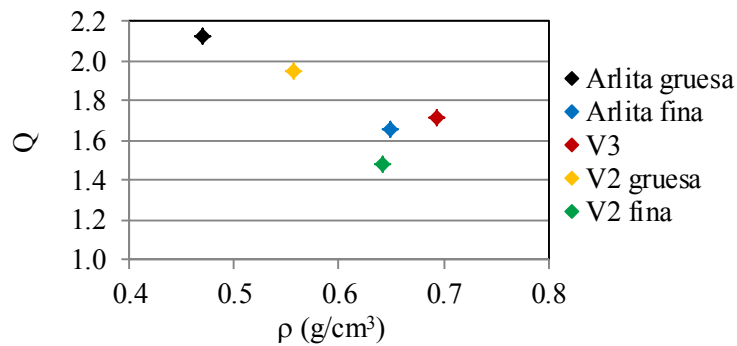


Figura 5.76.- Factor de calidad en función de la densidad aparente.

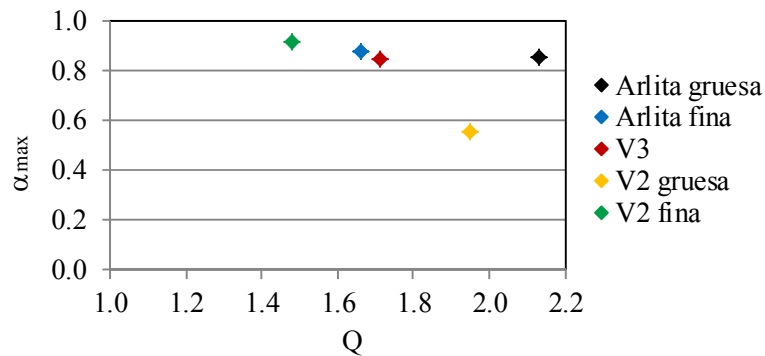


Figura 5.77.- Absorción máxima y Factor de Calidad.

De la Figura 5.77 se observa que en las muestras analizadas se mantiene el coeficiente de absorción máxima en valores elevados para valores distintos del

Factor de Calidad, exceptuando la composición de V2 de tamaño grueso, en la que tiene menor absorción máxima.

De los resultados obtenidos, no parece haber una diferencia importante en la respuesta de la absorción con la variación de frecuencia para las diversas granulometrías estudiadas. El distinto comportamiento entre las posiciones “a” y “b” está influenciado por la morfología de los granos que en el caso de la arlita de tamaño grueso (posición “b”) no garantiza la condición de terminación rígida en toda la superficie durante un ensayo en tubo de impedancia. En todas las composiciones se alcanzan valores máximos del coeficiente de absorción en torno al 0.9, siendo la composición de vermiculita de grano fino la que en algunas muestras (en concreto la muestra 3 y 4) superan ligeramente este valor, alcanzando un coeficiente máximo de 0.94.

Las muestras de grano grueso ofrecen mayor dispersión de la absorción en ambas posiciones, siendo la posición “b” la que ofrece mayor variación del comportamiento. Las composiciones de grano fino responden a un mismo tipo de comportamiento, observándose que las probetas de arlita fina con la cara más plana en contacto con la terminación rígida del tubo de impedancia dan resultados diversos. En el caso de la V3, la absorción tiende a un comportamiento similar a muestras de grano fino mostrando gráficas muy uniformes en todas las muestras y en ambas posiciones. La absorción en probetas de grano grueso es ligeramente inferior a probetas de grano más fino y los valores altos de absorción se localizan en un ancho de banda más estrecho. Esto se ajusta a la condición de pérdida de energía acústica por rozamiento de la onda entre los poros del material.

De los resultados obtenidos, no parece haber una diferencia importante en la respuesta de la absorción con la variación de frecuencia para distintas granulometrías.

Tabla 5.18.- Valores promedio de resultados en tubo de impedancia.

Promedio	$\alpha_{max}$	$F(\alpha_{max})$ (Hz)	$F_{inf}$ (Hz)	$F_{sup}$ (Hz)	$\Delta F$ (Hz)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	$Q$
Arl gruesa	0.85	1157.41	899.01	1442.72	543.71	0.70	2.13
Arl fina	0.87	1165.48	880.17	1582.69	702.52	0.65	1.66
V3	0.85	1216.63	882.86	1593.46	710.60	0.69	1.71
V2 gruesa	0.80	1216.63	896.32	1520.78	624.46	0.56	1.95
V2 fina	0.91	1203.17	837.10	1649.98	812.88	0.64	1.48

Tabla 5.19.- Cuadro resumen de los datos experimentales en ensayo en tubo de impedancia.

Posición "a"	$\alpha_{max}$	$F(\alpha_{max})$ (Hz)	$F_{inf}$ (Hz)	$F_{sup}$ (Hz)	$\Delta F$ (Hz)	mat/c	mat/a	c/a	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	$Q$
Arl_gruesa	0.85	1200.48	936.69	1491.17	554.48	1.50	3.00	2.00	0.70	2.17
Arl_fina	0.86	1135.88	855.95	1566.54	710.60	1.50	3.00	2.00	0.65	1.60
V3	0.87	1232.78	888.25	1604.22	715.98	0.20	0.34	1.71	0.69	1.72
V2_gruesa	0.84	1248.93	925.93	1550.39	624.46	0.25	0.31	1.25	0.56	2.00
V2_fina	0.92	1162.79	802.11	1598.84	796.73	0.20	0.33	1.63	0.64	1.46

Posición "b"	$\alpha_{max}$	$F(\alpha_{max})$ (Hz)	$F_{inf}$ (Hz)	$F_{sup}$ (Hz)	$\Delta F$ (Hz)	mat/c	mat/a	c/a	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	$Q$
Arl_gruesa	0.85	1114.34	861.33	1394.28	532.95	1.50	3.00	2.00	0.70	2.09
Arl_fina	0.89	1195.09	904.40	1598.84	694.45	1.50	3.00	2.00	0.65	1.72
V3	0.83	1200.48	877.48	1582.69	705.21	0.20	0.34	1.71	0.69	1.70
V2_gruesa	0.76	1184.33	866.71	1491.17	624.46	0.25	0.31	1.25	0.56	1.90
V2_fina	0.90	1243.54	872.10	1701.12	829.03	0.20	0.33	1.63	0.64	1.50

### 5.6.5.- Resistividad al flujo

Para obtener esta propiedad intrínseca del material se ha optado por comparar el método acústico propuesto por Ingard y Dear [132] con los resultados obtenidos mediante la función de transferencia según proceso normalizado. Para ello se ha hecho uso del mismo dispositivo que para el estudio en tubo de impedancia, al que se ha acoplado una extensión con una terminación rígida (rebote de señal con absorción nula). El montaje se ha dispuesto según se indica en la Figura 2.9 con  $L = 892$  mm. La ubicación de los micrófonos debe colocarse junto a la muestra (cara expuesta a la onda acústica incidente) y junto a la terminación rígida. Se ha observado experimentalmente que la posición de los micrófonos en posiciones separadas de las indicadas anteriormente modifica la respuesta en frecuencia de la función de transferencia  $|H_{12}|$  entre los dos micrófonos.

La determinación de la resistividad al flujo por el método aproximado propuesto por Ingard y Dear [132] requiere determinar el término  $|\text{imag}H_{12}|$ , siendo  $H_{12}$  la relación de las transformadas de la presión sonora entre los micrófonos 1 y 2, (véase Figura 2.9). La alternativa propuesta por la normativa, donde se indica que la resistividad al flujo puede terminarse mediante el máximo de la función de transferencia  $|H_{12}|$ , proporciona resultados ligeramente distintos dependiendo del número de puntos tomados para determinar el ajuste con la línea de corte a frecuencia nula. Para el ensayo se ha empleado un acondicionador acústico de señal de ruido blanco modelo OROS OR34 Compact Analyzer con salida para 4 canales de salida y potencia de 15VA. Los dos micrófonos empleados han sido Brüel & Kjaer 4188-A-21 con sensibilidad combinada de -30.5 y -30.8 dB, respectivamente.

En este ensayo se han medido los niveles de presión acústica de las probetas en dos posiciones: posición “a” y posición “b”, siguiendo la pauta descrita en el estudio del coeficiente de absorción anteriormente descrito. Los resultados promedios de cada muestra en cada posición se indican en las gráficas siguientes, representando además la función de transferencia descrita por Ingard-Dear obtenida como el promedio de las funciones en cada posición. Sobre estos resultados, según se indica en la metodología propuesta por estos autores, la resistividad al flujo se obtiene como el valor de corte a frecuencia nula de la línea recta que corta a los máximos de la función  $|H_{12}|$  en frecuencias bajas. En el caso del método aproximado, considerando  $|\text{imag}H_{12}|$ , la resistividad al flujo se obtiene mediante la proyección a frecuencia nula de la recta que une los puntos de la función en las frecuencias que cumplen la condición (2.55):

$$L = (2n - 1)\frac{\lambda}{4}; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.3)$$

La primera limitación para aplicar este método es que la longitud de onda debe ser mayor que 1.7 veces el diámetro del tubo. Partiendo de la definición de la longitud de onda  $\lambda = c_0/f$ , la frecuencia de trabajo debe ser menor que:

$$\lambda > 1.7D \rightarrow \frac{c}{f} > 1.7D \rightarrow f_{\max} < \frac{c}{1.7D} \quad (5.4)$$

Introduciendo valores, con un diámetro del tubo de 72 mm:

$$f_{\max} < \frac{340}{1.7 \cdot 0.072} = 2777 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

Esta frecuencia no se supera en la medición experimental de la resistividad al flujo en el rango de frecuencia estudiado.

La condición de onda plana, dada por la expresión (5.3) permite determinar las frecuencias en las que se cumple dicha condición, es decir:

$$L = (2n - 1)\frac{\lambda}{4} = (2n - 1)\frac{c/f}{4} \rightarrow f = \frac{(2n - 1) \cdot c}{4 \cdot L}; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.6)$$

Así pues, las frecuencias a considerar en el caso del método aproximado propuesto por Ingard-Dear supone considerar los valores de la función  $|\text{imag}H_{12}|$  a estas frecuencias y determinar la resistividad al flujo a partir de la línea de corte a frecuencia nula mediante regresión polinómica lineal. Las frecuencias en este caso son: 98.83, 296.51, 494.18, 691.8 y 889.53 Hz. Se ha determinado la resistividad al flujo por este método. Sin embargo, dada la incertidumbre por rizado de la señal que puede haber en la medición a estas frecuencias, la resistividad al flujo tomada para los cálculos en el modelo matemático es la obtenida a partir de los puntos que no están afectados por un rizado puntual de la señal y pueden variar ligeramente con la frecuencia indicada en la expresión (5.3).

La obtención de la regresión queda influenciada por el número de puntos tomados para obtener la regresión polinómica. Tras analizar la regresión para varias cantidades de puntos, se ha tomado la regresión para los tres primeros. La Figura 5.78 a Figura 5.87 muestran los niveles de presión para cada posición de la probeta, con la nomenclatura empleada en el estudio del coeficiente de absorción y las funciones de transferencia en cada material.

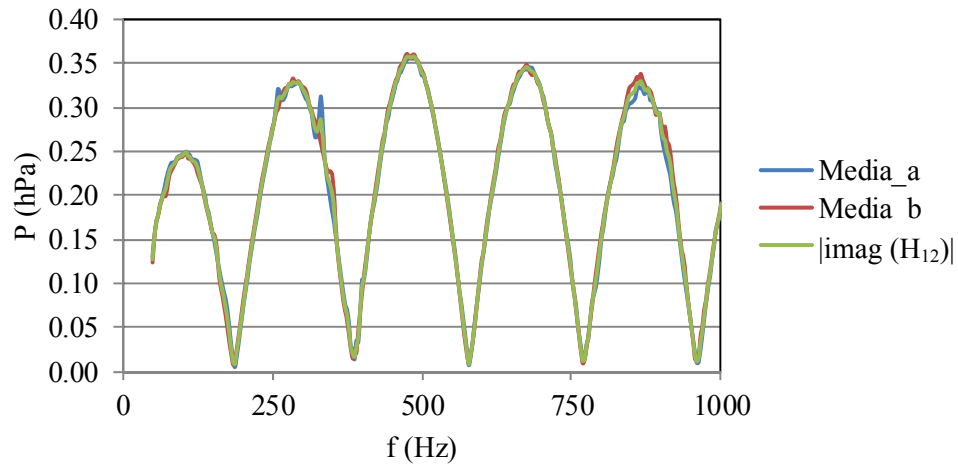


Figura 5.78.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en Arl\_gruesa.

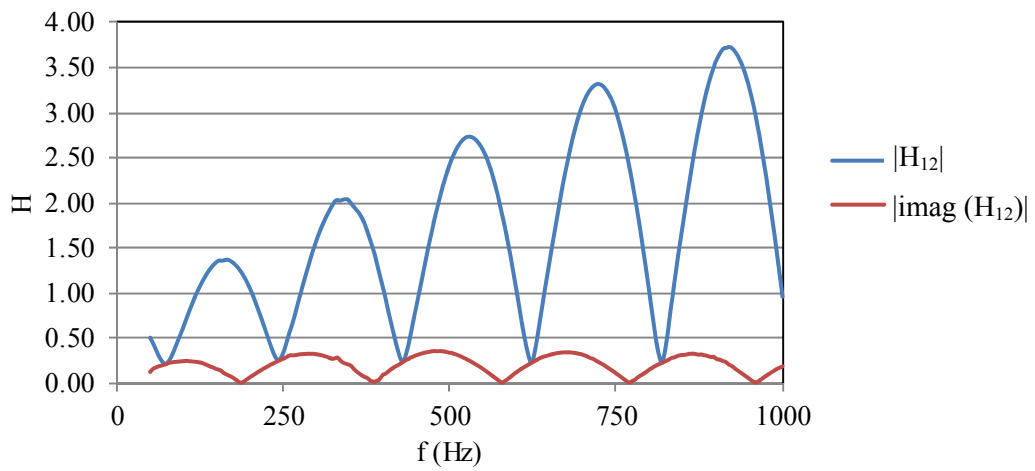


Figura 5.79.- Funciones de transferencia en Arl\_gruesa.



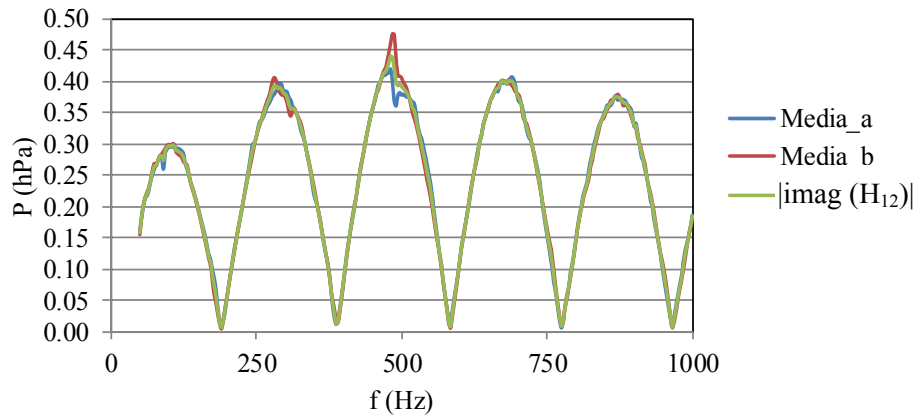


Figura 5.80.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en Arl\_fina.

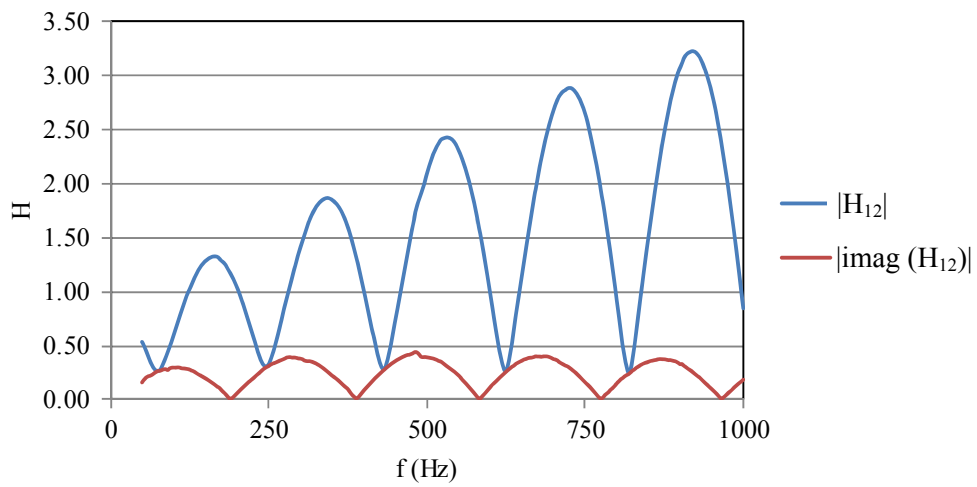


Figura 5.81.- Funciones de transferencia en Arl\_fina.

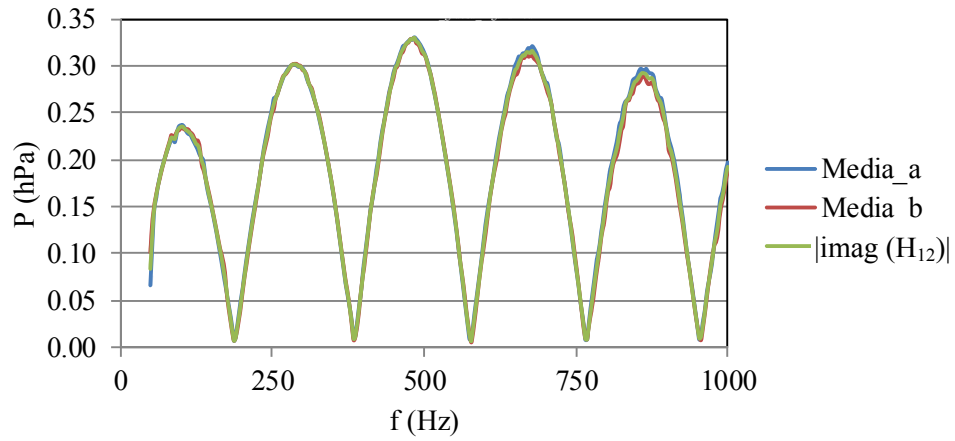


Figura 5.82.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en V3.

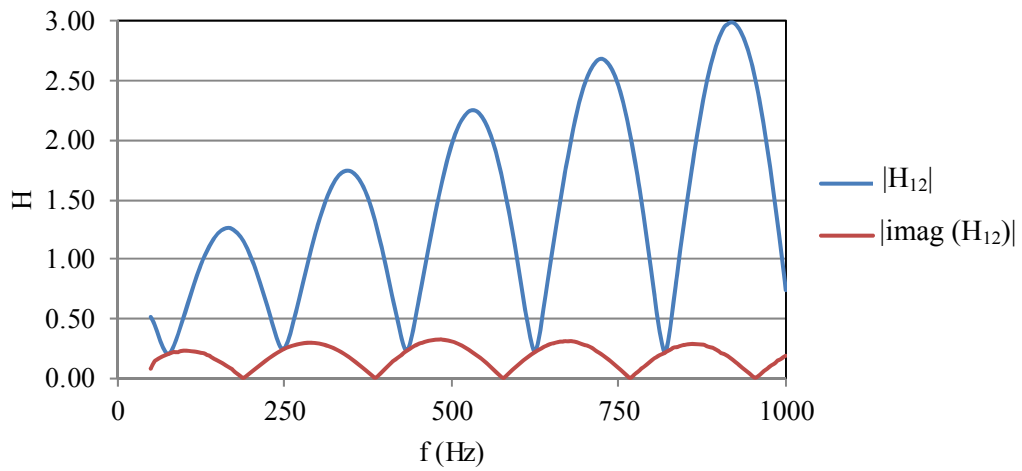


Figura 5.83.- Funciones de transferencia en V3.

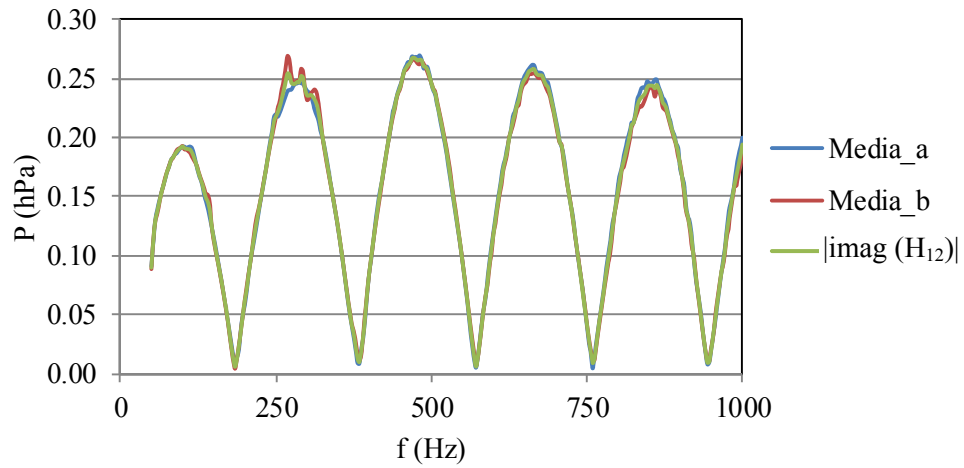


Figura 5.84.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en V2\_gruesa.

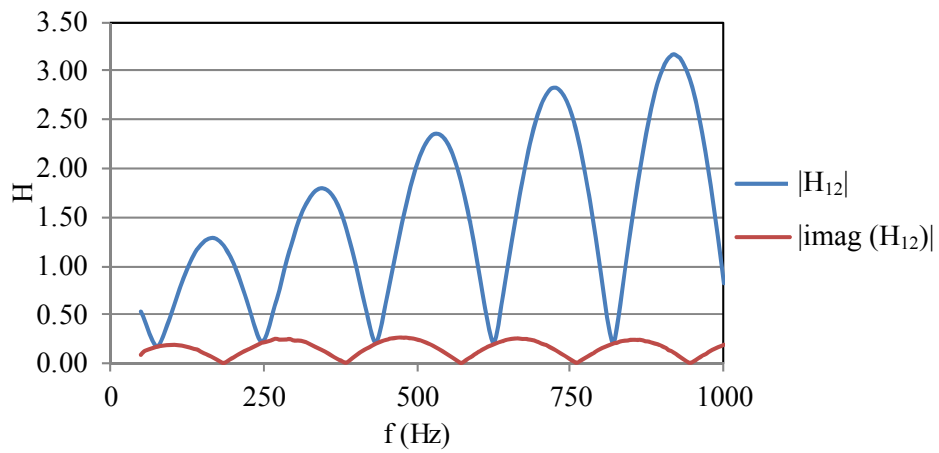


Figura 5.85.- Funciones de transferencia en V2\_gruesa.

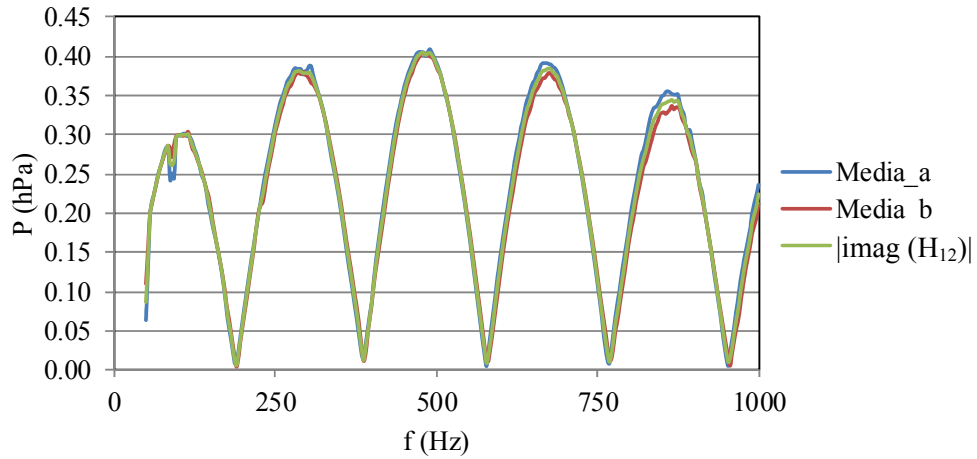


Figura 5.86.- Niveles de presión en ensayo de resistencia al flujo en V2\_fina.

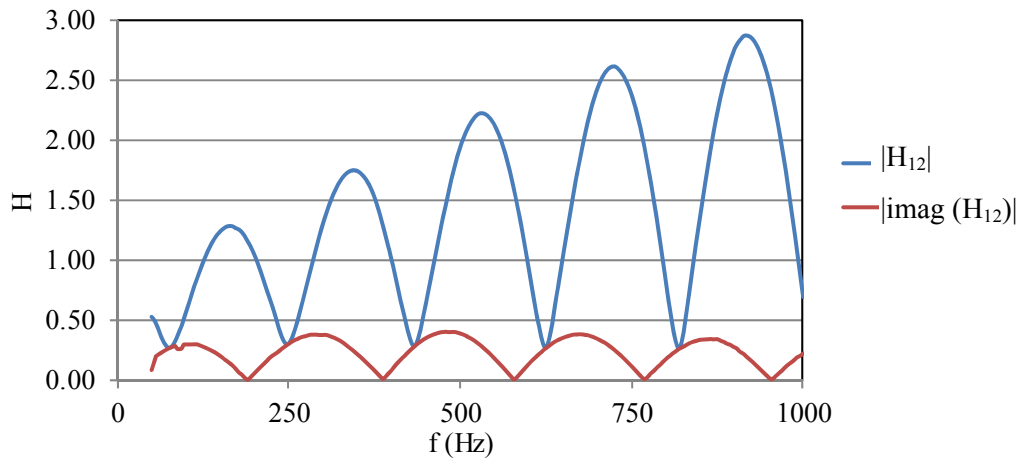


Figura 5.87.- Funciones de transferencia en V2\_fina.

En la Tabla 5.20 a Tabla 5.24 se indican los resultados obtenidos en cada muestra para cada posición “a” y “b” de las probetas y el valor promedio de cada composición. Se dan los resultados de resistividad al flujo para realizar una comparación entre ambas metodologías: función de transferencia y método

aproximado por Ingard-Dear. En estas tablas se incluye la desviación típica  $\sigma$  y la diferencia relativa del máximo  $\Delta_{\max}$  y mínimo  $\Delta_{\min}$  de la resistividad al flujo con respecto al valor medio. Para la muestra de Arl\_gruesa\_3 en su posición “a” se ha desestimado el valor de resistividad al flujo obtenido ya es un valor muy inferior con respecto al resto de probetas de la misma composición. Esto da a entender la sensibilidad que ofrecen los resultados en la obtención de valores adecuados.

La resistividad al flujo se ha obtenido por regresión polinómica lineal obteniendo su valor a frecuencia nula, como se ha indicado anteriormente. Numéricamente el valor de la resistividad al flujo se ha calculado multiplicando el valor anterior por la impedancia del aire (densidad por velocidad del sonido) y dividiendo por la longitud de la muestra. La densidad del aire ha sido  $1.21 \text{ g/cm}^3$  y la velocidad del sonido en el medio de propagación ha sido de  $343 \text{ m/s}$ .

Tabla 5.20.- Valores de resistividad al flujo en Arl\_gruesa ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$ ).

Probeta	R $ H_{12} $ a	R $ H_{12} $ b	R $ H_{12} $	R $ \text{imag}(H_{12}) $ a	R $ \text{imag}(H_{12}) $ b	R $ \text{imag}(H_{12}) $
1	1912.53	1930.39	1921.46	2072.82	2073.78	2073.30
2	1632.17	1643.07	1637.62	1681.81	1611.81	1646.81
3	1798.48	desestimada	desestimada	1896.00	1636.46	1766.23
4	1742.27	1820.27	1781.27	1723.30	1811.82	1767.56
5	2008.60	2020.66	2014.63	2098.27	2134.61	2116.44
6	1891.60	2123.33	2007.46	2064.86	2062.06	2063.46
Media	<b>1830.94</b>	<b>1907.55</b>	<b>1872.49</b>	<b>1922.84</b>	<b>1888.42</b>	<b>1905.63</b>
$\sigma$	134.41	185.37	161.48	185.51	232.80	201.47
$\Delta_{\max}$	177.66	215.79	142.14	175.43	246.19	210.81
$\Delta_{\min}$	198.77	264.47	234.87	241.04	276.62	258.83

Tabla 5.21.- Valores de resistividad al flujo en Arl\_fina (Pa·s/m<sup>2</sup>).

Probeta	R $ H_{12} $ a	R $ H_{12} $ b	R $ H_{12} $	R $ \text{imag}(H_{12}) $ a	R $ \text{imag}(H_{12}) $ b	R $ \text{imag}(H_{12}) $
1	2049.08	2077.33	2063.20	2150.97	2256.79	2203.88
2	1787.09	2160.27	1973.68	2087.87	2140.58	2114.22
3	2322.85	2253.86	2288.35	2305.59	2300.00	2302.79
4	2058.37	2095.23	2076.80	2117.61	2206.36	2161.99
5	2237.60	2205.13	2221.36	2293.90	2303.53	2298.71
6	2332.22	2529.72	2430.97	2723.18	2569.60	2646.39
Media	<b>2131.20</b>	<b>2220.25</b>	<b>2175.73</b>	<b>2279.85</b>	<b>2296.14</b>	<b>2288.00</b>
$\sigma$	209.25	165.40	169.23	235.45	147.42	190.75
$\Delta_{\max}$	201.02	309.46	255.24	443.33	273.46	358.39
$\Delta_{\min}$	344.11	142.93	202.05	191.99	155.56	173.77

Tabla 5.22.- Valores de resistividad al flujo en V3 (Pa·s/m<sup>2</sup>).

