UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA
Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES A BASE DE NEUMÁTICO, CORCHO Y KENAF, PARA SER UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE SALAS

Doctorando: José Miguel Núñez Carroza
Badajoz, Junio de 2013

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA
Y DE LOS MATERIALES

D. ANTONIO MACÍAS GARCÍA, Dña. Mª ANGELES DÍAZ DÍEZ, profesores del departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales de la Escuela de Ingenierías Industriales, y D. EDUARDO MANUEL CUERDA CORREA, profesor del departamento de Química Orgánica e Inorgánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura,

CERTIFICAN:

Que la Tesis Doctoral realizada por D. JOSÉ MIGUEL NÚÑEZ CARROZA con el título "**PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES A BASE DE NEUMÁTICO, CORCHO Y KENAF, PARA SER UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE SALAS**" bajo nuestra dirección, reúne los requisitos necesarios de calidad, originalidad y presentación para optar al grado de Doctor, y está en condiciones de ser sometida a valoración de la Comisión encargada de juzgarla.

Dr. D. Antonio Macías García	Dra. Mª Ángeles Díaz Díez	Dr. Eduardo Manuel Cuerda Correa

Badajoz, Junio de 2013

A mi mujer Toñi, por su infinita paciencia
A mi pequeño Miguel, por las horas robadas

AGRADECIMIENTOS

Quiero en estas líneas dar mis más sinceras gracias al profesor Antonio Macías, por su constante e inagotable capacidad de trabajo. Por confiar en mí, por ser paciente y sobre todo, por siempre estar ahí. Quiero agradecer igualmente a los codirectores de este trabajo, Mª Ángeles Díaz y Eduardo Manuel Cuerda su apoyo y todo el tiempo dedicado, así como todos sus útiles consejos a lo largo de este período.

Me gustaría también recordar en estas líneas a mi familia, tanto a los que están como a los que nos dejaron, por el apoyo recibido en los buenos y, sobre todo, en los no tan buenos tiempos. Sentir el respaldo de los tuyos es lo que hace fijarte y alcanzar metas que algún día fueron impensables.

He de agradecer igualmente el apoyo de mi compañero y amigo Antonio Acero, quien me inició en esta materia. También me gustaría hacer mención al hoy gerente de INTROMAC, Manuel Martín, quien desde el departamento de acústica de este Instituto Tecnológico extremeño me ha apoyado en la realización de este trabajo.

Por último a todos mis amigos, compañeros y, en definitiva, todo aquel que con una simple palabra de aliento me ha dado ánimos para que hoy este trabajo sea toda una realidad.

INDICE

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN **2**

01.01. NEUMÁTICO, CORCHO Y KENAF **3**
01.02. ABSORBENTES ACÚSTICOS **53**
01.03. OBJETIVO E INTERÉS DE LA TESIS **63**
01.04. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO I **67**

CAPÍTULO II – MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES **71**

02.01. MATERIALES 74
02.02. MÉTODOS EXPERIMENTALES 98
02.03. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO II 195

CAPÍTULO III – RESULTADOS Y DISCUSIÓN **204**

03.01. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE LOS MATERIALES DE PARTIDA 206
03.02. ESTUDIO TEXTURAL DE LOS MATERIALES DE PARTIDA 222
03.03. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS 233
03.04. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LAS MUESTRAS AGLOMERADAS 245
03.05. EJEMPLO DE APLICACIÓN 363
03.06. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO III 387

CAPÍTULO VI - CONCLUSIÓN **388**

04.01. CONCLUSIÓN 389

ANEXO I - TABLAS **392**
ANEXO II - FIGURAS **396**
ANEXO III - FOTOGRAFÍAS **400**
ANEXO IV - EXPRESIONES **401**

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

01.01. NEUMÁTICO, CORCHO Y KENAF 3

01.01.01. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU) 3

01.01.02. EL CORCHO 23

01.01.03. EL KENAF 45

01.02. ABSORBENTES ACÚSTICOS 53

01.02.01. MATERIALES UTILIZADOS 53

01.02.02. ABSORBENTES ACÚSTICOS A BASE DE NEUMÁTICO, CORCHO Y KENAF 60

01.03. OBJETIVO E INTERÉS DE LA TESIS 63

01.04. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO I 67

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

01.01. NEUMÁTICO, CORCHO Y KENAF

01.01.01. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU)

UN PROBLEMA MEDIOAMBIENTAL

Los neumáticos fuera de uso constituyen un importante problema medioambiental en los países desarrollados en los que la dependencia del automóvil implica un importante consumo de este material. Los neumáticos fuera de uso (código 16.01.03. según la Lista Europea de Residuos[1]) no se clasifican como peligrosos, pero su producción en grandes cantidades sin una gestión de los residuos adecuada puede ocasionar importantes problemas paisajísticos y medioambientales.

Fotografía 01 "*Tsunami Negro*" – García Gálvez 2011
Fotografía tomada en Seseña (Castilla la Mancha), al fondo urbanización "El Quiñón", próxima a la R-4

El neumático se diseña para resistir severas condiciones meteorológicas y mecánicas, lo que conlleva elevar de forma notable el período de degradación de este material mediante su depósito en vertedero sin recuperar materia o energía (10 siglos según memoria TNU 2010 [2]). El vertido de neumáticos enteros fuera de uso, por sus características geométricas, limita la compactación de éstos en vertederos lo que

permite la acumulación de gases y lixiviados en su interior siendo susceptible de producir incendios en basureros y depósitos.

NORMATIVA Y GESTIÓN

Con motivo de lo anterior, la Unión Europea ha legislado al objeto de valorizar los NFU mostrándose en la siguiente tabla una sinopsis del panorama normativo comunitario y estatal:

Tabla 01 Normativa relacionada con los NFU

Disposición	Sinopsis
Ley 10/1998 de Residuos [3]	Tiene por objeto prevenir la producción de residuos fomentando por este orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización, con la finalidad de proteger el medioambiente y la salud de las personas.
Directiva 1999/31/CE [4]	Esta Directiva establece, mediante rigurosos requisitos técnicos y operativos sobre residuos y vertidos, medidas, procedimientos y orientaciones para impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos, en particular la contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el suelo y el aire, y del medio ambiente mundial, incluido el efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud humana, durante todo el ciclo de vida del vertedero.
Directiva 2000/53/CE [5]	Establece medidas destinadas, con carácter prioritario, a la prevención de los residuos procedentes de vehículos y, adicionalmente, a la reutilización, reciclado y otras formas de valorización de los vehículos al final de su vida útil y sus componentes, para así reducir la eliminación de residuos y mejorar la eficacia en la protección medioambiental de todos los agentes económicos que intervengan en el ciclo de vida de los vehículos y, más concretamente, de aquellos que intervengan directamente en el tratamiento de los vehículos al final de su vida útil. En el apartado 4 del Anexo I relativo a operaciones de tratamiento para fomentar el reciclado se incluye la "*retirada de neumáticos... si estos materiales no van a ser retirados en el proceso de fragmentación de tal modo que puedan reciclarse efectivamente como materiales*".
PNNFU 2001-2006 [6]	En este Plan se establecían una serie de objetivos ecológicos (recogidos en el apartado 2.2.) a conseguir mediante una serie de instrumentos (según el apartado 2.3.). Se recogía igualmente un plan de inversiones así como los medios de seguimiento y revisión del Plan. En la tabla 1 del Plan se pone de manifiesto el notable incremento en la generación de los neumáticos usados en España en la década de los noventa (139.000 *vs.* 330.000 t/año).

Real Decreto 1481/2001 [7]	El objeto de este Real Decreto es el establecimiento de un marco jurídico y técnico adecuado para las actividades de eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, al tiempo que regula las características de éstos y su correcta gestión y explotación. En relación a los NFU su vertido se regula en el artículo 5.3. en el que se cita: "*No se admitirán en ningún vertedero los residuos siguientes:... d) A partir del 16 de julio de 2003, neumáticos usados enteros, con exclusión de los neumáticos utilizados como elementos de protección en el vertedero, y a partir del 16 de julio de 2006, neumáticos usados troceados; no obstante, se admitirán los neumáticos de bicicleta y los neumáticos cuyo diámetro exterior sea superior a 1.400 milímetros.*"
Real Decreto 1619/2005 [8]	Esta disposición marca un ante y un después en la gestión de neumáticos fuera de uso, estableciendo el régimen jurídico de su producción y gestión, y fomentando, por este orden al igual que hiciera la Ley 10/1998, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, con la finalidad de proteger el medio ambiente (a excepción de los neumáticos de bicicleta y aquellos con diámetro superior a 1.400 mm).
PNNFU 2008-2015 [9]	Este Plan desarrolla de forma integrada la gestión de diferentes residuos abordando los NFU en el apartado 8 del único Anexo que contiene. A la vista del diagnóstico elaborado por la información suministrada por los primeros Sistemas Integrados de Gestión (SIG) marca una serie de objetivos cualitativos y cuantitativos a conseguir mediante una serie de medidas que se basan en la promoción del recauchutado y la promoción de la utilización de los materiales procedentes de los NFU, entre otras. Se establecen además los indicadores que permitirán realizar el seguimiento del grado de cumplimiento de los objetivos marcados.
Directiva 2008/98/CE [10]	Esta Directiva establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso. La novedad de esta disposición es la definición de "subproducto" (artículo 5) y la posibilidad de que los NFU pierdan la condición de residuos en los términos establecidos en el artículo 6.2.

Tal y como se ha señalado en la tabla resumen anterior el RD 1619/2005 [8] es la disposición que culmina todo un proceso de optimización de gestión de los NFU. Las principales novedades que se introducen en esta disposición que marcan un hito importante en la gestión de este tipo de residuos son las siguientes:

a) Se atribuye la responsabilidad básica de la gestión de los NFU a los productores de neumáticos, definidos en el artículo 2 como aquellos que fabriquen, importen o adquieran en otros estados miembros de la unión

Europea, neumáticos que sean puestos en el mercado nacional. Esta responsabilidad puede practicarse de forma individual o mediante la participación en un sistema integrado de gestión, existiendo actualmente dos en España (SIGNUS Ecovalor y TNU).

b) Los productores de neumáticos deben elaborar un plan empresarial de prevención (artículo 3) de neumáticos fuera de uso para minimizar las afecciones al medio ambiente que incluirá la identificación de los mecanismos aplicables para alargar la vida útil de sus productos y facilitar la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización.

c) Los sistemas integrados de gestión (artículo 8) garantizan la recogida de los neumáticos fuera de uso y su correcta gestión. La gestión del sistema se llevará a cabo a través de una entidad gestora que ha de tener personalidad jurídica propia y carecer de ánimo de lucro.

d) Los productores de neumáticos (artículo 4) deben garantizar que se alcanzan como mínimo los objetivos ecológicos que se establecen en el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006 y en sus sucesivas revisiones (actualmente Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015).

Los objetivos los objetivos cualitativos fijados por el apartado 8 (NFU) del Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015 son tres:

- Asegurar la correcta gestión ambiental de los NFU.
- Aplicar el principio de responsabilidad del productor a los responsables de la puesta en el mercado de los neumáticos
- Determinar objetivos de valorización y reciclaje de NFU.

Estos últimos objetivos cuantitativos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 02. Objetivos cuantitativos en % extraídos del PNNFU 2008-2015

	2008	2012	2015
PREVENCIÓN - Reducción - Recauchutado		 15	 8 20
VALORIZACIÓN	98	98	98
RECICLAJE	50 (40 del caucho en mezclas bituminosas)	52 (42 del caucho en mezclas bituminosas)	55 (45 del caucho en mezclas bituminosas)
	Acero: 100	Acero: 100	Acero: 100
VALORIZACIÓN ENERGÉTICA	30	25	20

Para conseguir los objetivos anteriores el propio Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015 fija una serie de medidas que de forma muy escueta se resumen en las siguientes líneas:

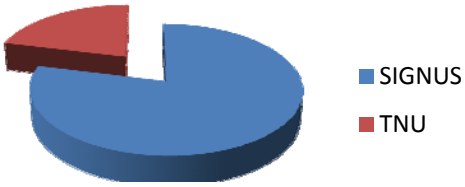
- Promoción del recauchutado, especialmente mediante la divulgación para los usuarios de vehículos de turismo, con el fin de obtener el mismo éxito que el obtenido en camiones y vehículos industriales.
- Promoción de la utilización de los materiales procedentes del reciclaje de los NFU. En este apartado destaca fundamentalmente su empleo en mezclas bituminosas (el 45% para el año 2015) si bien se debe fomentar el empleo de este material para la elaboración de un amplio abanico que cubra el otro 10% restante (hasta el 55% para este mismo año). Es interesante por tanto la obligación que establece este plan para las Administraciones Públicas al objeto de que fomenten el uso del polvo de caucho procedente del reciclado de NFU.

Hasta el momento actual se han constituido dos Sistemas Integrados de Gestión (SIG), uno de ellos denominado “SIGNUS”, cuya entidad gestora es “SIGNUS Ecovalor, S.L.”, legalmente establecido el 19 de mayo de 2005, y el otro denominado “TNU”, cuya entidad gestora es ”Tratamiento de Neumáticos Usados, S.L.”, constituido legalmente el 13 de julio de 2006. De las últimas memorias publicadas de ambas entidades se puede deducir en la siguiente tabla el resultado de la gestión y puesta en marcha de este marco jurídico que apuesta por dar solución medioambiental a la generación de neumáticos:

Tablas 03 y 04. Tratamiento de NFU 2010 SIGNUS - TNU
(1) Media ponderada

TRATAMIENTO DE GESTIÓN DE NFU EN ESPAÑA
Año 2010

SIG	Tn	%
SIGNUS [11]	195.480,00	78,87%
TNU [2]	52.356,17	21,13%
TOTAL	**247.836,17**	**100,00%**



Destino	TNU[2]	SIGNUS[11]	MEDIA P.[(1)]
REUTILIZACIÓN	13,07%	9,00%	**9,86%**
VALORIZACIÓN ENERGÉTICA	47,78%	40,00%	**41,64%**
VALORIZACIÓN MATERIAL	39,15%	51,00%	**48,50%**

PROPIEDADES [12,13]

La composición de los neumáticos puede variar de un continente a otro y levemente de una marca comercial a otra. Los componentes más habituales de los NFU en Europa se pueden ver en la tabla 5 (datos aportados por Pirelli Neumáticos S.A. 2001).

