

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>v</b>
<b>LISTADO DE SÍMBOLOS</b>	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1.- Introducción	<b>3</b>
1.2.- Objetivos	<b>4</b>
1.3.- Estructura de la tesis	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO</b>	<b>7</b>
2.1.- Introducción a la caracterización acústica de los materiales	<b>9</b>
2.2.- Clasificación de los métodos de medida	<b>10</b>
2.3.- Orígenes del tubo de impedancia acústica (o tubo de Kundt)	<b>11</b>
2.4.- Método basado en el tubo de impedancia acústica	<b>12</b>
2.4.1.- Primeros trabajos	<b>12</b>
2.4.2.- Década de los 80	<b>19</b>
2.4.3.- Década de los 90	<b>22</b>
2.4.4.- Siglo XXI	<b>32</b>
2.4.5.- Tendencias actuales	<b>34</b>
2.5.- Materiales para el aislamiento y acondicionamiento acústicos	<b>36</b>
2.5.1.- Introducción	<b>36</b>
2.5.2.- Materiales absorbentes del sonido de tipo poroso	<b>38</b>
2.5.2.1.- Materiales porosos rígidos	<b>38</b>
2.5.2.2.- Materiales porosos elásticos	<b>38</b>
2.5.3.- Otros materiales	<b>39</b>
2.5.3.1.- Materiales para argamasa	<b>39</b>
2.5.3.2.- Sistemas de paneles perforados	<b>39</b>
2.5.3.3.- Sistemas de paneles rígidos	<b>40</b>

2.5.3.4.- Absorbentes suspendidos	40
2.6.- Nuevos materiales provenientes del reciclado	41
<b>CAPÍTULO 3. MODELO MATEMÁTICO</b>	<b>45</b>
3.1.- Modelos matemáticos para materiales de tipo poroso y fibroso	47
3.1.1.- Modelo de Delany y Bazley	48
3.1.2.- Modelo de Miki	50
3.1.3.- Modelo de Allard y Champoux	51
3.1.4.- Modelo de Voronina	52
3.1.5.- Modelo de Dunn y Davern	57
3.1.5.1.- Impedancia acústica en materiales homogéneos de una capa	57
3.1.5.2.- Impedancia acústica en materiales multicapa	58
3.1.5.3.- Trabajo de Dunn y Davern	58
3.1.6.- Modelo de Garai y Pompoli	59
3.1.6.1.- Nuevo modelo para la resistividad (NMR)	59
3.1.6.2.- Nuevo modelo para la impedancia (NMI)	60
3.1.6.3.- Modelo integrado (MI)	61
3.2.- Modelo propuesto	62
3.3.- Conclusiones del modelo propuesto	71
<b>CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA</b>	<b>73</b>
4.1.- Introducción	75
4.2.- Coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia acústica	75
4.2.1.- Descripción del equipo de medida	76
4.2.2.- Resultados del coeficiente de absorción acústica	80
4.2.2.1.- Lana de roca de 4 cm de espesor	81
4.2.2.2.- Lana de roca de 1'5 cm de espesor	82
4.2.2.3.- Sándwich reciclado tricapa de fibras textiles	83
4.2.2.4.- Fibra de poliéster IG 700	84
4.2.2.5.- Fibra de poliéster RC 700	85
4.2.2.6.- Sándwich reciclado tricapa con lámina viscoelástica	86
4.2.2.7.- Sándwich tricapa de porexpán y lámina viscoelástica	87
4.2.2.8.- Sándwich tricapa de lana de roca y lámina viscoelástica	88

4.2.2.9.- Fibra de poliéster IG 400	89
4.2.2.10.- Fibra de poliéster RC 400	90
4.3.- Resistencia específica al flujo en tubo de impedancia acústica	91
4.3.1.- Introducción	91
4.3.2.- Resultados de la resistencia específica al flujo	92
4.3.2.1.- Lana de roca de 4 cm de espesor	92
4.3.2.2.- Lana de roca de 1'5 cm de espesor	93
4.3.2.3.- Sándwich reciclado tricapa de fibras textiles	94
4.3.2.4.- Fibra de poliéster IG 700	95
4.3.2.5.- Fibra de poliéster RC 700	96
4.3.2.6.- Sándwich reciclado tricapa con lámina viscoelástica	97
4.3.2.7.- Sándwich tricapa de porexpán y lámina viscoelástica	98
4.3.2.8.- Sándwich tricapa de lana de roca y lámina viscoelástica	99
4.3.2.9.- Fibra de poliéster IG 400	100
4.3.2.10.- Fibra de poliéster RC 400	101
4.4.- Evaluación de la incertidumbre en la medida de la resistencia al flujo	102
4.4.1.- Introducción	102
4.4.2.- Método experimental para el cálculo de la resistencia al flujo	105
4.4.3.- Análisis de los resultados	106
4.4.4.- Conclusiones	107
<b>CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA</b>	<b>109</b>
5.1.- Simulación numérica mediante el método de los elementos finitos	111
5.1.1.- Simulación numérica con ANSYS	112
5.1.2.- La acústica en conductos	113
5.1.2.1.- Ondas planas en tubos de paredes rígidas	113
5.1.2.2.- Campo sonoro en tubo terminado con impedancia arbitraria	114
5.1.2.3.- Resonancia en tubos	116
5.2.- Estudio de las ondas sonoras en un tubo de impedancia acústica	119
5.2.1.- Modelo analítico de frecuencias resonantes en tubos	119
5.2.2.- Medidas experimentales	121
5.2.3.- Modelo en elementos finitos	122

5.2.4.- Simulación numérica de la distribución de presiones en el interior de un tubo de impedancia acústica	128
5.3.- Aplicaciones industriales de la simulación numérica en tubos	134
5.3.1.- Transmisión del sonido en tubos acoplados	134
5.3.2.- Requerimientos de los filtros en los tubos de escape	137
5.4.- Modelo de silenciador en elementos finitos	138
5.4.1.- Modelo de filtro reactivo	138
5.4.2.- Modelo de filtro disipativo	147
5.4.2.1.- Frecuencias resonantes en tubo con muestra de lana de roca	148
5.4.2.2.- Resultados con el modelo de filtro disipativo	151
5.5.- Estudio paramétrico de los filtros mediante la simulación numérica	153
5.5.1.- Resultados para un filtro acústico de tipo reactivo	154
5.5.2.- Resultados para un filtro acústico de tipo disipativo	158
5.5.3.- Conclusiones del estudio paramétrico	167
5.6.- Evaluación de tubos con múltiples filtros	168
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES</b>	<b>173</b>
6.1.- Conclusiones	175
6.2.- Líneas futuras de trabajo	180
<b>ANEXO I. OTRAS MEDICIONES</b>	<b>183</b>
<b>ANEXO II. GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>	<b>197</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>211</b>