Probeta	R $ H_{12} $ a	R $ H_{12} $ b	R $ H_{12} $	R $ \text{imag}(H_{12}) $ a	R $ \text{imag}(H_{12}) $ b	R $ \text{imag}(H_{12}) $
1	1831.95	1831.71	1831.83	1920.22	1920.13	1920.18
2	1703.30	1687.02	1695.16	1769.91	1750.82	1760.37
3	1477.91	1501.94	1489.92	1540.77	1533.36	1537.06
4	1804.10	1698.21	1751.15	1810.42	1788.77	1799.59
5	1821.05	1973.52	1897.29	1916.46	2092.10	2004.28
6	1683.90	1619.53	1651.71	1738.05	1746.81	1742.43
Media	<b>1720.37</b>	<b>1718.66</b>	<b>1719.51</b>	<b>1782.64</b>	<b>1805.33</b>	<b>1793.99</b>
$\sigma$	134.17	164.89	143.61	140.18	187.65	161.23
$\Delta_{\max}$	111.58	254.87	177.78	137.58	286.77	210.29
$\Delta_{\min}$	242.46	216.71	229.59	241.87	271.97	256.92

Tabla 5.23.- Valores de resistividad al flujo en V2\_gruesa (Pa·s/m<sup>2</sup>).

Probeta	R $ H_{12} $ a	R $ H_{12} $ b	R $ H_{12} $	R $ \text{imag}(H_{12}) $ a	R $ \text{imag}(H_{12}) $ b	R $ \text{imag}(H_{12}) $
1	1747.22	1554.14	1650.68	1826.85	1743.04	1784.95
2	1439.08	1472.34	1455.71	1646.82	1688.04	1667.43
3	1342.76	1397.05	1369.90	1425.79	1444.66	1435.23
4	1381.62	1415.05	1398.33	1394.78	1432.20	1413.49
5	1404.41	1424.77	1414.59	1538.14	1407.78	1472.96
6	1224.93	1278.28	1251.61	1289.78	1301.09	1295.44
Media	<b>1423.34</b>	<b>1423.61</b>	<b>1423.47</b>	<b>1520.36</b>	<b>1502.80</b>	<b>1511.58</b>
$\sigma$	174.99	90.90	130.98	193.97	173.27	180.38
$\Delta_{\max}$	323.88	130.54	227.21	306.49	240.24	273.36
$\Delta_{\min}$	198.41	145.32	171.87	230.58	201.71	216.14

Tabla 5.24.- Valores de resistividad al flujo en V2\_fina (Pa·s/m<sup>2</sup>).

Probeta	R $ H_{12} $ a	R $ H_{12} $ b	R $ H_{12} $	R $ \text{imag}(H_{12}) $ a	R $ \text{imag}(H_{12}) $ b	R $ \text{imag}(H_{12}) $
1	1920.93	2041.81	1981.37	2092.53	2161.78	2127.15
2	2100.60	2171.67	2136.13	2259.08	2281.46	2270.27
3	2597.44	2632.87	2615.15	2688.60	2718.61	2703.61
4	2466.12	2491.18	2478.65	2460.67	2485.03	2472.85
5	2304.26	2254.83	2279.54	2662.88	2471.99	2567.44
6	1928.00	1851.87	1889.94	1899.15	1933.66	1916.41
Media	<b>2219.56</b>	<b>2240.70</b>	<b>2230.13</b>	<b>2343.82</b>	<b>2342.09</b>	<b>2342.95</b>
$\sigma$	282.52	287.14	282.45	316.98	276.43	293.64
$\Delta_{\max}$	377.88	392.17	385.02	344.78	376.52	360.65
$\Delta_{\min}$	298.63	388.83	340.20	444.67	408.43	426.55

La resistividad al flujo con la función de transferencia y el método Ingard-Dear en ambas posiciones se indica en la Figura 5.88 y Figura 5.89. Entre ambas posiciones no hay diferencia de la resistividad, por lo que estas muestras ofrecen prácticamente el mismo comportamiento resistivo en ambas direcciones. Los valores promedio entre ambas posiciones se indica en la Figura 5.90. El primero de los métodos proporciona valores ligeramente más elevados que el método Ingard-

Dear, pero sin diferencias apreciables, justificando que ambas metodologías pueden ser empleadas para determinar la resistividad al flujo.

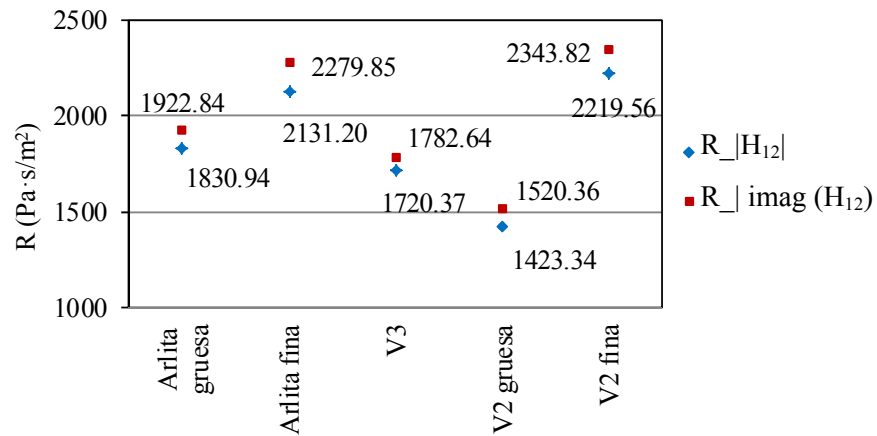


Figura 5.88.- Resistividad al flujo en posición “a”.

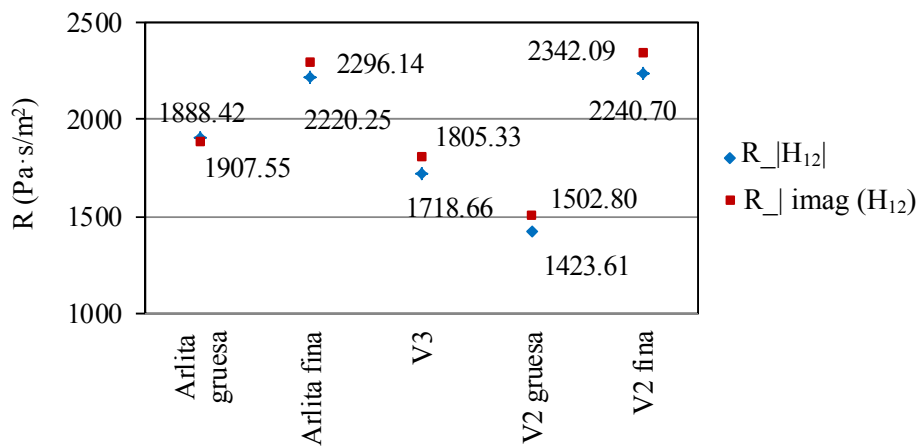


Figura 5.89.- Resistividad al flujo en posición “b”.



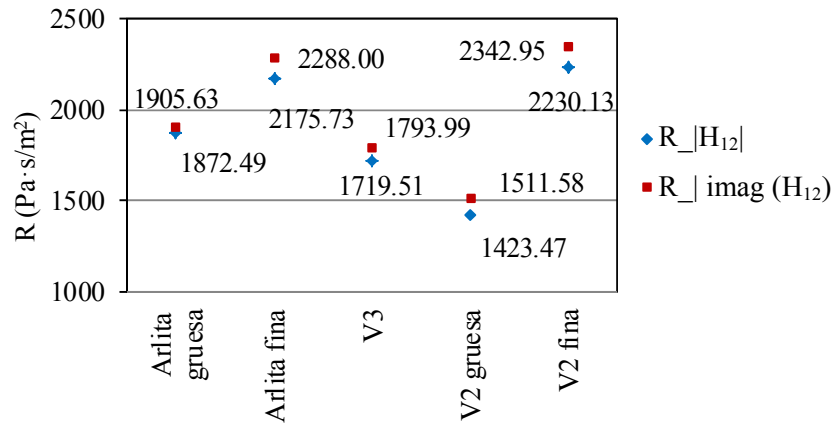


Figura 5.90.- Resistividad al flujo promedio de los materiales.

Tabla 5.25.- Valores de resistividad al flujo (Pa·s/m²). Tratamiento con  $|H_{12}|$ .

	$R_{ H_{12} _a}$	$R_{ H_{12} _b}$	$R_{ H_{12} }$	$\sigma$	$\Delta_{min}$	$\Delta_{max}$
Arl_gruesa	1830.94	1907.55	<b>1872.49</b>	156.13	240.32	250.84
Arl_fina	2131.20	2220.25	<b>2175.73</b>	185.74	388.64	353.99
V3	1720.37	1718.66	<b>1719.51</b>	143.33	241.61	254.01
V2_gruesa	1423.34	1423.61	<b>1423.47</b>	132.95	198.54	323.75
V2_fina	2219.56	2240.70	<b>2230.13</b>	185.74	388.64	353.99

Tabla 5.26.- Valores de resistividad al flujo (Pa·s/m²). Tratamiento  $|imag(H_{12})|$ .

	$R_{ imag(H_{12})_a}$	$R_{ imag(H_{12})_b}$	$R_{ imag(H_{12}) }$	$\sigma$	$\Delta_{min}$	$\Delta_{max}$
Arl_gruesa	1922.84	1888.42	<b>1905.63</b>	201.50	293.83	228.98
Arl_fina	2279.85	2296.14	<b>2288.00</b>	187.48	200.13	435.19
V3	1782.64	1805.33	<b>1793.99</b>	158.36	260.63	298.11
V2_gruesa	1520.36	1502.80	<b>1511.58</b>	175.59	221.80	315.27
V2_fina	2343.82	2342.09	<b>2342.95</b>	187.48	200.13	435.19

Los resultados mostrados en la Tabla 5.20 a Tabla 5.24 indican que la resistividad obtenida mediante el método de Ingard-Dear proporciona valores

ligeramente superiores a los obtenidos mediante la función de transferencia. En vista de los resultados obtenidos de la resistividad al flujo, para cálculos posteriores se toman los valores de resistividad al flujo proporcionados por el método aproximado de Ingard-Dear. Las muestras de grano fino (Arlita\_fina y V2\_fina) ofrecen valores más altos de resistividad al flujo mientras que las de tamaño grueso (Arl\_gruesa y V2\_gruesa) resultan más bajas. En el caso de la V3 con tamaño de grano muy similar a la Arlita\_gruesa da resultados intermedios entre las muestras de granos grueso (Arl\_gruesa y V2\_gruesa). La composición de V2\_gruesa con el mayor tamaño de grano proporciona la menor resistencia al paso del flujo de aire.

#### 5.6.6.- Porosidad

La porosidad representa el porcentaje de aire que contiene un material poroso. Puede cuantificarse de modo aproximado mediante la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{Vol_{aire}}{Vol_{material}} \quad (5.7)$$

La porosidad se ha determinado mediante técnicas volumétricas en las que los poros se rellenan con un fluido incompresible y de densidad conocida, siguiendo los trabajos propuestos por Neithalath et al. ([204] y [205]) y Sumanasooriya et al. [277]. En este caso se ha empleado agua y la expresión matemática empleada para determinar la porosidad está indicada en la ecuación (2.62) del Capítulo 2.- Problemática acústica. Conceptos teóricos.

$$\phi = \frac{V_a}{V_T} = \frac{V_a}{V_a + V_e} \quad (5.8)$$

Dado que estos materiales granulares estudiados ofrecen capacidad para absorber y almacenar agua, es necesario cuantificar el grado de almacenamiento de agua. Esto permitirá definir el tiempo necesario para que una muestra determinada almacene un porcentaje determinado de fluido. Previamente se ha realizado un ensayo en laboratorio con diversos granos extraídos de cada probeta para comparar la cantidad de agua que son capaces de almacenar (absorber) a lo largo del tiempo. Ello permitirá cuantificar el tiempo necesario para humectar las probetas para el estudio de la porosidad. Estas partículas se han dejado reposar en un baño de agua a temperatura ambiente de 23 °C y periódicamente se han pesado en una balanza de precisión. Analizando las mediciones efectuadas, se ha podido comprobar que es necesario prestar atención en el proceso de extracción y posterior medición,

cuidando que en todas las mediciones el peso del agua que rodea a las partículas no falsee la medición. Para ello, antes de ser pesados, los granos se han extraído del agua y se han depositado en un film mallado para eliminar el agua externa residual. Después de cada medición, las partículas han sido devueltas a sus respectivos baños de agua para continuar su proceso de humectación. El Departamento dispone de una balanza de precisión Mettler Toledo modelo AG 245 con un nivel de precisión de 0.1 y 0.01 mg.

El tiempo transcurrido entre cada medición ha variado en función de la cantidad relativa de agua retenida por los granos en cada pesada. Las primeras mediciones se han realizado en pequeños intervalos de tiempo: 2, 5, 10, 15, 50 minutos, Figura 5.92. El resto de mediciones se han espaciado en el tiempo ya que cada vez resulta más difícil la absorción de agua, Figura 5.93.

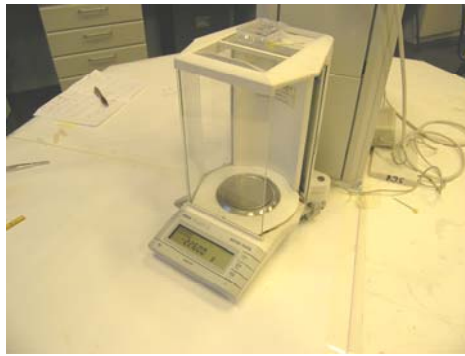


Figura 5.91.- Balanza de precisión disponible en DIMM.

Los resultados muestran que el 90% del agua que almacena cada material se obtiene alrededor de las 7 horas de iniciado el ensayo, mientras que el 95% se alcanza sobre las 24 horas, Figura 5.93 y Tabla 5.27. Transcurridos 50 minutos desde el inicio del ensayo la mayoría de las muestras han almacenado en torno al 80% del agua que pueden retener. La Tabla 5.27 indica los porcentajes relativos de agua almacenada respecto al peso inicial de cada material. En ella también se indica el tiempo para alcanzar el 90% en peso (T90).

Tabla 5.27.- Porcentajes relativos en peso del agua retenida

	Peso inicial (g)	Agua retenida (%)	Agua retenida en 50 min (%)	T90 (min)
Arl_gruesa	1.3681	14.52	89.12	50
Arl_fina	3.3465	16.08	74.21	220
V3	1.3489	31.63	90.37	50
V2_gruesa	0.979	35.63	78.30	1200 (20 h)
V2_fina	2.0353	24.64	82.05	1200 (20 h)

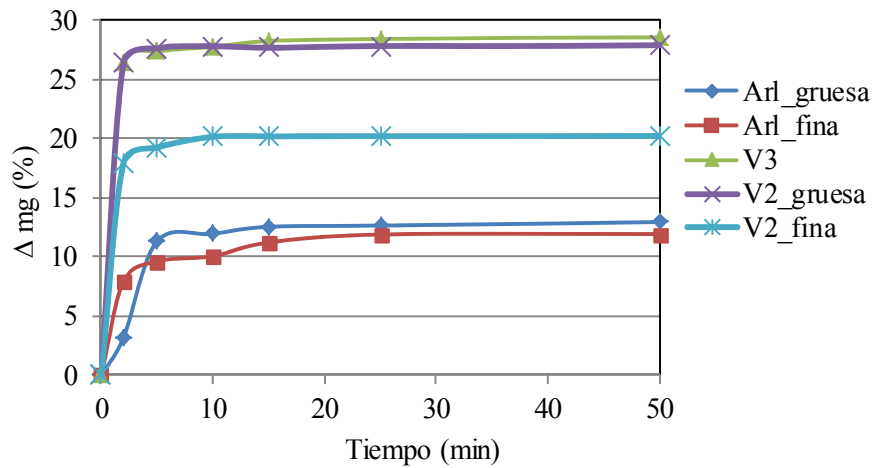


Figura 5.92.- Porcentaje relativo de agua retenida en los 50 minutos.

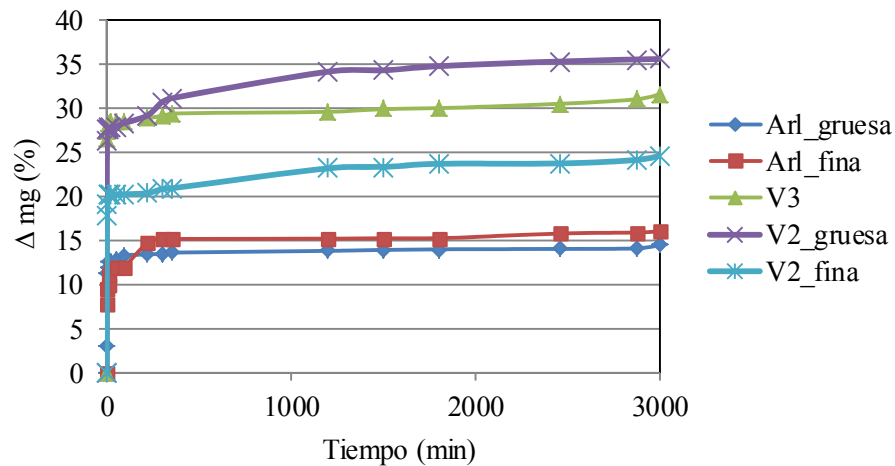


Figura 5.93.- Evolución del porcentaje relativo de agua retenida en el tiempo.

Con todo ello, las muestras se han humectado durante 48 horas antes de realizar el ensayo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.28, en la que se indica el volumen aparente de las probetas y el volumen de agua neto que es introducido para cubrir los huecos en estas muestras humectadas. Para realizar esta medición experimental ha sido necesario construir un recipiente de polietileno de alta densidad (PEHD), Figura 5.94, con un diámetro interno que se ajusta exactamente a las muestras. Con ello se garantiza que no hay hueco lateral ni inferior.



Figura 5.94.- Recipiente para la medición de porosidad.

Tabla 5.28.- Porosidad de los materiales.

	Vol. aparente de la muestra (ml)	Vol. agua introducido (ml)	Porosidad
Arl_gruesa	205.51	78.67	0.38
Arl_fina	205.78	80.50	0.39
V3	207.07	82.83	0.40
V2_gruesa	206.12	76.00	0.37
V2_fina	207.34	80.67	0.39

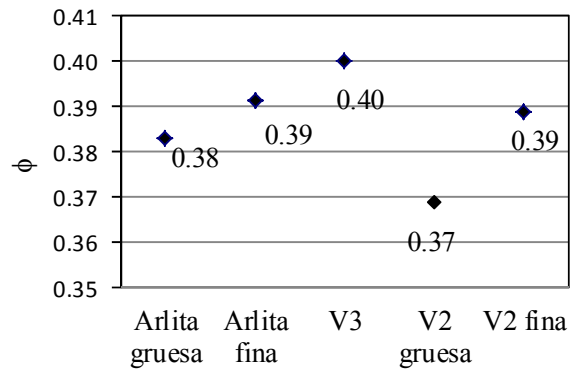


Figura 5.95.- Porosidad media de los materiales analizados.

Los resultados obtenidos indican que estos materiales disponen de porosidad moderada y con valores bastante similares entre sí. Ello indica que los materiales con mayor granulometría disponen de canales internos de mayor tamaño que en materiales de granulometría más fina. El estudio de la tortuosidad permitirá definir con mayor claridad las particularidades internas de los compuestos.

### 5.6.7.- Tortuosidad

La tortuosidad se ha obtenido mediante el método experimental con electrolito y considerando la analogía eléctrica y la acústica descritas anteriormente. El ensayo consiste en determinar la corriente que circula entre dos placas metálicas (electrodos) al ser sometidas a una diferencia de tensión, estando intercalado entre ambos electrodos el material a analizar. El paso de corriente de un electrodo se garantiza con un fluido conductor (electrolito) entre ambos. La disolución empleada es el sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) disuelto al 10%. Para garantizar que no aparece ningún cambio químico en el proceso de electrólisis, los electrodos utilizados son de cobre, con un espesor de 5 mm.

La medición eléctrica se ha realizado con un alimentador de señal continua modelo Promax Fac-307B con indicador de tensión e intensidad. El rango máximo de tensión  $U$  es de 30 V. La intensidad  $I$  se ha comprobado con un multímetro digital modelo Top Craft M92A montado en serie. El montaje del equipo y material utilizado en este ensayo se muestra en la Figura 5.96. En el ensayo se ha variado la tensión y se ha anotado la intensidad medida en el multímetro digital. Las representaciones gráficas para determinar la proporcionalidad entre la resistencia del material y la del material con electrolito se indican a continuación, Figura 5.97 a Figura 5.101.

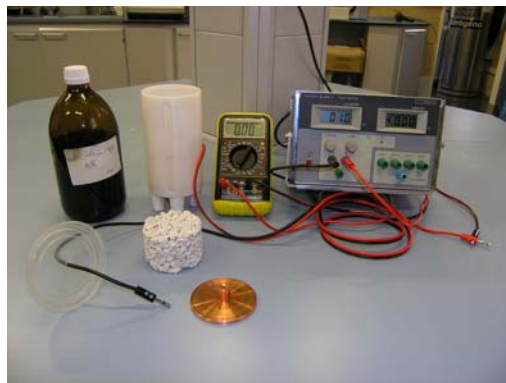


Figura 5.96.- Montaje para la determinación experimental de la tortuosidad.

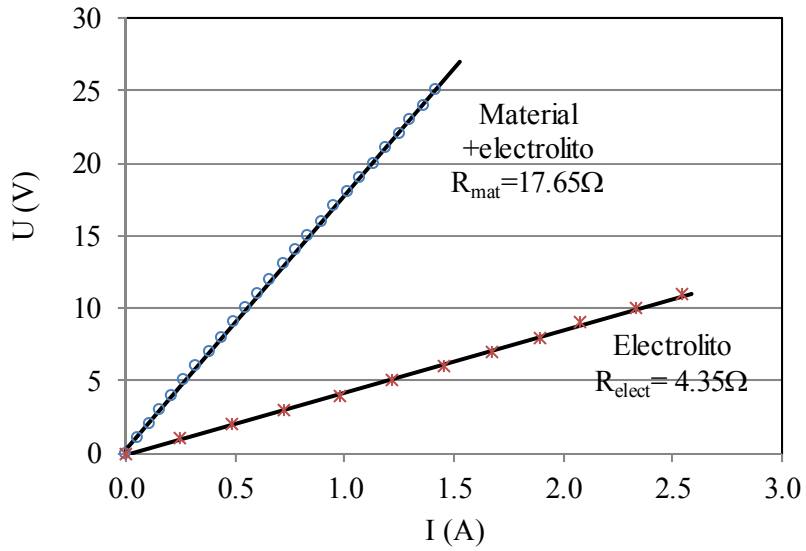


Figura 5.97.- Resistencia eléctrica experimental en arlita gruesa.

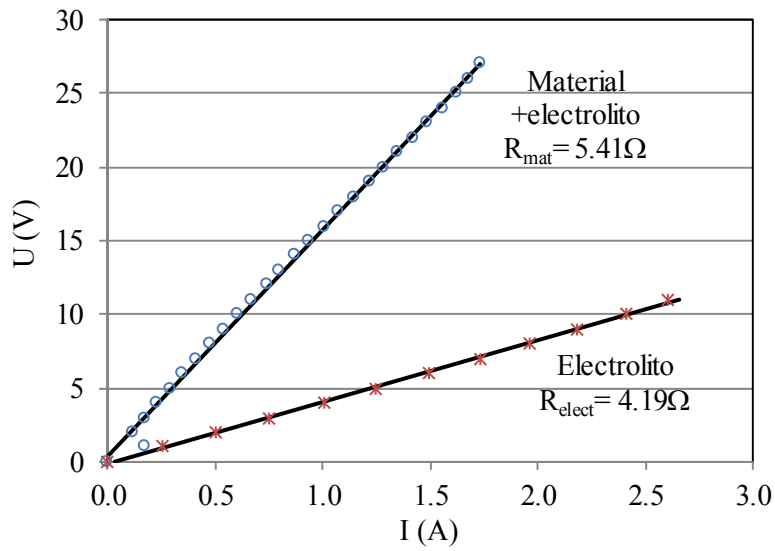


Figura 5.98.- Resistencia eléctrica experimental en arlita fina.



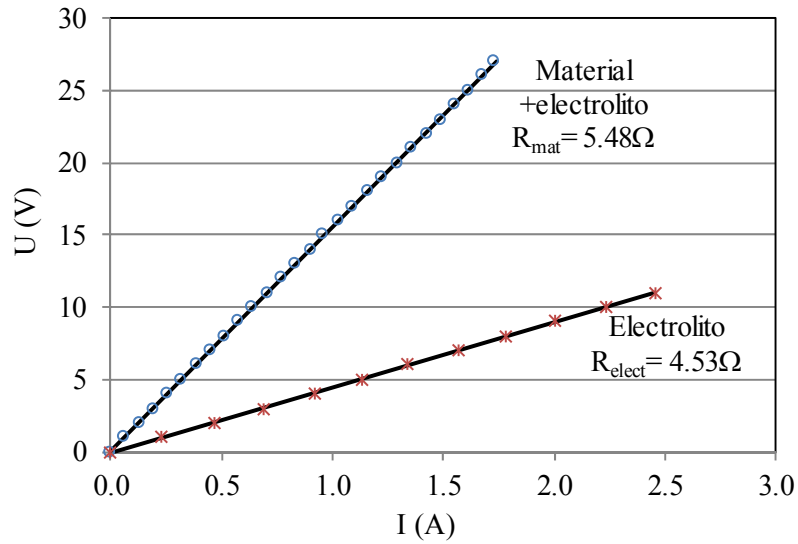


Figura 5.99.- Resistencia eléctrica experimental en V3.

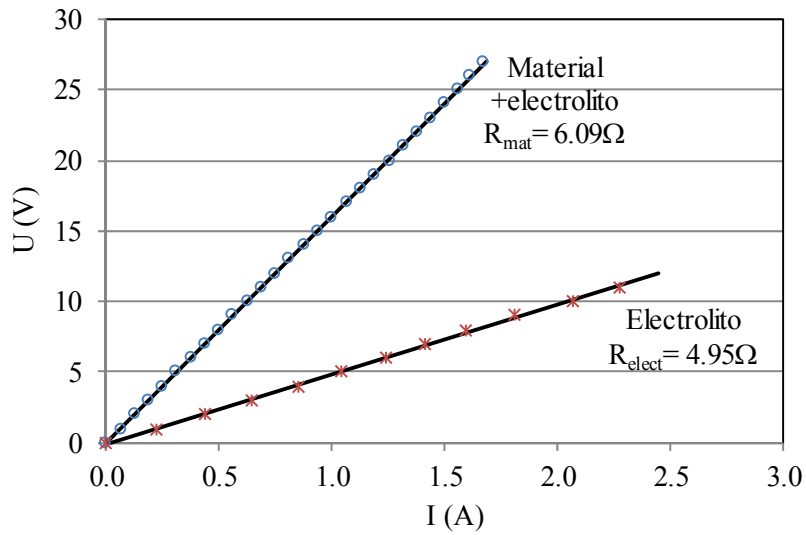


Figura 5.100.- Resistencia eléctrica experimental en V2 gruesa.

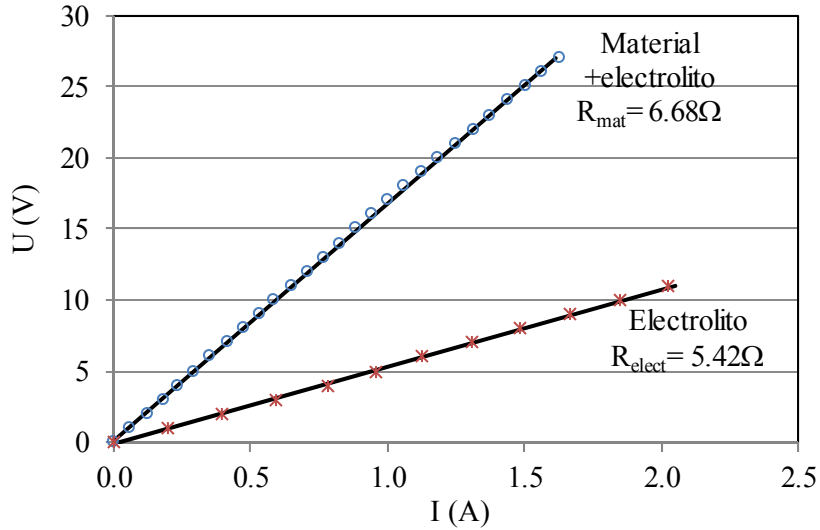


Figura 5.101.- Resultados experimentales de la resistencia eléctrica en V2 fina.

Es habitual encontrar expresiones analíticas para la estimación de la tortuosidad. La predicción de la tortuosidad según los trabajos de Umnova et al. [292], Horoshenkov y Swift [125] y en materiales granulares sueltos, Voronina y Horoshenkov [303] puede relacionarse con la porosidad mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_{\infty} = 1 + \frac{1 - \phi}{2\phi} \quad (5.9)$$

Attenborough [28] propone otra expresión para cuantificar la tortuosidad que también depende de la porosidad:

$$\alpha_{\infty} = \frac{1}{\sqrt{\phi}} \quad (5.10)$$

Los resultados que ofrecen estas ecuaciones y los obtenidos por el procedimiento experimental se muestran en la Tabla 5.29.

Tabla 5.29.- Tortuosidad en método experimental y modelos de predicción.

	$\phi$	$\alpha_{\infty} _{\text{exp}}$	$R_{\text{Electrolito+probeta}}$	$R_{\text{Electrolito}}$	$\alpha_{\infty} = 1 + \frac{1-\phi}{2\phi}$	$\alpha_{\infty} = \frac{1}{\sqrt{\phi}}$
Arl_gruesa	0.38	1.55	17.65	4.35	1.81	1.62
Arl_fina	0.39	1.44	15.41	4.19	1.78	1.6
V3	0.4	1.37	15.48	4.53	1.75	1.58
V2_gruesa	0.37	1.2	16.09	4.95	1.86	1.65
V2_fina	0.39	1.2	16.68	5.42	1.79	1.6

Los valores experimentales obtenidos muestran que los materiales presentan tortuosidad moderada y que las composiciones con vermiculita presentan menor tortuosidad que en el caso de las arlitas. Especialmente las muestras de vermiculita V2 son menos tortuosas que las de vermiculita V3. Los resultados de ambas predicciones son ligeramente superiores a los valores experimentales.