Tabla 05. Composición media de los neumáticos usados en la UE (en %)

Tipo	Peso (kg)	Caucho y elastómeros	Negro de humo	Metal (acero)	Textil	Aditivos y otros
Turismos	6,50-9,00	48	22	15	5	10
Vehículos pesados	55-80	43	21	27	0	9

Como puede apreciarse el componente que se encuentra en mayor proporción son los cauchos naturales y sintéticos; la relación entre ambos varía en función del uso que se le vaya a dar al neumático.

El negro de carbón se incorpora en proporciones variables en la fabricación de las distintas partes de los neumáticos, consiguiéndose variaciones en la rigidez, así como en la resistencia a tracción y la abrasión. Este componente es el principal responsable del color negro de los neumáticos, cuyo descubrimiento no deja de ser anecdótico. Las ruedas de los primeros automóviles estaban hechas de goma (caucho natural) que les confería un color blanquecino. Con el fin de evitar que se notase la suciedad, en 1885 la compañía de neumáticos B.F. Goodrich decidió fabricar ruedas negras para lo cual añadió negro de carbón, de forma que el caucho se tiñese de color negro. Para

sorpresa de esta compañía se descubrió que las ruedas así fabricadas eran hasta 5 veces más resistentes que las ruedas no coloreadas. En 1910 esta compañía introdujo el uso de negro de carbón en la fabricación de los neumáticos.

Los componentes metálicos del neumático proporcionan a su carcasa rigidez, resistencia y flexibilidad; constituyen un cordaje ligero de acero de alta resistencia. Los materiales textiles habitualmente utilizados en las carcasas de los neumáticos son el nailon, rayón y el poliéster. Estos materiales en función de su disposición respecto del sentido de rotación determinan la típica clasificación de neumáticos en diagonal y radial.

Durante la mezcla de materias primas para la fabricación del neumático se le añade al caucho y al negro de carbón una serie de aditivos como cargas, plastificantes, estabilizantes, agentes colorantes, acelerantes o retardantes del proceso de fabricación. La misión de estos aditivos es modificar las propiedades del caucho, en especial las relativas a dureza y resistencia así como su resistencia a la abrasión, aceites, oxígeno, disolventes químicos y al calor.

El azufre se aporta durante el proceso de vulcanización, combinándose a temperaturas entre 120 y 160 ºC con el caucho, lo que hace a éste más resistente y elástico, contribuyendo a mejorar la durabilidad del neumático.

Entre las características propias de los neumáticos están la resistencia a la acción de los mohos, al calor, a la humedad, a la luz solar y los rayos ultravioletas, a algunos aceites y a muchos disolventes. Asimismo, no son biodegradables, lo cual conlleva como hemos visto graves problemas medioambientales por su acumulación, ni tóxicos (residuo no peligroso según la lista LER) y retardan el desarrollo bacteriológico.

Desde el punto de vista térmico, los neumáticos, tanto de turismo como de camión, tienen prácticamente el mismo poder calorífico que el carbón (6.800 kcal/kg a 7.800 kcal/kg), y una tonelada de neumáticos equivale aproximadamente a 0,7 toneladas de fuel oil, característica que permite su valoración energética como veremos más adelante.

En cuanto a las propiedades físicas tal y como hemos visto hay que destacar que entre el 50 y el 60% de un neumático está compuesto de caucho natural o sintético. La densidad de un neumático entero es de unas 0,15 t/m^3.

En cuanto a sus propiedades químicas hay que indicar que los polímeros más comunes utilizados en los procesos productivos son el estireno-butadieno, poliisopreno y polibutadieno. Los NFU también contiene óxido de zinc, azufre y negro de carbón (20-30% combustión incompleta de hidrocarburos) y otros compuestos metálicos. El negro de carbón presenta un efecto antioxidante y antiozono, que en la valoración de los NFU como polvo de neumáticos en ligantes bituminosos, reduce el envejecimiento. La presencia de metales pesados es inferior al 0,1% en peso excepto para el zinc.

Tabla 06. Composición química elemental de un NFU [12]

Componentes	% peso
C	70,0
H	7,00
S	1,00
N	0,50
O	4,00
ZnO	1,00
Fe	16,0
Ácido esteárico	0,30
Halógenos	0,10
Ligandos cupríferos	0,02
Cd	0,001
Cr	0,009
Ni	0,008
Pb	0,005

En lo referente a sus propiedades mecánicas resaltar que debido a la forma tórica y a su elasticidad los NFU son difícilmente compactables.

PROCESAMIENTO O TRANSFORMACIÓN [13,14]

La valorización de los neumáticos abarca tres grandes tipos de tratamientos: el recauchutado, el reciclaje y su valorización energética. La promoción tanto del recauchutado como del reciclaje son las dos líneas fundamentales en las que hemos visto que se basa el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.

Centrándonos en el reciclaje cabe señalar que los neumáticos se pueden utilizar sin procesarlos o bien sometiéndolos previamente a un proceso de reducción de tamaño. Para la reducción de tamaño de los NFU existen distintos tipos de procedimientos que pueden ser desde totalmente mecánicos a otros que combinan tratamientos mecánicos con químicos o térmicos.

Los procesos mecánicos, en general comienzan bien triturando los neumáticos enteros, o bien cortándolos hasta tamaños comprendidos entre 25 y 300 mm. En algunos sistemas se eliminan los cables metálicos de los talones que los ajustan a las llantas previamente al troceado; en otros, los elementos metálicos son separados magnéticamente tras el troceado. Los materiales textiles del neumático se retiran mediante equipos de aspiración. Estos procesos se realizan a temperatura ambiente.

El sistema más completo de reducción mecánica de tamaño es el granulado. En una primera fase se trocean los neumáticos hasta tamaños entre 50 y 300 mm. En una segunda fase, además de reducir el material a tamaños entre 5 y 25 mm, se separan magnéticamente los elementos metálicos. Posteriormente el material puede someterse a otros procesos de granulado o molido hasta reducirlo al tamaño deseado, clasificándose finalmente por tamaños (0-0,5 mm, 0,5-2mm, 2-7 mm, 7-15 mm) en función de la aplicación a la que se destina. Durante la fase final se retira el material textil mediante equipos de aspiración.

Entre los procesos de reducción de tamaño que combinan los tratamientos mecánicos con los químicos o térmicos, destacan los criogénicos. Este tipo de proceso consiste en someter el material troceado a una cámara de enfriamiento, donde se utiliza nitrógeno líquido para enfriarlo entre –80 y –120 ºC, por debajo de la temperatura de transición vítrea. El material quebradizo procedente de la cámara es triturado mediante molinos de martillos y se separan los elementos metálicos y las fibras textiles. El material resultante es muy limpio, y puede alcanzar los 0,15 mm. Sin embargo, como contrapartida a este sistema de procesado se encuentran los costes de esta tecnología que son lo suficientemente elevados como para que no se extienda demasiado.

Los tamaños inferiores al mm se conocen como polvo de neumático y son los que presentan mayor interés práctico. Se obtiene por dos procedimientos: el criogénico y el

mecánico o ambiental. En cualquiera de ellos es preciso separar el caucho de los otros integrantes. Con el sistema criogénico se obtienen texturas muy lisas de características vítreas y corte angular, con baja superficie específica.

PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO [13,15]

PROPIEDADES FÍSICAS

El material procedente del troceado mecánico de neumáticos es plano, de forma irregular y puede contener trozos metálicos procedentes de las bandas de acero de la carcasa. El tamaño de este material puede variar entre 300 y 25 mm, salvo el sometido al proceso de granulado que, como hemos visto, puede presentar valores de granulometría inferiores dependiendo de la criba que se ponga. La densidad obtenida con este material sin compactar es variable en función del tamaño de los trozos, habiéndose obtenido valores entre 390 y 535 kg/m^3. La densidad media para rellenos con este material compactado varía entre 630 y 840 kg/m^3. Para el material más grueso procedente del granulado, con tamaño entre 76 y 13 mm, se han obtenido densidades sin compactar entre 320 y 490 kg/m^3, y densidades entre 570 y 730 kg/m^3 para el material compactado.

El polvo de neumático tiene el 100% de sus partículas de tamaño inferior a 2 mm. El peso específico del polvo de caucho es aproximadamente de 1,15 y el producto debe estar libre de material textil, metálico y otros contaminantes.

PROPIEDADES QUÍMICAS

Las principales componentes del material procesado son: caucho (natural y sintético), negro de carbón, azufre, óxido de zinc y aditivos. En condiciones ambientales normales los fragmentos de neumático no son reactivos.

PROPIEDADES MECÁNICAS

La resistencia al corte de los trozos de neumáticos depende del tamaño y forma de las partículas; no obstante lo anterior, se han obtenido [16] valores del ángulo de fricción interna comprendidos entre 19 y 26º, y valores de cohesión entre 4,3 kPa y 11,5 kPa.

Los ensayos de compresibilidad han dado como resultado módulos de elasticidad entre 770 y 1.200 kPa. La permeabilidad depende del índice de poros pero es comparable a la de una grava limpia.

OTRAS PROPIEDADES

Los neumáticos tienen un poder calorífico elevado, comprendido entre 28 - 35 MJ/kg. Una tonelada de neumáticos equivale aproximadamente a 0,7 toneladas de fuel-oil.

TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA VALORIZACIÓN MATERIAL Y ENERGÉTICA [17]

Tabla 07. Resumen de las tecnologías empleadas para la valorización material y energética de los NFU. CIMTAN [17]

Tecnología	Características	Ventajas	Desventajas
Tratamientos mecánicos	- Trituración previa de los NFU para reducir el tamaño.	- Permite la reducción del volumen, importante en vertederos - Facilita la molienda u otras técnicas	- No existen muchos estudios para mejora de la técnica.
Tecnologías de reducción de tamaño	- Molienda a temperatura ambiente (mecánica) - Molienda criogénica (enfriamiento caucho con N_2) - Molienda húmeda (chorro de agua)	- Consigue reducir a tamaños que van desde los 500 mm a inferiores de 500 μm. - Molienda criogénica permite partículas de menor tamaño, superficie más suave y menor oxidación superficial - Muy empleada	- Lixiviado de ZnO - Molienda a T.A.: coste elevado por la necesidad de un mantenimiento continuo de la maquinaria. Mayor sensibilidad a los agentes atmosféricos. - Molienda criogénica: coste adicional por precio del N_2 y fase adicional de secado.
Tecnologías de regeneración	- Desvulcanización: rotura selectiva del enlace químico entrecruzado del azufre en el caucho vulcanizado. - Recuperación: de caucho vulcanizado mediante desvulcanización o despolimerización.	- Consigue una descomposición de los componentes del neumático. - Permite reutilizar los componentes de caucho de los NFU para la fabricación de diferentes elementos.	- Caucho obtenido con propiedades físicas inferiores al original. - Importante una óptima elección de la materia prima y condiciones de proceso.

Pirólisis	- Calentamiento del granulado de NFU a temperatura moderada en ausencia de oxígeno.	- Descomposición de los componentes del neumático. - Gases pirolíticos tienen elevado poder calorífico. - negro de carbón se puede reutilizar para la fabricación de nuevos elementos. - Negro pirolítico para la coloración y absorbente luz UV.	- Problemática con la aplicación de los aceites condensables obtenidos. - Características de los productos depende de las condiciones del proceso. Importante un ajuste de los parámetros.

APLICACIONES [17]

De la tabla de objetivos cuantitativos del II PNFU (Apartado 8 del Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2009 [9]) se deduce la apuesta realizada por las Administraciones Públicas para el fomento del reciclaje y prevención, frente a la valorización energética. Es por tanto este primer apartado el que ofrece un amplio abanico de posibilidades para el caucho obtenido del reciclado de los NFU según se extrae Informe de Vigilancia Tecnológica elaborado por el CIMTAN (Círculo de Innovación en Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología):

VALORIZACIÓN MATERIAL

Aplicaciones de los neumáticos enteros:

a. Arrecifes artificiales: se espera que los neumáticos usados en la creación de arrecifes artificiales puedan perdurar más de 30 años [18]. Los neumáticos sumergidos en agua marina se encuentran en un medio estable químicamente y protegidos de la radiación ultravioleta, lo que limita la cantidad de lixiviados contaminantes [19].

b. Macizos de suelo reforzado: los NFU agrupados en sistemas de tipo geomalla permiten la formación de macizos de suelo reforzado mediante la interposición de capas superpuestas de neumáticos enteros rellenos de material granular compactado. Las estructuras neumático-suelo muestran propiedades mecánicas superiores a los suelos de origen y pueden presentar diferentes

aplicaciones específicas: como muros de sostenimiento de tierras, muros de estabilización en pie de taludes, muros antierosión en márgenes de cauces fluviales, rellenos ligeros en terraplenes [19].

c. Balas de neumáticos: las balas prismáticas de 1 tonelada de peso se fabrican con prensas hidráulicas, que compactan entre 100 y 125 neumáticos por unidad. Las dimensiones habituales son 75x150x135 cm. Son una buena alternativa a los gaviones metálicos en la construcción de estructuras de contención y presas. Se han utilizado con éxito en la estabilización de márgenes fluviales degradados por la erosión del agua [19].

d. Barreras acústicas: los neumáticos enteros constituyen la base de la estructura y se recubren con tierra para que no les afecte la luz. Como la estructura es inmóvil, el desgaste del material es mínimo [17].

e. Pistas provisionales: para la circulación de vehículos sobre terrenos poco estables en explotaciones forestales, accesos a canteras, etc. [20]

Aplicaciones de los neumáticos triturados:

a. Pistas de atletismo: los gránulos de caucho procedentes de NFU son una materia prima básica en la composición de los distintos revestimientos sintéticos, que podemos clasificarlos en revestimientos realizados “in situ”, mixtos y prefabricados, atendiendo a su puesta en obra, que a su vez pueden ser compactos o multicapas si el tipo de mezclas que lo componen es homogéneo o compuesto por capas de distintas calidades. En la construcción de una pista de atletismo se emplean aproximadamente de setenta a ochenta toneladas de gránulos de caucho, según el sistema que se instale y la superficie de la pista, siendo las partículas de caucho de un tamaño comprendido entre 1 y 4 mm [21].

b. Pistas multiuso: las características generales que deben cumplir todos los pavimentos deportivos son elasticidad, resistencia al deslizamiento y durabilidad. La elasticidad permite que el pavimento juegue un papel importante absorbiendo parte de la energía que el deportista transmite en sus

impactos con el pavimento evitando así lesiones en sus articulaciones y en sus caídas. Las capas elásticas de mejor calidad se fabrican con gránulos de caucho procedentes de la trituración de neumáticos usados, utilizando generalmente como aglomerante una resina de poliuretano, se fabrican en distintos espesores a pie de obra o se suministran prefabricadas en forma de rollos. La capa final de acabado debe garantizar la correcta estabilidad del deportista en contacto con el pavimento así como el bote de la pelota por lo que la textura y calidad de esta capa varía en función de distintos factores como son, la ubicación de la pista, en interior o al aire libre y el tipo de deporte[21].

c. Campos de hierba artificial: la hierba artificial consiste en una moqueta cuyas fibras sintéticas, de polietileno en su gran mayoría, imitan a la hierba natural, las fibras tienen una altura que varía de 50 a 60 mm, y están lubricadas para evitar quemaduras ante la posible caída de los jugadores. Como material de relleno se utilizan gránulos de caucho sueltos procedentes de neumáticos fuera de uso de un tamaño comprendido entre 0,5 y 2,0 mm combinados con arena de sílice, que por su mayor peso específico se sitúa en el fondo de la moqueta sirviendo de lastre del sistema. Esta moqueta que se presenta generalmente en rollos de 5 m de anchura, se coloca flotante sobre una infraestructura flexible acabada en aglomerado asfáltico preferentemente. Entre la base asfáltica y la moqueta opcionalmente se coloca una base elástica a base de gránulos de caucho también procedentes de neumáticos fuera de uso de tamaños de 2,0 a 7,0 mm aglomerados con poliuretano de unos 20 a 30 mm de espesor para dotar a la superficie de una elasticidad adicional. Como referencia en un campo de fútbol con base elástica de dimensiones reglamentarias puede llegar a consumir 140 toneladas de caucho de NFU de gránulos de distintos tamaños. Para obtener estas cantidades de caucho es necesario reciclar el equivalente a 36.000 neumáticos de turismo [22].

d. Pavimentos de seguridad: se utilizan principalmente en parques infantiles, guarderías y residencias de ancianos para evitar posibles lesiones por caídas al resultar un pavimento elástico. Su composición es a base de gránulos de caucho aglomerados con resinas de poliuretano [21].

e. Rellenos ligeros: empleados como relleno de terraplenes se utilizan fundamentalmente sobre cimientos compresibles o de baja capacidad portante para limitar las cargas transmitidas al cimiento y los asentamientos totales. Pueden realizar también mezclas de suelo o material granular con neumáticos troceados en aquellas situaciones donde la necesidad de una menor compresibilidad del relleno compense el aumento de peso frente al uso de neumáticos troceados en exclusiva. Los rellenos ligeros también pueden utilizarse sobre estructuras o tuberías enterradas, para limitar las cargas sobre la estructura y la concentración de tensiones por consolidación diferencial, ya que su deformabilidad permite la generación de un efecto bóveda sobre la estructura [19].

f. Aislamiento acústico: el caucho es un material con buena absorción acústica, por lo que resulta adecuado para la fabricación de pantallas antirruido en carreteras. Los NFU troceados, así como enteros o embalados, han sido utilizados como material de relleno de terraplenes longitudinales utilizados como barreras antirruido. Paneles de caucho granulado, aglomerado con resinas de poliuretano, se han utilizado como capa de aislamiento en barreras acústicas prefabricadas [19].

g. Aislamiento térmico: se puede considerar que los neumáticos troceados presentan una capacidad de aislamiento térmico ocho veces superior a la de un suelo. La utilización de rellenos de NFU en terraplenes de carreteras proporciona una protección eficaz frente a la penetración de la helada en el suelo subyacente. El problema de la pérdida de capacidad portante de los suelos durante el deshielo primaveral es un factor primordial de diseño de carreteras en zonas frías [19].

h. Capa de drenaje en vertederos: para la recogida de lixiviados se establece la instalación de una capa de drenaje de espesor superior a 0,50 m. Esta capa requiere una permeabilidad que los rellenos de NFU troceados superan. Este material también es utilizado como relleno de las zanjas o pozos de drenaje de recolección, protegido de la contaminación mediante una envuelta geotextil [19].

i. Sistemas de drenaje en carreteras: se emplean los NFU troceados como material de relleno de capas y zanjas drenantes en carreteras, las propiedades elásticas del relleno proporcionan una protección mecánica a las tuberías. Las propiedades aislantes del caucho hacen que sea un material de relleno idóneo en zonas sometidas a temperaturas bajas, impidiendo la congelación del agua contenida en él [19].

j. Equipamientos viales y ferroviarios: se han utilizado productos reciclados en equipamientos viales prefabricados (bordillos, badenes, isletas, bandas sonoras, conos de señalización, barreras de seguridad, quitamiedos, etc.). En los equipamientos ferroviarios destaca la utilización de losetas flexibles en pasos a nivel. Existen también algunas experiencias en la fabricación de traviesas compuestas [19].

k. Calzado: las suelas de los zapatos fabricadas con polvo o granulado son muy duraderas [17].

l. Colchonetas para animales: recubiertas por dos capas de tela sintética la cual protege al granulado contra los rayos ultravioleta. La capa interior es impermeable y puede lavarse y desinfectarse fácilmente [17].

Aplicaciones en materiales bituminosos

Según el II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso integrado dentro del Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015 [9] las Administraciones Públicas fomentarán el uso del polvo de caucho procedente del reciclado de NFU como material constituyente de diversos productos, fundamentalmente en las obras públicas y, en particular, en las mezclas bituminosas para la construcción de carreteras, siempre que sea técnica y económicamente posible. Se ha estimado que la apertura de este mercado de carreteras al caucho, podría dar salida al 40 % de los NFU generados.

El “Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas” [23] pretende recoger el estado de conocimientos y experiencias de nuestro país en este campo, para ayudar a los técnicos y Administraciones responsables de carreteras a utilizar

adecuadamente este material. El objetivo del Manual es establecer recomendaciones sobre el empleo de los materiales obtenidos en la trituración fina del caucho procedente de neumáticos fuera de uso (polvo de caucho de NFU) en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para carreteras. Se presentan también criterios para la selección y uso del polvo de caucho y para la dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad de las unidades de obra correspondientes.

La incorporación de polvo de caucho a una mezcla bituminosa modifica sus propiedades reológicas y mejora sus prestaciones como material para carreteras [23]. Actualmente son posibles dos métodos de incorporación del polvo de caucho procedente de NFU:

a. "vía húmeda": el polvo de NFU se incorpora al betún asfáltico previamente a su introducción en la amasadora de la central de fabricación de la mezcla bituminosa en caliente, obteniéndose un betún modificado o mejorado por el caucho. La forma de fabricar este ligante puede ser mediante la utilización de una planta de fabricación de betunes modificados o bien mediante una instalación *in situ* ubicada en la planta de fabricación de la mezcla bituminosa, entre el depósito de betún y la amasadora de la mezcla bituminosa. [24] El Manual define tres clases de ligantes que incorporan polvo de caucho: "betún mejorado con caucho (BC)", "betún modificado con caucho (BMC)" y "betún modificado de alta viscosidad con caucho (BMAVC)". Los betunes mejorados con caucho presentan características empíricas mejores que las de los betunes asfálticos y el porcentaje de polvo de caucho suele estar comprendido entre un 8 y 12 %. Los betunes modificados con caucho presentan propiedades empíricas similares a las de los betunes modificados con polímeros y la cantidad de polvo de caucho es generalmente mayor del 12 % e inferior al 15 %. Finalmente los betunes modificados de alta viscosidad con caucho se fabrican con una mayor proporción de polvo de caucho (generalmente entre 15- 22%) [23].

b. "vía seca": consiste en introducir el polvo procedente de NFU directamente en la amasadora de la central de fabricación de la mezcla bituminosa, como si de un polvo mineral se tratara [24]. El polvo de caucho actúa en parte como árido, pero las partículas más finas interaccionan con el betún modificando sus

propiedades, consiguiéndose así mejorar el comportamiento de la mezcla bituminosa [23]. En el proceso por vía seca pueden diferenciarse dos técnicas, según el tamaño máximo del polvo de caucho. La primera utiliza tamaños máximos elevados, de hasta 2 mm y en la segunda técnica se emplea polvo de caucho de menor tamaño (todo pasa por el tamiz 0.5 mm) y en menor proporción [23].

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

En ocasiones el caucho usado puede ser utilizado como combustible aprovechando el poder calorífico que presenta este material (recordemos que una tonelada de neumático equivale aproximadamente a 0,70 toneladas de fuel-oil) [25]. Los neumáticos contienen más de un 90% de materia orgánica y poseen un valor calorífico superior al del carbón [26].

El tratamiento térmico de neumáticos usados se subdivide en general en combustión (incineración), gasificación y pirólisis y presenta ventajas tales como: [27]

- La posible reducción del volumen de NFUs en más del 90%
- Producción de una energía neta con posible recuperación material
- Es un procedimiento en teoría no contaminante y capaz de destruir la mayor parte de las sustancias orgánicas que pueden ser perjudiciales para el medioambiente y para el ser humano.

El proceso conlleva problemas asociados como: [27]

- Los depósitos de cenizas: las sales de plomo y cadmio utilizadas como estabilizadores en la producción de neumáticos quedan como cenizas, causando problemas de eliminación.
- Gases tóxicos: cuando los neumáticos se queman se generan algunos gases como SO_2, H_2S, HCl, HCN, etc, se requieren tratamientos adicionales para una gestión correcta.
- Hollín: una quema insuficiente del material de desecho produce hollín, que en general requiere una mayor combustión y temperaturas de llama más elevadas.
- Necesidad de incineradoras apropiadas.

La combustión de los residuos de neumáticos sería una manera sencilla de eliminar el residuo y generar energía, pero las emisiones producidas (dioxinas, compuestos aromáticos policíclicos etc...) hacen que esto no sea posible desde un punto de vista medioambiental, [28] motivo por el cual la normativa de gestión de los NFU potencia en mayor medida las alternativas de recauchutado y reciclaje. Sin embargo, procesos térmicos como la pirolisis pueden ser una buena alternativa a los procesos de combustión directa, ya que no se producen emisiones incontroladas y se logra recuperar productos sólidos y líquidos. [29–32]

La valorización energética representó en Europa en 2006 más del 34% de las soluciones escogidas para gestionar los NFU comparadas con el 14% en 1992.[33]

Producción de combustible:

La utilización como combustible trata de aprovechar la energía térmica que produce la combustión de la goma de los neumáticos usados. Los NFU pueden representar una alternativa a los combustibles tradicionales. Pueden presentar valores energéticos similares al carbón pero con menores porcentajes de azufre. [33]

Los NFU pueden utilizarse como combustible en: [33]

- Centrales eléctricas sin necesidad de modificar la instalación.
- Cementeras: los neumáticos troceados son utilizados como combustible alternativo en los hornos de las cementeras. Esta aplicación permite reutilizar todos los componentes del neumático. Los componentes combustibles del neumático se incineran para generar calor y otras sustancias del neumático como sílice y aceros son utilizados como materias primas precursoras para la producción de cemento, reemplazando recursos naturales como vidrio y óxidos férricos.

Según datos de la ETRma, [33] (European Tyre & Rubber Manufacturers' Association) antigua BLIC (Bureau de Liaison des Industries du Caoutchouc) la industria del cemento tiene capacidad para recuperar materialmente en torno a un 25% de NFU. En Europa existen entre 250 y 300 cementeras que podrían potencialmente utilizar el equivalente a la cantidad total de neumáticos usados generados anualmente. Pero esta aplicación requeriría algunas modificaciones mecánicas de la planta.

Aprovechamiento energético por gasificación:

La gasificación [34] es un proceso termoquímico de descomposición de la materia orgánica en un ambiente caracterizado por un déficit de aire respecto al estequiométrico necesario para realizar la combustión completa de la misma. Es un proceso a alta temperatura (del orden de 600ºC) donde el combustible sólido reacciona con un agente gasificante (aire, oxígeno o vapor de agua).

En el tratamiento de NFU vía gasificación se obtienen 2 fases; una sólida (mezcla de negro de carbón y acero) en aproximadamente un 37 % en peso del total de los productos del proceso, y una fase gaseosa en un 63%.

Los dos componentes de la fase sólida se separan fácilmente con un tropel rotatorio de tamizado. El gas generado sale de los gasógenos a una temperatura superior a 350ºC y contiene dos fases separables:

- Fase gaseosa no condensable; formada por una amplia gama de gases de gasificación (CO, H_2, CO_2, N_2, hidrocarburos tipo C1, C2, C3, C4,…). Representa, de media, un 38% en peso del total de NFU tratados en el proceso, empleados como valorización energética en motores de gas adaptados al respecto.

- Fase gaseosa condensable; constituida por todo el espectro de alquitranes, aceites medianos y ligeros, etc. Constituye un 25% del peso total de los NFU tratados. Los aceites condensados se pueden valorizar energéticamente como sustitutivo de un combustible ligero o emplear en aplicaciones industriales específicas.

Aprovechamiento energético mediante pirólisis

La pirólisis se ha considerado como una de las soluciones más factibles para valorizar NFU y que además puede proporcionar un provecho económico a gran escala. El interés se centra en el hecho de que los productos obtenidos por este proceso son de fácil manipulación, almacenamiento y transporte [35].

La fracción gaseosa generada puede ser utilizada como combustible [36] para el proceso autotérmico [37]. Los materiales carbonosos pueden ser utilizados como combustible de alta calidad o como precursores de negro de carbón o carbón activo [37].

El producto líquido es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de 5-20 átomos de carbono con alto contenido en aromáticos [38]. Tras la destilación, la fracción líquida puede emplearse como aceites o ser mezclada para obtener combustibles para automoción [39]. También se obtienen otros productos químicos como benceno, tolueno, xilenos y limonenos [36,40–42].

Por último, la fracción sólida puede utilizarse como combustible sólido o como negro de carbón de bajo grado [36,43].

Se ha demostrado que, mediante tratamiento térmico de neumáticos usados [44], es posible conseguir un negro de carbón pirolítico de una calidad similar a uno comercial de la serie 700 e inferiores. Esto amplía la gama de aplicaciones. Las características del negro de carbón reciclado son diferentes a las del negro de carbón convencional, pero con la optimización se llegan a aproximar. El uso del negro pirolítico para coloración y para absorbente de luz UV podría ofrecerse fácilmente tanto para productos plásticos como para productos de caucho.

La viabilidad económica de la recuperación de neumáticos usados mediante pirólisis depende claramente de una mejora de las propiedades finales de los productos pirolíticos y en sus salidas comerciales [45].

01.01.02. EL CORCHO

El corcho es un producto natural obtenido de la corteza del alcornoque, árbol típico de la zona mediterránea y de gran relevancia en Extremadura. Debido a sus propiedades el corcho es el material idóneo para industria taponera, pero tiene además diversas aplicaciones en la construcción, la industria, la artesanía,.... Lo cual hace del corcho, sin lugar a dudas, un recurso natural fundamental dentro del tejido industrial y empresarial en Extremadura.