#### 5.6.8.- Área específica

La desviación del tamaño de poro  $\sigma_{\text{poro}}$  cuantifica la dispersión respecto del tamaño medio de poro y da información de la distribución del tamaño de poro. Se ha obtenido con la metodología descrita por Leclaire et al. [160]. Debido a la capacidad de absorción del agua tanto de cemento y de vermiculita, se han sumergido en un recipiente en agua durante 48 h para garantizar que toda el agua empleada en el ensayo no es absorbida por el material. Previamente al ensayo se extraen las muestras y se depositan sobre una malla para eliminar el excedente de agua. El tiempo requerido en este experimento ha variado entre 10 y 15 minutos, dependiendo de la cantidad final de agua que ha retenido la probeta y el tamaño de poro: a menor tamaño de poro y menor tamaño de grano, se ha necesitado más tiempo de evacuación. El agua absorbida por la arlita es considerablemente menor que en el caso de la vermiculita. Las probetas de arlita retienen la mitad del agua que en caso de las vermiculitas de gran tamaño (V3 y V2\_gruesa), comportándose estas últimas de un modo muy similar. Sin embargo, en el caso de la vermiculita de menor tamaño de grano (V2\_fina) el agua que retienen al sumergirse en agua es mayor, duplicando el agua retenida con respecto al material de grano más gruesos (V2\_fina y V3). Esto resulta evidente ya que la cantidad de granos en las muestras de grano fino para la vermiculita es muy superior con lo que existe mayor capacidad para retener agua. En el caso de las arlitas la dificultad de absorción de agua por su parte demuestra con claridad que la arlita fina, con mayor número de

granos ofrece más capacidad para retener agua en su interior, aunque estos valores son muy similares en ambos tipos de arlitas.

La Figura 5.102 ilustra la cantidad de agua que retiene el material al ser sumergido en un recipiente en agua durante 48 horas y la Figura 5.103 muestra el agua retenida en relación al peso. Para garantizar que no queda aire atrapado en las cavidades internas, las muestras se han volteado 90° cada 12 horas hasta realizar un giro completo. El secado final de las probetas se ha realizado en estufa a 80 °C. durante 2 horas para facilitar la posterior manipulación, ya que se desprenden granos del contorno con cierta facilidad. Posteriormente se han dejado secar las muestras por completo a temperatura ambiente hasta comprobar que el peso es similar al peso en seco medido inicialmente.

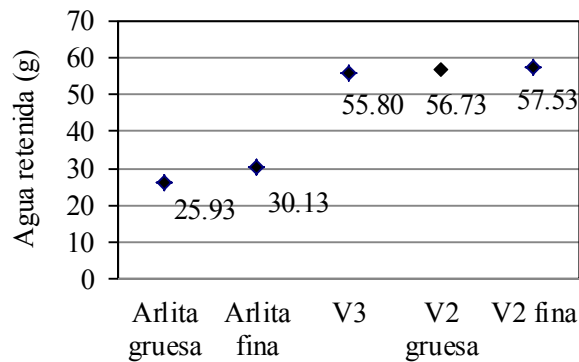


Figura 5.102.- Agua retenida en muestras humectadas.

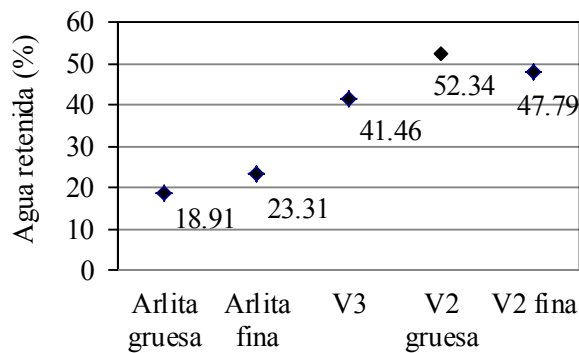


Figura 5.103.- Porcentaje de agua retenida en muestras humectadas.

Empleando el procedimiento descrito por Leclair [160] con anterioridad, la Figura 5.104 muestra la variación del volumen normalizado de agua extraído en cada material poroso respecto a la presión aplicada.

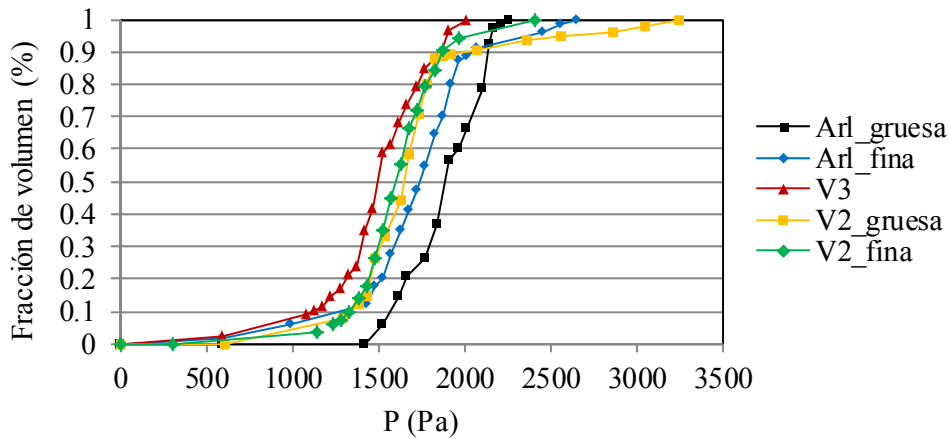


Figura 5.104.- Fracción de volumen de líquido obtenido experimentalmente en función de la presión.

Expresando la fracción normalizada de agua en función del radio de las partículas, consideradas como esferas, expresión (2.85), tomando un valor de tensión superficial del agua de valor  $\sigma_a = 0.07275$  N/m y ángulo de contacto entre granos  $\theta = 0$ , y tomando la representación logarítmica indicada en la expresión (2.88), se obtiene el ajuste a los valores experimentales mostrado en la Figura 5.105 que permite determinar el tamaño de poro  $s$ , mostrados en la Tabla 5.30.

$$\phi = -\log_2 s \quad (5.11)$$

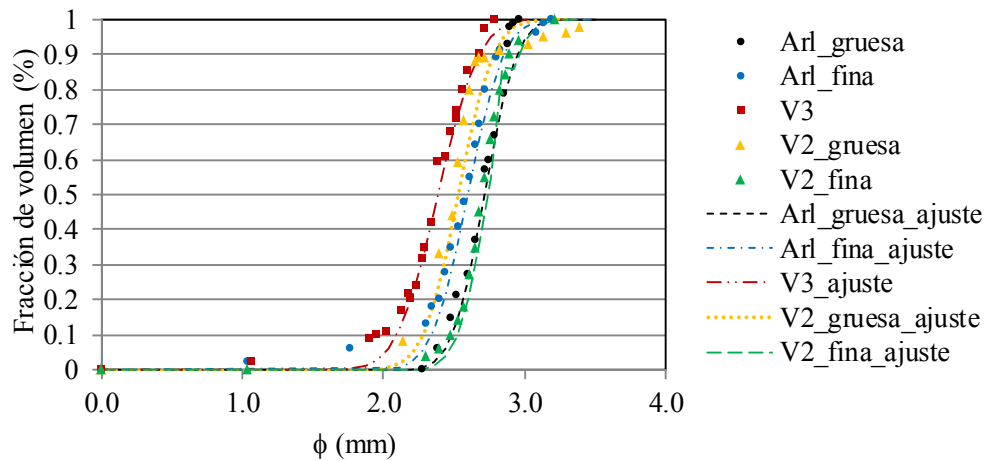


Figura 5.105.- Distribución de tamaño de poro. Las líneas discontinuas indican el ajuste mediante la expresión (2.86).

Tabla 5.30.- Valores de desviación estándar de tamaño de poro.

	Desviación estándar del tamaño de poro $\sigma$
Arl_gruesa	0.16
Arl_fina	0.21
V3	0.24
V2_gruesa	0.17
V2_fina	0.17

Los valores obtenidos en el ajuste, Tabla 5.30, indican que las probetas de arlita fina y vermiculita tipo 3, con menor tamaño de poro, ofrecen mayor desviación de tamaño de poro, mientras que el resto de materiales muestran valores similares. En el caso de la V3 el valor más alto de desviación estándar es debido a una distribución relativamente amplia de tamaño de grano como resultado de una mayor diversidad en el tamaño de las partículas, Figura 5.46.

Tabla 5.31.- Resumen de parámetros no acústicos de los materiales.

	Resistividad al flujo $R$ (Pa·s/m <sup>2</sup> )	Desviación estándar $\sigma$	Porosidad $\phi$	Tortuosidad $T$
Arl gruesa	1872.49	0.16	0.38	1.55
Arl fina	2175.73	0.21	0.39	1.44
V3	1719.51	0.24	0.40	1.37
V2 gruesa	1423.47	0.17	0.37	1.2
V2 fina	2230.13	0.17	0.39	1.2

## 5.6.9.- Resistencia mecánica

Con el fin de determinar las composiciones más idóneas para usos diversos, se ha determinado la resistencia estructural de estos materiales. Se han sometido a un ensayo destructivo en máquina Universal de Ensayos ELIB-50-W que dispone el Departamento ([90] y [89]). La célula de carga empleada en este ensayo es de 50 kN y la velocidad de aplicación de la carga es de 5 mm/min.



Figura 5.106.- Máquina Universal de Ensayos disponible en el DIMM.

Inicialmente se han ensayado las probetas de V2 y V3 estudiadas en el ensayo preliminar. La mayoría de las probetas se han fracturado con un plano de rotura de 45°, como se indica en la Figura 5.107.

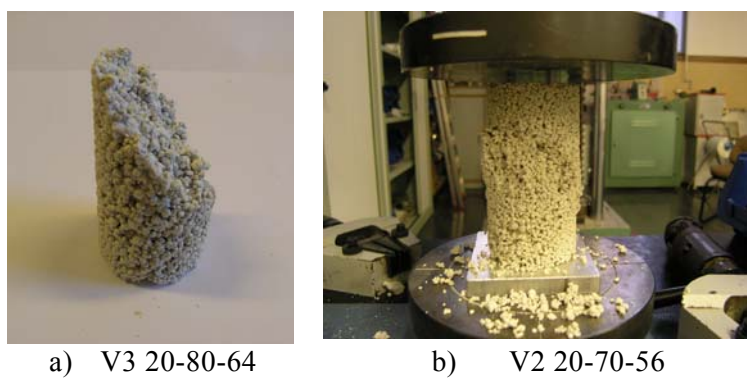


Figura 5.107.- Fracturas características de las probetas en máquina de compresión de las muestras preliminares.



Figura 5.108.- Ejemplo de ensayo de compresión en muestra caracterizada.



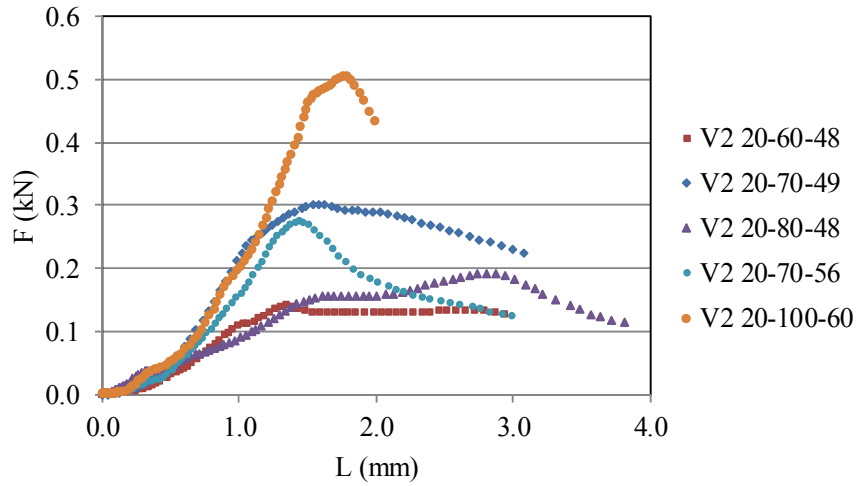


Figura 5.109.- Resultados de compresión en muestras preliminares de V2.

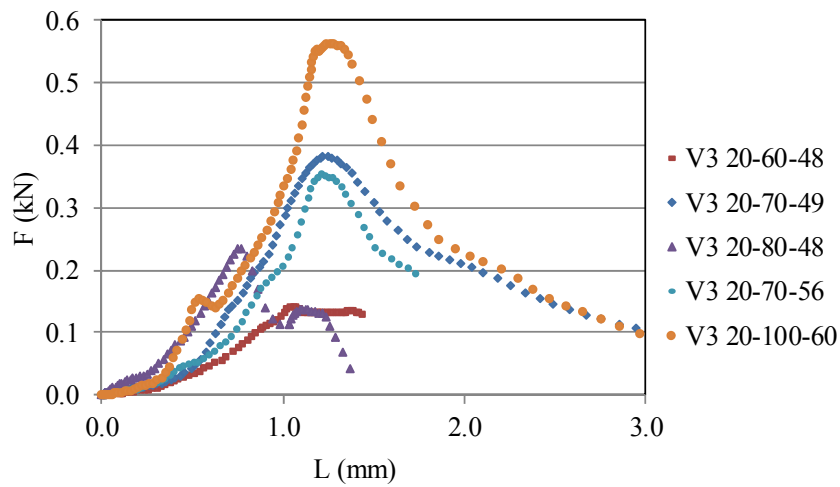


Figura 5.110.- Resultados de compresión en muestras preliminares de V3.

Los materiales elaborados con V2 proporcionan valores más elevados de resistencia a la compresión que los compuestos de V3, manteniendo las mismas

dosificaciones de cemento y agua. El análisis de las composiciones de material (vermiculita-cemento-agua) indicadas en la Tabla 5.1 no permite obtener resultados concluyentes en relación con la resistencia de estos materiales. En ambos tipos de vermiculita no hay una tendencia clara en la relación  $v/c$ ,  $v/a$  y  $c/a$ . Altos valores de la relación  $c/a$  (1.66 para la dosis 20-100-60) ofrecen muestras con alta resistencia con relación  $v/a = 0.33$  y sin embargo, con relaciones  $v/a=0.42$  (caso de la mezcla 20-60-48) resultan valores bajos de compresión. También ocurre lo mismo con la relación  $v/c$ , donde se observa que valores altos ( $v/c=0.29$  para el caso de la composición 20-70-49 y  $v/c = 0.33$  para el caso de 20-60-48) dan valores bajos y altos de compresión, respectivamente. La composición que ofrece mejor comportamiento claramente diferenciado, es la asociada a las muestras de alto porcentaje de cemento y relación  $c/a$ , es decir, V2 20-100-60 y V3 20-100-60. Las probetas de V2 y V3 20-70-49 y V2 y V3 20-70-56 ofrecen resistencia a compresión muy similar y con un rango de utilización casi idéntico. El resto de composiciones dan lugar a compuestos de baja resistencia y con amplitud de desplazamiento muy reducido.

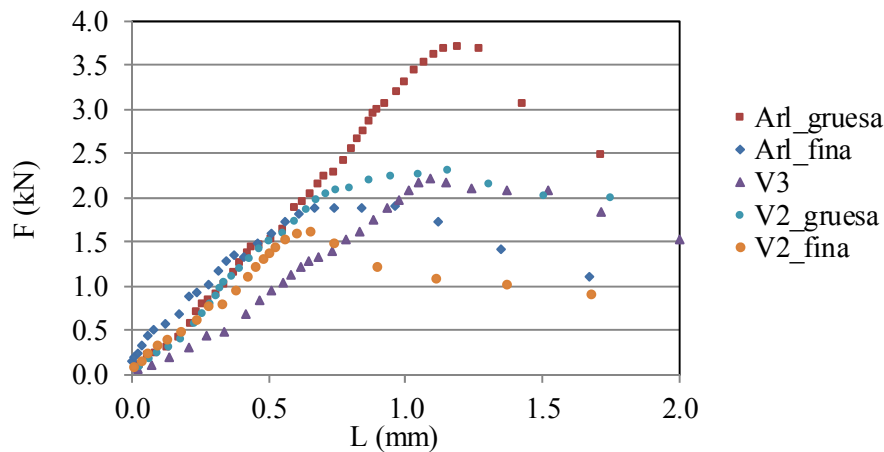


Figura 5.111.- Resultados de compresión de las muestras caracterizadas.

Los resultados de compresión para las muestras de arlita y vermiculita caracterizadas considerando el rango en el que se obtiene la zona elástica del diagrama de compresión, Figura 5.111, indican que las probetas de arlita de tamaño grueso ofrecen claramente el mejor comportamiento resistente, seguido de las muestras de Vermiculita V3. El resto de composiciones tienen una pendiente y área de trabajo muy similar entre sí, resultando que la V2\_gruesa ofrece mejor

comportamiento que la Arl\_fina. La composición de V2\_fina es la más crítica y tiene un rango de utilización más reducido. En general puede afirmarse que las mejores capacidades resistentes de los materiales analizados se dan en composiciones de tamaño de grano más grueso.

Tabla 5.32.- Rigidez en ensayo de compresión.

	Arl gruesa	Arl fina	V3	V2 gruesa	V2 fina
<i>K</i> (kN/mm)	3.27	2.67	2.11	2.96	2.57

### 5.7.- PREDICCIÓN ACÚSTICA CON MODELO MATEMÁTICO

La propagación del sonido a nivel microscópico en materiales granulares es complicada como resultado de la geometría interna compleja del material. A nivel macroscópico y considerando que la estructura permanece inmóvil al paso de una onda acústica, puede tomarse el tratamiento de fluido equivalente para determinar la impedancia característica  $Z(\omega)$  y número de onda complejo  $k(\omega)$ , con las expresiones en función de la frecuencia:

$$Z(\omega) = \sqrt{\rho(\omega)/C(\omega)} \quad (5.12)$$

$$k(\omega) = \omega\sqrt{\rho(\omega)C(\omega)} \quad (5.13)$$

siendo  $\omega$  la frecuencia angular,  $\rho(\omega)$  la densidad del fluido equivalente y  $C(\omega)$  la compresibilidad del fluido.

El modelo seleccionado para estos materiales es el propuesto por Horoshenkov y Swift [125] para medios granulares de matriz rígida con una distribución de tamaño de poro que se ajuste a la forma normal logarítmica. En este caso, el modelo depende de cuatro parámetros: porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo y desviación estándar del tamaño de poro. Tal como se ha indicado en el capítulo de análisis de los modelos teóricos de predicción, la selección de este modelo se basa en el número de parámetros implicados en este modelo y que pueden determinarse con el equipamiento disponible por el equipo investigador, la aproximación de la predicción acústica de otros modelos, como Johnson-Koplik-Dashen [135] y Attenborough [27], frente a la respuesta experimental y el empleo de este modelo sobre materiales granulares con este tipo de material aligerante. Los autores obtienen expresiones matemáticas para la densidad y el módulo de

compresibilidad, indicadas anteriormente en el Capítulo 3.- Modelos acústicos de materiales porosos. Dichas expresiones se reproducen aquí nuevamente:

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \left( \rho_0 - \frac{\phi R}{j\omega\alpha_\infty} F(\omega) \right) \quad (5.14)$$

$$C(\omega) = \frac{\alpha_\infty}{\gamma P_0} \left( \gamma - \frac{\rho_0 \alpha_\infty (\gamma - 1)}{\phi \rho(N_{pr} \omega)} \right) \quad (5.15)$$

donde  $\gamma$  es el cociente de calores específicos,  $P_0$  es la presión atmosférica,  $N_{pr}$  es el número de Prandtl,  $\phi$  es la porosidad,  $R$  es la resistividad al flujo,  $\sigma$  es la resistividad al flujo y  $F(\varepsilon)$  es la función de corrección de la viscosidad que puede expresarse mediante la aproximación de Padé como:

$$F(\varepsilon) \approx \frac{1 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2}{1 + b_1 \varepsilon} \quad (5.16)$$

$$a_1 = \frac{\theta_1}{\theta_2}; \quad \theta_2 = \theta_1; \quad b_1 = a_1 \quad (5.17)$$

En partículas circulares:

$$\theta_1 = \frac{4}{3} e^{4\xi^2} - 1; \quad \theta_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{\frac{3}{2}\xi^2} \quad (5.18)$$

siendo  $\xi = (\sigma_{poro} \ln 2)^2$ ,  $\sigma_{poro}$  es la desviación estándar del tamaño de poro y  $\varepsilon = \sqrt{\frac{-j\omega\rho_0\alpha_\infty}{R\phi}}$  es un parámetro adimensional.

Cuando es difícil cuantificar alguno de los parámetros, es habitual emplear algún método de optimización para determinar de forma indirecta aquellos parámetros que mejor ajustan el modelo a los resultados experimentales medidos en tubo de impedancia, [237]. En este caso, se ha seleccionado la tortuosidad como parámetro de ajuste del modelo a los valores experimentales mediante el método de optimización de Nelder-Mead [208]. Esta metodología consiste en minimizar la función objetivo hasta una tolerancia mínima prefijada (por ejemplo, diferencia entre el valor experimental de la absorción y el obtenido con la función objetivo) a partir de un valor inicial propuesto para el parámetro a ajustar (tortuosidad).

Mediante sucesivas iteraciones se determina el valor del parámetro de ajuste (tortuosidad) que minimiza la función objetivo y cada nuevo valor se asigna como valor inicial para el cálculo posterior hasta obtener el valor (tortuosidad estimada) que mejor ajusta la absorción teórica a la experimental con la tolerancia indicada. La tortuosidad estimada con este procedimiento se indica en la Tabla 5.33.

Los valores estimados para la tortuosidad, Tabla 5.33, son más elevados que los obtenidos por el procedimiento experimental con el empleo de electrolito y además son muy próximos a los teóricos propuestos por la condición de Voronina y Horoshenkov  $\alpha_{\infty} = 1 + \frac{1-\phi}{2\phi}$ . Los valores teóricos propuestos por la ecuación de Attenborough se ajustan mejor a los resultados experimentales en el caso de las vermiculitas.

Tabla 5.33.- Resumen de parámetros para modelo.

	Arl gruesa	Arl fina	V3	V2 gruesa	V2 fina
$R$ (Pa·s/m <sup>2</sup> )	1872.49	2175.73	1719.51	1423.47	2230.13
$\phi$	0.38	0.39	0.4	0.37	0.39
Tortuosidad (estimada)	1.87	1.82	1.7	1.73	1.7
Tortuosidad (experimental)	1.55	1.44	1.37	1.2	1.2
Tortuosidad Voronina-Horoshenkov	1.81	1.78	1.75	1.86	1.79
Tortuosidad Attenborough	1.62	1.6	1.58	1.65	1.6
Desviación de tamaño de poro $\sigma$	0.16	0.21	0.24	0.17	0.17

Los resultados del coeficiente de absorción que proporciona el modelo de Horoshenkov-Swift [125] con la tortuosidad estimada para los compuestos estudiados se muestran en la Figura 5.112 a la Figura 5.116. A la vista de los resultados obtenidos el modelo de Horoshenkov-Swift puede tomarse para predecir la respuesta acústica en estos tipos de materiales granulares, aunque este ajuste es mejor en las muestras de arlita y en menor grado para la V3 para todo el rango de frecuencias estudiado. Las muestras de vermiculita V2 proporcionan resultados teóricos que difieren en mayor medida con respecto a las mediciones experimentales.

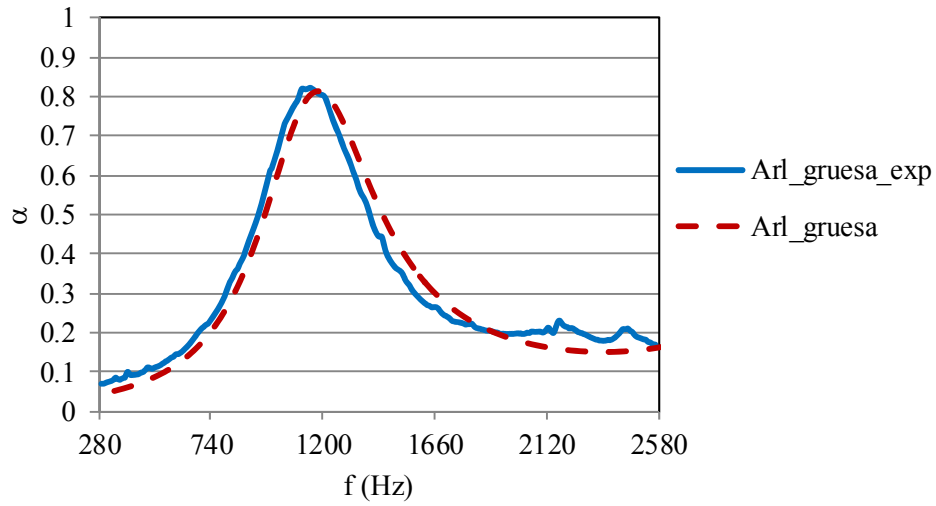


Figura 5.112.- Coeficiente de absorción en Arl\_gruesa. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [125].

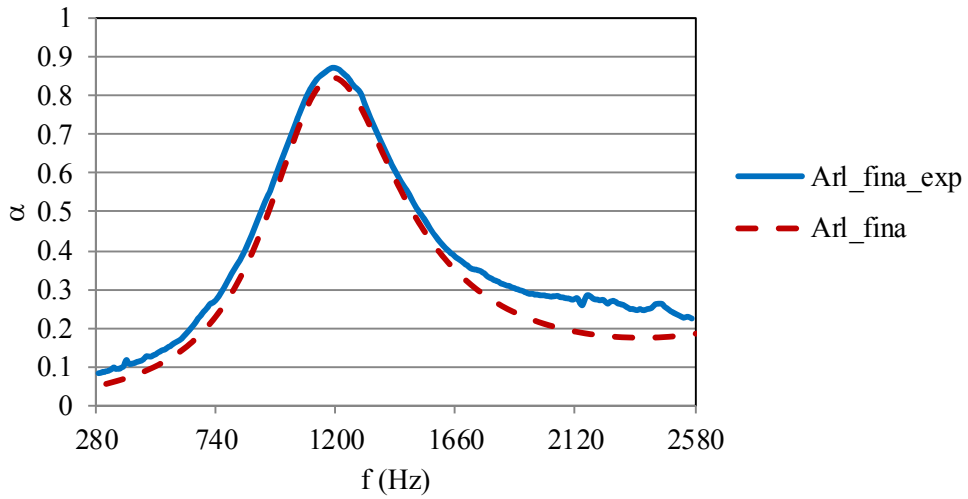


Figura 5.113.- Coeficiente de absorción en Arl\_fina. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [125].

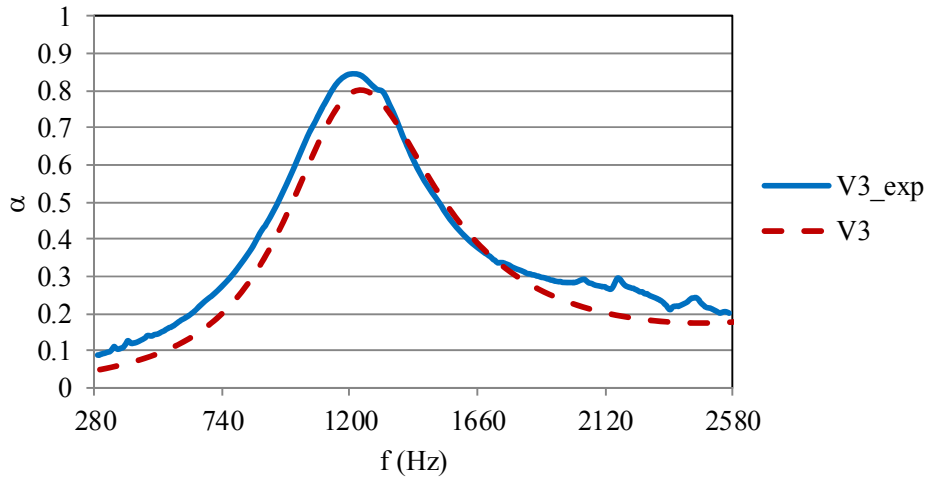


Figura 5.114.- Coeficiente de absorción en V3. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [125].

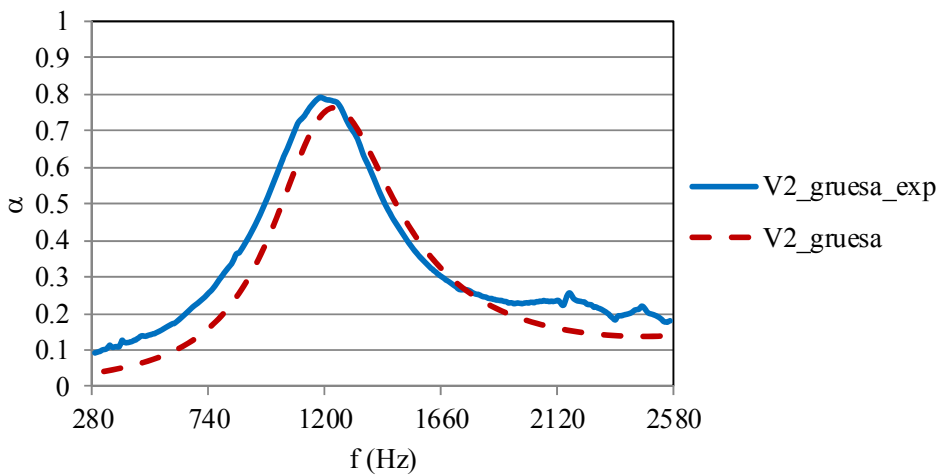


Figura 5.115.- Coeficiente de absorción en V2\_gruesa. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [125].