EL ALCORNOQUE [46]

El alcornoque, de nombre científico *Quercus suber, L.*, es un árbol perteneciente a la familia de las Fagáceas (*Fagaceae*), la cual incluye también a la encina (*Quercus ilex, L.*), los diversos robles (*Quercus robur*) y el castaño (*Castanea sativa, Miller*).

Es un árbol de tamaño medio que puede alcanzar hasta 20 ó 25 m de altura. Su copa es amplia y el tronco puede llegar a ser muy grueso. Su corteza o corcha es de tipo suberoso, es decir, está compuesta por corcho, siendo relativamente blanda y esponjosa, ligera y con grietas muy profundas, longitudinales desde jóvenes en los árboles que no han sido descorchados nunca o desde hace tiempo; a esta corcha se le llama bornizo. Es de color grisáceo y llega a alcanzar espesores de más de 25 cm. En los árboles que han sido descorchados, la corteza interior, llamada capa madre, es de color amarillento que en seguida pasa a rojo oscuro y luego a negruzco. Esta corteza es lisa, y comienza con los años a resquebrajarse con el crecimiento hacia el exterior, aunque mucho menos que en el corcho bornizo original.

Las hojas son perennes, con forma oval a oblonga y borde algo dentado o espinoso. Las flores masculinas aparecen en amentos o espigas colgantes en el extremo de las ramas jóvenes y las femeninas solitarias o en pequeños grupos. El fruto es una bellota castaño rojiza de tamaño variable.

Los frutos del alcornoque son muy apreciados para la alimentación del ganado, ya que, aunque son más amargos que los de la encina, maduran de forma escalonada a lo largo del otoño y el invierno. La producción de bellota varía mucho de un árbol a otro, dependiendo de las podas, sustrato, edad, características genéticas, etc.

La corteza suberosa del alcornoque tiene la misión natural de protegerlo frente a los frecuentes incendios que se producen en los bosques mediterráneos. Al quemarse, la parte interna de la corcha se cierra con el calor y evita la entrada de oxígeno y la combustión, protegiendo a las partes internas del árbol y rebrotando en la siguiente estación. En Extremadura, donde el fuego ha castigado fuertemente zonas de monte repoblada en los años sesenta con pinos (como por ejemplo la Sierra de Gata), se ha optado por realizar nuevas plantaciones con el empleo de este árbol, más resistente a los incendios.

Actualmente el corcho es el principal aprovechamiento del alcornoque, con múltiples aplicaciones en la artesanía y en la industria. La aplicación principal es la industria taponera, si bien este material tiene cabida en otro tipo de aplicaciones tales como colmenas, aislantes, parquets y otros elementos de construcción, juntas de automóviles, calzado, papel de corcho, confección de ropa y otros objetos de uso diario, etc.

La madre o casca es muy rica en taninos, por lo cual ha sido utilizada como astringente y, sobre todo, para curtir pieles. En otro tiempo este fue el uso más rentable del alcornoque, por lo cual se talaron o arrancaron enormes extensiones de bosque alcornocal.

La madera es de color pardo-rojiza, muy dura y con una elevada densidad, con radios anchos y marcados. Es irregular y de fácil agrietamiento en el secado, proporcionando entre otras aplicaciones, leña y carbón excelentes.

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL ALCORNOCAL [46]

La distribución mundial del alcornoque de forma natural se limita a la parte occidental del Mediterráneo, llegando a las costas del Atlántico. La superficie mundial de alcornocal es de unas 2.500.000 hectáreas (según estudio del IPROCOR, Instituto del Corcho, Madera y Carbón de Extremadura, 1999). En esta cifra se incluyen masas de muy diverso tipo, densidad y estado de degradación, por lo cual hay que tomarlas con reservas. Esta superficie se reparte aproximadamente así:

Tabla 08. Distribución Geográfica del Alcornocal
Fuente: IPROCOR
* Datos no actualizados

País	Superficie (Has.)
Portugal	860.000
España	725.000
Argelia	440.000
Marruecos	375.000
Italia	144.000
Túnez	99.000*
Francia	44.000
Total	**2.687.000**

Como se puede observar en la tabla anterior, más de la mitad de los alcornocales mundiales se encuentran en la Península Ibérica, y prácticamente el resto en los países del Magreb, con áreas de menor importancia en el Sureste y Suroeste de Francia y en Italia. Se incluyen en estos últimos países los importantes alcornocales de Córcega, Cerdeña y Sicilia. Esta tabla elaborada por el IPROCOR coincide con los estudios de conservación de los recursos genéticos de los Quercus elaborado por la Universidad Politécnica de Madrid [47].

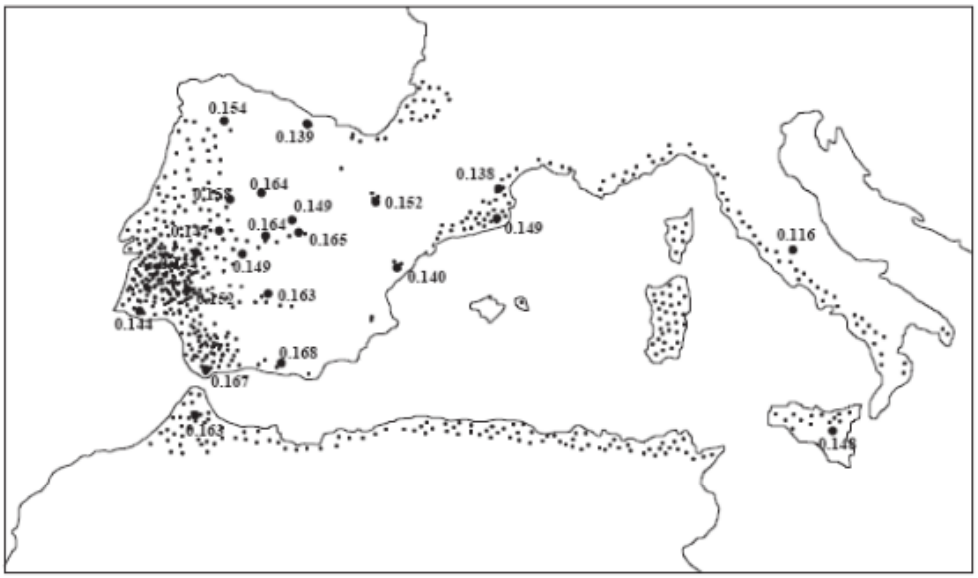


Figura 01. Valores de diversidad genotípica Quecus
(Jiménez, 2000)

En la Península Ibérica, el alcornoque aparece en todo Portugal, y en todo el suroeste español, con otra zona importante en la provincia de Gerona, en parte de Barcelona y masas aisladas que aparecen en el Sur de Galicia, Asturias, Santander, Euskadi, Zaragoza, Castellón, Murcia, Menorca, etc, indicando una mayor distribución en otros tiempos más húmedos y cálidos. La superficie en el ámbito de la geografía española se distribuye por comunidades autónomas aproximadamente como sigue:

Tabla 09. Distribución Geográfica del Alcornocal por CCAA en España
Fuente: IPROCOR, 1999

Comunidad Autónoma	Superficie (Has.)
Andalucía	350.000
Extremadura	250.000
Cataluña	75.000
Otras	50.000
Total	**725.000**

De lo que se deduce la importancia que tienen los recursos materiales obtenidos del alcornocal para el sector industrial de Extremadura y en general para su economía.

VALORES ECOLÓGICOS DEL ALCORNOCAL [46]

El alcornoque es la especie clímax a lo largo de varios millones de hectáreas alrededor del Mediterráneo occidental, es decir, es la especie forestal reina, la mejor adaptada y dotada para sobrevivir y dominar en este ecosistema. De forma natural, forma bosques densos que albergan a una gran variedad de especies de fauna y flora, convirtiendo a estas masas en verdaderas reservas ecológicas.

FAUNA

En los bosques y dehesas de alcornoque viven más de 400 especies de vertebrados, la mayor parte de ellas especies protegidas y muchas de ellas amenazadas de extinción a nivel mundial. Entre estas destacan aves como el águila imperial, el buitre negro o la cigüeña negra, y mamíferos como el lince ibérico. Las dehesas de alcornoques y encinas también son un lugar de gran importancia para la invernada de aves procedentes del centro y norte de Europa, destacando la invernada de la casi totalidad de la población europea occidental de grullas y una parte importante de las palomas torcaces, zorzales y otras. Brevemente, las especies más destacables serían:

- Águila imperial: tan solo sobreviven unas 150 parejas en todo el mundo, prácticamente todas en España y básicamente en Extremadura y su entorno inmediato. Es una especie íntimamente ligada a los alcornocales, tanto que una gran parte de los nidos existentes se encuentran situados sobre este árbol. Utiliza las dehesas como zonas de caza, y los bosques y zonas de matorral tranquilas como zona de cría.

- Lince: actualmente solo sobrevive este bello animal en el mundo en las zonas más apartadas de bosque y matorral mediterráneo de la Península Ibérica, muchas de sus poblaciones situándose en zonas de alcornocal.

- Buitre negro: es la especie de buitre más ligada al bosque mediterráneo, situándose sus nidos a menudo sobre alcornoques. Sus principales

poblaciones mundiales se encuentran en los bosques mediterráneos de encinas y alcornoques de la Península Ibérica.

- Cigüeña negra: esta rara y desconfiada ave necesita bosques o roquedos tranquilos para criar, situándose sus mejores poblaciones en Europa occidental en los bosques mediterráneos extremeños.

- Diversidad: otros muchos tipos de aves, mamíferos, reptiles, insectos, etc., viven de forma exclusiva o no, en los diferentes tipos de alcornocal (bosques, dehesas y matorrales).

FLORA Y VEGETACIÓN

Los alcornocales en sus diversas formas y áreas de distribución albergan una gran variedad de flora, del orden probablemente de miles de especies, siendo en este aspecto los alcornocales de Cádiz especialmente ricos, con numerosas especies de plantas únicas en el mundo o compartidas únicamente con zonas similares del Norte de Marruecos. Según algunos estudios, los pastizales de las dehesas pueden ser los sistemas con más diversidad de plantas herbáceas por m^2 del mundo, lo cual se debe a la antigüedad de este uso de los bosques, al que se han ido adaptando numerosas plantas. También numerosos tipos de hongos, entre ellos diversas especies que solo viven con el alcornoque, se desarrollan en este tipo de bosques.

SUELOS, AGUA Y CLIMA

Los bosques de alcornoques, situados en zonas de clima mediterráneo sujetos continuamente al riesgo de desertificación, constituyen una verdadera frontera verde frente a los problemas de pérdida de suelos y de recursos hídricos. El arbolado y su matorral acompañante cumplen numerosas funciones ambientales de gran importancia tanto a escala local o regional como de todo el Mediterráneo.

EL CORCHO [46]

El corcho es la corteza que reviste la madera del alcornoque. En los primeros tiempos es fina y lisa, engrosando poco a poco a medida que el árbol crece. Este tejido vegetal

formado por células muertas protege las partes vivas del tronco y ramas del alcornoque y puede llegar a alcanzar 25 cm. de espesor en el tronco de los ejemplares que no han sido nunca descorchados.

A medida que el árbol se va desarrollando, la corteza, formada a base de capas anuales, aumenta su espesor proporcionalmente al crecimiento del tronco o rama en la que se origina. La primera capa o corcho virgen se llama bornizo, una vez desbornizado el árbol produce con cada saca sucesiva un corcho mejor y más valioso.

ESTRUCTURA

Utilizando la célula del corcho se hicieron los primeros estudios sobre la estructura celular. El inglés Robert Hooke en su libro Micrographia [48], describe cómo el corcho está formado por lagunas poliédricas semejantes a las células de un panal, y de ahí que le llamara "cells": celdillas o células. Las células del tejido suberoso (corcho) son unidades muertas y llenas de aire.

La disposición que presentan es bastante regular, en hileras radiales y encajadas unas en otras gracias a su forma geométrica, formando en conjunto tandas circulares superpuestas. Es precisamente esa disposición la que le confiere al corcho gran parte de sus cualidades, tales como la elasticidad y la resistencia.

La membrana celular contribuye a las características específicas del corcho. Esta pared que separa los huecos citados anteriormente se halla formada por cinco capas: dos celulósicas, que son las que están en contacto con la cavidad celular; otras dos, suberificadas, de espesor notablemente mayor, y la quinta, lignificada, y por otra parte la más interior de todas, constituida a su vez por dos tabiques de espesor microscópico, íntimamente ligados. Las dos capas intermedias suberificadas, compuestas por estratos alternos de suberina y cera son las que confieren al corcho la elasticidad especial que le aporta su gran valor.

Las células están atravesadas por los "plasmodesmos", canalillos cuyo diámetro tiene una dimensión aproximada de 6x10 μm, y que, conectando unas células con otras, hacen que actúen como un sistema de vasos comunicantes, es decir, que tienen lugar

movimientos complejos de vapor de agua, en un sentido u otro, según predominen los macroporos o los microporos.

El grosor de estas membranas a lo largo de la primavera es constante, aumentando luego gradualmente hasta final del ciclo vegetativo. Paralelamente tiene lugar una disminución notable del tamaño de las células. Estos dos cambios simultáneos influyen en la dureza y compresibilidad: la mayor o menor movilidad del parénquima formado en la primavera atenúa o acrecienta la dureza y la mayor densidad que tienen las formaciones otoñales. De aquí que los corchos que han tenido un desarrollo rápido (cuyos anillos tienen un espesor de 6 a 10 mm), sean menos densos y más compresibles que aquellos otros cuyas capas anuales sean de 1 ó 2 mm, en los que predominan las células formadas en otoño, de paredes gruesas y reducido tamaño. La longitud de las células de corcho varía entre 10 y 70 μm, aceptándose como valor medio 40 μm. El número de células de corcho por centímetro cúbico se aproxima a 35 millones.

LENTICELAS

Se llaman lenticelas a los poros existentes en la corteza suberosa, necesarios para la respiración de ésta, ya que es a través de ellos por donde el corcho recibe el oxígeno. Su forma es normalmente cilíndrica u ovalada, aunque puede presentar grandes irregularidades, ensanchamientos o unión de lenticelas contiguas, lo cual es una eventualidad más frecuente en las zonas de crecimiento rápido.

Su diámetro oscila entre los 0,2 y los 8 mm y aparecen en cantidades entre 30 y 270 por cm^2. Los poros se observan en la barriga, en el frente y en los costados. El exceso de porosidad resta compacidad al corcho. Por tanto, la calidad disminuye al aumentar el número de poros y el tamaño de éstos.

El porcentaje de plancha ocupado por poros está influenciado por factores genéticos, pero también por los ambientales; cuanto más activos sean los tejidos vivos de la casca, mayores serán sus necesidades de respiración, necesitando por tanto mayor porcentaje de poros.

La porosidad (P), se define como el área ocupada por todas las lenticelas en un corte transversal del corcho, en virtud de la cual se establecen tres categorías del mismo:

- Poco porosos: $P < 2\%$
- Medianamente porosos: $2\% \leq P < 4\%$
- Muy porosos: $P \geq 4\%$

CARACTERÍSTICAS CONSTITUTIVAS DE LA CORTEZA SUBEROSA.

En cuanto a la composición química hay que decir que el primer descubrimiento notable en las investigaciones sobre la naturaleza o composición química del corcho, tuvo lugar a principios del siglo XIX con Cheuieul (1807), que identificó la "suberina", sustancia fundamental, sin duda la más importante de las que componen el tejido suberoso. Numerosos estudios posteriores nos han ido proporcionando nuevos conocimientos acerca de esta sustancia. Actualmente se sabe que la suberina es una mezcla de ácidos grasos, aunque todavía se desconoce la composición química de todos y cada uno de ellos. Entre los ácidos grasos ya identificados están el fenólico, floinólico, floiónico y subérico, siendo el primero el más abundante. La suberina es inflamable, insoluble en agua, éter, cloroformo, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y amoníaco y es el mayor determinante de las numerosas cualidades del corcho, como veremos más adelante. Sometiéndola a destilación en seco se obtiene un alquitrán semejante al de la hulla y del que puede extraerse bencina, amoníaco, naftalina, fenol y antraceno, entre otros componentes.

PROPIEDADES DEL CORCHO

- Ligereza: se debe a que el 88% de su volumen es aire, lo que se traduce en una densidad baja, comprendida entre 0,12 y 0,24 kg/dm^3.

- Elasticidad: la elasticidad es la capacidad de recuperar el volumen (la forma) inicial tras sufrir una deformación que justifica, entre otras, su utilización en la industria taponera.

- Coeficiente de rozamiento elevado: la superficie del corcho queda tapizada por microventosas que le permiten una gran adherencia y dificultan su deslizamiento.

- Alta impermeabilidad: la difusión de líquidos y gases a través del corcho es muy dificultosa, se efectúa rápidamente a través de los poros lenticelares y de forma extremadamente lenta a través de los plasmodesmos.

- Gran poder calorífico: la capacidad del corcho para generar calor es equivalente a la del carbón vegetal, alrededor de 7.000 kcal/kg.

- Aeroelasticidad: la aeroelasticidad está relacionada con la amortización de impactos y supone que la zona afectada por la deformación no es tan solo aquella en la que se contacta sin que se extiende el efecto a las zonas colindantes, lo que permite una buena amortiguación de impactos.

- Fácilmente manejable: modificando artificialmente el contenido en agua del corcho, mediante hervido por ejemplo, se facilitan los procesos industriales, principalmente los de corte, al volverse más blando y elástico.

- Bajo contenido en agua: la humedad de equilibrio del corcho con el ambiente, una vez eliminada la raspa, no supera el 9% de su peso, siendo normalmente del 6%. Esta baja humedad hace imposible la proliferación de microorganismos, lo que le confiere una mayor durabilidad.

- Aislante térmico: Su estructura alveolar (impidiendo circular el aire), el bajo contenido en agua y la falta de conductividad de sus compuestos le permite cumplir su función de aislante de forma efectiva. Presenta una resistencia al paso del calor treinta veces superior a la del hormigón.

- Aislante acústico: tal y como se analizará en este trabajo, el empleo del corcho como aislante acústico ha sido habitual debido a la estructura porosa que presenta el material, lo cual favorece fenómenos de absorción y difusión del sonido.

PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

La producción industrial de corcho en España se ha mantenido en términos globales en torno a las 90.000 toneladas anuales en las últimas décadas.

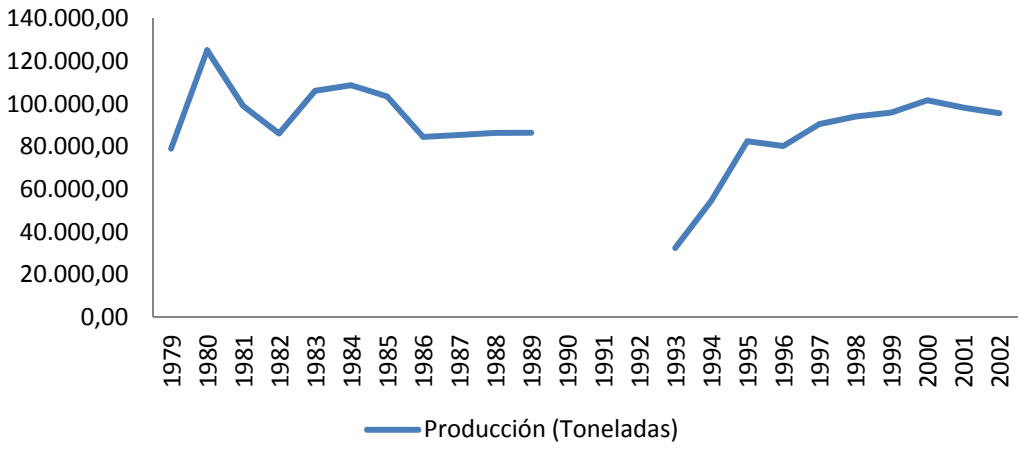


Figura 02. Gráfica producción en toneladas corcho 1979-2002
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE (datos 1990 - 1992 no disponibles)

Salvo excepciones puntuales como en 1980 (con una producción de 125.111 toneladas) o 1993 (con una producción de 32.449 toneladas), durante este período la producción promedio se ha mantenido en torno a la cifra indicada.

Analizando con más detalle la última década se puede constatar que la producción española de este material se ha mantenido constante a excepción de los años 2009-2010 (años muy significativos en la crisis actual), en la que ha tenido una importante caída, no tan notable como la sufrida en 1993, si bien en el reciente 2011 se comprueba la existencia de una importante recuperación.

Tabla 10. Serie histórica 2007-2011 de producción industrial de corcho en España
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE
(datos marcados en gris no publicables por secreto estadístico)

Aplicación / t / año	*2011*	*2010*	*2009*	*2008*	*2007*
Corcho triturado, granulado, pulverizado …	44.245,38	31.392,40	25.727,99	41.161,43	31.245,70
Corcho natural descortezado o escuadrado…	32.311,87	20.947,16	17.809,49	19.073,26	27.776,82
Manufacturas corcho natural					
Tapones	2.477,66	2.489,06	2.472,85	3.365,09	3.935,68
Otros (discos, anillos,…)	5.053,59	1.913,52	4.306,19	4.994,55	2.258,70
Corcho aglomerado manufacturado (i/aglutinante)					
Tapones para vinos espumosos	9.333,04	7.568,61	5.539,06	7.442,17	8.010,33
Otros tapones	7.312,57	6.462,76	6.547,31	6.599,50	6.716,70
Otros (cubos, placas, baldosas,…)			1.898,89	3.188,06	5.298,87
Otros (juntas, aislamientos, decoración…)	362,19	287,72	1.641,80	1.837,67	2.349,09
TOTAL PRODUCCIÓN ANUAL (Toneladas)	**101.096,30**	**71.061,23**	**65.943,58**	**87.661,73**	**87.591,89**

En la siguiente tabla correspondiente al período 2002-2006, de importante crecimiento económico en nuestro país, se comprueba que la producción de corcho se ha mantenido prácticamente constante, sin variaciones sustanciales a tener en cuenta.

Tabla 11. Serie histórica 2006-2002 de producción industrial de corcho en España
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE
(datos marcados en gris no publicables por secreto estadístico

Aplicación / t / año	*2006*	*2005*	*2004*	*2003*	*2002*
Corcho triturado, granulado, pulverizado …	32.278,56	29.610,40	35.536,00	33.807,73	35.106,30
Corcho natural descortezado o escuadrado…	25.159,36	28.208,93	26.178,49	31.918,61	31.202,11
Manufacturas corcho natural					
Tapones	3.527,37	3.970,89	4.220,76	4.335,48	4.395,77
Otros (discos, anillos,…)	1.871,78	2.188,62	2.569,98	2.646,00	1.658,39
Corcho aglomerado manufacturado (i/aglutinante)					
Tapones para vinos espumosos	7.804,40	8.094,22	9.384,93	8.032,01	8.440,88
Otros tapones	7.306,70	7.108,99	9.192,31	6.140,72	6.026,42
Otros (cubos, placas, baldosas,…)	4.807,04	10.086,38	9.616,38	8.814,50	8.973,07
Otros (juntas, aislamientos, decoración…)	1.912,05	723,66			2.761,32
TOTAL PRODUCCIÓN ANUAL (Toneladas)	**84.667,26**	**89.992,09**	**96.698,85**	**95.695,05**	**98.564,26**

En términos globales, si estudiamos las últimas décadas de producción de corcho en España comprobamos que hasta aproximadamente 2002 el peso económico que ha tenido la producción de corcho ha sido de continuo ascenso.

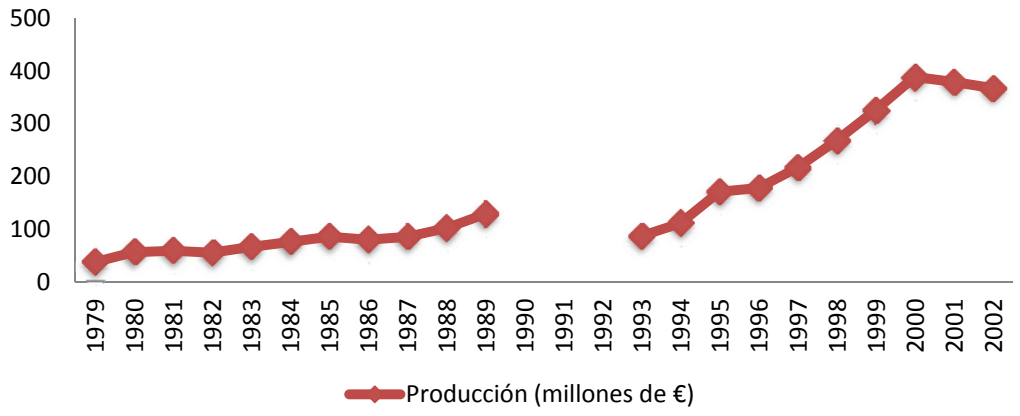


Figura 03. Gráfica producción en millones de € corcho 1979-2002
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE (datos 1990 - 1992 no disponibles)

Analizando con más detalle la última década se puede comprobar que la producción industrial de corcho ha descendido de forma constante desde 2001 (año en la que se obtiene el máximo de la curva en 379,26 millones de €), obteniendo la menor producción desde un punto de vista económico en el año 2009 coincidiendo con la menor producción en toneladas. Como puede constatarse, en los dos últimos años la producción de corcho está en un proceso de recuperación, tanto a nivel de producción en toneladas como a nivel de producción económica, lo cual da esperanzas al sector.

Tabla 12. Serie histórica 2011-2007 de producción industrial de corcho en España
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE
(datos marcados en gris no publicables por secreto estadístico

Aplicación / miles de € / año	*2011*	*2010*	*2009*	*2008*	*2007*
Corcho triturado, granulado, pulverizado…	34.106,00	29.661,00	26.727,00	38.748,00	31.033,00
Corcho natural descortezado o escuadrado…	72.862,00	45.137,00	41.235,00	52.443,00	68.927,00
Manufacturas corcho natural					
Tapones	59.997,00	62.069,00	55.784,00	73.350,00	98.243,00
Otros (discos, anillos,…)	20.792,00	12.350,00	13.684,00	18.564,00	23.798,00
Corcho aglomerado manufacturado (i/aglutinante)					
Tapones para vinos espumosos	67.872,00	64.347,00	50.643,00	65.712,00	73.794,00
Otros tapones	49.568,00	41.577,00	39.261,00	36.527,00	38.011,00
Otros (cubos, placas, baldosas,…)			1.954,00	3.599,00	5.940,00
Otros (juntas, aislamientos, decoración…)	4.508,00	3.308,00	6.497,00	7.971,00	8.494,00
TOTAL PRODUCCIÓN ANUAL (miles de €)	**309.705,00**	**258.449,00**	**235.785,00**	**296.914,00**	**348.240,00**

Tabla 13. Serie histórica 2006-2002 de producción industrial de corcho en España
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE
(datos marcados en gris no publicables por secreto estadístico)

Aplicación / miles de € / año	*2006*	*2005*	*2004*	*2003*	*2002*
Corcho triturado, granulado, pulverizado…	32.107,00	28.809,00	33.163,00	36.447,00	41.059,00
Corcho natural descortezado o escuadrado…	62.365,00	63.714,00	65.343,00	78.023,00	79.908,00
Manufacturas corcho natural					
Tapones	88.622,00	91.782,00	89.867,00	99.448,00	89.326,00
Otros (discos, anillos,…)	24.084,00	28.385,00	33.248,00	36.011,00	22.383,00
Corcho aglomerado manufacturado (i/aglutinante)					
Tapones para vinos espumosos	78.132,00	83.151,00	94.010,00	74.562,00	77.220,00
Otros tapones	40.948,00	40.209,00	46.751,00	30.293,00	32.877,00
Otros (cubos, placas, baldosas,…)	5.639,00	15.029,00	13.653,00	12.998,00	17.028,00
Otros (juntas, aislamientos, decoración…)	6.567,00	2.016,00			7.506,00
TOTAL PRODUCCIÓN ANUAL (miles de €)	**338.464,00**	**353.095,00**	**376.035,00**	**367.782,00**	**367.307,00**

Poniendo en relación las tablas anteriores comprobamos que durante la última década la producción de corcho se ha mantenido prácticamente constante en lo referente a toneladas sufriendo un decrecimiento notable desde un punto de vista económico, más acusado en 2009, si bien en los últimos años existen síntomas de recuperación.