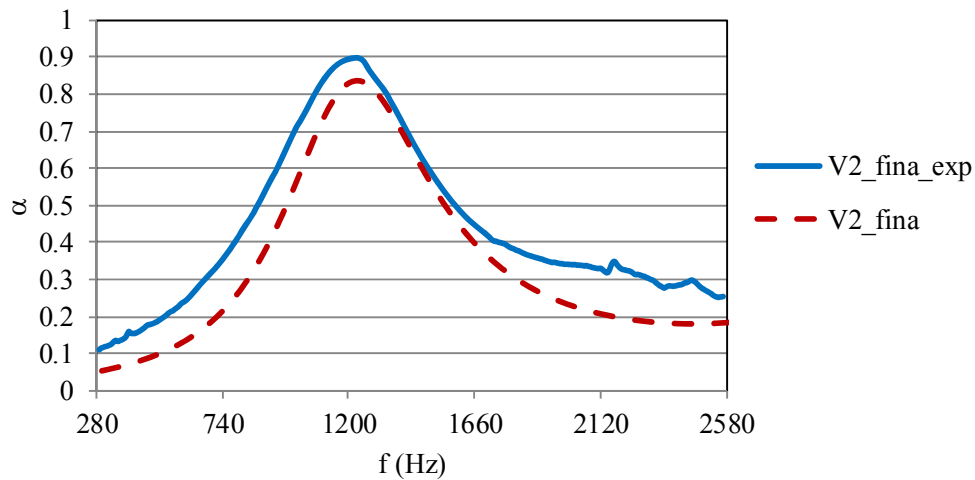


Figura 5.116.- Coeficiente de absorción en V2\_fina. Valores experimentales y modelo de Horoshenkov y Swift [125].

### 5.8.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han determinado las granulometrías de la arlita y vermiculita empleada en estos estudios experimentales. El tamaño de grano condiciona la morfología de los compuestos obtenidos. Inicialmente se ha realizado un proceso de experimentación para conocer el efecto del tipo de aglutinante, tiempo y modo de amasado, grado de humectación y porcentaje de materiales para obtener probetas con consistencia suficiente. Tras un estudio preliminar para conocer la respuesta acústica de los compuestos granulares realizados con vermiculita, se han caracterizado cinco materiales. Los resultados obtenidos sobre los compuestos granulares de arlita y vermiculita que han sido estudiados detalladamente indican que desde un punto de vista acústico ofrecen un comportamiento muy similar entre todos ellos y abre una vía de utilización para aplicaciones que requieren niveles altos de absorción para bajas frecuencias. Este comportamiento se ha comparado con la predicción del modelo de Horoshenkov y Swift, concluyéndose que puede predecir adecuadamente la respuesta de estos tipos de compuestos granulares. La aplicación de este modelo requiere determinar experimentalmente diversos parámetros en laboratorio. La viabilidad de estos materiales para la reducción de transmisión de ruido se estudia en el capítulo siguiente.



## **Capítulo 6.- Aplicación al caso de dispositivos de control de ruido.**

*Este capítulo explora la hipótesis planteada inicialmente sobre la utilización de los compuestos granulares desarrollados a lo largo de la Tesis en aplicaciones industriales relacionadas con dispositivos de control de ruido, tales como silenciadores. Para ello, se determinan las propiedades características (velocidad del sonido y densidad equivalente) de dos granulometrías y se cuantifica el índice de pérdidas de transmisión en algunas configuraciones de silenciador disipativo. Los resultados obtenidos indican que estos materiales pueden ser potencialmente interesantes en este tipo de aplicaciones. Para la obtención de resultados experimentales se fabrica un prototipo de silenciador híbrido multicámara que incorpora vermiculita cementada en su interior y se realizan las medidas en un banco acústico de ensayos. La comparación de dichas medidas con la predicción llevada a cabo mediante el método de elementos finitos muestra una buena concordancia.*



### **6.1.- ATENUACIÓN DEL RUIDO EN APLICACIONES INDUSTRIALES Y VEHICULARES**

La creciente exigencia de las normativas de protección contra la contaminación acústica [162] ha provocado mayor interés creciente en el desarrollo de dispositivos de control de ruido cuyas prestaciones sean cada vez mejores. Uno de los elementos fundamentales en sistemas de producción de energía, ventilación y automoción es el silenciador [200]. En esencia, se trata de un dispositivo localizado entre la fuente de ruido y las zonas potencialmente expuestas a recibir niveles sonoros elevados, cuyo objetivo fundamental es la reducción de dichos niveles a valores aceptables. Un ejemplo habitual de silenciador es el empleado en el sistema de escape de los gases procedentes de la combustión interna de un motor para reducir el nivel sonoro asociado al flujo pulsante antes de ser emitido a la atmósfera. Estos sistemas se emplean en las motocicletas, vehículos automóviles, barcos y sistemas de generación de energía y, si bien su objetivo fundamental es reducir el impacto acústico, también pueden afectar a la potencia y rendimiento del motor. Los condicionantes en el diseño de los silenciadores se basan, entre otros, en: 1.- Aspectos acústicos (reducción del nivel sonoro a límites admisibles por normativa), 2.- Criterios de rendimiento y eficiencia energética (mínima pérdida de carga para no afectar a la potencia del motor) y 3.- Restricciones geométricas (adaptación a las dimensiones permitidas en su lugar de ubicación).

La reducción del ruido asociado a los procesos termofluidodinámicos del motor puede obtenerse combinando diversos factores: geometría del silenciador, inserción de materiales absorbentes, conductos extendidos, cámaras resonadoras y superficies perforadas, entre otros. En la selección del material es importante destacar que los gases de salida del motor se encuentran a altas temperaturas: alrededor de 500 °C en el colector de escape y del orden de 300 °C en el extremo del tubo de escape ([80] y [34]). En este sentido, el material debe soportar altas temperaturas y ser inalterable a los componentes de los humos de escape.

Atendiendo al tipo de fenómeno físico que da lugar a la reducción de emisiones acústicas, los silenciadores se clasifican en reactivos ([75], [255] y [200]) y disipativos ([77] y [147]). En el caso de los silenciadores reactivos, la atenuación acústica se obtiene mediante configuraciones geométricas y elementos internos para provocar fenómenos de reflexión de las ondas hacia la fuente, logrando así la reducción de energía acústica aguas abajo del silenciador, Figura 6.1. Así pues, parte de la energía incidente es devuelta a la fuente por la propia reflexión de las ondas en las discontinuidades geométricas, como pueden ser cambios de sección

entre conductos, superficies perforadas, placas separadoras y conductos extendidos para generar subcámaras resonadoras.

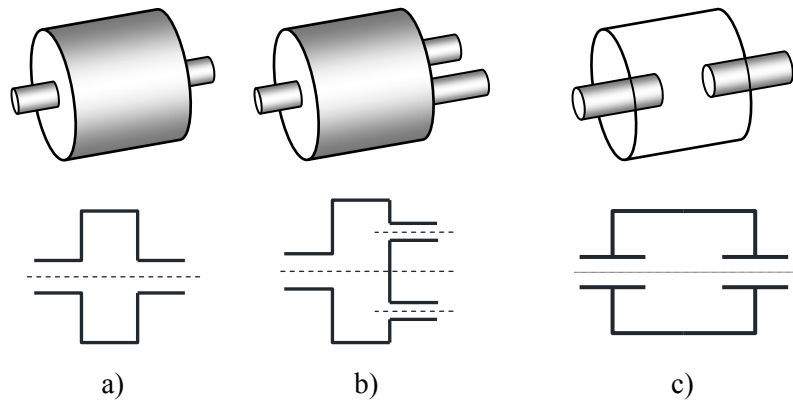


Figura 6.1.- Ejemplos de silenciadores reactivos: a) Cámara de expansión simple, b) cámara con salida doble, c) cámara con conductos extendidos.

En el caso de los silenciadores disipativos, la atenuación se produce por la incorporación de materiales absorbentes de gran superficie específica. De forma habitual se emplean fibras, aunque con el uso, estos materiales se ensucian y deterioran por el hollín de los hidrocarburos no quemados en la combustión por lo que tienden a perder sus propiedades de absorbentes [18]. Además, la utilización de dichas fibras permite la posibilidad de arrastre y emisión a la atmósfera, con el riesgo potencial para la salud que ello supone. La utilización de materiales absorbentes se complementa con otros sistemas de atenuación como subcámaras resonadoras, placas intermedias y superficies perforadas, que además de contribuir a reducir el nivel sonoro, dan soporte estructural al material y aumentan la rigidez del silenciador. La Figura 6.2 muestra un ejemplo de silenciador disipativo con material absorbente y que incorpora un conducto central perforado.

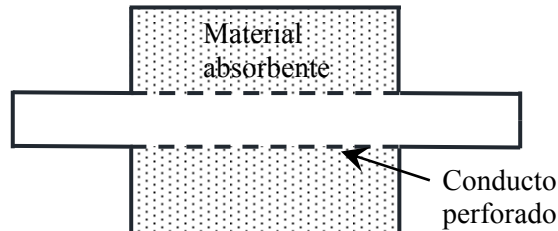


Figura 6.2.- Silenciador disipativo con conducto central perforado.

La atenuación sonora correspondiente a un dispositivo de control de ruido es la reducción de la potencia acústica de una onda que se propaga entre dos puntos y puede expresarse mediante diferentes índices [200]: Índice de Pérdidas por Inserción ( $IL$ ), Índice de Pérdidas de Transmisión ( $TL$ ) e Índice de Diferencia de Nivel ( $LD$ ).

- Índice de Pérdidas de Inserción  $IL$ . Se define como la diferencia entre dos niveles de potencia sonora de un mismo punto antes y después de la incorporación de un silenciador entre el punto de medición y la fuente de ruido, es decir

$$IL = 10 \log \left( \frac{W_{ref}}{W} \right) \quad (6.1)$$

siendo  $W_{ref}$  la potencia acústica del punto sin silenciador y  $W$  la potencia acústica con silenciador.

- Índice de Pérdidas de Transmisión  $TL$ . Es la relación entre la potencia acústica que incide en el silenciador y la transmitida por éste cuando se emplea una salida anecoica. El  $TL$  caracteriza el silenciador de forma intrínseca, sin dependencia de la fuente ni el resto del sistema [200].

$$TL = 10 \log \left( \frac{S_1 |P_1^+|^2}{S_2 |P_2^+|^2} \right) = 20 \log \left( \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{1/2} \frac{|P_1^+|}{|P_2^+|} \right) \quad (6.2)$$

donde  $S_1$  y  $S_2$  son las áreas de los conductos de entrada y salida respectivamente,  $P_1^+$  la presión incidente y  $P_2^+$  la presión transmitida.

- Diferencia de Nivel  $LD$ . Representa la diferencia de presión sonora medida en la fuente de generación de ruido (aguas arriba del silenciador) y en la salida (aguas abajo del silenciador). No es necesaria una terminación anecoica en la salida del silenciador.

$$LD = 20 \log \left( \frac{|P_1|}{|P_2|} \right) \quad (6.3)$$

siendo  $P_1$  la presión aguas arriba y  $P_2$  la presión aguas abajo

La evaluación del índice de pérdidas de transmisión ( $TL$ ) puede determinarse de forma sencilla mediante la hipótesis de propagación unidimensional en las secciones de entrada y salida del silenciador (aunque el campo acústico sea tridimensional en su interior), por medio del método de la Matriz de Transferencia [200], donde se relacionan las variables en la entrada y salida del silenciador, denotadas como subíndices 1 y 2 en la expresión (2.21), que se reproduce aquí nuevamente:

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{Bmatrix} \quad (6.4)$$

Descomponiendo en ondas incidentes y reflejadas y teniendo en cuenta las ecuaciones

$$P_1 = P_1^+ + P_1^- \quad (6.5)$$

$$V_1 = -\frac{1}{j\rho_0\omega} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c_0} (P_1^+ - P_1^-) \quad (6.6)$$

resulta:

$$P_1^+ = \frac{P_1 + \rho_0 c_0 V_1}{2} \quad (6.7)$$

y al tener una salida anecoica:

$$P_2 = P_2^+ = \rho_0 c_0 V_2 \quad (6.8)$$

Aplicando las expresiones (6.4), (6.7), (6.8) en la definición del  $TL$ , ecuación (6.2), la expresión resultante es:

$$TL = 20 \log \left( \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{1/2} \left| \frac{P_1 + \rho_0 c_0 V_1}{2 \rho_0 c_0 V_2} \right| \right) = 20 \log \left( \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{1/2} \left| \frac{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 T_{21} + T_{22}}{2} \right| \right) \quad (6.9)$$

siendo  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$  y  $T_{22}$  los términos de la matriz de transferencia del silenciador, también conocidos como polos [200].

## 6.2.- ÍNDICE DE PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN EN SILENCIADOR CILÍNDRICO CON MATERIAL GRANULAR

En el modelado acústico de silenciadores suelen distinguirse dos tipos de modelos: aquellos basados en la hipótesis de onda plana, que solamente son válidos a bajas frecuencias, por debajo de la frecuencia de corte de la cámara de mayor diámetro [200] y los de tipo tridimensional, válidos en amplios rangos de frecuencia, para los que pueden utilizarse técnica analíticas ([75], [255], [77] y [147]) y/o numéricas de resolución ([79], [18] y [80]). La presencia de flujo medio [223] también altera el comportamiento de los dispositivos acústicos, sobre todo en configuraciones disipativas ([147] y [80]). En un silenciador, la incorporación de material absorbente alrededor del conducto perforado central dificulta el tratamiento ya que se requiere una caracterización acústica precisa de dicho material [187]. Sin embargo, en muchas ocasiones puede tomarse la consideración de que el material es isótropo, homogéneo y que sus propiedades acústicas están determinadas por la impedancia característica  $Z$  y el número de onda  $k$  o, de forma alternativa, mediante la velocidad del sonido equivalente  $c_{eq}$  y la densidad equivalente  $\rho_{eq}$  en el medio poroso.

Como aplicación de los materiales granulares desarrollados y analizados en este trabajo se ha cuantificado numéricamente el  $TL$  para un silenciador cilíndrico simple. En concreto, se ha considerado material granular en forma de arlita gruesa y vermiculita V3, a partir de las propiedades obtenidas de forma experimental,  $c_{eq}$  y  $\rho_{eq}$ , y se han obtenido resultados satisfactorios en lo referente a la atenuación. Posteriormente se ha estudiado el  $TL$  de un silenciador híbrido cilíndrico [78] formado por una cámara resonadora de entrada tipo “folded” (con tubo extendido y anillo externo), seguido de una cámara disipativa con material granular y una cámara de salida corta. Cada elemento tiene una función característica: el resonador “folded” tiene una longitud considerable en un espacio compacto para garantizar un pico de atenuación a baja frecuencia, la cámara disipativa aporta buenas prestaciones en el rango de altas frecuencias y la cámara corta aporta una

resonancia transversal a frecuencias medias. Considerando que el coeficiente de absorción es bastante similar para los materiales caracterizados en todo el rango de frecuencias, se ha seleccionado la vermiculita V3 para evaluar su aplicación en la atenuación del ruido en sistemas de escape. Para el prototipo fabricado, se ha determinado el  $TL$  con modelización mediante elementos finitos ([79], [18] y [80]) y se ha validado experimentalmente.

### 6.2.1.- Cuantificación del $TL$ en silenciador simple mediante modelización

La obtención del  $TL$  mediante modelización matemática del silenciador requiere conocer la velocidad del sonido equivalente  $c_{eq}$  y la densidad equivalente del material  $\rho_{eq}$  [14]. Estas propiedades pueden determinarse a partir de la impedancia característica  $Z$  y el número de onda  $k$ , obteniéndose mediante un montaje experimental con la técnica de los 4 micrófonos [81]. La dependencia entre estos las diferentes propiedades viene dada por:

$$c_{eq} = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{k} \quad (6.10)$$

$$\rho_{eq} = \frac{Z}{c_{eq}} \quad (6.11)$$

Para ello, se han realizado nuevas probetas de estos materiales (Arl\_gruesa y V3) de 53.6 mm de diámetro en longitudes de 50 mm y 100 mm para ajustarlas a las dimensiones del portamuestras del banco de medición.



Figura 6.3.- Probetas de Arl\_gruesa y V3 para determinar la impedancia característica y el número de onda.

Para comparar los resultados acústicos que ofrecen estos materiales granulares con respecto a la fibra, se ha determinado el coeficiente de absorción en banco de ensayos. Dicho banco (véase Figura 5.30) se ha empleado anteriormente



para determinar el coeficiente de absorción en las muestras de vermiculita en el estudio preliminar, *Capítulo 5.- Caracterización de materiales aligerados. Resultados experimentales.* Las dimensiones de las probetas, Figura 6.3, han sido: 53 y 100 mm en Arl\_gruesa y 50 y 96 mm en V3. En el caso de la fibra de vidrio se ha seleccionado la fibra de Owens Corning, Figura 6.4, con espesor de la probeta de 95 mm, con un peso de 0.0257 kg (densidad de llenado de 120 kg/m<sup>3</sup>). La temperatura ambiente durante el ensayo se ha mantenido entre 25.9 y 26 °C. Aunque se ha observado que la variación del coeficiente de absorción no varía significativamente, en cada probeta se han realizado 4 mediciones y se ha tomado el valor promedio. Los resultados se muestran en la Figura 6.5.



Figura 6.4.- Fibra de vidrio de Owens Corning.

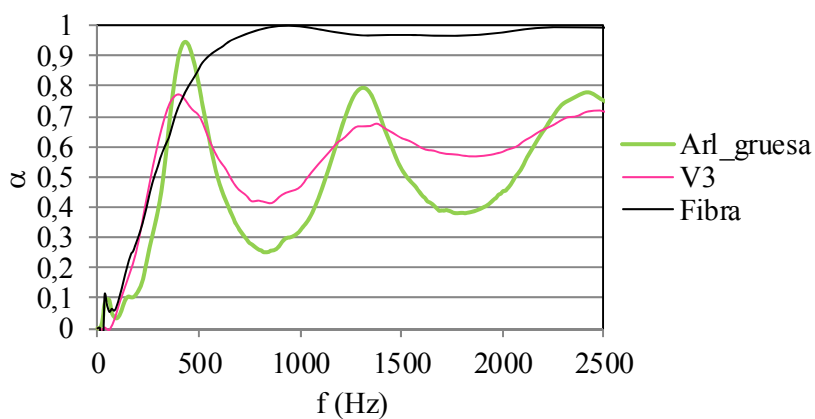


Figura 6.5.- Coeficiente de absorción de Arl\_gruesa, V3 y fibra de vidrio en probetas de 52 mm de diámetro y 100 mm de longitud.

El coeficiente de absorción de la fibra, Figura 6.5, presenta una respuesta muy uniforme y con valores altos de absorción en todo el rango de frecuencias, exceptuando bajas frecuencias (0 a 700 Hz), mientras que en materiales granulares varía en todo el rango de frecuencias y con valores más bajos. En el ancho de banda estudiado, y exceptuando frecuencia puntuales (400, 1300 y 2400 Hz), el comportamiento de la composición con V3 es mejor que para la Arl\_gruesa, con una respuesta más uniforme y con niveles de absorción mínima más elevados que para la Arl\_gruesa. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos en el estudio experimental, reflejando fielmente las composiciones anteriores. Esta diferencia de absorción acústica entre la fibra y el material granular puede condicionar a priori la utilidad de estos compuestos granulares en los silenciadores. Sin embargo, dado que la respuesta del silenciador es compleja y depende en gran manera de las características concretas de la configuración geométrica bajo estudio, no siempre se cumple que un material con mejor coeficiente de absorción garantice el mejor  $TL$  ([77] y [78]).

Antes de proceder a la realización de medidas se ha utilizado un dispositivo para la calibración de los micrófonos empleando la técnica de Seybert y Ross [258]. La metodología consiste en obtener la función de transferencia entre cada micrófono respecto a uno de ellos tomado de referencia (por ejemplo, el micrófono 1). Dichos micrófonos se sitúan enrasados en un plano perpendicular al eje del conducto, Figura 6.6. El bloque con los micrófonos se sitúa al final de un tubo con longitud suficiente para que la onda de presión posea un frente plano. De este modo ante una excitación acústica todos los micrófonos deberían registrar la misma señal. Las pequeñas diferencias en amplitud y fase se utilizan para corregir las medidas tomando como referencia, tal como se ha indicado, el micrófono 1. La Figura 6.7 ofrece una vista del software de adquisición y caracterización empleado durante la medición en el banco de ensayos.



Figura 6.6.- Montaje para calibración de los micrófonos.

6.2.- Índice de pérdidas de transmisión en silenciador cilíndrico con material granular.

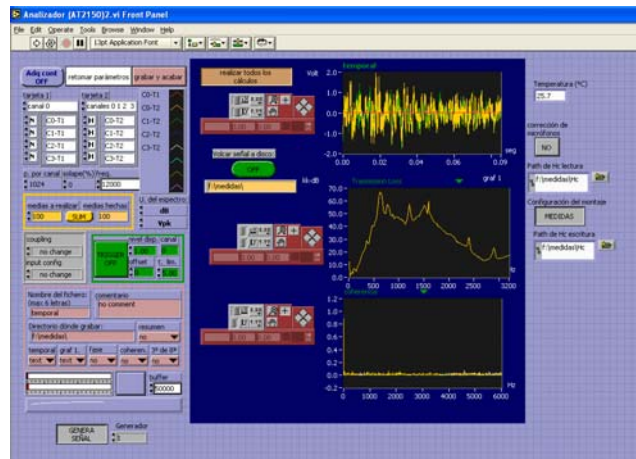


Figura 6.7.- Captura de pantalla del software de adquisición y caracterización experimental del silenciador.

Las condiciones ambientales se han mantenido en torno a los 25.7 °C y humedad relativa del 50%. Se ha suavizado la señal considerando 100 promediados del  $TL$  y se han empleado las funciones de calibración de cada micrófono con respecto al número 1, siendo éste más cercano a la fuente emisora. Se ha utilizado como señal de excitación un ruido blanco con contenido en frecuencia hasta 5000 Hz, y la frecuencia de muestreo ha sido de 12000 Hz. La parte real e imaginaria de la densidad equivalente, Figura 6.8 y Figura 6.9 y la velocidad del sonido equivalente, Figura 6.10 y Figura 6.11, se indican como “5” y “10” para las probetas corta y larga, respectivamente. Durante el ensayo, también se les ha dado la vuelta, utilizando como nomenclatura de la medida experimental la terminología de sentido directo “d” y sentido inverso “i”. Se ha seleccionado de forma aleatoria la marcación de las caras. Esto no es significativo en las probetas de V3, ya que las dos caras son muy uniformes. Sin embargo, en el caso de la arlita, la cara superior (procedente del molde) presenta mayor rugosidad que la inferior.

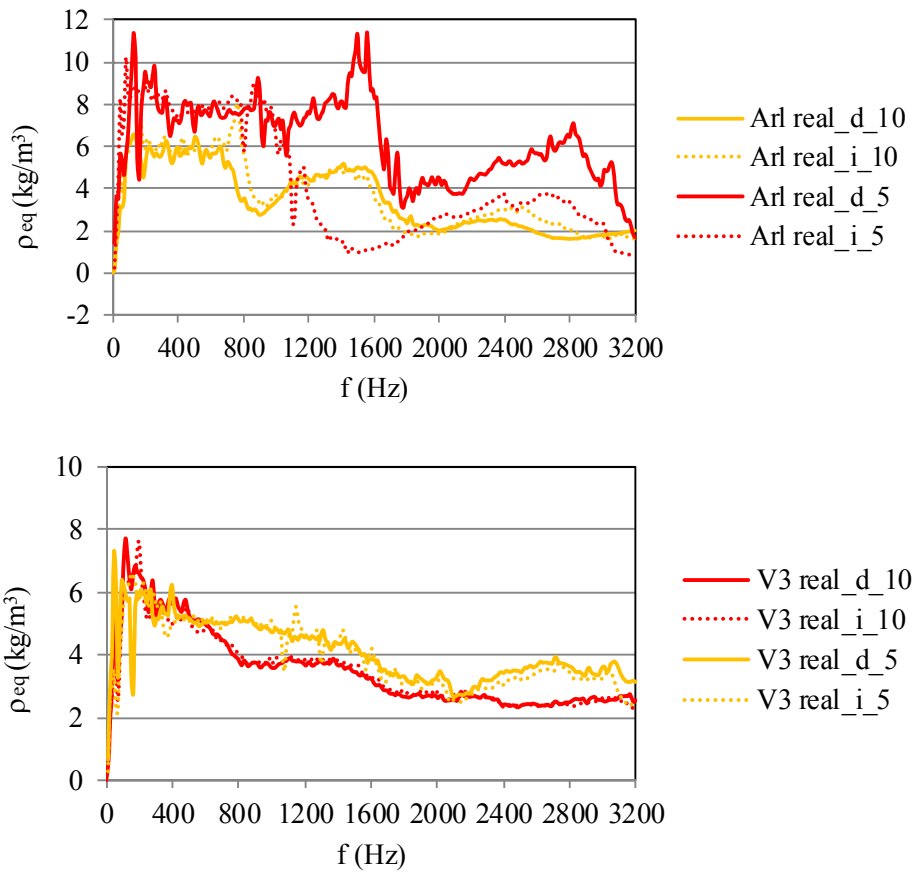


Figura 6.8.- Parte real de  $\rho_{eq}$ . Comparación entre longitudes.

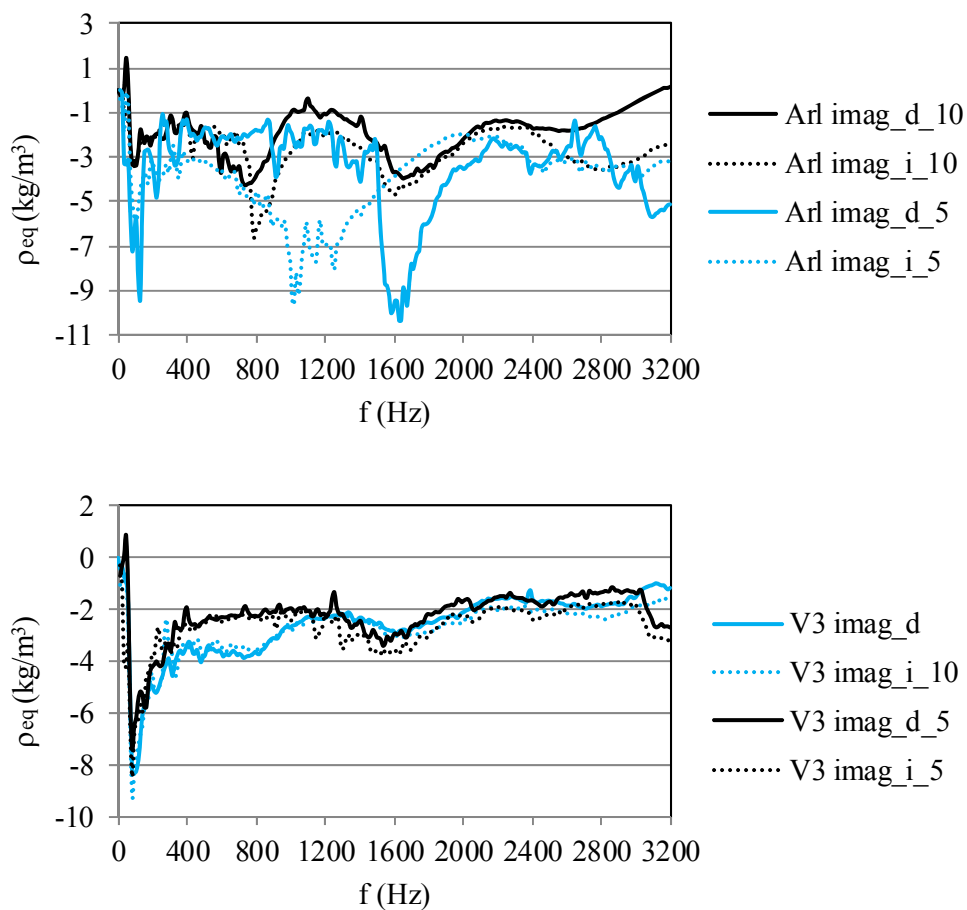


Figura 6.9.- Parte imaginaria de  $\rho_{eq}$ . Comparación entre longitudes.

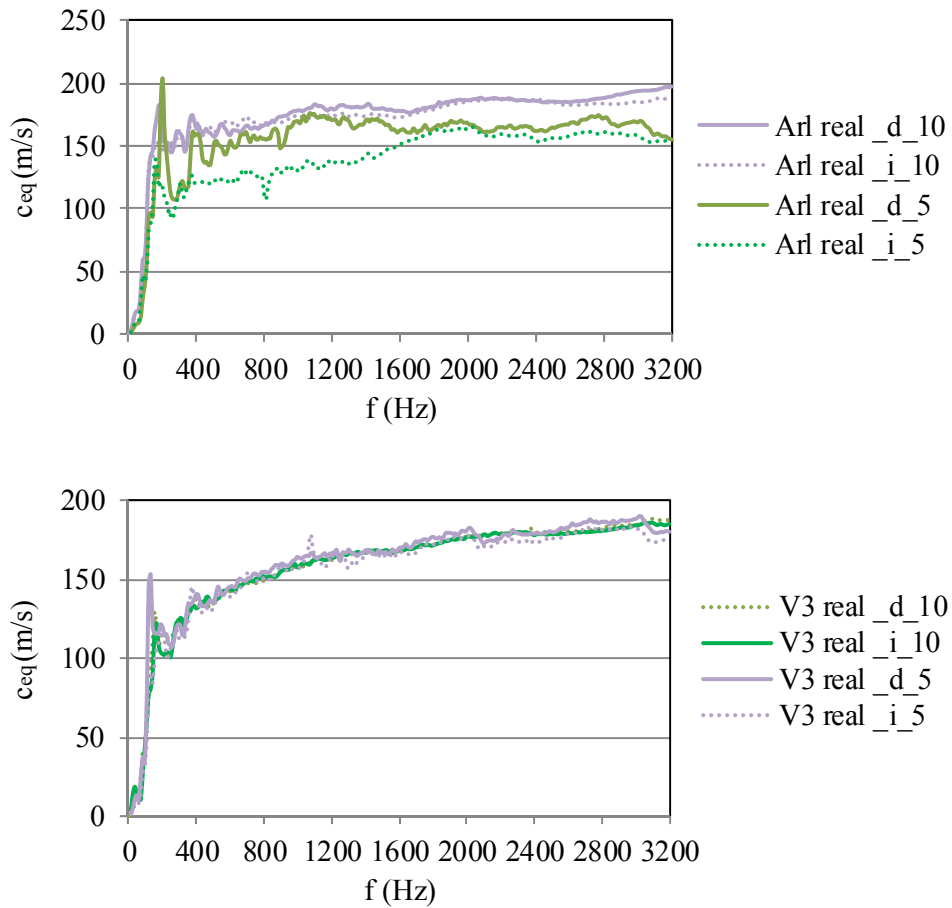


Figura 6.10.- Parte real de  $c_{eq}$ . Comparación entre longitudes.