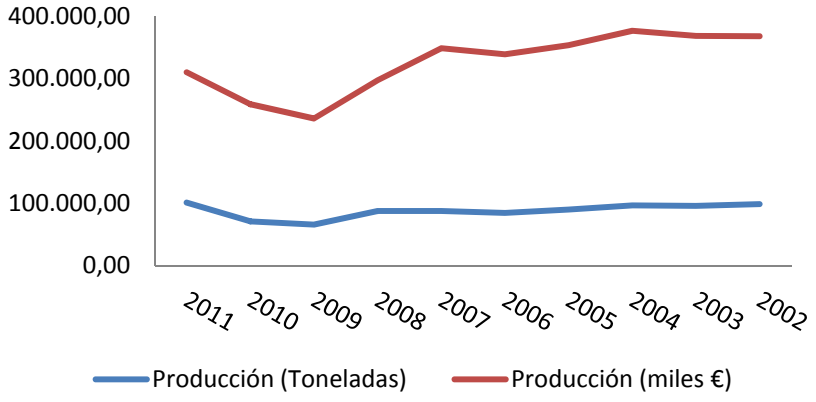


Figura 04. Gráfica producción en toneladas y millones de € corcho 2011-2002

Entrando de forma somera en las aplicaciones o destino final del corcho producido en España, en la siguiente tabla se muestra el promedio de producción en miles de € de los últimos diez años, donde se puede comprobar que la industria taponera implica casi el sesenta por ciento de la producción total (58,91%) teniendo otras aplicaciones un carácter meramente anecdótico.

Tabla 14. Promedio en miles de € e importancia relativa de producción industrial de corcho en España
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE

Aplicación / miles de € / año	*miles de €*	*%*	*€ / t*
Corcho triturado, granulado, pulverizado…	33.186,00	10,11%	975,74 €
Corcho natural descortezado o escuadrado…	62.995,70	19,19%	2.417,46 €
Manufacturas corcho natural			
Tapones	80.848,80	24,63%	22.974,54 €
Otros (discos, anillos,…)	23.329,90	7,11%	7.918,82 €
Corcho aglomerado manufacturado (i/aglutinante)			
Tapones para vinos espumosos	72.944,30	22,22%	9.158,14 €
Otros tapones	39.602,20	12,06%	5.705,22 €
Otros (cubos, placas, baldosas,…)	9.480,00	2,89%	1.439,55 €
Otros (juntas, aislamientos, decoración…)	5.858,38	1,78%	3.946,53 €
TOTAL PRODUCCIÓN ANUAL (miles de €)	**328.245,28**	100,00%	

La industria taponera es la que mayor rendimiento (en términos de producción económica) obtiene desde un punto de vista económico a la tonelada de corcho, tal y como se muestra en la siguiente figura. Por este motivo, ésta es la aplicación a la que se dedica la mayor parte de la producción, sin perjuicio de los costes reales de producción que tenga cada una de las aplicaciones expuestas que pueden variar el rendimiento neto que no es objeto de estudio en el presente trabajo.

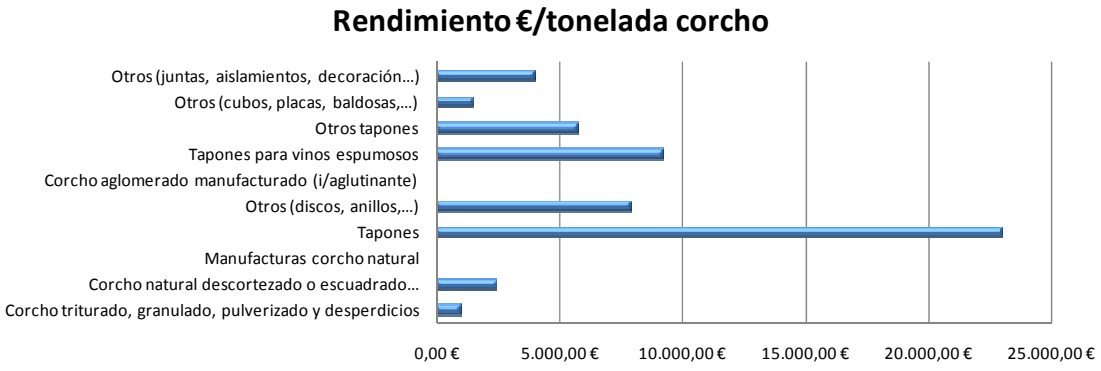
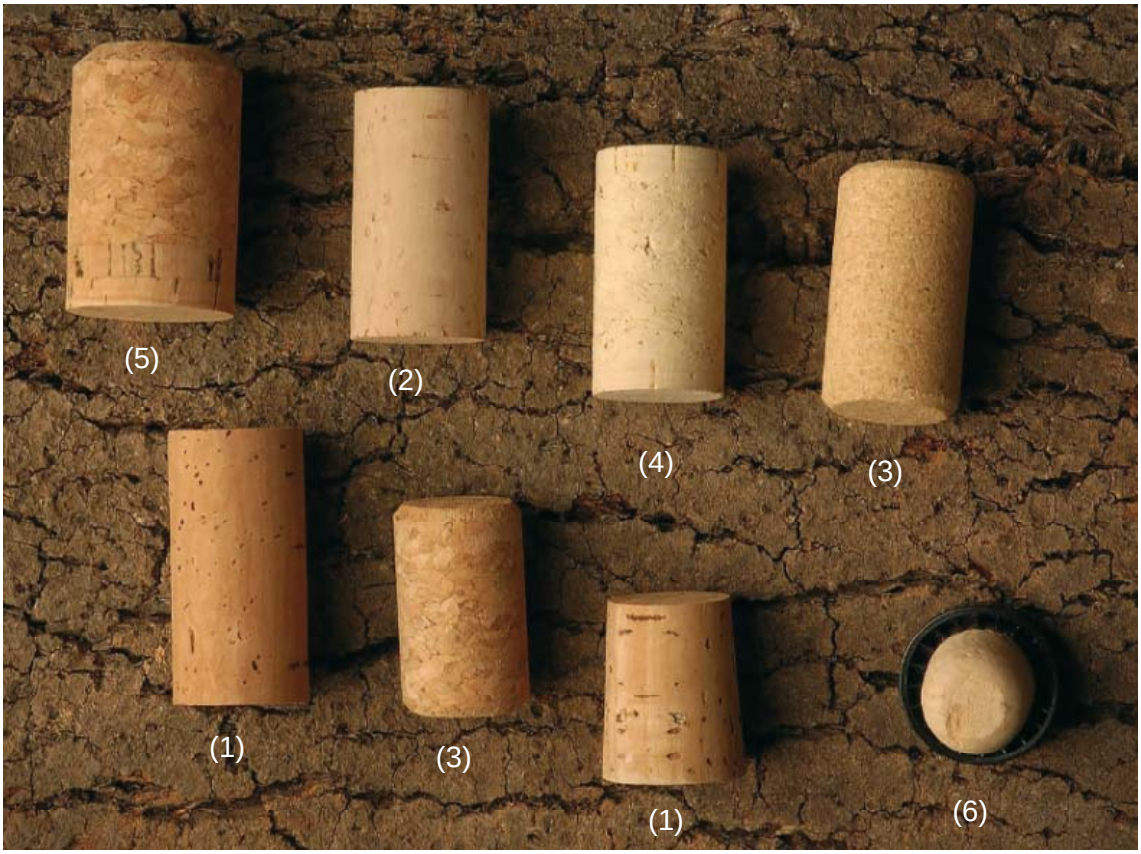


Figura 05. Gráfica rendimiento €/tonelada de corcho
Fuente: elaboración propia a partir de datos INE

APLICACIONES ACTUALES

INDUSTRIA TAPONERA

La industria taponera constituye la principal aplicación del corcho en términos de producción tal y como se deduce del apartado anterior, llegando a abarcar hasta el 70% según se desprende de publicaciones de asociaciones específicas productoras de este material [49]. Entre los productos habituales en la industria taponera destacan los siguientes:



Fotografía 02
Pág. 31 publicación "El Corcho, patrimonio cultural y económico de Extremadura"
ASECOR - Asociación Sanvicenteña de Empresarios del Corcho

- Tapón de corcho natural (1)

  Los tapones de corcho natural aseguran la estanqueidad del vino dentro del recipiente de vidrio. Este aislamiento, de prolongarse en el tiempo, promueve la maduración del vino, es decir su envejecimiento mediante un gran número de

procesos físico-químicos tanto entre sus componentes como entre éstos y las sustancias que componen el ambiente interno de la botella.

El tapón de corcho natural, por sus características de elasticidad, compresibilidad y constitución celular, es el único cierre capaz de asegurar este tipo de conservación en cualquier tipo vino. Además, solo sus componentes naturales son capaces de adaptarse correctamente a las irregularidades internas del cuello de la botella, garantizando un perfecto aislamiento durante el almacenamiento, incluso aunque el vidrio se dilate o se contraiga, lo que puede acontecer con la alteración de la temperatura ambiente [50].

Las condiciones de aislamiento pueden permanecer a lo largo de algunas décadas. Este aislamiento puede prolongarse aún más en el tiempo siempre que el tapón sea de corcho de elevada calidad y las condiciones de almacenamiento del vino sean ideales (temperatura, presión y humedad adecuadas y sin grandes amplitudes térmicas diarias y durante las estaciones del año).

- Tapón de corcho natural colmatado (2)

Los tapones naturales colmatados son tapones de corcho natural con los poros (lenticelas) rellenos exclusivamente con polvo de corcho resultante de la rectificación de los tapones naturales. Para la fijación del polvo de corcho en los poros del tapón es utilizada una cola a base de resina y de caucho natural, aprobada como sustancia apta para su uso en productos que van a estar en contacto con alimentos. Actualmente, en este proceso, también es utilizada una cola a base de agua. El colmatado sirve esencialmente para dos fines: mejorar el aspecto visual del tapón y su rendimiento [50].

- Tapón de corcho aglomerado (3)

Los tapones aglomerados son íntegramente fabricados a partir de granulados de corcho con los materiales no utilizables de la producción de tapones naturales.

Los tapones aglomerados pueden ser fabricados con un molde individual o por extrusión. Los tapones de aglomerado son una solución económica para asegurar un cierre perfecto por un período que no deberá superar, en general, los 12 meses.

Además de las ventajas económicas que representan para vinos de bajo precio y de alta rotación, estos tapones tienen también la ventaja de constituir lotes de unidades completamente homogéneas. Este producto es el resultado de un proceso altamente industrializado y la única variación entre las clases de tapones está en la elección del calibre del granulado de corcho y, posteriormente, en el tratamiento de superficie utilizado [50].

- Tapón técnico (4)

Los tapones técnicos fueron concebidos para embotellar vinos destinados a ser consumidos en un plazo medio de 2 a 3 años. Están constituidos por un cuerpo de corcho aglomerado muy denso, con discos de corcho natural pegados en un extremo o en ambos extremos. Los tapones técnicos con un disco en cada extremo son denominados tapones técnicos 1+1. Con dos discos de corcho natural se llaman tapones técnicos 2+2, y con dos discos solo en uno de los extremos se llaman tapones técnicos 2+0, y así sucesivamente.

Este tipo de tapón es químicamente muy estable y mecánicamente muy resistente. Se comportan de manera ejemplar con respecto a la torsión/fricción a que son sometidos en las fases de embotellamiento y desarrollo. Además, han demostrado ser excelentes aislantes a lo largo del tiempo, consiguiendo mantener la concentración necesaria de SO_2 (dióxido de azufre) libre en la botella, evitando la oxidación prematura del vino sin desarrollar aromas de reducción desagradables [50].

- Tapón para vinos espumosos (5)

Se trata de tapones especialmente concebidos para ser usados en cavas, vinos espumosos (gasificados) y sidras. Los tapones para vinos espumosos se pueden considerar como parte de la familia de los tapones técnicos, pues son

producidos a partir de un cuerpo formado por aglomerado de granos de corcho, al cual se le aplica en uno de sus extremos uno, dos o tres discos de corcho natural sellados mediante una cola aprobada para ser utilizada en productos que van a estar en contacto con alimentos.

Los tapones de cava tienen un diámetro mayor que los tapones normales. Este mayor diámetro es imprescindible para soportar las elevadas presiones existentes en las botellas de vino con gas. Para obtener los mejores rendimientos físicos, químicos y microbiológicos, estos tapones están sujetos a una fabricación minuciosa y a un control de calidad ajustado [50].

- Tapón con cápsula (6)

El tapón con cápsula (cabeza) es un tapón de corcho natural (o un tapón colmatado) en cuyo extremo superior es colocada una cápsula. Esta cápsula puede ser de madera, PVC, porcelana, metal, vidrio u otros materiales.

El tapón con cápsula es generalmente utilizado en licores, o en bebidas espirituosas que cuando salen al mercado, están listas para ser consumidas. Los ejemplos más conocidos son el brandy y vino de jerez, moscatel, vinos de oporto y también Whisky, Vodka, Cognac, Armagnac, Calvados, Licores y Aguardientes. Este tapón es muy práctico para los camareros y para los consumidores, pues permite una reutilización fácil, un factor importante para botellas cuyo contenido no es consumido de una sola vez [50].

DISCOS

El disco o arandela de corcho natural tiene la forma de un cilindro recto, semejante a una moneda, y con unas dimensiones de 5 a 6 mm. de altura, y de 30 a 34 mm. de diámetro.

Los discos de corcho natural son utilizados para la producción de tapones técnicos, tapones constituidos por un cuerpo de aglomerado de corcho granulado, con discos de corcho natural en uno o ambos extremos, como los tapones tipo 1+1 o los tapones para vinos espumosos.

En este tipo de tapones, es el disco de corcho natural el que se encuentra en contacto con el vino (al estar situado en el extremo del tapón), ayudando así a la protección de la delicadeza del vino [50].

AISLAMIENTOS PARA CONSTRUCCIÓN

El corcho es probablemente uno de los materiales aislantes más antiguos que se han utilizado comercialmente y hubo un tiempo en que fue el material aislante más utilizado en la industria de la refrigeración. Actualmente, debido a un precio relativamente alto en comparación con otros materiales aislantes su uso es menor, excepto como base de algunas máquinas, para reducir la transmisión de vibraciones así como más recientemente en bioconstrucción o construcción sostenible. Puede obtenerse en forma de planchas o bloques expandidos, así como en forma granular; su densidad varía entre 110 y 130 kg/m^3 y su resistencia mecánica es de 2,2 kg/m^2 por término medio. Solo puede utilizarse hasta temperaturas de 65 °C. Tiene una buena eficacia termoaislante, es bastante resistente a la compresión y no arde fácilmente. Su principal limitación técnica es su tendencia a absorber humedad, siendo su permeancia media al vapor de agua de 12,5 g·cm·m^{-2}·día^{-1}·mmHg^{-1}.[51] A continuación se muestran algunas de las características técnicas de este material:

Tabla 15. Densidad y conductividad térmica a 20-25 °C del aislante de corcho
Fuente: El uso del hielo en pequeñas embarcaciones de pesca, FAO, 2005 [51].