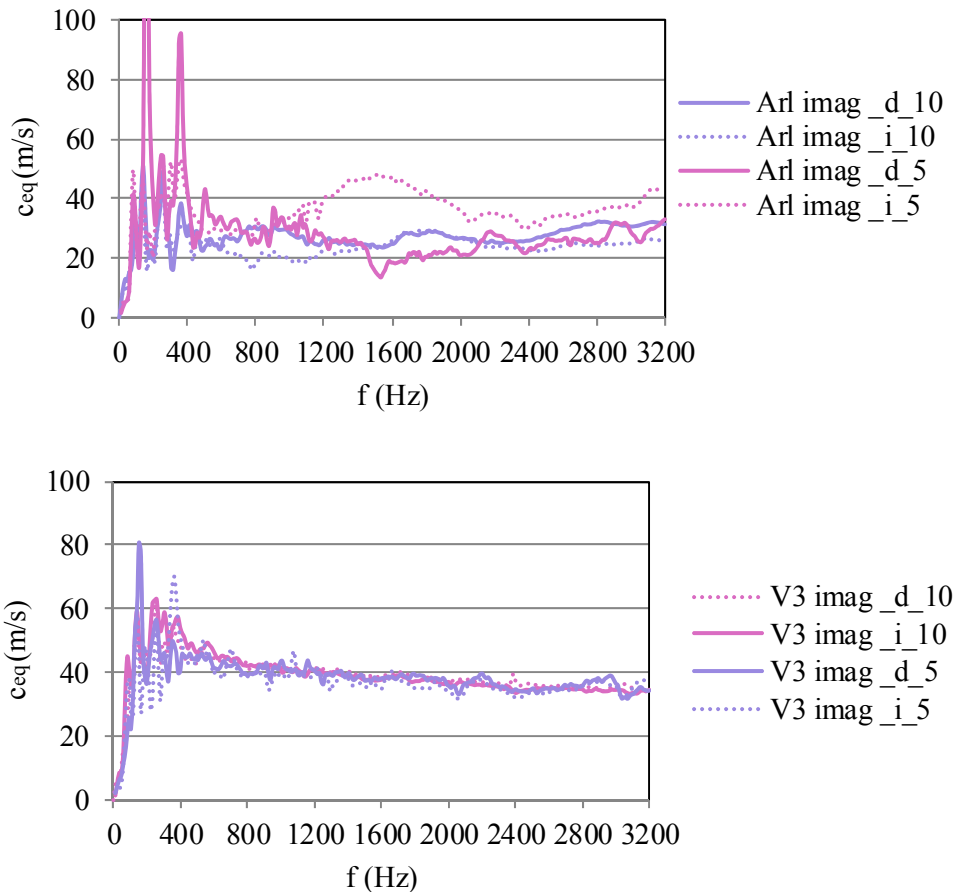


Figura 6.11.- Parte imaginaria de  $c_{eq}$ . Comparación entre longitudes.

Los resultados de  $\rho_{eq}$  y  $c_{eq}$  en ambos sentidos de ensayo (análisis de simetría de las probetas) y tamaño de las probetas ofrecen resultados clarificadores. La respuesta de la V3 no cambia significativamente para diferentes longitudes en lo referente a las propiedades acústicas equivalentes  $\rho_{eq}$  y  $c_{eq}$  y también se observa que el sentido del ensayo no tiene efecto a destacar sobre este material, de manera que a priori la consideración de material homogéneo en el modelo de silenciador parece suficientemente justificada para obtener predicciones adecuadas. Sin embargo, en la arlita, esta reversibilidad de la probeta durante el ensayo respecto al sentido de la onda no se reproduce, ofreciendo un comportamiento muy diferente en probetas de corta longitud (lo cual parece indicar que las muestras cortas son

poco representativas del comportamiento volumétrico del material). Como se observa en la Figura 6.8 a Figura 6.11, el compuesto con arlita ofrece diferente respuesta en función del sentido de ensayo y el tamaño de la probeta. Esto puede condicionar los resultados del *TL*. Esta diferencia de comportamiento también se reproduce en el *Capítulo 5.6.- Resultados experimentales* (Figura 5.51 y Figura 5.57). La diferencia de resultados en la arlita puede ser debida a varias causas:

- Proceso de elaboración: factor humano en el vertido al molde y formación granular incontrolada de este material, apareciendo heterogeneidades y zonas de aglutinación muy compactas, que producen reflexiones y fenómenos acústicos no deseables. Esto afecta al comportamiento según la dirección de la onda acústica. El apelmazamiento de algunos granos de arlita durante el cementado también es susceptible de generar cavidades internas que actúan como resonadores.

- La sección del portamuestras es más representativa para la V3, con tamaño de grano más pequeño que la arlita, resultando que la granulometría de la arlita es muy heterogénea. La sección de la probeta comparada con el tamaño de los granos parece ser crítica para el caso de la arlita.

Conocidas estas propiedades se ha modelizado mediante elementos finitos el caso de un silenciador disipativo simple con cámara central (Figura 6.2) de 248 mm de longitud y 183.7 mm de diámetro y con conducto de entrada y salida de 100 mm y 53.6 mm de diámetro. La temperatura considerada en este análisis es de 27.4 °C, con velocidad del sonido de 347.49 m/s y densidad del aire de 1.174 kg/m<sup>3</sup>. En la Figura 6.12 y Figura 6.13 puede observarse el *TL* teórico empleando los datos experimentales de  $\rho_{eq}$  y  $c_{eq}$  para las probetas corta y larga y en ambos sentidos (directo e inverso) de ensayo. También se comparan los resultados con la fibra Owens Corning con resistividad de 2000 Pa·s/m<sup>2</sup>) y para el caso de un silenciador reactivo (sin material absorbente). Las irregularidades de los resultados con arlita y vermiculita se deben a que en los cálculos del MEF se han utilizado directamente las propiedades medidas experimentalmente, sin recurrir a un modelo matemático de ajuste que suavice las curvas del *TL*.

El análisis de resultados indica que la presencia de un material absorbente mejora de forma importante el índice de pérdidas de transmisión respecto al caso reactivo puro. La predicción de resultados en la arlita presenta una mayor discrepancia entre las dos probetas de arlita, mientras que en la V3 la respuesta es muy similar entre las dos probetas y en ambos sentidos de ensayo. Esto es debido a la diferente granulometría y los motivos expuestos anteriormente al comentar los resultados de la Figura 6.8 a Figura 6.11. En la V3 el grano es más regular en



tamaño y los poros son más uniformes mostrando un  $TL$  similar en muestras de distinta longitud y con reversibilidad. Por el contrario, la arlita posee granos más grandes con lo que el material de adhesión conforma zonas apelmazadas de gran tamaño que puede originar heterogeneidad y generar conductos cerrados y con ello afectar al paso de una onda en uno u otro sentido.

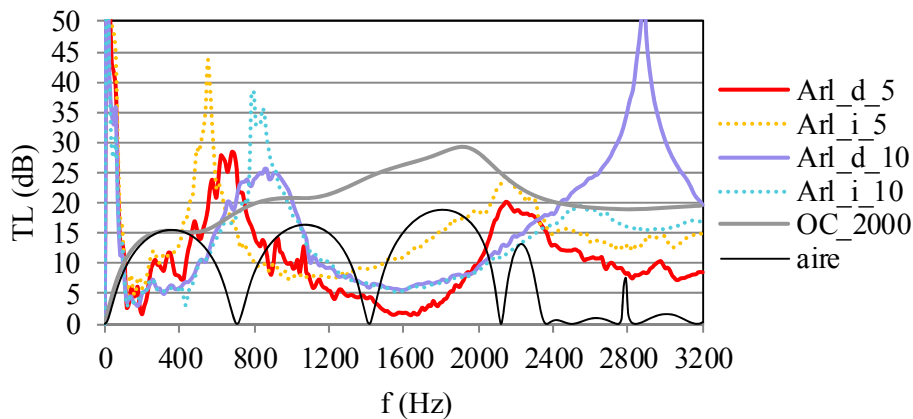


Figura 6.12.-  $TL$  teórico (MEF) en silenciador disipativo simple con arlita.

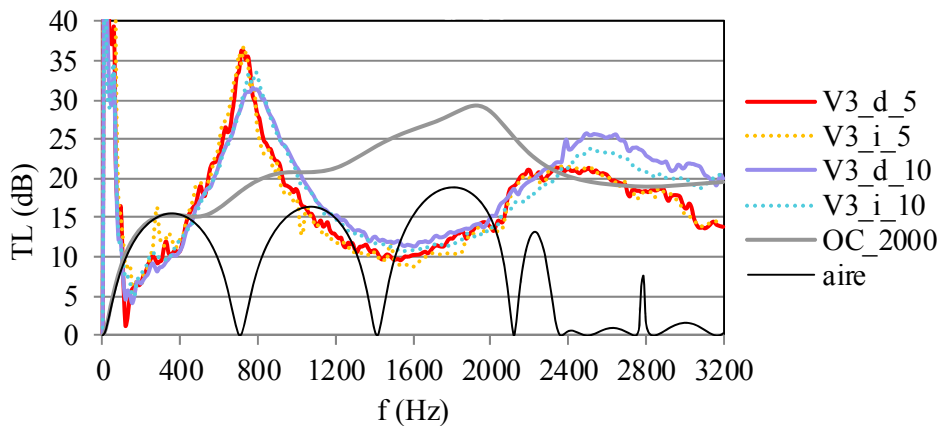


Figura 6.13.-  $TL$  teórico en silenciador disipativo simple con V3.

La fibra de vidrio considerada presenta un comportamiento del  $TL$  más uniforme y queda por debajo de las prestaciones del material granular en ciertos rangos de frecuencias, que para las configuraciones concretas consideradas van de

400 a 1000 Hz y de 2300 a 3000 Hz. En estos intervalos, el nivel de  $TL$  con material granular es más elevado, si bien empeora en frecuencias medias. Dado que el rango de frecuencias en el que el silenciador debe proporcionar un  $TL$  considerable depende del espectro de la fuente de ruido, estos resultados parecen confirmar que estos materiales granulares pueden ser aptos para ser empleados en silenciadores disipativos, en rangos de frecuencia determinados que dependen de la aplicación concreta.

#### 6.2.2.- *Ensayo experimental de silenciador híbrido con material granular.*

Como se ha indicado anteriormente, se ha elaborado un prototipo de silenciador disipativo más complejo con varias cámaras y conductos extendidos. En concreto, tal como se muestra en la Figura 6.14, se trata de un silenciador híbrido cilíndrico formado por una cámara resonadora de entrada tipo “folded” (con cámara de entrada que incluye tubo extendido y anillo externo), seguido de una cámara disipativa con material granular y una cámara de salida corta. Cada elemento se diseña para conseguir unas prestaciones concretas en un rango de frecuencias de interés: el resonador “folded” tiene una longitud considerable en un espacio compacto para garantizar un pico de atenuación a baja frecuencia, la cámara disipativa aporta buenas prestaciones en el rango de bajas frecuencias y la cámara corta aporta resonancias transversales a frecuencias medias. Se ha considerado como material granular con vermiculita V3 para medir el  $TL$  experimentalmente en banco de ensayos y también para las simulaciones del MEF. Posteriormente se ha procedido a comparar los resultados.

La configuración de las cámaras y conductos internos del silenciador se indica en la Figura 6.14. Las dimensiones geométricas relevantes vienen dada por los valores  $R_1 = 26.8$  mm,  $R_2 = 54$  mm,  $R_3 = 91.8$  mm,  $L_{r1} = 148$  mm,  $L_p = 48$  mm,  $L_d = 111$  mm,  $t_{p1} = 5$  mm,  $L_a = 248$  mm,  $t_{p2} = 5$  mm y  $L_{r2} = 50$  mm.

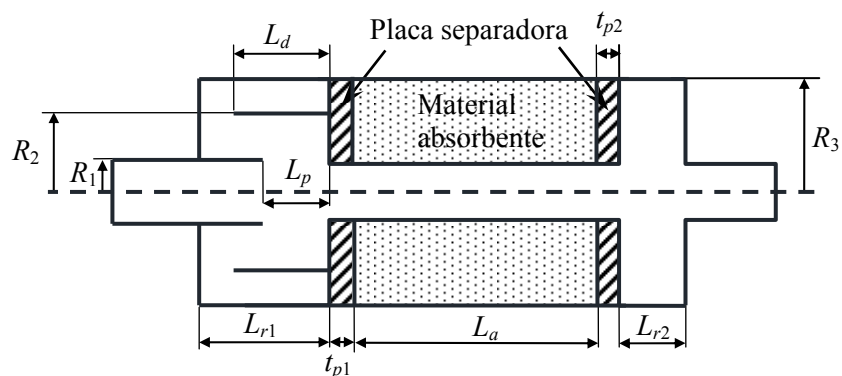


Figura 6.14.- Geometría de silenciador cilíndrico híbrido.

La Figura 6.15 muestra la cámara central cilíndrica disipativa con V3 y el conducto interior que se ajusta a las dimensiones de los conductos del banco de ensayos. El diámetro exterior es de 184.6 mm, con diámetro del conducto interior de 53.6 mm y longitud de 247 mm. La muestra de V3 se ha realizado con un molde en tubería de PVC de diámetro nominal externo de 200 mm y 7.7 mm de espesor y el conducto interior se ha generado con un bloque de aluminio trabajado en un torno del DIMM a las dimensiones adecuadas para ajustarse al diámetro interno del banco de ensayos.

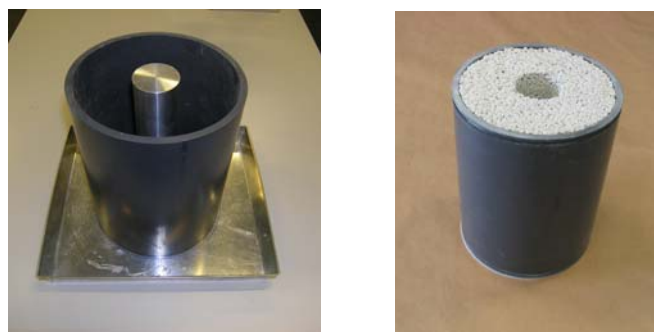


Figura 6.15.- Molde y probeta para fabricación de prototipo a medir en banco de ensayo.

Por el gran tamaño de las muestras aquí presentadas, el fraguado y la preparación requiere prestar atención. La preparación de la masa no puede hacerse en un solo amasado por lo que es necesario subdividir la preparación en varios amasados parciales: según los casos se ha necesitado alrededor de 10 amasados independientes para conseguir llenar los moldes. Esto puede dificultar la homogeneidad del material obtenido.

La medición experimental del  $TL$  se ha realizado en dos posiciones (Figura 6.16). En la posición “a” el resonador tipo “folded” se sitúa en la salida del silenciador, mientras que en la posición “b” se coloca en la entrada, invirtiéndose por tanto la configuración. Esto ha servido para comprobar que no hay cambios a destacar en los resultados y se puede comprobar más adelante. Las condiciones ambientales del laboratorio se han mantenido en torno a una temperatura de 25 °C y una humedad del 45%. La Figura 6.17 muestra los elementos que forman el silenciador con el material poroso insertado en la cámara central y una vista de este prototipo montado.



(posición a)



(posición b)

Figura 6.16.- Montaje del silenciador híbrido con tubo extendido en la salida (posición a) y en la entrada (posición b).



Figura 6.17.- Utillaje para montaje y detalle del silenciador con tubo extendido y anillo externo.

El  $TL$  obtenido por modelización mediante el MEF empleando las propiedades características  $c_{eq}$  y  $\rho_{eq}$  obtenidas anteriormente se muestra en la Figura 6.18. En ella se ha representado el  $TL$  en posición “a” (indicado con “a”) y posición “b” (indicado con “b”), así como en las dos probetas: corta (indicado con “5”) y larga (indicado con “10”). En esta figura también se incluye el  $TL$  experimental del silenciador para la posición “a” y solamente sirve de comparación entre los resultados teóricos y los experimentales. Tal como se indica más adelante, los resultados del  $TL$  obtenido experimentalmente no muestra diferencias significativas entre la posición “a” y “b”. Se observa que los resultados de  $TL$  son muy similares en todas las modelizaciones y se ajustan razonablemente a los valores experimentales (indicado con “exp”). Cabe destacar que existe una concordancia más que razonable tanto a nivel cualitativo como cuantitativo. Las predicciones del MEF capturan de forma adecuada todas las singularidades y resonancias de la curva de atenuación experimental en el rango de frecuencias bajo estudio. Los niveles de atenuación logrados superan los 30 dB en gran parte del intervalo de frecuencias, lo que pone de manifiesto las buenas prestaciones del prototipo desarrollado.

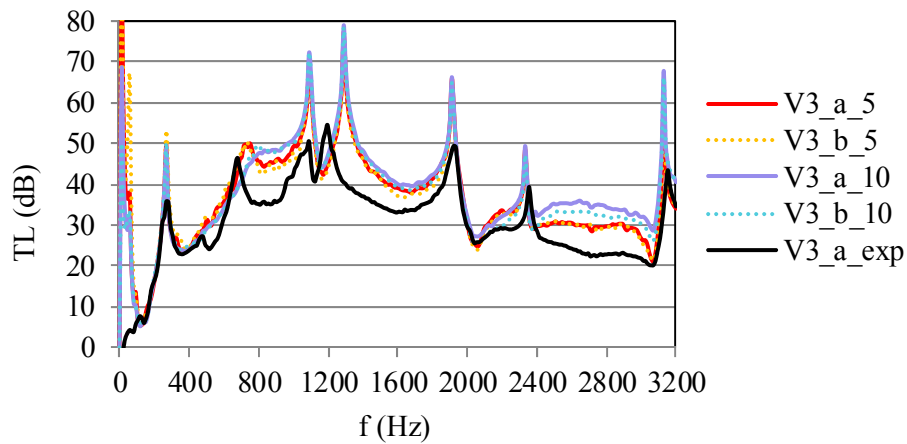


Figura 6.18.-  $TL$  obtenido mediante el MEF para V3 y comparación con resultado experimental.

También se ha procedido a realizar ensayos con modificaciones en el resonador tipo “folded”. En concreto, se han considerado dos configuraciones del silenciador híbrido: la primera de ellas incorpora el conducto extendido de longitud  $L_d$  (ver Figura 6.14), mientras que en la segunda dicho conducto se ha eliminado. La Figura 6.19 muestra los resultados experimentales correspondientes a los ensayos en ambos sentidos. En la configuración “a”, la onda acústica se encuentra primero la subcámara larga con tubo extendido y anillo externo (resonador “folded”), luego la cámara disipativa con el material poroso y finalmente la subcámara extracorta, mientras que en la configuración “b” se ha dado la vuelta al prototipo. En esta gráfica también se representa el  $TL$  para el silenciador híbrido sin tubo extendido en el resonador “folded” en ambas posiciones ( $L_d=0$ , marcado con \*).

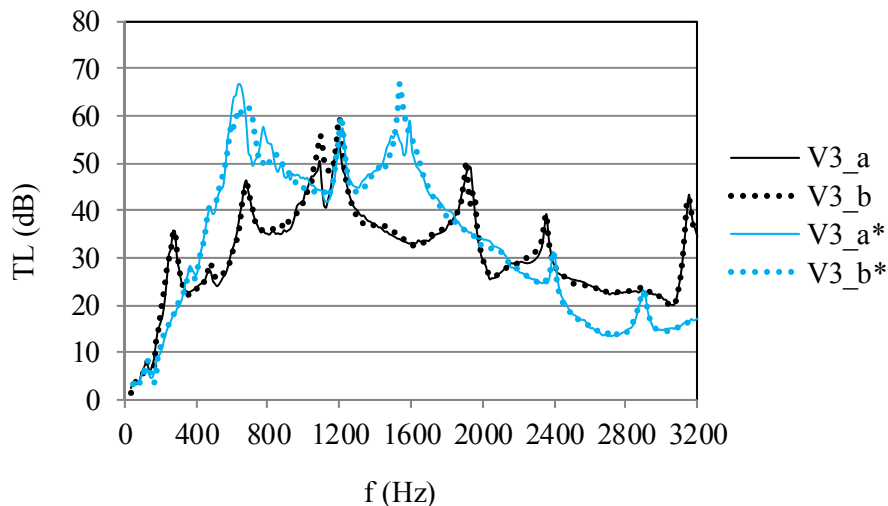


Figura 6.19.-  $TL$  experimental en silenciador híbrido multicámara con vermiculita. Comparación de geometrías, sin conducto extendido en resonador tipo “folded” ( $L_d=0$ , marcado con \*) y con conducto extendido.

Los resultados obtenidos en ambos sentidos de medición (a y b) no muestran diferencias significativas, como era de esperar, ya que, en ausencia de flujo, el balance energético del silenciador cumple las condiciones de cualquier sistema pasivo y su  $TL$  está determinado por la combinación de efectos de cada uno de los elementos: resonador tipo “folded”, cámara disipativa central y cámara corta.

De los resultados experimentales se observa que la respuesta del silenciador híbrido con conducto extendido en el resonador “folded” ( $TL_{V3\_a}$  y  $TL_{V3\_b}$ ) difiere con respecto al caso de ausencia de este conducto ( $TL_{V3\_a^*}$  y  $TL_{V3\_b^*}$ ). Este comportamiento es interesante ya que el cambio en la geometría puede modificar sustancialmente la absorción del silenciador. El primer pico de atenuación a 270 Hz es especialmente interesante dado que muchas fuentes de ruido suelen tener contenido espectral significativo en el rango de bajas frecuencias, y la utilización de un resonador tipo folded se presenta como un elemento de control de emisiones a tener en cuenta. Dicho pico desaparece al eliminar el conducto de longitud  $L_d=0$ . Otros picos notables aparecen debido a fuertes resonancias producidas por el efecto de las cámaras de expansión. A medida que aumenta la frecuencia, la absorción está dominada por la cámara disipativa central, que evita la caída drástica del  $TL$  (típica en cámaras reactivas puras). Puede concluirse que, en base a los resultados anteriores, los materiales granulares

desarrollados en la Tesis son potencialmente válidos para su utilización en dispositivos de control de ruido (véanse por ejemplo los reducidos niveles de atenuación de silenciadores reactivos puros de la Figura 6.12 y Figura 6.13). Este comportamiento está relacionado con los resultados obtenidos experimentalmente para el coeficiente de absorción sobre probetas de 100 mm (Figura 6.5). Sin embargo, este parámetro no es determinante para definir el comportamiento de un material en un silenciador disipativo ya que la atenuación que ofrece éste silenciador está determinada por:

- Las particularidades geométricas del silenciador.
- Las características del material absorbente y su respuesta en frecuencia.

Si bien existen materiales de tipo fibroso que presentan unas prestaciones mejores en lo referente a coeficiente de absorción, el índice de pérdidas de transmisión con material granular no es necesariamente inferior en todo el rango de frecuencias de interés. Esto implica que los materiales granulares pueden emplearse como alternativa potencial a las fibras en dispositivos de control de ruido tales como silenciadores. El empleo de un material con un comportamiento variable en frecuencia, como es el caso de la vermiculita V3, puede ser de aplicación en ciertas geometrías de silenciadores disipativos, en las que el nivel de atenuación final resulta de la combinación de características resonantes y disipativas, vinculadas a las particularidades geométricas de la configuración bajo estudio.

### **6.3.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO**

En el capítulo anterior se ha concluido que el comportamiento acústico de estos materiales granulares puede ser adecuado para aplicaciones industriales. En este capítulo se estudia el caso para sistemas de control de ruido. El objetivo de este análisis es determinar las pérdidas de transmisión  $TL$  en un silenciador disipativo híbrido para justificar su uso industrial. Previamente se ha determinado el  $TL$  de un silenciador simple mediante tratamiento teórico con las propiedades de la velocidad del sonido y densidad equivalente obtenidas en el laboratorio del DIMM para dos granulometrías, arlita gruesa y vermiculita V3, y dos longitudes de las probetas. Los resultados obtenidos ofrecen atenuación válida en el rango de frecuencias estudiado, por lo que seguidamente se ha ensayado un silenciador con vermiculita V3 como material disipativo en el laboratorio del DIMM.



Se han estudiado diversas configuraciones de un prototipo de silenciador híbrido multicámara: 1.- Sin conducto extendido exterior en el resonador tipo “folded” ( $L_d=0$ ) y 2.- Con la incorporación de un conducto extendido. Los resultados obtenidos indican que estos compuestos pueden ser interesantes en este tipo de aplicaciones, mostrando valores de pérdidas de transmisión con niveles aceptables en todo el rango de frecuencias estudiado. Como se ha indicado, aunque existen materiales de tipo fibroso que presentan unas prestaciones mejores en lo referente a coeficiente de absorción, el índice de pérdidas de transmisión con material granular no es necesariamente inferior en todo el rango de frecuencias de interés. En el caso de la vermiculita V3, este material puede ser de aplicación en ciertas configuraciones de silenciador disipativo, en las que el  $TL$  final depende de la combinación de características resonantes (asociadas a las particularidades geométricas) y disipativas.



## **Capítulo 7.- Conclusiones y trabajos futuros.**

*En este capítulo se recogen las conclusiones más importantes del estudio realizado a lo largo de la Tesis Doctoral sobre materiales granulares y se da respuesta a las cuestiones planteadas respecto a la viabilidad y empleo de estos materiales en aplicaciones concretas, tales como paneles acústicos y dispositivos de control de ruido en sistemas industriales y vehículos. Se indican nuevos campos de desarrollo para estos materiales compuestos que pueden ser posibles líneas de investigación.*



### 7.1.- CONCLUSIONES

Las principales aportaciones de esta Tesis son tres: en primer lugar, conocer la dosificación de cada material para obtener muestras que puedan ser manipuladas y que presenten una porosidad adecuada; en segundo lugar, la caracterización experimental de parámetros acústicos y no acústicos, con los que pueda aplicarse un modelo válido de predicción acústica; y por último, evaluar la utilización de estos productos como material absorbente en sistemas de control de ruido.

La medición de estos parámetros de caracterización ha necesitado la adaptación o construcción de equipamiento para los ensayos en laboratorio. Además, ha sido necesario conocer las técnicas experimentales que pueden emplearse mediante un estudio de la documentación técnica. También se ha realizado una búsqueda bibliográfica sobre los modelos de predicción y del uso de materiales de aporte procedentes de reutilización y expandidos.

Durante el periodo de experimentación se ha hecho uso de distinto equipamiento del que dispone el Departamento y el equipo investigador en los Campus: banco de ensayo acústico, tamizadora, microscopio, máquina universal de ensayos, etc.

En vista de los resultados experimentales obtenidos, los materiales granulares elaborados a partir de matriz cementicia (cemento) pueden ser una alternativa a los materiales habituales empleados en aplicaciones que requieren absorción acústica. Si bien el coeficiente de absorción obtenido en las muestras desarrolladas a lo largo de este trabajo presenta valores altos, la zona óptima de utilización se encuentra acotada en un intervalo frecuencial relativamente estrecho, localizado en el rango de frecuencias medias y bajas. Por tanto, la utilización de los materiales compuestos estudiados aquí dependerá de las características concretas de la aplicación final, pudiendo aparecer limitaciones asociadas a la zona óptima de comportamiento.

Las propiedades no acústicas tales como la porosidad y la tortuosidad no varían significativamente entre estos materiales porosos para las configuraciones específicas desarrolladas en el laboratorio. Por otro lado, la resistividad al flujo para estos compuestos es relativamente baja y ello impide aportar resultados concluyentes: valores diferentes de resistividad al flujo proporcionan respuestas análogas en lo referente a absorción acústica, como es el caso de la arlita fina y la vermiculita V3. En general no hay una diferencia importante en el coeficiente de

absorción en el rango de frecuencias estudiado, obteniéndose valores muy próximos entre los materiales analizados para diferente granulometría.

La resistencia estructural de los compuestos a base de arlita con mayor tamaño de grano (arlita gruesa) permite presentar esta composición como la más adecuada para condiciones de utilización que impliquen presencia de impactos y vibraciones. Sin embargo, en aplicaciones en las que el peso sea un factor importante, el compuesto elaborado con vermiculita (Vermiculita tipo 2 gruesa) resulta más apropiado dado su menor peso y su alta resistencia mecánica. La condición de homogeneidad-reversibilidad del material con compuestos a base de arlita no se cumple. Desde un punto de vista acústico las composiciones de tamaño de grano fino ofrecen mejor comportamiento: mayor absorción máxima y, en términos generales, valores más elevados en todo el rango de frecuencia estudiado. Las muestras desarrolladas con gran tamaño de grano reducen ligeramente la absorción acústica máxima, y presentan asimismo un menor rango óptimo de frecuencias. Además, su absorción baja significativamente en todo el rango de frecuencias.

Por otro lado, estos materiales granulares ofrecen algunas ventajas relacionadas con la procedencia del material virgen. Obtenidos a partir de roca triturada y extraída directamente desde cantera, no presentan ninguna problemática medioambiental. El final del ciclo de utilización tampoco supone la aparición de desechos dañinos al medioambiente ni a los seres vivos. Tan solo el proceso de fabricación con fuentes de energía contaminante genera carga medioambiental. Los materiales empleados son totalmente degradables en la naturaleza, aunque es necesario un sistema de tratamiento y postprocesado. La incorporación de energías no contaminantes o mínimamente contaminantes pueden proporcionar un valor añadido a este tipo de materiales.