Tipo	Densidad (kg/m^3)	Conductividad térmica (W^{-1}ºC^{-1}) / (kcal h^{-1} m^{-1} ºC^{-1})
Granulado suelto y seco	115	0,052 / 0,045
Granulado	86	0,048 / 0,041
Bloque de corcho expandido	130	0,040 / 0,344
Plancha de corcho expandido	150	0,043 / 0,037
Expandido, ligado con resinas o brea	100-150	0,043 / 0,037
Expandido, ligado con resinas o brea	150-250	0,048 / 0,041

A la vista de las propiedades anteriores, las aplicaciones más habituales del corcho como aislamiento térmico para la construcción son las siguientes:

- Aislamientos térmicos naturales (cámaras, bajo suelo radiante y bajo tarima). Existen productos industriales formados por paneles de corcho aglomerados con resina, expandido con densidad en torno a los 110 kg/m^3, empleados tanto en cámaras de cerramiento, suelos y techos según la necesidad de aislamiento.

- Juntas de dilatación: una de las principales propiedades que presenta el corcho es su elasticidad, esto es, la capacidad de recuperar su forma original una vez cesa el esfuerzo que lo deforma. Esta propiedad tiene una gran relevancia en la industria taponera y no podía ser menos en el ámbito de la construcción. La capacidad elástica del corcho es empleada para resolver juntas de dilatación que absorban las deformaciones que se producen entre diferentes materiales de acabado tanto en suelos, paredes como techos.
- Aislamientos antivibración para instalaciones: con el objeto de no transmitir las vibraciones de una determinada máquina a la estructura de un edificio aprovechando la propiedad de flexibilidad indicada en el apartado anterior, el corcho es un material muy adecuado para ser empleado como aislamiento para este tipo de aplicaciones.
- Aislamientos antirruido: el corcho es un material natural que, debido a la estructura interna de sus partículas y a la densidad en comparación con otros materiales aislantes (térmicos) presenta un adecuado comportamiento como aislante acústico a ruido aéreo. Existen productos de corcho natural en el mercado que con espesores comprendidos entre los 15 y 50 mm pueden llegar a alcanzar los 43,8 dB(A) de índice global de reducción sonora ponderada en A.

REVESTIMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

- Paredes y techos: uno de los productos obtenidos a partir del corcho son los laminados industriales, que permiten el revestimiento de grandes superficies de paramentos sin apenas juntas, con espesores que rondan los 2/3 mm. También se pueden suministrar en planchas con diferentes formatos. Este tipo de revestimientos naturales buscan un acabado cálido que dé sensación de confort a las estancias. En esta gama de productos también se encuentran los revestimientos para el acondicionamiento acústico de recintos para los cuales los espesores deben ser mayores (en torno a los 10 mm) con el fin de mejorar la absorción acústica de este material y con ella una serie de parámetros importantes en la acústica de salas.
- Suelos: al igual que para la aplicación anterior, el empleo de este material como revestimiento de suelo permite dotar a la estancia de un mayor confort y calidez. Este tipo de productos se pueden suministrar en losetas, bandas de

parquet o en rollos, disponiéndose tanto encolado como flotante respecto del soporte.

APLICACIONES INDUSTRIALES

- Taquillos de corcho-espuma para el transporte de vidrios: los tacos de corcho-espuma se emplean de forma usual como material absorbente de las vibraciones para el transporte de paneles de cristal y otras materias frágiles. Suelen fabricarse con medidas comprendidas entre 20x20 y 18x18 mm, con espesores de 3+2 mm (corcho + espuma).
- Juntas de estanqueidad de corcho: las juntas de estanqueidad se elaboran a base de un compuesto de corcho-caucho conjuntamente con una amplia gama de aditivos químicos que le proporcionan las propiedades de estanqueidad, elasticidad y resistencia requeridas para las aplicaciones en el sector de la automoción. Estas juntas de estanqueidad se confeccionan troqueladas a partir de una base de planchas de corcho y caucho vulcanizado.

INDUSTRIA DEL CALZADO

- Plantillas y talones de calzado: mediante el troquelando de una base de rollo de una plancha de corcho, se obtienen componentes que nutren el sector del calzado. El corcho aglomerado tiene una serie de propiedades que permiten obtener un material muy adecuado para el sector del calzado. En primer lugar, debido a sus propiedades aislantes (indicadas anteriormente) el corcho permite un adecuado aislamiento entre el suelo y el interior del zapato. En segundo lugar el corcho es un buen aislamiento frente a la electricidad estática. El corcho es un material elástico; esta propiedad de flexibilidad facilita los movimientos del pie al caminar. Por último, las propiedades físicas del corcho en lo relativo a su estructura macroscópica hace que, a través de las lenticelas, este material permita una adecuada transpiración del pie.

ARTÍCULOS DE PAPELERÍA Y HOGAR

En un segundo plano se encuentran dentro de las aplicaciones del corcho un gran número de productos en el sector de la papelería y hogar. Una breve muestra es la que se cita a continuación:

- Posavasos de corcho
- Maquetas
- Bricolaje
- Planchas de corcho autoadhesivas
- Pizarras
- Recipientes aislantes
- Elementos decorativos...

OTRAS APLICACIONES

Por último, aunque el producto estrella del sector corchero es el tapón de corcho para el vino, el corcho es también utilizado para la fabricación de una gran variedad de productos como los siguientes:

- Terrarios
- Manufacturas ecológicas
- Artículos de pesca y componentes para artículos deportivos
- Componentes especiales para instrumentos musicales.
- Muebles y objetos de decoración
- Componentes especiales para productos ortopédicos

PRODUCTOS SUSTITUTIVOS. PERSPECTIVAS DE FUTURO

En las últimas décadas existe una importante campaña de desprestigio internacional contra los tapones de corcho, presuntamente con origen en EEUU, Australia y Reino Unido en estrecha relación con los fabricantes de productos alternativos a esta aplicación de este material (tapones de plástico o rosca). El argumento empleado es la existencia de compuestos químicos molestos que dotan al vino un olor y sabor desagradable, principalmente el TCA (2,4,6 - tricloroanisol), existiendo una percepción en el mercado que une el corcho al TCA.

No obstante lo anterior, investigaciones realizadas por el grupo de investigación del Departamento de Tecnología de Alimentos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid ha detectado este tipo de contaminantes organoclorados en vinos sin embotellar, por lo que en estos casos no puede atribuirse al corcho la alteración buscada, al no haber tenido el vino contacto con el tapón [52].

Existe una amplia variación de precios entre los diferentes productos para el cierre de botellas: corcho, sintéticos y rosca. Por lo general, un tapón sintético cuesta como media un 25% del precio medio de un tapón de corcho, sin embargo los tapones alternativos no siempre son la alternativa más económica [53].

Lo cierto es que la producción de productos sustitutivos del corcho para la industria taponadora ha crecido en los últimos años, presentando un futuro incierto cuál será la evolución de la misma y qué consecuencias puede tener para los fabricantes de corcho. La producción mundial de corcho se encuentra restringida a la península ibérica y algunos países del mediterráneo tal y como se ha podido comprobar en el apartado anterior (distribución geográfica del alcornocal), lo que provoca que el corcho sea un recurso limitado, permitiendo la entrada de otros sistemas de cierre para cubrir la necesidad de la demanda [53].

01.01.03. EL KENAF

LAS FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales son materiales lignocelulósicos procedentes tanto de vegetales, minerales como animales. Actualmente el uso de fibras naturales, pese a su abundancia y tratarse de materiales renovables, está muy por debajo de las fibras sintéticas. No obstante lo anterior existe un crecimiento significativo de investigaciones relacionadas con las fibras naturales en diversos sectores tales como automoción, donde el empleo de este material como refuerzo de materiales compuestos está dando muy buenos resultados.

Las bondades de las fibras naturales frente a las fibras sintéticas son varias, si bien también presentan algún tipo de inconveniente. La primera ventaja es obvia, ya que se trata de un recurso ilimitado y renovable, contando además una menor energía en su

producción con inferior emisión de CO_2 tanto cuando se queman como cuando se someten a compostaje, [54] reduciendo la huella de carbono de este material frente a las fibras sintéticas. El reducido peso molecular manteniendo una dureza y rigidez adecuada, las hace muy indicadas para ser empleadas como refuerzo en materiales compuestos. La manipulación y el tratamiento de las fibras naturales son, en general, menos peligrosos que en las fibras sintéticas.

Como contrapartida, las fibras naturales cuentan con una mayor dispersión en los valores de sus propiedades frente a las fibras sintéticas que se suelen mantener sobre unos rangos más discretos. Estas propiedades en las fibras naturales dependerán de diferentes variables tales como el lugar de origen, edad de la planta de la que proceden, condiciones de cuidado y cultivo, proceso de extracción y composición química [54].

El término fibra natural hace referencia indistintamente a elementos de origen mineral (como asbesto), de origen animal (como la seda o pelo) o de origen vegetal (como el algodón, lino, sisal, kenaf o yute). En la siguiente figura se propone una clasificación de las fibras naturales en función de su origen.

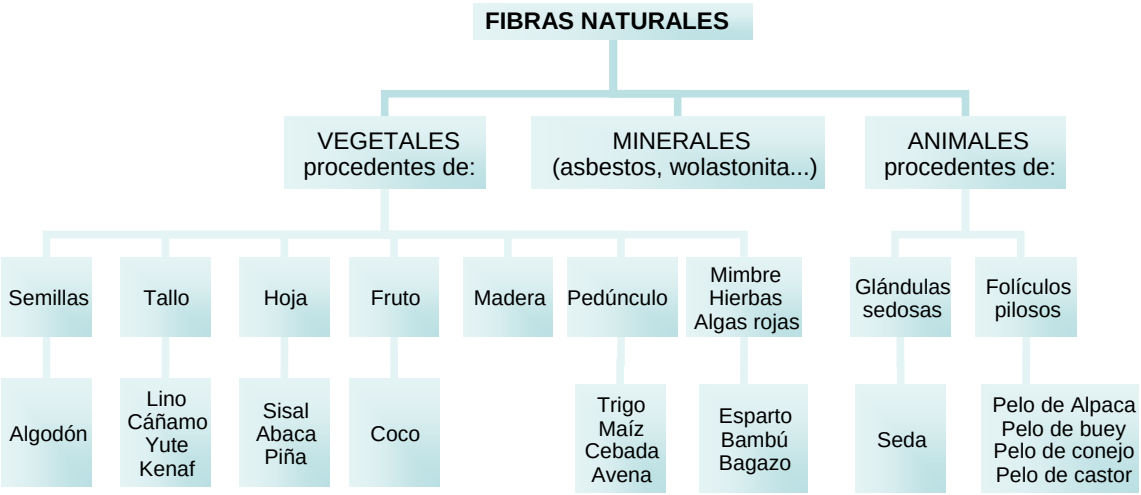


Figura 06. Clasificación de las fibras naturales

El presente trabajo trata sobre un tipo de fibra natural vegetal procedente del tallo, el kenaf, cuyas características y propiedades se describen a continuación.

EL KENAF

GENERALIDADES

El kenaf (*Hibiscus cannabinus*) es una planta herbácea dicotiledónea de la familia de las Malváceas, probablemente originaria de África sin bien su origen natural exacto es desconocido. Se trata de una planta herbácea de rápido crecimiento que puede alcanzar una altura de 2,4 a 6 m en tan solo cinco meses, lo que la hace muy atractiva para aplicaciones industriales. Las hojas no presentan una forma definida y cuentan con una longitud de 10 a 15 cm. El fruto es una cápsula de aproximadamente 2 cm de diámetro, que contiene varias semillas. Los tallos son en general de sección redonda y tienen espinas de diferentes tamaños.

En el tallo, al igual que en el lino y cáñamo, se distinguen dos regiones distintas. Las fibras de la corteza exterior, que constituye alrededor de 30-40% del tallo, son moderadamente largas, mientras que las fibras del núcleo son más cortas. La longitud de las fibras liberianas es de 2 a 6 mm aproximadamente; sin embargo, cabe destacar que las fibras liberianas de las plantas tardías son más cortas que las de las plantaciones normales, ya que el crecimiento vegetativo de esta planta está influenciado por la duración del día. El kenaf es una fibra que puede presentar una gran variedad de colores.

ASPECTOS ESTRUCTURALES

Las fibras naturales vegetales están compuestas principalmente por tres compuestos (celulosa, hemicelulosa y lignina) y en menor medida por una serie de compuestos de bajo peso molecular solubles en agua, proteínas y sales minerales. El contenido de cada uno de ellos dependerá de la variedad y la edad de la planta o especie de la que provengan [55].

Las fibras de origen vegetal como el kenaf están compuestas por paquetes de cédulas de paredes gruesas y alargadas. Estas fibras se han definido por algunos autores como agrupaciones de microfibrillas huecas adheridas a una matriz de hemicelulosa/lignina [56]. Considerando una fibra vegetal como una cédula individual, su longitud típica varía entre 1 y 50 mm y su diámetro entre 10 y 50 μm. Las fibras

vegetales conforman diversas microestructuras organizadas jerárquicamente que se disponen en tubos microscópicos concéntricos alrededor del lumen central [57].

PROPIEDADES FÍSICAS

En la siguiente tabla se resumen las propiedades físicas y mecánicas del kenaf en comparación con otras fibras naturales:

Tabla 16. Propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales [58]

Fibra	Densidad (g/m^3)	Diámetro (μm)	Fuerza de tensión (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformación a rotura (%)
KENAF	**-**	**-**	**930**	**53**	**1,60**
Algodón	1,50-1,60	-	287-800	5,5-12,6	7,8-8,0
Yute	1,30-1,45	25-200	393-773	13-26,5	1,16-1,5
Lino	1,50	-	345-1100	27,6	2,7-3,2
Cáñamo	-	-	690	70	1,6
Sisal	1,45	50-200	468-640	9,4-22,0	3,0-7,0

CONSTITUYENTES QUÍMICOS

La composición química de las fibras naturales más importantes se resume en la siguiente tabla:

Tabla 17. Composición química de las fibras naturales [58]

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Pectina (%)
KENAF	**31,0-39,0**	**21,5**	**15,0-19,0**	**-**
Algodón	82,7	5,2	-	-
Yute	61,0-71,5	13,6-20,4	12,0-13,0	0,2
Lino	71,0	18,6-20,6	2,2	2,3
Cáñamo	70,2-74,4	17,9-22,4	3,7-5,7	1,9
Sisal	67,0-78,0	10,0-14,2	8,0-11,0	10,0

La celulosa es el componente mayoritario de las fibras naturales vegetales. La celulosa cristaliza de diferentes formas dependiendo de su procedencia y de los tratamientos a los que se somete, conociéndose cuatro configuraciones cristalinas diferentes.