También permiten su reciclado en otros productos: como material base para la construcción o como material poroso para absorción acústica o con fines estéticos. En el caso de la construcción estos materiales porosos pueden ser empleados como material aislante tanto térmico como acústico y también existe la posibilidad de incluirlos como material oculto tras paredes, enlucidos, falsos techos o paneles prefabricados. Además se pueden emplear como material aligerante en pantallas acústicas para reducción del impacto acústico en parques, carreteras, colegios y centros de ocio. Las posibilidades geométricas que ofrecen estos compuestos granulares son ilimitadas, pudiéndose fabricar placas con multitud de formas, tamaños y espesores, incorporación de grabados estéticos de siluetas o dibujos bajo relieve, formas geométricas de los paneles y acabados superficiales

(texturas y colores) e incluso con la inclusión de huecos perforados u ondulaciones. Este ámbito de aplicación abre un amplio abanico de posibilidades para estos materiales granulares. En el caso de materiales de baja resistencia estructural, como por ejemplo la vermiculita, es necesaria la incorporación de material de refuerzo (por ejemplo, armaduras de acero).

Otra característica que hace que estos materiales granulares sean interesantes es la capacidad para soportar altas temperaturas. En el proceso de elaboración de la materia prima se alcanzan temperaturas muy elevadas, lo que garantiza la resistencia térmica del material poroso final. Aplicaciones en las que se tienen condiciones extremas de temperatura corresponden, por ejemplo, a paneles aislantes al fuego (placas de aislantes en calefactores) y silenciadores de escape de turbinas de producción de energía y motores de combustión. Los silenciadores empleados en sistemas de producción de energía y en el ámbito vehicular pueden combinar de forma efectiva las características de absorción acústica de los materiales desarrollados en este trabajo con configuraciones geométricas optimizadas, así como otros elementos constructivos (inclusión de placas y tubos perforados con material absorbente, resonadores, conductos extendidos, ubicación de los conductos de entrada y salida, etc.). Además, la fabricación del material granular se puede ajustar con moldes a las formas geométricas requeridas por el silenciador deseado (cilíndrico, elíptico, cónico, etc.). Los resultados experimentales obtenidos en lo referente a atenuación acústica, cuantificados por medio del  $TL$ , justifican su uso en sistemas de escape y dispositivos industriales de control de ruido, mostrándose como una posible alternativa a las fibras. La vermiculita permite la obtención de un material más homogéneo que la arlita, y por tanto ofrece una mejor aproximación entre modelización numérica y resultados experimentales. Sin embargo, la capacidad resistente a vibraciones y golpes de la arlita es considerablemente mayor que en las vermiculitas.

Una de las desventajas que penalizan estos materiales porosos es su baja resistencia estructural, especialmente en el caso de emplear ciertas dosificaciones en las vermiculitas, lo cual puede dificultar su manipulación y utilización. También cabe indicar el elevado peso frente a otros materiales fibrosos y el coste de fabricación. Es evidente, por tanto, que quedan abiertos múltiples frentes interesantes de investigación orientados a paliar dichos inconvenientes. Sin embargo, como se ha indicado, sí parece viable que dichos materiales puedan ser una alternativa a otros considerados “clásicos” en dispositivos de control de ruido en equipos estáticos.

A lo largo del desarrollo de la Tesis Doctoral se han realizado diversas aportaciones científicas en el ámbito de los materiales granulares, que han sido convenientemente publicadas en revistas y congresos.

## **7.2.- TRABAJOS FUTUROS**

Partiendo del estudio realizado, las posibilidades de desarrollo de trabajo futuro son múltiples. A continuación se proporciona información más detallada.

En lo referente al material se pueden escoger diversas tendencias. La incorporación de otros materiales base: materiales de residuos de derribos en edificación, materia prima de naturaleza volcánica o deshechos de altos hornos son distintos ejemplos de alternativas a estos materiales. En el caso de que la temperatura no sea un requisito para la aplicación práctica, el empleo de materiales de naturaleza plástica, tales como PP, PVC o PE procedentes de reciclado puede dar salida a la reutilización de estos residuos. La sustitución del aglutinante por resinas permite reducir considerablemente el peso del producto final, pero esto limita el uso a aplicaciones en las que la temperatura no sea extrema.

En relación a la caracterización acústica se puede seguir realizando otras campañas de medición de parámetros acústicos con variaciones del material estudiado, con otros materiales diferentes y también con diferentes condiciones de trabajo (por ejemplo, a alta temperatura o el efecto del grado de contaminación de la muestra por partículas externas y cómo afecta la degradación de estos materiales). Pueden incorporarse materiales elaborados en varias capas y con distintas granulometrías, adición de perforaciones pasantes o ciegas, analizar el impacto del número de perforaciones y sección de éstas, así como combinaciones de todas estas alternativas. La caracterización de los parámetros no acústicos puede obtenerse mediante otros ensayos experimentales con técnicas alternativas ya vistas en el apartado de revisión bibliográfica: resistividad al flujo en tubo con soplante de aire, determinación de la porosidad por otras técnicas como por ejemplo cámara de vacío o la obtención de la longitud característica térmica y viscosa. La consecución de estos objetivos requiere la construcción y adquisición de equipamiento, lo cual está supeditado a fuentes de financiación que soporten el coste económico. La cuantificación de estos parámetros característicos permitirá la aplicación y/o simulación de otros modelos matemáticos más complejos que se ajusten en mayor medida a los resultados experimentales.

La dificultad de estos materiales a presentar homogeneidad en los granos también es un aspecto a tratar. Pueden desarrollarse técnicas que permitan paliar



esta problemática, como se ha podido observar de forma experimental en el último de los capítulos. Por ejemplo, se pueden estudiar técnicas de fabricación que permitan obtener materiales basados en arlita con propiedades más uniformes, técnicas que aumenten la resistencia estructural de compuestos basados en vermiculita, que reduzcan coste de fabricación y permitan disminuir el peso, etc.

En el caso de aplicaciones en sistemas y dispositivos de control de ruido industrial y vehicular, pueden plantearse múltiples vías de desarrollo. Frente a los materiales habituales de tipo fibroso empleados en la práctica, los materiales granulares pueden aplicarse en el diseño optimizado de silenciadores, garantizando una atenuación selectiva de frecuencias mediante determinadas formas geométricas, dimensiones y ubicación de los conductos de entrada y salida, incorporación de perforaciones, etc., de modo que las carencias de absorción de la propia geometría del silenciador en ciertas frecuencias puedan ser contrarrestadas por las posibilidades acústicas de estos materiales. Además, la adición de productos químicos catalizantes permite abrir una vía de estudio y alternativa a los sistemas empleados tradicionalmente



## **Bibliografía.**



### **RESUMEN DE REFERENCIAS POR PROCEDENCIA**

La búsqueda de información necesaria para documentarse sobre el tema trabajado aquí proviene de distintas fuentes de información y diversa procedencia. En este sentido, la Universidad dispone de una plataforma de búsqueda y consulta on line de trabajos tanto académicos como de investigación, lo que supone una herramienta de gran ayuda.

Las referencias consultadas se han clasificado según la fuente de publicación a partir del número de referencias encontradas en cada editor. Esto permite cuantificar la relevancia de cada fuente bibliográfica en el ámbito de la acústica aplicada en materiales granulares de matriz rígida y elaboradas con materiales expandidos estudiados en este trabajo.

Número de referencias	Editor
46	Construction and Building Materials
40	Applied Acoustics
36	Journal of the Acoustical Society of America
16	Cement and Concrete Research
14	Cement and Concrete Composites
11	Journal of Sound and Vibration
10	Journal of Applied Physics
10	Waste Management
6	Building and Environment
6	Energy and Buildings
5	Journal of Hazardous Materials
4	Applied Clay Science
4	Journal of Colloid and Interface Science
4	Journal of Thermal Analysis and Calorimetry
Resto < 4	Diversas fuentes

También es posible agrupar la documentación consultada atendiendo al material estudiado en cada referencia. Seguidamente se indica la distribución de referencias revisadas atendiendo al tipo de material aligerante, siendo arlita (Arl),

vermiculita (Ver), perlita (Per), cerámicos (Cer), caucho (Cau), aligerantes de la construcción (Al), materiales fibrosos (Fib) y aditivos (Ad):

Ámbito de aplicación	Número de referencias
Ver	72
Al	70
Per	27
Cau	20
Arl	7
Ad	5
Cer	4
Fib	2

Respecto a los usos de la vermiculita, considerando los campos de búsqueda de aislante acústico (Ac), aislante térmico (Term), uso combinado como aislante térmico y acústico (Ac-Term), aditivo en cemento (Cem) y yeso (Yes), jardinería y horticultura (Jard) o como absorbente de compuestos químicos (Abs\_quim), las referencias consultadas se distribuyen del siguiente modo:

Ámbito de aplicación	Número de referencias
Ac	52
Term	35
Ac-Term	2
Cem	109
Yes	5
Jard	12
Abs_quim	23

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abate, G. y Masini, J. Influence of thermal treatment applied to Fe (III) polyhydroxy cation intercalated vermiculite on the adsorption of atrazine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (9), 3555-3560, 2007.
- [2] Abollino, O., Giacomino, A., Malandrino, M. y Mentasti, E. The efficiency of vermiculite as natural sorbent for heavy metals. Application to a contaminated soil. *Water Air Soil Pollut*, 181, 149-160, 2007.
- [3] Acústica. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo de aire. UNE –EN 29053-1994.
- [4] Addison, J. Vermiculite: a review of the mineralogy and health effects of vermiculite exploitation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 21 (3), 397-405, 1995.
- [5] Affonso, M., Gonçalves, R., Ventura, E., Dornelles, M. y Pereira, G. Langstroth hive construction with cement-vermiculite. *Scientia Agricola*, 61 (6), 573-578, 2004.
- [6] Afreen, F., Zobayed, S., Kubota, C., Kozai, T. y Hasegawa, O. A combination of vermiculite and paper pulp supporting material for the photoautotrophic micropropagation of sweet potato. *Plant Science*, 157 (2), 225–231, 2000.
- [7] Ahac, S., Haladin, I., Lakusic, S. y Dragcevic, V. Croatian experience in road traffic noise management - concrete noise barriers. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 3 (1), 2014.
- [8] Akçaözoglu, S., Akçaözoglu, K. y Atis, C. Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste pet lightweight aggregate (wpla). *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 721-726, 2013.
- [9] Akçaözoglu, S., Atis, C. y Akçaözoglu, K. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30 (2), 285-290, 2010.
- [10] Alba, J., Rey, R., Ramis, J. y Arenas, J. An inverse method to obtain porosity, fibre diameter and density of fibrous sound absorbing materials. *Archives of Acoustics*, 36 (3), 561-574, 2011.
- [11] Alba, J., Ramis, J., Lorenzana, M. y Rey, R. Propuesta de modelo empírico para materiales absorbentes acústicos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 24 (2), 147-162, 2008.

- [12] Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A. y Gutiérrez, A. Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29, 2707–2716, 2009.
- [13] Alexandre, M., Albarrán, A. y Gómez, V. An identification study of vermiculites and micas: adsorption of metal ions in aqueous solution. *Fuel Processing Technology*, 92, 200–205, 2011.
- [14] Allard, J. Propagation of sound in porous media. Modelling sound absorbing materials. *Elsevier Science Publishers*. ISBN: 1-85166887X, 1993.
- [15] Allard, J., Castagnede, B., Henry, M. y Lauriks, W. Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air. *Review of Scientific Instruments*, 65 (3), 754-755, 1994.
- [16] Allard, J. y Champoux, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91 (6), 3346-3353, 1992.
- [17] Amalina, W., Ariwahjoedi, B. y Hussain, P. Effect of vermiculite addition on thermal characteristic of water-based acrylic fire retardant coating formulation. *Journal of Applied Sciences*, 11 (10), 1763-1769, 2011.
- [18] Antebas, A.G., Denia, F.D., Pedrosa, A.M. y Fuenmayor, F.J. A finite element approach for the acoustic modeling of perforated dissipative mufflers with non-homogeneous properties, *Mathematical and Computer Modelling*, 57 (7-8), 1970-1978, 2013.
- [19] Ardanuy, M., Antunes, M. y Velasco, J. Vegetable fibres from agricultural residues as thermo-mechanical reinforcement in recycled polypropylene-based green foams. *Waste Management*, 32 (2), 256-263, 2012.
- [20] Arenas, J., Alba, J., Rey, R., Ramis, J. y Suárez, E. Materiales absorbentes ecológicos para pantallas acústicas. Publicaciones de la Universidad de Alicante. ISBN: 978-8497172745, 2013.
- [21] Asdrubali, F., D'Alessandro, F. y Schiavoni, S. Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs. *Proceedings of Acoustics 08 Paris*, 35-40, 2008.
- [22] Asdrubali, F., Schiavoni, S. y Horoshenkov, K. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*, 19 (4), 283-312, 2013.
- [23] Atalla, Y. y Panneton, R. Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. *Canadian Acoustics*, 33 (1), 11-24, 2005.



- [24] Atiş, C. Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete and influence of curing condition. *Cement and Concrete Research*, 35, 1112-1121, 2005.
- [25] Attenborough, K. Acoustical characteristics of porous materials. *Physics Reports*, 82 (3), 179-227, 1982.
- [26] Attenborough, K. Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 73 (3), 785-799, 1983.
- [27] Attenborough, K. Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces. *Journal of Sound and Vibration*, 99 (4), 521-544, 1985.
- [28] Attenborough, K. Models for the acoustical characteristics of air filled granular materials. *Acta Acoustics*, 1, 213-226, 1993.
- [29] Aydin, S. y Baradan, B. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. *Cement and Concrete Research*, 37 (6), 988-995, 2007.
- [30] Babu, D., Babu, K. y Tiong, W. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43 (2-3), 671-676, 2006.
- [31] Balek, V., Pérez, J., Pérez, L., Šubrt, J. y Poyato, J. Thermal behaviour of ground vermiculite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 88 (3), 819-823, 2007.
- [32] Bartolini, R., Filippozzi, S., Princi, E., Schenone, C. y Vicini, S. Acoustic and mechanical properties of expanded clay granulates consolidated by epoxy resin. *Applied Clay Science*, 48 (3), 460-465, 2010.
- [33] Bastos, A., Sousa, H. y Melo, A. Methodology for the design of lightweight concrete with expanded clay aggregates. *TMS journal*, 73-84, 2005.
- [34] Baxa, D. Noise control in internal combustion engines. *John Wiley & Sons*. ISBN-13: 978-0471058700. 1982.
- [35] Bekir, I. y Isikdag, B. Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite. *Building and Environment*, 42, 3540-3546, 2007.
- [36] Bektasa, F., Turanlia, L. y Monteiro, P. Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35, 2014-2017, 2005.

- [37] Bellia, G., Tosin, M., Floridi, G. y Degli, F. Activated vermiculite, a solid bed for testing biodegradability under composting conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 66, 65-79, 1999.
- [38] Benk, A. y Coban, A. Possibility of producing lightweight, heat insulating bricks from pumice and  $H_3PO_4$  or  $NH_4NO_3$ . hardened molasses binder. *Ceramics International*, 38 (3), 2283-2293, 2012.
- [39] Benkreira, H., Khan, A. y Horoshenkov, K. Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chemical Engineering Science*, 66, 4157-4171, 2011.
- [40] Beranek, L. Acoustic impedance of porous materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 13, 248-260, 1942.
- [41] Bernal, S., Mejía, R. y Provis, J. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials*, 33, 99-108, 2012.
- [42] Berndt, M. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2606-2613, 2009.
- [43] Binici, H., Temiz, H. y Köse, M. The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice. *Construction and Building Materials*, 21 (5), 1122-1128, 2007.
- [44] Biot, A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28 (2), 179-191, 1956.
- [45] Boudaghpour, S. y Hashemi, S. A study on light expanded clay aggregate (LECA) in a geotechnical view and its application on greenhouse and greenroof cultivation. *International Journal of Geology*, 4 (2), 59-63, 2008.
- [46] Bouguerra, A., Ledhem, A., Barquin, F., Dheilily, R. y Quéneudec, M. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*, 28 (8), 1179-1190, 1998.
- [47] Bouvard, D., Chaix, J., Dendievel, R., Fazekas, A., Létang, J., Peix, G. y Quenar, D. Characterization and simulation of microstructure and properties of eps lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 37 (12), 1666 -1673, 2007.
- [48] Bradley, W. y Serratos, J. A discussion of the water content of vermiculite. *Clays and Clay Minerals: Proceedings of the Seventh National Conference*, 260-270, 2013.

- [49] Branco, F. y Godinho, L. On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. *Construction and Building Materials*, 45,184-191, 2013.
- [50] Brennan, M. y To, W. Acoustic properties of rigid-frame porous materials - an engineering perspective. *Applied Acoustics*, 62 (7), 793-811, 2001.
- [51] Brigattia, M., Colonnab, S., Malferraria, D., Medicic, L. y Poppi, L. Mercury adsorption by montmorillonite and vermiculite: a combined XRD, TG-MS, and EXAFS study. *Applied Clay Science*, 28, 1-8, 2005.
- [52] Brown, R. Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling in Biot's equation for acoustic waves in fluid-filled porous media. *Geophysics*, 45 (5), 1269-1275, 1980.
- [53] Brown, R. y Bolt, R. The measurement of flow resistance of porous acoustic materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 13 (4), 337-344, 1942.
- [54] Carman, P. Flow of Gases through Porous Media. *Butterworth*. 1956.
- [55] Carman, P. Fluid flow through granular beds. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers and the Chemical Engineer*. 15, 150-158, 1937.
- [56] Campillo, N., Peral, R., Velasco, E. Evaluation of the sound power level from rolling tyres. *39<sup>th</sup> International Congress on Noise Control Engineering (Internoise 2010)*, 2010.
- [57] Campillo, N., Peral, R., Velasco, E., Campello, H. An experimental procedure to obtain sound power level of tyre/road noise under Coast-By conditions. *Applied Acoustics*, 74 (5), 718-727, 2013.
- [58] Catai, R., Penteadó, A. y Dalbello, P. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 4205-4216, 2006.
- [59] Champoux, Y. y Allard, J. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics*, 70, 1975-1979, 1991.
- [60] Champoux, Y. y Stinson, M. Measurements of tortuosity and implications for acoustical modeling. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37, S139, 1990.
- [61] Champoux, Y., Stinson, M. y Daigle, G. Air-based system for the measurement of porosity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89 (2), 910-920, 1991.

- [62] Chen, S., Wang, H. y Jhou, J. Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials. *Construction and Building Materials*, 48, 98-103, 2013.
- [63] Chidiac, S. y Mihaljevic, S. Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 33 (8), 855-863, 2011.
- [64] Choi, Y., Moon, D., Kim, W. y Lachemi, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 23, 2829-2835, 2009.
- [65] Chung, D. Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites*, 31 (6-7), 511-526, 2000.
- [66] Chung, D. Cement-matrix composites for smart structures. *Smart Materials and Structures*, 9 (4), 389-401, 2000.
- [67] Corinadelsi, V. y Moriconi, G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (8), 2869-2876, 2009.
- [68] Cremer, L., Muller, H. y Schultz, T. Principles and applications of room acoustics. Vol 1. *Applied Science*. ISBN-13: 978-0853341130. 1978.
- [69] Cui, H., Lo, T., Memon, S. y Xu, W. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 149-158, 2012.
- [70] D'Alessandro, F., Asdrubali, F. y Baldinelli, G. Multi-parametric characterization of a sustainable lightweight concrete containing polymers derived from electric wires. *Construction and Building Materials*, 68, 277-284, 2014.
- [71] Decournet, G., Low-noise road surface techniques and materials. *29<sup>th</sup> International Congress on Noise Control Engineering (Internoise 2000)*, 2000.
- [72] Delany, M. y Bazley, E. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3, 105-116, 1970.
- [73] Demirboga, R. y Gül, R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 723-727, 2003.

- [74] Demirboga, R., Örüing, I. y Gül, R. Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31, 1627-1632, 2001.
- [75] Denia, F.D., Albelda, J., Fuenmayor F.J. y Torregrosa, A.J. Acoustic behaviour of elliptical chamber mufflers. *Journal of Sound and Vibration*, 241(3), 401-421, 2001.
- [76] Denia, F.D. Modelado del comportamiento acústico de silenciadores de escape mediante técnicas analíticas y el método de elementos finitos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2004.
- [77] Denia, F.D., Selamet, A., Fuenmayor, F.J. y Kirby, R. Acoustic attenuation performance of perforated dissipative mufflers with empty inlet/outlet extensions. *Journal of Sound and Vibration*, 302(4-5), 1000-1017, 2007.
- [78] Denia, F.D. Selamet, A., Martínez, M.J. y Fuenmayor, F.J. Sound attenuation of a circular multi-chamber hybrid muffler, *Noise Control Engineering Journal*, 56 (5), 356-364, 2008.
- [79] Denia, F.D., Martínez, J., Baeza, L. y Fuenmayor, F.J. Acoustic modelling of exhaust devices with nonconforming finite element meshes and transfer matrices, *Applied Acoustics*, 73 (8), 713-722, 2012.
- [80] Denia, F.D., Sánchez, E.M., Martínez, J. y Kirby, R. Finite element based acoustic analysis of dissipative silencers with high temperature and thermal-induced heterogeneity. *Finite Elements in Analysis and Design*, 101, 46-57, 2015.
- [81] Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. UNE-EN ISO 10534-2.
- [82] Díaz, A., Castro, G. y Sarquí, P. Experimental quantification of vermiculite thermal expansion. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4 (2), 37-42, 2013.
- [83] Directiva 70/157/CEE. Nivel Sonoro Admisible y Dispositivo de Escape en los vehículos a Motor. *Diario oficial de las Comunidades Europeas*, 1970.
- [84] Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N. y Panneton, R. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*, 71, 506-509, 2010.
- [85] Dragonetti, R., Ianniello, C. y Romano, R. Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129, 753-764, 2011.

[86] EEA: Noise in Europe 2014. Publications office of the European Union (2014). ISBN 978-9292135058 <<http://dx.doi.org/10.2800/763331>>. Acceso: 8/11/2014.

[87] El-Gamal, S., Hashem, F. y Amin, M. Thermal resistance of hardened cement pastes containing vermiculite and expanded vermiculite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109 (1), 217-226, 2012.

[88] Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas. UNE-EN 933-2:1996.

[89] Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009.

[90] Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo. UNE-EN 12390-4:2001.

[91] Estudio económico y tecnológico para explotación y aprovechamiento de las rocas industriales. Especificaciones y clasificaciones de las rocas industriales. Tomo IX. Mica y Vermiculita. *Ministerio de Industria y Energía. Dirección General de Minas e Industrias de la Construcción*. 1975.

[92] Fellah, E., Mitrif, G., Fellah, M., Ogam, E. y Depollier, C. Ultrasonic characterization of porous absorbing materials: inverse problem. *Journal of Sound and Vibration*, 302, 746-59, 2008.

[93] Fellah, Z., Berger, S., Lauriks, W., Depolier, C., Aristegui, C. y Chapelon, J. Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113 (5), 2424-2433, 2003.

[94] Fellah, Z., Berger, S., Lauriks, W., Depollier, C. y Fellah, M. Measuring the porosity of porous materials having a rigid frame via reflected waves: a time domain analysis with fractional derivatives. *Journal of Applied Physics*, 93 (1), 296-303, 2003.

[95] Fellah, Z., Sadouki, M., Fellah, M., Mitri, F., Ogam, E. y Depollier, C. Simultaneous determination of porosity, tortuosity, viscous and thermal characteristic lengths of rigid porous materials. *Journal of Applied Physics*, 114 (20), 204902-204905, 2013.

[96] Ferreira, L., Brito, J. y Saikia, N. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*, 36, 196-205, 2012.

[97] Fleury, J. As possibilidades de utilização da vermiculita fina não-expandida na agricultura. *Boletim Goiano de Geografia*, 7 (1), 75, 1988.

- [98] Fonseca, M., Oliveira, M., Arakaki, L., Espinola, J. y Airoidi, C. Natural vermiculite as an exchanger support for heavy cations in aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 285, 50-55, 2004.
- [99] Fonseca, M., Oliveira, M. y Arakaki, L. Removal of cadmium, zinc, manganese and chromium cations from aqueous solution by a clay mineral. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 288-292, 2006.
- [100] Fonseca, J. y O'Sullivan, C. y Coop, M. Image segmentation techniques for granular materials. *AIP conference proceedings*, 1145, 223-226, 2009.
- [101] Foti, D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, 25 (4), 1906-1915, 2011.
- [102] Frigione, M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30 (6), 1101-1106, 2010.
- [103] Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P., Garabito, J. y Calderón, V. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 32 (9), 672-677, 2010.
- [104] Gandage, A., Vinayaka, V., Sivakumar, M., Vasan, A., Venu, M. y Yaswanthe, A. Effect of perlite on thermal conductivity of self compacting concrete. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 188-197, 2013.
- [105] García, M., Rodríguez, I., Gómez, R., Díaz, M. y Marcos, C. Caracterización y evaluación de vermiculitas en la recuperación de trazas de cromo en agua. *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 3, 95-96, 2005.
- [106] Garnica, A., Curbelo, F., Oliveira, E. y Neto, E. Remoción del petróleo del agua producida utilizando como adsorbente vermiculita expandida e hidrofobizada. *Afinidad: Revista de Química Teórica y Aplicada*, 63 (521), 35-39, 2006.
- [107] Geslain, A., Groby, J.P., Dazel, O., Mahasaranon, S., Horoshenkov, K. y Khan, A. An application of the peano series expansion to predict sound propagation in materials with continuous pore stratification. *Journal of Acoustic Society of America*, 132 (1), 208-215, 2012.
- [108] Ghassabzadeh, H., Mohadespour, A., Torab, M., Zaheri, P., Maragheh, M. y Taheri, H. Adsorption of Ag, Cu and Hg from aqueous solutions using expanded perlite. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 950-955, 2010.

- [109] Giese, F., Eigenbrod, C. y Koch, D. A novel production method for porous sound-absorbing ceramic material for high-temperature applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8 (3), 646-652, 2011.
- [110] Glé, P., Gourdon, E. y Arnaud, L. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72 (5), 249-259, 2011.
- [111] Gomes, E., Visconte, L. y Pacheco, E. Thermal characterization of polypropylene/vermiculite composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 97 (2), 571-575, 2009.
- [112] Gómez, R., Rodríguez, I., García, M., Díaz, M. y Marcos, C. Evaluación de vermiculitas piroexpandidas para la recuperación de trazas de níquel en medios acuosos. *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 3, 103-104, 2005.
- [113] González, O., Touza, M. y Pereiro, G. Caracterización de algunas propiedades en tableros de corteza de pinus pinaster Ait. y tableros de vermiculita expandida. *Informes de la Construcción*, 64 (526), 243-251, 2012.
- [114] Gül, R., Okuyucu, E., Türkmen, I. y Cüneyt, A. Thermo-mechanical properties of fiber reinforced raw perlite concrete. *Materials Letters*, 61, 5145-5149, 2007.
- [115] Gündüz, L., Bekar, M. y Sapci, N. Influence of a new type of additive on the performance of polymer-lightweight mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 29, 594-602, 2007.
- [116] Hannawi, K., Kamali, S. y Prince, W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30 (11), 2312-2320, 2010.
- [117] Hassani, A., Ganjidoust, H. y Maghanaki, A. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management and Research*, 23 (4), 322-327, 2005.
- [118] Hassanpour, M., Shafigh, P. y Mahmud, H. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – a review. *Construction and Building Materials*, 37, 452-461, 2012.
- [119] Heckl, M. Introduction to acoustics: aspects of vehicle acoustics. *AVL Conference. Engine and Environment*, 27-32, 1990.
- [120] Heo, J., Seo, J., Joo, W., Kim, T. y Crohn, D. Effect of vermiculite addition on compost produced from korean food wastes. *Waste Management*, 10, 981-987, 2004.



- [121] Ho, A., Turatsinze, A., Hameed, R. y Vu, D. Effects of rubber aggregates from grinded used tyres on the concrete resistance to cracking. *Journal of Cleaner Production*, 23 (1), 209-215, 2012.
- [122] Holmes, N., Browne, A. y Montague, C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 73, 195-204, 2014.
- [123] Hong, Z., Bo, L., Guangsu, H. y Jia, H. A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *Journal of Sound and Vibration*, 304 (1-2), 400-406, 2007.
- [124] Horoshenkov, K. y Swift, M. Acoustic properties of consolidated granular mixes. *Applied Acoustics*, 62, 665-690, 2001.
- [125] Horoshenkov, K. y Swift, M. The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110 (5), 2371-2378, 2001.
- [126] Horoshenkov, K. y Swift, M. The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. *Applied Acoustics*, 62 (6), 665-690, 2001.
- [127] Hossain, K., Ahmed, S. y Lachemi, M. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 25 (3), 1186-1195, 2011.
- [128] Hoyes, J. Vermiculite - the high temperature sealing material of the future?. *Sealing Technology*, (46), 8-9, 1997.
- [129] Huang, W., Li, D., Liu, Z., Tao, Q., Zhu, Y., Yang, J. y Zhang, Y. Kinetics, isotherm, thermodynamic, and adsorption mechanism studies of La(OH)<sub>3</sub>-modified exfoliated vermiculites as highly efficient phosphate adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 236, 191-201, 2014.
- [130] Hutcheon, N. Expanded vermiculite as loose-fill, thermal insulation for dwellings. *Archives des Publications du CNRC*, 125, 1-6, 1952.
- [131] IMA Europe. Industrial Materials. "Vermiculite", web site: <[http://www.ima-europe.eu/sites/ima-europe.eu/files/minerals/Vermiculite\\_WEB-2011.pdf](http://www.ima-europe.eu/sites/ima-europe.eu/files/minerals/Vermiculite_WEB-2011.pdf)>. Acceso: 20/1/2015.
- [132] Ingard, K. y Dear, T. Measurement of acoustic flow resistance. *Journal of Sound and Vibration*, 103 (24), 567-572, 1985.

- [133] Jiménez, P., García A. y Morán, F. Hormigón armado. 14ª Edición basada en la EHE ajustada al código modelo y al Eurocódigo. *Gustavo Gili*. Barcelona. ISBN 978-8425218255. 2007.
- [134] Jo, B., Park, S. y Park, J. Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 22 (12), 2281-2291, 2008.
- [135] Johnson, D., Koplik, J. y Dashen, R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 176, 379-402, 1987.
- [136] Johnson, D., Plona, T., Scala, C., Pasierb, F. y Kojima, H. Tortuosity and acoustic slow waves. *The American Physical Society*, 49 (25), 1840-1844, 1982.
- [137] Juliá, E. Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica. Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [138] Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez, S. y Calderón, V. Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 34 (10), 1174-1179, 2012.
- [139] Karahan, O. y Atis, C. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials and Design*, 32 (2), 1044-1049, 2011.
- [140] Karaipekli, A. y Sari, A. Capric–myristic acid/vermiculite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy*, 83 (3), 323-332, 2009.
- [141] Kayali, O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 22 (12), 2393-2399, 2008.
- [142] Kearsley, E. y Wainwright, P. The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 233-239, 2002.
- [143] Khandaker, M. y Anwar, H. Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 283-291, 2004.
- [144] Kim, H., Jeon, J. y Lee, H. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. *Construction and Building Materials*, 29, 193-200, 2012.
- [145] Kim, H. y Lee, H. Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregates and void ratio. *Journal of Sound and Vibration*, 329 (7), 866-879, 2010.

- [146] Kim, H. y Lee, H. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. *Applied Acoustics*, 71 (7), 607-615, 2010.
- [147] Kirby, R. y Denia, F.D. Analytic mode matching for a circular dissipative silencer containing mean flow and a perforated pipe. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122, 3471, 2007.
- [148] Kramar, D. y Bindiganavile, V. Impact response of lightweight mortars containing expanded perlite. *Cement and Concrete Composites*, 37, 205-214, 2013.
- [149] Kramar, D. y Bindiganavile, V. Mechanical properties and size effects in lightweight mortars containing expanded perlite aggregate. *Materials and Structures*, 44, 735-748, 2011.
- [150] Kriiger, J. y Quickert, M. Determination of acoustic absorber parameters in impedance tubes. *Applied Acoustics*, 50 (1), 79-89, 1997.
- [151] Kumar, S., Kumar, R., Bandopadhyay, A., Alex, T., Kumar, B., Das, S. y Mehrotra, S. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement. *Cement and Concrete Composites*, 30 (8), 679-685, 2008.
- [152] Lafarge D., Lemarinier P., Allard J. y Tarnow, V. Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 1995-2006, 1997.
- [153] Lafarge, D. Propagation du son dans les matériaux poreux à structure rigide saturés par un fluide viscothermique: définition de paramètres géométriques, analogie électromagnétique, temps de relaxation. Tesis doctoral. Universidad du Maine. 1993.
- [154] Lakušić, S., Bjegović, D., Haladin, I., Baričević, A. y Serdar, M. Ruconbar – innovative noise protection solution made of recycled waste tyres. *20th International Scientific Conference. Transport 2011*, 73-82, 2011.
- [155] Lakušić, S., Bjegović, D., Haladin, I., Baričević, A. y Serdar, M. Ruconbar – greening the market of noise protection solutions. *2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure*, 701-708, 2012.
- [156] Lanzón, M. y García, P. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction and Building Materials*, 22, 1798-1806, 2008.
- [157] Lanzón, M. y García, P. Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. *Cement and Concrete Composites*, 31 (2), 114-119, 2009.

- [158] Leclaire, P., Kelders, L., Lauriks, W., Melon, M., Brown, N. y Castagnede B. Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air. *Journal of Applied Physics*, 80, 2009-2012, 1996.
- [159] Leclaire, P., Kelders, L., Lauriks, W., Glorieux, C. y Thoen, J. Determination of the viscous characteristic length in air-filled porous materials by ultrasonic attenuation measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99 (4), 1944-1948, 1996.
- [160] Leclaire, P., Swift, M. y Horoshenkov, K. Determining the specific area of porous acoustic materials from water extraction data. *Journal of Applied Physics*, 84 (12), 6886-6890, 1998.
- [161] Leiva, C., Solís, J., Marrero, M. y García, C. Recycled blocks with improved sound and fire insulation containing construction and demolition waste. *Waste Management*, 33 (3), 663-671, 2013.
- [162] Ley 7/2002 de protección contra la contaminación acústica. *Boletín Oficial de la Generalitat Valenciana*, Valencia, 2002.
- [163] Li, Ch. y Yang, H. Expanded vermiculite/paraffin composite as a solar thermal energy storage material. *Journal of the American Ceramic Society*, 96 (9) 2793-2798, 2013.
- [164] Li, G. y Zhao, X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 25 (3), 293-299, 2003.
- [165] Li, Q., Li, Z., Yuan, G. Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material. *Construction and Building Materials*, 35, 687-692, 2012.
- [166] Libre, N., Shekarchi, M., Mahoutian, M. y Soroushian, P. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Construction and Building Materials*, 25, 2458-2464, 2011.
- [167] Llompart, M., Sanchez, L., Lamas, J., Garcia, C., Roca, E. y Dagnac, T. Hazardous organic chemicals in rubber recycled tire playgrounds and pavers. *Chemosphere*, 90 (2), 423-431, 2013.
- [168] Losa, M., Leandri, P. y Bacci, R. Mechanical and performance-related properties of asphalt mixes containing expanded clay aggregate. *Journal of the Transportation Research Board*, 2051, 23-30, 2008.
- [169] Madandoust, R., Ranjbar, M. y Mousavi, S. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 25 (9), 3721-3731, 2011.

- [170] Maderuelo, R. Investigaciones sobre la aplicabilidad en edificación de materiales acústicos procedentes de la valorización de residuos. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. 2014.
- [171] Maderuelo, R., Barrigón, J. y Gómez, V. Acoustical performance of loose cork granulates. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72:321-330, 2014.
- [172] Maderuelo, R., Martín, M. y Vílchez, R. The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction. *Applied Acoustics*, 72, 823-828, 2011.
- [173] Maderuelo, R., Morillas, J., Martín, M., Escobar, V. y Gonzalo, G. Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 10 (3), 585-600, 2013.
- [174] Maderuelo, R., Nadal, A., Crespo, J. y Parres, F. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Applied Acoustics*, 73 (4), 402-408, 2012.
- [175] Mahdi, F., Abbas, H. y Khan, A. Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. *Construction and Building Materials*, 24, 25-36, 2010.
- [176] Malandrino, M., Abollino, O., Buoso, S., Giacomino, A., La Gioia, A. y Mentasti, E. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite. *Chemosphere*, 82, 169-178, 2011.
- [177] Malandrino, M., Abollino, O., Giacomino, A., Aceto, M. y Mentasti, E. Adsorption of heavy metals on vermiculite: influence of pH and organic ligands. *Journal of Colloid and Interface Science*, 299, 537-546, 2006.
- [178] Malhotra, S. y Tehri, S. Development of bricks from granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 10 (3), 191-192, 1996.
- [179] Marcos, C. y Rodríguez, I. Expansion behaviour of commercial vermiculites at 1000 °C. *Applied Clay Science*, 48, 492-498, 2010.
- [180] Marcos, C., Ruíz, A., Argüelles, A., Sánchez, P., García, A. y Blanco, J. Nuevos avances en la formación de fases interstratificadas durante el proceso de deshidratación-rehidratación de vermiculitas-Mg: influencia de la presión de vacío, temperatura y composición. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 43 (2), 138-140, 2004.
- [181] Marín, B., Benavidez, A., Delvasto, S., Mejía, R. y Chavarro, S. Estudio de materiales absorbentes del sonido en cajas acústicas. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 1 (3), 1135-1142, 2009.

- [182] Marques, A., Correia, J. y Brito, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire Safety Journal*, 58, 49-57, 2013.
- [183] Martias, C., Joliff, Y. y Favotto, C. Effects of the addition of glass fibres, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based composite at room temperature and during a fire test. *Composites Part B: Engineering*, 62, 37-53, 2014.
- [184] Martin, T., Lima, L., Rodrigues, A., Girardi, E., Gomes, E. y Minami, K. Utilização de vermiculita, casca de pínus e carvão na produção de mudas de pepino e de pimentão. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 28 (1), 107-113, 2006.
- [185] Martin, W., Putman, B. y Kaye, N. Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement. *Construction and Building Materials*, 48, 210-217, 2013.
- [186] Martínez, M. Modelado analítico-numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2010.
- [187] Mechel, F. Formulas of acoustics, volume 2. *Springer*. ISBN: 978-3540768340. 2004.
- [188] Melo, M., Silva, L., Coutinho, A., Sousa, V. y Perazzo, N. Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil. *Energy and Buildings*, 47, 35-43, 2012.
- [189] Meshgin, P., Xi, Y. y Li, Y. Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 28 (1), 713-721, 2012.
- [190] Métodos de ensayo de cementos. Parte 1. Determinación de resistencias mecánicas. UNE-EN 196-1:2005.
- [191] Métodos de ensayo de cementos. Parte 3. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. UNE-EN 196-3:2005.
- [192] Miki, Y. Acoustical properties of porous materials - generalizations of empirical models. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 11 (1), 25-28, 1990.
- [193] Miki, Y. Acoustical properties of porous materials - modifications of Delany-Bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 11 (1), 19-24, 1990.
- [194] Minerales y productos químicos para la agricultura. Productos químicos. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. <<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/62.pdf>>. Acceso: 17/8/2014.

- [195] Miyara, F., Acústica y sistemas de sonido. *UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario*. República Argentina. ISBN: 950-6731969. 1999.
- [196] Momtazi, A. y Zanoosh, R. The effects of polypropylene fibers and rubber particles on mechanical properties of cement composite containing rice husk ash. *Procedia Engineering*, 10, 3608-3615, 2011.
- [197] Moreira, D., Martins, K. y Gil, T. Avaliação da capacidade de adsorção de vermiculita hidrofóbica em contato direto com óleo. *REM. Revista Escola de Minas*, 59 (3), 329-333, 2006.
- [198] Moussatov, A., Ayrault, C. y Castagnède, B. Porous material characterization – ultrasonic method for estimation of tortuosity and characteristic length using a barometric chamber. *Ultrasonics*, 39 (3), 195-202, 2001.
- [199] Mulange, D. y Garbers, A. Stabilization of Cr(VI) from fine ferrochrome dust using exfoliated vermiculite. *Journal of Hazardous Materials*, 223, 46-52, 2012.
- [200] Munjal, M. Acoustics of ducts and mufflers. *Wiley*. ISBN: 978-1118443125, 2014.
- [201] Nadal, A., Maderuelo, R., Martín, M., Parres, F. y Juliá, E. Comportamiento acústico de arlita y perlita aglutinadas con diferentes proporciones de resina de poliuretano. *Proceedings VIII Congreso iberoamericano de acústica*, 2012.
- [202] Narayanan, N. y Ramamurthy, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 22, 321-329, 2000.
- [203] Nawel, S., Mounir, L. y Hedi, H. Study of mechanical behavior of lightweight aggregates concrete of tunisian clay. *Procedia Engineering*, 10, 936-941, 2011.
- [204] Neithalath, N., Garcia, R., Weiss, J. y Olek, J. Tire-pavement interaction noise: recent research on concrete pavement surface type and texture. *Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements*, 2, 523-540, 2005.
- [205] Neithalath, N., Sumanasooriya, M. y Deo, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials Characterization*, 61 (8), 802-813, 2010.
- [206] Neithalath, N., Weiss, J. y Olek, J. Acoustic performance and damping behavior of cellulose–cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 26 (4), 359-370, 2004.
- [207] Neithalath, N., Weiss, J. y Olek, J. Reducing the noise generated in concrete pavements through modification of the surface characteristics. *Portland Cement Association*, 2005.

- [208] Nelder, J. y Mead, R. Simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7, 308-313, 1965.
- [209] Nelson, P., Designing porous road surfaces to reduce traffic noise, TRL Annual Review, *Transportation Research Laboratories*, 1994.
- [210] Nguyen, L., Beaucour, A., Ortola, S. y Noumowé, A. Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 121-132, 2014.
- [211] Núñez, J., Preparación y caracterización de materiales a base de neumático, corcho y kenaf, para ser utilizados en el acondicionamiento acústico de salas. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. 2013.
- [212] Observatorio DKV de salud y medio ambiente en España 2012. *Observatorio Salud y Medio Ambiente*. 3, 2012.
- [213] Oldham, D., Egan, Ch. y Cookson, R. Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics*, 72, 350-363, 2011.
- [214] Oliveira, M., Barbosa, N., Torres, S., Leal, A. y Silva, C. Compósitos à base de gesso com resíduos de eva e vermiculita. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16 (6), 684-689, 2012.
- [215] Oliveira, L. y Ugarte, J. Utilização da vermiculita como adsorvente de óleo da indústria petrolífera. *Publicação do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004*. Disponible en: <[http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie\\_anais\\_XII\\_jic\\_2004](http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XII_jic_2004)>. Acceso: 13/12/2014.
- [216] Olny, X. y Panneton, R. Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123 (2), 814-824, 2008.
- [217] Orioli, F., Júnio, V. y Oliveira, A. Efeito de combinações de vermiculita e vermicomposto no desenvolvimento de porta enxerto de limão cravo. *Nucleus*, 5 (1), 1-6, 2008.
- [218] Ozkan, O., Yüksel, I. y Muratoglu, O. Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag. *Waste Management*, 27 (2), 161-167, 2007.
- [219] Pacheco, F., Ding, Y. y Jalali, S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. *Construction and Building Materials*, 30, 714-724, 2012.



- [220] Pàmies, T., Romeu, J., Genescà, M. y Arcos, R. Active control of aircraft fly-over sound transmission through an open window. *Applied Acoustics*, 84, 116-121, 2014.
- [221] Panneton, R. y Olny, X. Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119 (4), 2027-2040, 2006.
- [222] Panuccio, M., Sorgona, A., Rizzo, M. y Cacco, G. Cadmium adsorption on vermiculite, zeolite and pumice: batch experimental studies. *Journal of Environmental Management*, 90 (1), 364-374, 2009.
- [223] Parrondo, J L., Fernández, J., García, I. y Ruiz, E. Noise transmission through duct divisions in air circuits, considered as three-port acoustic systems. *Journal of Sound and Vibration*, 296, 183-197, 2006.
- [224] Peletskii, V. y Shur, B. Experimental study of the thermal conductivity of heat insulation materials based on expanded vermiculite. *Refractories and Industrial Ceramics*, 48 (5), 356-358, 2007.
- [225] Pelisser, F., Zavarise, N., Arent, T. y Bernardin, A. Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, 19 (6-7), 757-763, 2011.
- [226] Pereira, L. y Castro, J. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25 (4), 1712-1717, 2011.
- [227] Pfretzschner, J. Rubber crumb as granular absorptive acoustic material. *Forum Acusticum Sevilla*, 1-6, 2002.
- [228] Pfretzschner, J. y Rodriguez, R. Acoustic properties of rubber crumbs. *Polymer testing*, 18 (2), 81-92, 1999.
- [229] Picard, M., Solana, P. y Urchueguia, J. A method of measuring the dynamic flow resistance and the acoustic measurement of the effective static flow resistance in stratified rockwool samples. *Journal of Sound and Vibration*, 216 (3), 495-505, 1998.
- [230] Pierce, A. *Acoustics: An introduction to its Physical Principles and Applications*. McGraw-Hill, New York, 1981.
- [231] Porter, D. y Easterling, K. Dynamic studies of the tensile deformation and fracture of pearlite. *Acta Metallurgica*, 26 (9), 1978.

- [232] Pride, S., Morgan, F. y Gangi, A. Drag forces of porous-medium acoustics. *The American Physical Society*, 47 (3), 4964-4978, 1993.
- [233] Prizskulnik, S. Agregados de arcilla expandida em estruturas de pavimentos. *V Jornadas Luso- Brasileiras de Pavimentos: Politicas e Tecnologias*, 2006.
- [234] Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S. y Maly, A. Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1503-1511, 2013.
- [235] Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M., Allahyari, H. y Nikbin, I. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308, 2013.
- [236] Ramis, J., Alba, J., Rey, R., Escuder, E. y Sanchís, V. Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf. *Materiales de Construcción*, 60 (299), 133-143, 2010.
- [237] Ramis, J., Rey, R., Alba, J., Godinho, L. y Carbajo, J. A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber. *Materiales de Construcción*, 64 (313), 2014.
- [238] Reis, J., Chianelli, R., Cardoso, J. y Marinho, F. Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar. *Construction and Building Materials*, 25 (6), 2799-2804, 2011.
- [239] Rennó, L., Corretgé, L., Martins, J., Díaz, M. y Marcos, C. Productos resultantes de vermiculitas expandidas térmicamente a 1000 °C. *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 25, 223-226, 2000.
- [240] Rezende, E., Peralta, P. y Abate, G. Estudo de sorção de herbicidas pelos argilominerais vermiculita e montmorilonita. *Quimica Nova*, 34 (1), 21-27, 2010.
- [241] Rodríguez, F., Puente, J. y Díaz, C. Guía acústica de la construcción. *Dossat 2000*. Madrid. ISBN 9788496437814, 2008.
- [242] Rodríguez, R. Propiedades acústicas del caucho granular. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2003
- [243] Roulia, M., Chassapis, K., Fotinopoulus, C., Savvidis, T. y Katakis, D. Dispersion and sorption of oil spills by emulsifier-modified expanded perlite. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8 (5-6), 425-431, 2003.
- [244] Rößler, M. y Odler, I. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes: I. Effect of porosity. *Cement and Concrete Research*, 15 (2), 320-330, 1985.

- [245] Sadouki, M., Berbiche, A., Fellah, M., Fellah, Z., Orgam, E. y Depollier, C. Full characterization of air-saturated porous materials using only transmitted waves. *CFA 2014*, 675-680, 2014.
- [246] Sadouki, M., Fellah, M., Fellah, Z., Orgam, E. y Depollier, C. Acoustic characterization of air saturated porous materials at audible frequencies. *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference*, 1889-1894, 2012.
- [247] Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D. y Maallem, M. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: effect on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 43, 436-443, 2013.
- [248] Saikia, N. y Brito, J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401, 2012.
- [249] Saleh, S. Effect of mixing date palm leaves compost (dplc) with vermiculite, perlite, sand and clay on vegetative growth of dahlia (*dahlia pinnata*), marigold (*tagetes erecta*), zinnia (*zinnia elegans*) and cosmos (*cosmos bipinnatus*) plants. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5 (7), 655-665, 2011.
- [250] Salissou, Y. y Panneton, R. Pressure/mass method to measure open porosity of porous solids. *Journal of Applied Physics*, 101, 129413, 2007.
- [251] Sandberg, U. y Ejsmont, J. Tyre / Road noise reference book, Informex, Kisa, Sweden, 2002.
- [252] Santos, C., Melo, D., Melo, M. y Sobrinho, E. Caracterização e usos de argilas bentonitas e vermiculitas para adsorção de cobre (II) em solução. *Ceramica*, 48 (308), 178, 2002.
- [253] Santos, R., Río, M. y González, M. Yeso aligerado con agregados procedentes de residuos de construcción, demolición o industria. *Workshop on Environmental Impact of Buildings*, 37-44, 2013.
- [254] Sebaa, N., Fellah, Z., Fellah, M., Lauriks, W. y Depollier, C. Measuring flow resistivity of porous material via acoustic reflected waves. *Journal of Applied Physics*, 98 (8), 84901-84910, 2005.
- [255] Selamet, A., Denia, F.D. y Besa, A.J. Acoustic behavior of circular dual-chamber mufflers. *Journal of Sound and Vibration*, 265 (5), 967-985, 2003.
- [256] Sengula, O., Azizib, S., Karaosmanoglu, F. y Tasdemira, M. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43, 671-676, 2011.

- [257] Sevostianova, E., Leinauer, B. y Sevostianov, I. Quantitative characterization of the microstructure of a porous material in the context of tortuosity. *International Journal of Engineering Science*, 48, 1693-1701, 2010.
- [258] Seybert, A. y Ross, D. Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique. *Journal of the Acoustical Society of America*, 115, 2091-2099, 2004.
- [259] Shannag, M. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 25, 658-662, 2011.
- [260] Siddique, R. y Kaur, D. Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3 (1), 45-51, 2012.
- [261] Siddique, R., Khatib, J. y Kaur, I. Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Management*, 28, 1835-1852, 2008.
- [262] Sikora, J. y Turkiewicz, J. Experimental determination of sound absorbing coefficient for selected granular materials. *Mechanics and Control*, 28 (1), 26-28, 2009.
- [263] Sikora, J. y Turkiewicz, J. Sound absorption coefficients of granular materials. *Mechanics and Control*, 29 (3), 149-157, 2010.
- [264] Silber, A., Bar, B., Suryano, S. y Levkovitch, I. Zinc adsorption by perlite: effects of pH, ionic strength, temperature, and pre-use as growth substrate. *Geoderma*, 170, 159-167, 2012.
- [265] Silva, U., Melo, M., Silva, A. y Farias, R. Adsorption of crude oil on anhydrous and hydrophobized vermiculite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 260, 302-304, 2003.
- [266] Silva, R., Brito, J. y Saikia, N. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35 (1), 23-31, 2013.
- [267] Singh, M. y Garg, M. Perlite-based building materials - a review of current applications. *Construction and Building Materials*, 5 (2), 75-81, 1991.
- [268] Sobral, M., Samagaio, A., Ferreira, J. y Labrincha, J. Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate. *Journal of Materials Processing Technology*, 142 (2), 427-433, 2003.
- [269] Song, P., Hwang, S. y Sheu, B. Strength properties of nylon and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35 (8), 1546-1550, 2005.

- [270] Soranz, R., Cleante, O., Roberto, P. y Aparecida, E. Iron sources for citrus rootstock development grown on pine bark/vermiculite mixed substrate. *Scientia Agricola*, 64 (5), 520-531, 2007.
- [271] Stembirek, J., Holesova, S., Pazdziora, E., Bartosova, L., Prazanova, G. y Valaskova, M. Toxicity of potential antibacterial vermiculite material - preliminary study on an animal model. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 40 (10), 1152 -1152, 2011.
- [272] Stinson, M. The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary crosssectional shape. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89 (2), 551-558, 1991.
- [273] Stinson, M. y Champoux, Y. Propagation of sound and the assignment of shape factors to model porous materials having simple pore shape geometries. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91 (2), 685-695, 1992.
- [274] Stinson, M. y Daigle, G. Electronic system for the measurement of flow resistance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 2422-2428, 1988.
- [275] Stumpf, M., Flach, F., Reschke, J. y Piva, M. Acoustic absorption of mortar composites with waste material. *Archives of Acoustics Quarterly*, 38 (3), 417-423, 2013.
- [276] Stylianou, M., Inglezakis, V., Moustakas, K., Malamis, S. y Loizidou, M. Removal of Cu (II) in fixed bed and batch reactors using natural zeolite and exfoliated vermiculite as adsorbents. *Desalination*, 215, 133-142, 2007.
- [277] Sumanasooriya, M., Bentz, D. y Neithalath, N. Predicting the permeability of pervious concretes from planar images. *Proceedings in CD of the Concrete Technology Forum 2009*.
- [278] Sun, Z., Tang, X. y Cheng, G. Numerical simulation for tortuosity of porous media. *Microporous and Mesoporous Materials*, 173, 37-42, 2013.
- [279] Sutcu, M. y Akkurt, S. The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics International*, 35, 2625-2631, 2009.
- [280] Swift, M. Brisĭ, P. y Horoshenkov, K. Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate. *Applied Acoustics*, 57, 203-212, 1999.
- [281] Talip, Z., Eral, M. y Hiçsönmez, U. Adsorption of thorium from aqueous solutions by perlite. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, 139-143, 2009.
- [282] Tamices y tamizado de ensayo. Parte 3: Exigencias técnicas y verificaciones de los tamices de ensayo de tela metálica. UNE 7050-3: 1997.

- [283] Tan, K. y Du, H. Use of waste glass as sand in mortar: part I – fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*, 35 (1), 109-117, 2013.
- [284] Tavares, F., Pasqual, M., Castro, E. y Coimbra, G. Morphophysiological characteristics of pineapple 'gomo de mel' rooted in vitro under natural light and vermiculite substrate. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33 (2), 551-557, 2011.
- [285] Tertre, E., Hubert, F., Bruzac, S., Pacreau, M., Ferrage, E. y Prêt, D. Ion-exchange reactions on clay minerals coupled with advection/dispersion processes. Application to Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> exchange on vermiculite: reactive-transport modeling, batch and stirred flow-through reactor experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 112, 1-19, 2013.
- [286] Topçua, I. y Isikdag, B. Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology*, 204, 34-38, 2008.
- [287] Turgut, P. y Yesilata, B. Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks. *Energy and Buildings*, 40, 679-688, 2008.
- [288] Turkiewicz, J. y Wszolek, G. Theoretical and experimental determination of the sound-absorbing property class of acoustic barriers. *Acta Physica Polonia*, 125 (4), 127-130, 2014.
- [289] Türkmen, I. y Kantarci, A. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42, 2378–2383, 2007.
- [290] Ugur, N. y Ozturan, T. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes. *Journal of Hazardous Materials*, 179 (1-3), 954-965, 2010.
- [291] Umnova, O., Attenborough, K. y Li, K. Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres. *Journal of Acoustic Society of America*, 107 (6), 3113-3119, 2000.
- [292] Umnova, O., Attenborough, K. y Li, K. A cell model for acoustical properties of packings of spheres. *Acta - Acústica*, 97, 226-235, 2001.
- [293] Umnova, O., Attenborough, K., Shin, H. y Cummings, A. Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Applied Acoustics*, 66, 607-624, 2005.
- [294] Unal, O., Uygunoglu, T. y Yildiz, A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*, 42, 584-590, 2007.

- [295] Uysal, M. y Sumer, M. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 25 (11), 4112-4120, 2011.
- [296] Vaou, V. y Pantias, D. Thermal insulating foamy geopolymers from perlite. *Minerals Engineering*, 23, 1146-1151, 2010.
- [297] Vasina, M., Hughes, D., Horoshenkov, K. y Lapcik, L. The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Applied Acoustics*, 67, 787-796, 2006.
- [298] Venegas, R. y Umnova, O. Acoustical properties of double porosity granular materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130 (5), 2765-2776, 2011.
- [299] Vinicius, M. , Macedo, W., Peroni, L., Oliveira, E. y Gomes, A. Lodo de esgoto e vermiculita na produção de mudas de eucalipto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43(2), 155-163, 43 (2), 155-163, 2013.
- [300] Vinokur, R. Sound insulation by concrete panels with cylindrical circular hollows. *Applied Acoustics*, 45 (2), 131-138, 1995.
- [301] Voronina, N. An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity. *Applied Acoustics*, 51 (2), 181-198, 1997.
- [302] Voronina, N. An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity. *Applied Acoustics*, 58, 295-304, 1999.
- [303] Voronina, N. y Horoshenkov, K. A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media. *Applied Acoustics*, 64 (4), 415-432, 2003.
- [304] Waldron, C., Cousins, T., Nassar, A. y Gómez, J. Demonstration of use of high-performance lightweight concrete in bridge superstructure in virginia. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 19, 146-154, 2005.
- [305] Wang, L., Tang, B. y Xing, Y. Experimental study on sound absorption of crumb rubber modified asphalt mixture with large porosity. *Engineering Mechanics*, 26 (1), 181-184, 2009.
- [306] Wang, R. y Meyer, C. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34 (9), 975-981, 2012.
- [307] Weigler, H. y Karl, S. Structural lightweight aggregate concrete with reduced density-lightweight aggregate foamed concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 2 (2), 101-104, 1980.

- [308] Wen, S. y Chung, D. Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites. *Carbon*, 45 (3), 505-513, 2007.
- [309] Wightman, C., Muzzio, F. y Wilder, J. A quantitative image analysis method for characterizing mixtures of granular materials. *Powder Technology*, 89 (2), 165-176, 1996.
- [310] Wilson, D. Relaxation-matched modeling of propagation through porous media, including fractal pore structure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 94 (2), 1136-1145, 1993.
- [311] Wona, J., Kang, H., Lee, S., Lee, S. y Kang, J. Thermal characteristics of high-strength polymer-cement composites with lightweight aggregates and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 25, 3810-3819, 2011.
- [312] Xi, Y., Peng, T., Liu, H. y Chen, J. Preparation and properties of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation boards. *Advanced Materials Research*, 178, 220 -225, 2010.
- [313] Xu, Y., Jiang, L., Xu, J. y Li, Y. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Construction and Building Materials*, 27 (1), 32 -38, 2012.
- [314] Xu, Z., Hao, H. y Li, H. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. *Materials and Design*, 42, 72-88, 2012.
- [315] Xuequan, W., Hong, Z., Xinkai, H. y Husen, L. Study on steel slag and fly ash composite portland cement. *Cement and Concrete Research*, 29 (7), 1103-1106, 1999.
- [316] Yilmazer, S. y Ozdeniz, M. The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates. *Building and Environment*, 40, 311-318, 2005.
- [317] Yu, X., Wei, Ch., Ke, L., Wu, H., Chai, X. y Hu, Y. Preparation of trimethylchlorosilane-modified acid vermiculites for removing diethyl phthalate from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 369, 344-351, 2012.
- [318] Zhao, C., Wang, P., Wang, L. y Liu, D. Reducing railway noise with porous sound-absorbing concrete slabs. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- [319] Zheng, Y., Li, P., Zhang, J. y Wang, A. Study on superabsorbent composite XVI. Synthesis, characterization and swelling behaviors of poly (sodium acrylate)/vermiculite superabsorbent composites. *European Polymer Journal*, 43 (5), 1691-1698, 2007.
- [320] Zhu, X., Kim, B., Wang, Q. y Wu, Q. Recent advances in the sound insulation properties of bio-based materials. *BioResources*, 9 (1), 1764-1786, 2014.



[321] Zwicker, C. y Kosten, C. *Sound Absorbing Material*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1949.

### **APORTACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DE LA ELABORACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL**

- Revistas internacionales JCR

[322] Carbajo, J., Esquerdo, T., Ramis, J., Nadal, A., Denia, F.D. Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates. *Materiales de Construcción*, 65(320), 1-11, 2015.

- Congresos Internacionales

[323] Esquerdo, T., Nadal, A., Carbajo, J., Ramis, J., Acoustic characterization of cement matrix composites with lightweight aggregates. *Sustainable Materials. Science and Technology*, 2015.

[324] Micó, P., Nadal, A., Sastre, C., Esquerdo, T., Fast characterization of biobuilding materials using computer vision algorithms. *Sustainable Materials. Science and Technology*, 2015.

[325] Esquerdo, T., Carbajo, J., Ramis, J., Nadal, A., Denia, F.D. Acoustic behaviour of composites from lightweight aggregates. *44<sup>th</sup> Inter-Noise Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise 2015)*, 2015.

- Congresos nacionales

[326] Esquerdo, T., Nadal, A., Denia, F.D., Crespo, J., Pérez, L. Análisis morfológico de mezclas de materiales compuestos de matriz cementicia con aligerantes para la construcción. *I Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando Sinergias*, 67-70, 2013.

[327] Esquerdo, T., Nadal, A., Denia, F.D., Crespo, E., Maderuelo, R., Análisis morfológico de productos triturados mediante uso de programa informático de análisis de imágenes. *Cuadernos de Investigación en la Ingeniería. Avances en el Área de Materiales y sus Procesos*, 1, 10-117, 2014.

[328] Esquerdo, T., Sánchez, E.M., Nadal, A., Denia, F.D., Caracterización acústica experimental de productos elaborados con aligerantes para la construcción. *XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 9-16, 2014.

- [329] Esquerdo, T., Nadal, A., Maderuelo, R., Peydró, M., Comportamiento acústico de materiales compuestos a partir de vermiculita, *II Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando Sinergias*, 73-76, 2014.
- [330] Nadal, A., Maderuelo, R., Esquerdo, T., Meneses, J., Martín, M., Comportamiento acústico de materiales compuestos a partir de arlita, *II Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando Sinergias*, 77-80, 2014.
- [331] Micó, P., Nadal, A., Sastre, C., Esquerdo, T., Caracterización de materiales compuestos mediante técnicas de estereometría. *II Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando Sinergias*, 89-92, 2014.
- [332] Esquerdo, T., Denia, F.D., Nadal, A., Crespo, J. Análisis del comportamiento acústico de productos elaborados con aligerantes (vermiculita) y cemento portland. *Tecniacústica 2014. 45º Congreso español de acústica. 8º Congreso Ibérico de Acústica. Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental*. 810-816, 2014.
- [333] Esquerdo, T., Maderuelo, R., Meneses, J., Nadal, A., Denia, F.D., Martín, M. Análisis del comportamiento acústico de materiales compuestos de matriz cementicia con vermiculita. *Tecniacústica 2014. 45º Congreso Español de Acústica. 8º Congreso Ibérico de Acústica. Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental*. 817-824, 2014.
- [334] Esquerdo, T., Carbajo, J., Ramis, J., Nadal, A., Peydró, M. Caracterización físico-mecánica de materiales compuestos de matriz cementicia con aligerantes de construcción. *XI Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, 2015.
- [335] Micó, P., Nadal, A., Sastre, C., Esquerdo, T. Librería de funciones de Estereolitografía para el tratamiento de objetos tridimensionales. *I+D+i Campus de Alcoi. Creando Sinergias*, 2015.
- [336] Carbajo, J., Esquerdo, T., Nadal, A., Ramis, J., Denia, F.D. Absorción acústica de hormigón perforado. *46º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de acústica. EAA European Symposium on Virtual Acoustics and Ambisonics*, 2015.

**Anexo 1.**



En este anexo se incluyen las composiciones que han sido descartadas por falta de adhesión o de porosidad y también aquellas dosificaciones que ofrecen suficiente consistencia para ser manipuladas para los ensayos experimentales posteriores y favorecen el paso a un flujo de aire. En la Tabla A.1 se muestran las probetas realizadas con yeso y/o cemento de baja resistencia 32.5 R y que son desechadas por falta de adherencia o por falta de porosidad. El resto de muestras se han realizado con cemento de alta resistencia 52.5 R. Se indican además las composiciones estudiadas en el estudio preliminar en banco de ensayos acústicos disponible en el DIMM.

La obtención de las dosificaciones aptas para obtener probetas granulares se ha iniciado sobre la vermiculita de grano fino estudiada en este trabajo (V2). Una vez se han obtenido las cantidades adecuadas de v-c-a se ha analizado su efecto sobre la vermiculita de grano más grueso (V3).

Tabla A.1.- Probetas con cemento 32.5R en V2 sin cohesión.

v-c-a	v/c	v/a	c/a	
20-20-36.6	1	0.55	0.55	Sin consistencia
20-26.6-43.3	0.75	0.46	0.61	Sin consistencia
20-23.3-36.6	0.86	0.55	0.64	Sin consistencia

**Probetas con V2**



Figura A.1.- V2 35-49-24.5. Cemento 32.5 R, 50 mm, baja consistencia.



Figura A.2.- V2 35-51.5-26.3. Cemento 32.5 R, 50 mm, baja consistencia.

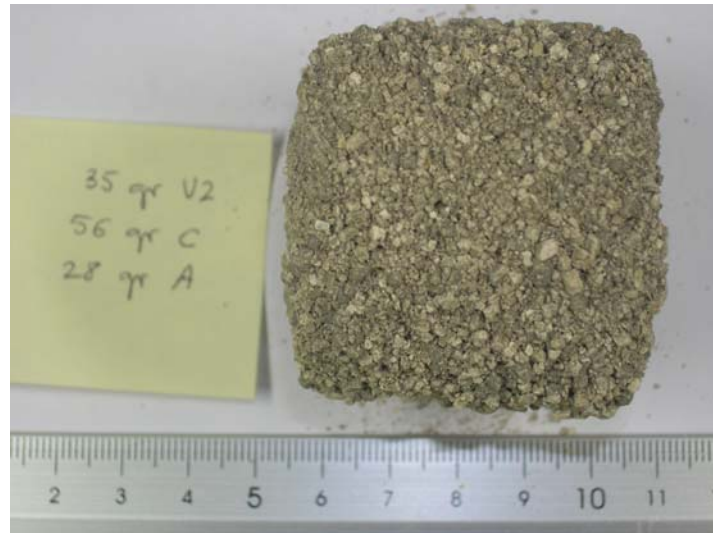


Figura A.3.- V2 35-56-28. Cemento 32.5 R, 50 mm, baja consistencia.

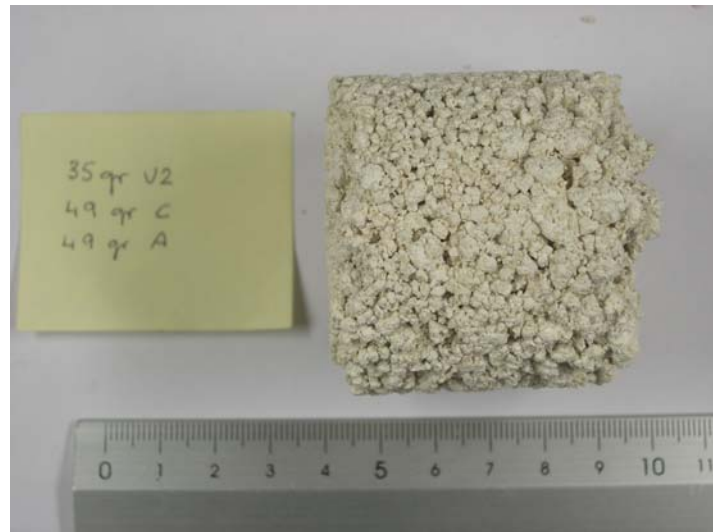


Figura A.4.- V2 35-49-49, 50 mm, baja consistencia.

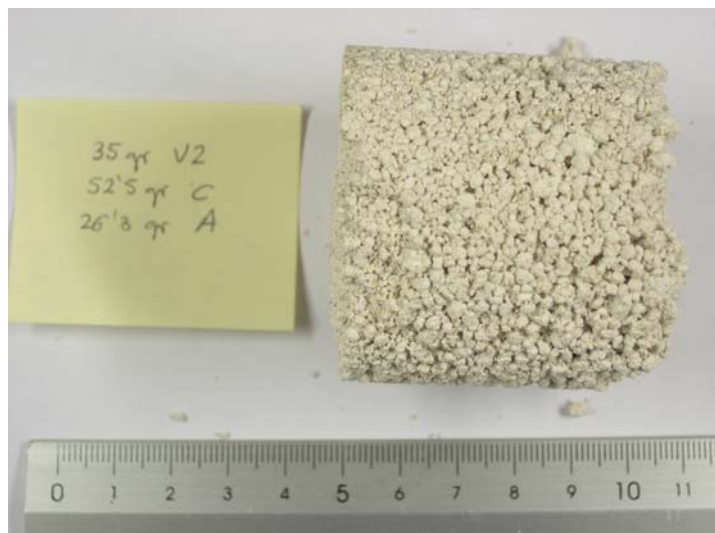


Figura A.5.- V2 35-52.5-26.3, 50 mm, baja consistencia.



Figura A.6.- V2 35-56-28, 50 mm, baja consistencia.





Figura A.7.- V2 35-59.5-29.8, 50 mm, baja consistencia.

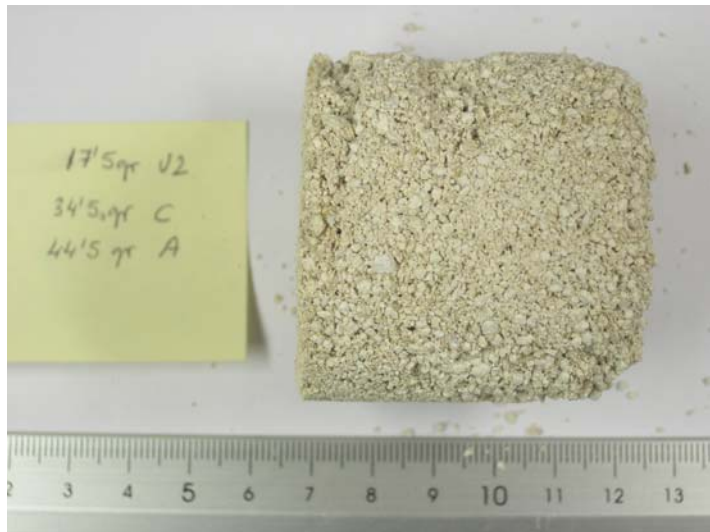


Figura A.8.- V2 17.5-34.5-44.5, 50 mm, baja consistencia.



Figura A.9.- V2 20-100-50, 50 mm, sin consistencia.



Figura A.10.- V2 20-75-37.5, 50 mm, sin consistencia.



Figura A.11.- V2 20-50-25, 50 mm, sin consistencia.

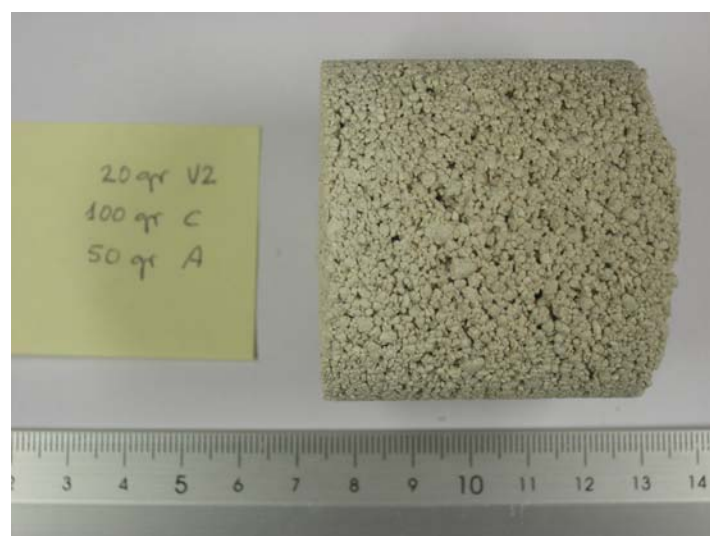


Figura A.12.- V2 20-100-50, 50 mm, con consistencia.

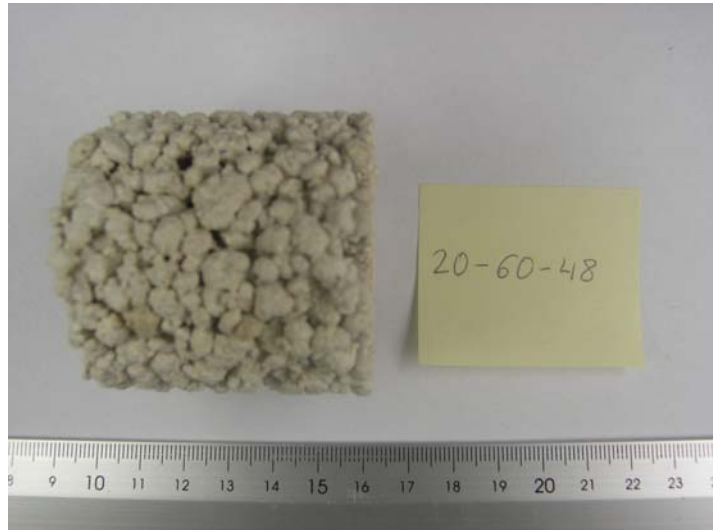


Figura A.13.- V2 20-60-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.14.- V2 20-60-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar.

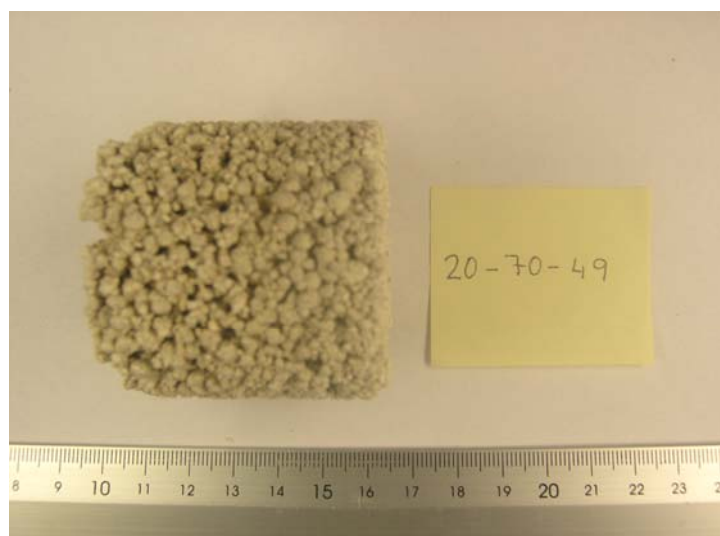


Figura A.15.- V2 20-70-49, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.16.- V2 20-70-49, 100 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.17.- V2 20-70-56, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.18.- V2 20-70-56, 100 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.19.- V2 20-80-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.20.- V2 20-80-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar.



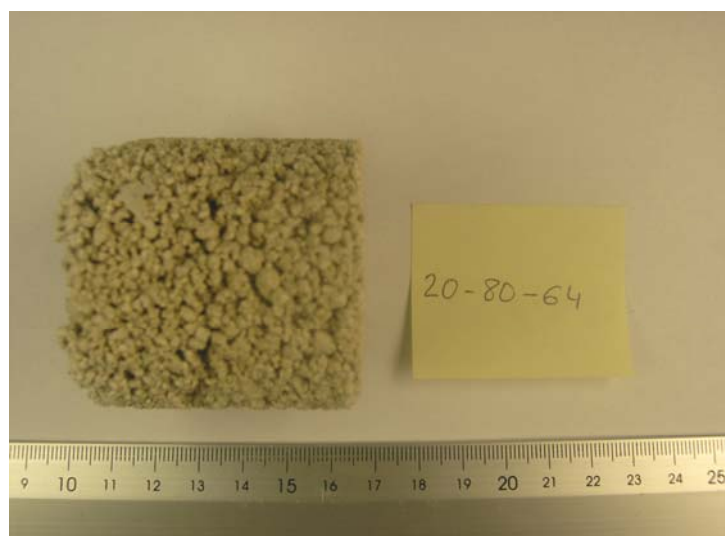


Figura A.21.- V2 20-80-64, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.22.- V2 20-80-64, 100 mm, analizada en estudio preliminar.





Figura A.23.- V2 20-100-60, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.24.- V2 20-100-60, 100 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.25.- V2 20-110-55, 50 mm, sin consistencia.



Figura A.26.- V2 20-110-55, 50 mm, amasado manual.

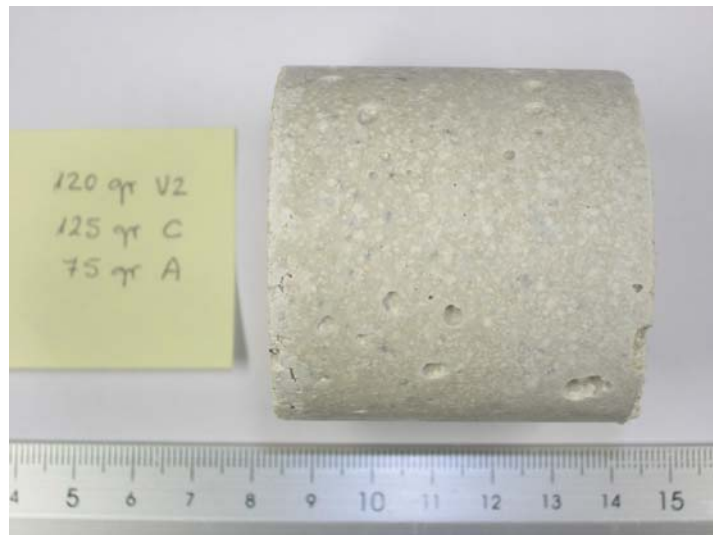


Figura A.27.- V2 20-125-75, 50 mm, humectada, sin porosidad.



Figura A.28.- V2 60-300-150, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar.



Figura A.29.- V2 120-100-50, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar.



Figura A.30.- V2 120-100-10, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar.



Figura A.31.- V2 120-100-0, 50 mm, humectada, sin porosidad, analizada en estudio preliminar.



Figura A.32.- V2 120-50-0, 50 mm, humectada, con porosidad, analizada en estudio preliminar.

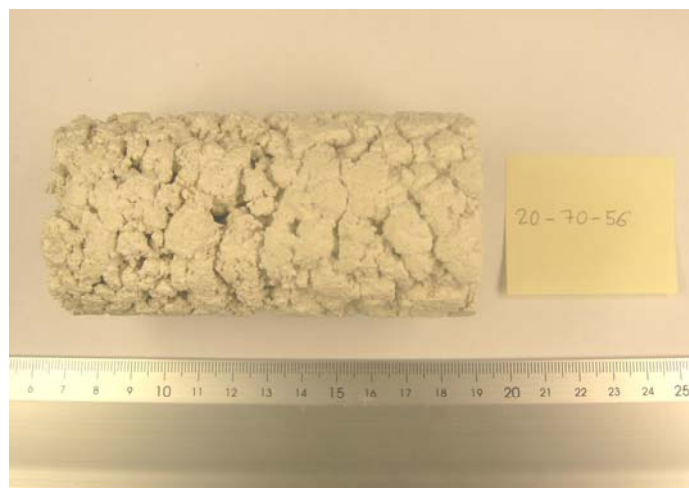


Figura A.33.- V2 20-70-56, 100 mm, amasado manual.



Figura A.34.- V2 20-80-64, 50 mm, amasado manual, analizada en estudio preliminar.



Figura A.35.- V2 20-80-64, 100 mm, amasado manual, analizada en estudio preliminar.

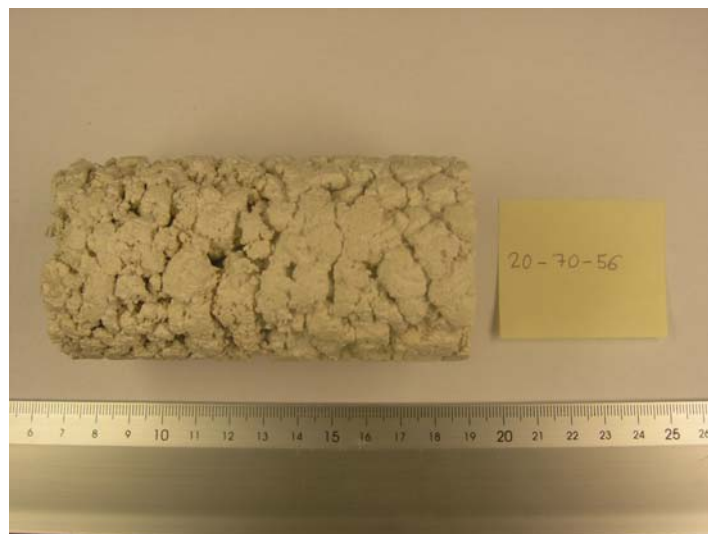


Figura A.36.- V2 20-70-56, 100 mm, amasado manual, analizada en estudio preliminar.

**Probetas con V3**

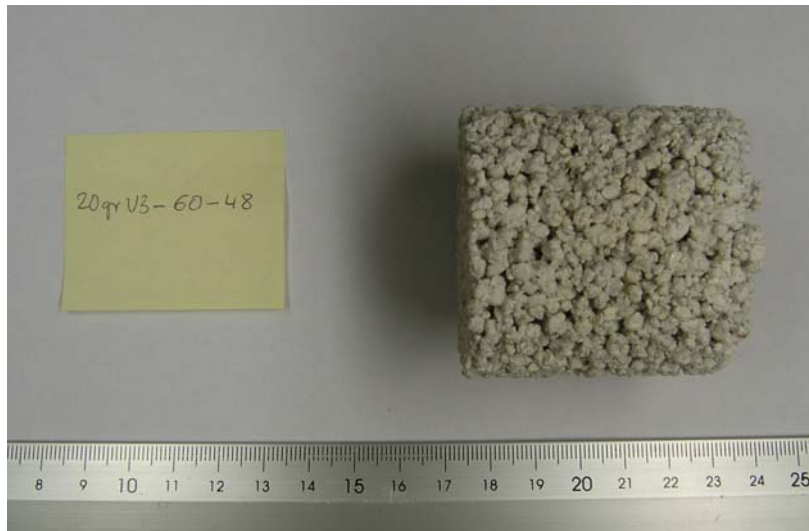


Figura A.37.- V3 20-60-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.38.- V3 20-60-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar.





Figura A.39.- V3 20-70-49, 50 mm, analizada en estudio preliminar.

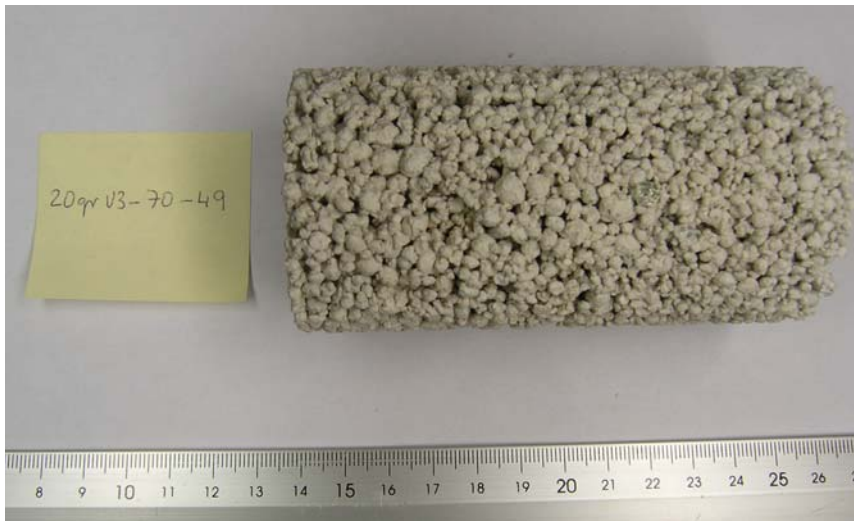


Figura A.40.- V3 20-70-49, 100 mm, analizada en estudio preliminar.

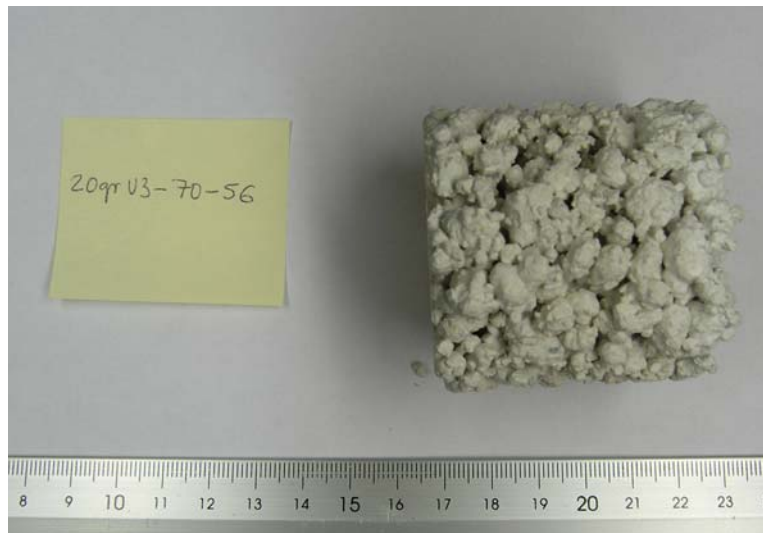


Figura A.41.- V3 20-70-56, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.42.- V3 20-70-56, 100 mm, analizada en estudio preliminar.

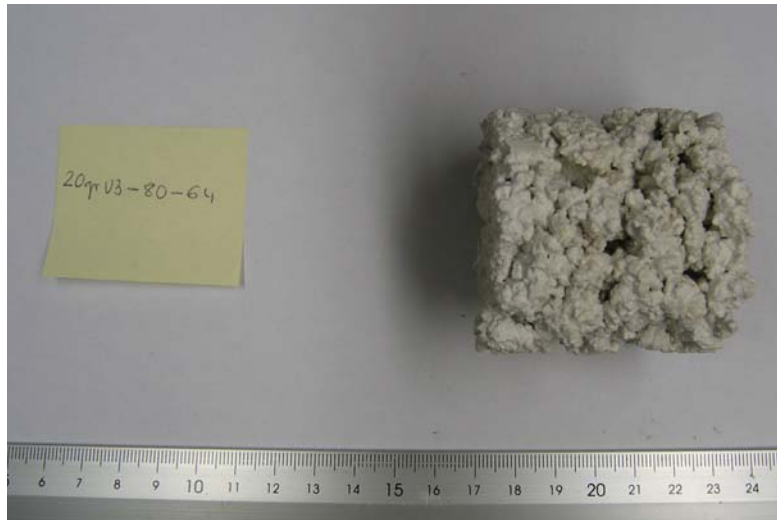


Figura A.43.- V3 20-80-64, 50 mm, analizada en estudio preliminar.

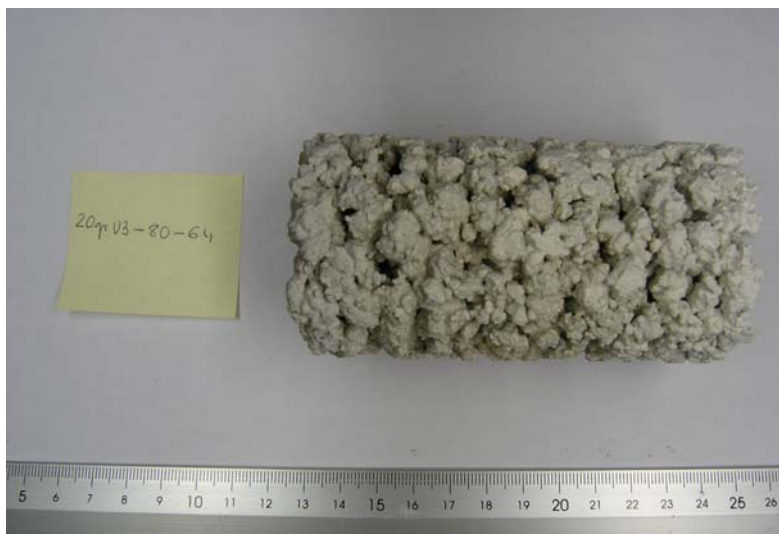


Figura A.44.- V3 20-80-64, 100 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.45.- V3 20-80-64, 100 mm, amasado manual.



Figura A.46.- V3 20-80-48, 50 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.47.- V3 20-80-48, 100 mm, analizada en estudio preliminar.



Figura A.48.- V3 20-100-60, 50 mm, analizada en estudio preliminar.

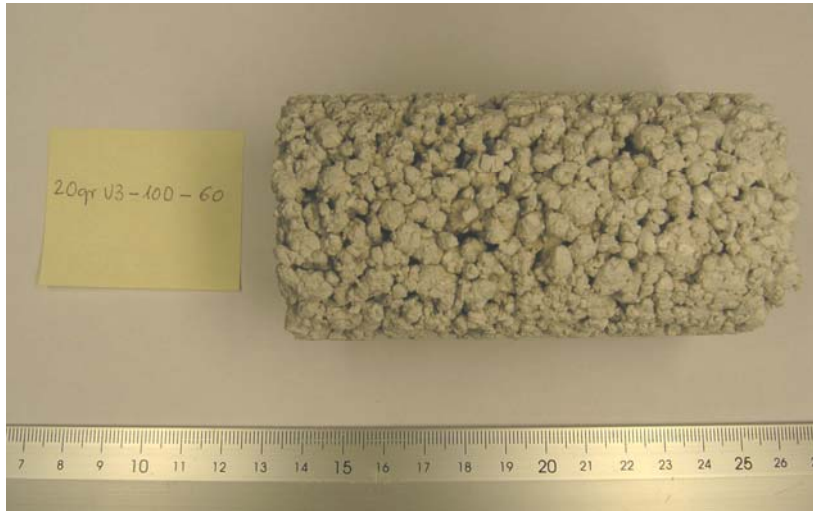


Figura A.49.- V3 20-100-60, 100 mm, analizada en estudio preliminar.