La hemicelulosa es un polisacárido químicamente heterogéneo formado por diferentes unidades de monosacáridos incluyendo pentosas y hexosas enlazadas entre si

formando estructuras ramificadas y en general amorfas, con una cadena más corta que la de la celulosa.

La lignina aporta rigidez a las plantas. Se trata de un compuesto formado por constituyentes alifáticos y aromáticos con alto peso molecular. Su estructura química no ha sido definida con exactitud. No obstante lo anterior, la lignina se caracteriza por su alto contiendo en carbono y su bajo contenido en hidrógeno.

PRODUCCIÓN

El kenaf se cultiva principalmente en regiones tropicales y subtropicales de la India, Sudeste de Asia y América Central.

Tabla 18. Producción mundial de kenaf
Fuente: FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE KENAF Y FIBRAS AFINES						
en miles de toneladas (t)						
País/Zona	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10
Lejano Oriente	**302,3**	**262,1**	**250,3**	**260,2**	**217,3**	**227,6**
China	86,9	82,8	86,8	86,8	80,0	80,0
India	156,4	153,0	144,0	139,7	120,0	131,2
Indonesia	7,0	7,0	3,1	4,0	3,8	3,8
Tailandia	35,7	4,6	3,6	2,2	2,9	1,8
Vietnam	14,2	12,6	10,6	25,7	8,8	9,0
Camboya	0,9	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3
Pakistan	1,2	1,3	1,6	1,5	1,5	1,5
Oriente próximo	**3,7**	**3,7**	**3,7**	**3,7**	**3,7**	**3,7**
América del Sur y Caribe	**25,9**	**39,4**	**40,0**	**39,1**	**38,4**	**38,4**
Brasil	12,6	26,1	26,0	25,7	25,1	25,1
Cuba	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Otros	3,3	3,3	4,0	3,4	3,3	3,3
África	**13,2**	**13,2**	**13,3**	**13,3**	**13,3**	**13,3**
Países desarrollados	**7,0**	**7,0**	**7,0**	**7,0**	**7,0**	**7,0**
TOTAL PRODUCCIÓN	**352,1**	**325,4**	**314,3**	**323,3**	**279,7**	**290,0**

APLICACIONES

Tanto las fibras largas como cortas se aplican hoy por hoy para usos específicos dentro de la industria del papel, textil y elaboración de materiales compuestos. El uso principal con el que ha contado la fibra de kenaf ha sido la fabricación de sacos, cuerdas, tela tosca y papel. No obstante, cada vez más se está apostando por las fibras naturales como material para multitud de aplicaciones. A continuación se relacionan algunas de las aplicaciones habituales de este material:

USOS TRADICIONALES

El kenaf ha sido un material idóneo para la fabricación de cuerdas, cordeles y aplicación en la industria textil. No obstante lo anterior el uso en este campo ha sido desplazado por las fibras sintéticas apenas utilizándose actualmente. Tanto las hojas como incluso las plantas jóvenes han servido y sirven como alimento en ganado, ricas en proteínas con una excelente digestibilidad.

APLICACIONES DE VALOR MEDIO

Otra de las aplicaciones que mayor auge ha recibido en los últimos años es la fabricación de papel, como alternativa para la obtención de celulosa al tratarse de una planta de ciclo corto evitando la deforestación y tala de bosques. Las fibras largas de la corteza exterior son especialmente adecuadas para la fabricación de papeles de calidad especial. No obstante, su empleo en este campo se puede hacer de forma integral (ambos tipos de fibras) o separando los diferentes tipos de fibras obteniendo una diferente gama de calidades. Las pastas de kenaf son ideales para papel de prensa, impresión, escritura, e incluso embalaje y se pueden usar en la mayoría de calidades de papel. Otras aplicaciones de valor medio son productos de madera, esteras medioambientales o material absorbente para aceite y líquidos.

AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO

Existen productos comerciales elaborados a partir de fibra de kenaf susceptible de ser utilizado como aislante térmico y como aislante de ruido a impacto. Este tipo de producto está muy ligado al concepto de “arquitectura sostenible” y permite, con un

material natural, contribuir a los objetivos fijados en la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios.

En lo relativo al aislamiento térmico, el coeficiente de conductividad térmica (λ) obtenido es uno de los más bajos en relación a otros materiales aislantes de gran profusión en las edificaciones actuales.

Tabla 19. Comparativa conductividad térmica de materiales aislantes
Fuente: elaboración propia a partir de resultados de Optimer System y Catálogo de Elementos Constructivos CTE [59]

Material o producto	Densidad ρ (kg/m^3)	Coeficiente λ (W/m·K)
Panel Isolkenaf P (60 kg/m^3)	**60**	**0,036**
Panel Isolkenaf P (30 kg/m^3)	**30**	**0,039**
Poliestireno Expandido (EPS)	-	0,039-0,029
Poliestireno Extruido (XPS) CO_2	-	0,039-0,033
Poliestireno Extruido (XPS) HCF	-	0,039-0,029
Lana mineral (MW)	-	0,050-0,031
Espuma rígida Poliuretano (PUR) CO_2	40-60	0,035-0,032
Espuma rígida Poliuretano (PUR) HCF	30-60	0,028

Los valores anteriores permiten obtener mayores resistencias térmicas que con el empleo de muchos de los aislantes habituales empleados en construcción para los elementos de la envolvente del edificio y con ello, un considerable ahorro energético del inmueble, empleando un recurso económico, abundante y reciclable. Los paneles que se indican en la tabla anterior están realizados a base de fibra de kenaf termofijada.

Respecto del empleo de este material como aislamiento acústico existen productos para su empleo en suelos y forjados al objeto de reducir su ruido a impacto. La reducción que puede obtenerse llega hasta los 33 dB para una densidad de 60 kg/m^3 y espesores que oscilan entre los 8 y 15 mm. Este tipo de producto está realizado en fibra de kenaf termofijado con una hoja de polietileno de protección, permitiendo mejorar el aislamiento a ruido a impacto previsto en el Documento Básico de protección frente al Ruido incluido en el Código Técnico de la Edificación (CTE), fijado en 60 ó 65 dB, según el uso de los espacios que separen los elementos constructivos horizontales, tal y como se establece en el apartado 2.1.2. del precitado documento.

ACEITE DE KENAF

El kenaf permite la elaboración de aceite a partir de él, comestible, en especial empleado en la elaboración de comidas para ganado. También puede ser usado en en la industria cosmética. Una de las aplicaciones en mayor auge en los últimos años para este tipo de productos agrícolas es su empleo como lubricantes o en la producción de biofuel.

MATERIALES COMPUESTOS O COMPOSITES

Las fibras de kenaf pueden ser usadas como refuerzo de materiales compuestos cuya matriz se realice con resinas epoxy o termoplásticos (como por ejemplo polipropileno). Ejemplos de este tipo de aplicación son los productos elaborados por compañías de automoción que cada vez más investigan en este campo e incorporan a sus vehículos piezas elaboradas con este material. También en la industria de telefonía móvil se cuentan con ejemplos de materiales compuestos elaborados a partir de una matriz polimérica, como el ácido poliláctico (PLA) reforzado con fibras de kenaf.

01.02. ABSORBENTES ACÚSTICOS

01.02.01. MATERIALES UTILIZADOS

El sonido puede definirse como una onda de presión que se propaga en un medio elástico, transportando cierta cantidad de energía, que se puede evaluar cuantitativamente a partir de medidas de la presión e intensidad sonoras [60]. La pérdida de energía acústica en el interior de un recinto es función de la absorción acústica, concepto que lleva asociadas dos componentes importantes, si bien la primera muchas veces es obviada lo que puede dar lugar a errores importantes en el diseño de recintos.

La primera de las componentes de la absorción acústica en el interior de un recinto es la absorción en el seno del aire (más genéricamente en el seno de un fluido o un sólido). La densidad de energía disminuye al propagarse la perturbación acústica debido a procesos viscoelásticos de degradación y moleculares, de relajación [60]. Al ser el aire un medio homogéneo se puede admitir que esta componente de la absorción es función del tiempo o de la distancia recorrida. Cobra especial relevancia en recintos de grandes dimensiones, donde la atenuación acústica puede ser importante, mientras que en pequeños recintos puede llegar a ser prácticamente despreciable.

La segunda de las componentes es la que más nos interesa desde el punto de vista del presente trabajo ya que está relacionada con las propiedades de los materiales que revisten interiormente el recinto objeto de estudio, el coeficiente de absorción acústica. Este coeficiente no es más que la fracción de energía no reflejada por una superficie u objeto en relación a la energía incidente, por lo que no hace mención a la disipación de energía que se produce en el seno del material. No obstante lo anterior, el coeficiente de absorción acústica dependerá de la solución constructiva en su conjunto, incluso al trasdós del revestimiento superficial, ya que, como veremos, trasdosados de un mismo material rellenos en su trasdós o separados del soporte unos centímetros dejando una cámara de aire contarán con diferente comportamiento acústico en función de la frecuencia de la onda incidente.

El coeficiente de absorción acústica depende de la frecuencia y más secundariamente del ángulo de incidencia, si bien este aspecto, muy relacionado con la acústica variable, es susceptible de ser abordado en un trabajo específico e independiente. Las

frecuencias de interés en edificación están función de la sensibilidad del oído humano (rango de audición) y se adoptan en bandas de octava la siguiente serie:

Tabla 20. Rango de frecuencias de interés en edificación
Fuente: "Frecuencias Preferentes" definidas en el Anexo 1 de la NBE CA-88 [61]

Rango de frecuencias en bandas de octava (Hz)					
125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**

El coeficiente de absorción acústica, especialmente de materiales comercializados, se suministra en tercios de octava, para las frecuencias siguientes: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000 y 5.000 Hz. Adicionalmente, pero solo de forma orientativa, se puede indicar el coeficiente con referencia al valor a 500 Hz, o preferiblemente mediante el coeficiente NRC (coeficiente de reducción de sonido) definido como la media aritmética de los coeficientes de absorción acústica a 250, 500, 1.000 y 2.000 Hz [60]. Por último, la norma EN ISO 11654 [62] permite evaluar de forma global la absorción acústica definiendo un coeficiente de absorción sonora ponderado α_w.

CLASIFICACIÓN DE MATERIALES Y SISTEMAS

Una propuesta de clasificación realizada por los Doctores D. Antonio Moreno Arranz y D. Carlos de la Colina Tejeda en su libro "Acústica en la Edificación" [60] está relacionada con los procesos y mecanismos de degradación de la energía acústica. En la clasificación propuesta, como verdaderos materiales son los primeros, esto es, los materiales porosos mientras que el resto realmente son dispositivos absorbentes o sistemas constructivos absorbentes para unos usos muy específicos y determinados o para un rango de frecuencias específico.

Los principales tipos de materiales absorbentes son los que se establecen en el siguiente diagrama, si bien cada vez más se está investigando en nuevos materiales, especialmente a partir de materiales reciclados como veremos.

Figura 07. Tipos de los principales materiales y sistemas absorbentes
Fuente: Acústica en la Edificación [60]

MATERIALES POROSOS [60]

Los materiales porosos se caracterizan por estar constituidos por un medio sólido o esqueleto recorrido por cavidades o poros con mayor o menor tortuosidad, parámetro por tanto a tener en cuenta en la caracterización de este tipo de materiales, en contacto con el exterior. La principal característica desde el punto de vista acústico de este tipo de materiales es que producen una degradación de la energía acústica por fricción viscosa del fluido (aire en este caso) en el seno de las cavidades, cuya superficie alcanza en estos medios una proporción muy superior a su volumen. La intercomunicación entre cavidades o poros y entre éstas y el exterior es otra de las características que definen a los materiales porosos.

Los materiales porosos se dividen en dos tipos, en función de su comportamiento acústico, los porosos rígidos y los porosos flexibles cuya definición está relacionada por la naturaleza de su esqueleto. Los primeros se caracterizan por contar con un coeficiente de absorción que aumenta con la frecuencia, es decir, a frecuencias altas el coeficiente de absorción es mayor que a frecuencias bajas, donde llega a ser prácticamente despreciable. Los materiales porosos flexibles cubren con un elevado coeficiente de absorción acústica tanto las frecuencias altas (sin llegar en ocasiones a

los anteriores) como las medias, lo cual permite ser empleados para la corrección de un mayor espectro de frecuencias según el uso de la sala.

RESONADORES [60]

Los resonadores no son propiamente materiales absorbentes, sino dispositivos absorbentes o sistemas constructivos que en este caso, producen absorción mediante un proceso de resonancia. El movimiento de resonancia de parte del sistema permite extraer energía del campo acústico de la sala de forma selectiva, lo cual es su principal ventaja ya que se puede calcular para bandas de frecuencias determinadas.

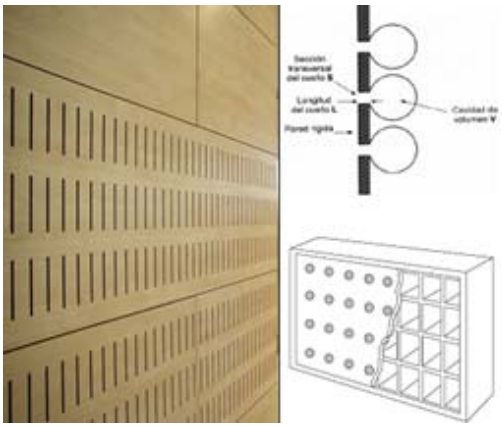


Figura 08. Ejemplo y esquema de resonador tipo Helmholtz
http://www.soloarquitectura.com/foros/showthread.php?60397-Resonador-Helmholtz

Los resonadores Helmholtz y los paneles perforados cuentan con una parte móvil que es el aire contenido en el cuello o conducto que pone en contacto la cavidad posterior que actúa como elemento elástico o muelle con respecto al campo acústico del recinto. En función de diferentes parámetros como el número de perforaciones, su diámetro (en el caso de que sean perforados) y el volumen de la cavidad interior puede calcularse la frecuencia de resonancia.

La frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz simple se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\mathrm{fr} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{s}{\mathrm{l}\cdot V}}$$

Expresión 01

Donde (en unidades M.K.S.):

c: velocidad del sonido en el aire (m/s)

s y l: área de la sección transversal (m^2) y longitud (m) efectiva del cuello del resonador

V: volumen de la cavidad (m^3)

Para resonadores con cuello cilíndrico de radio r, la longitud efectiva indicada anteriormente se obtiene añadiendo a la longitud geométrica el valor 1,60 r. La expresión anterior es aplicable a los paneles perforados para los que se escribe de forma simplificada de la siguiente forma:

$$\mathrm{fr} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{P}{\mathrm{l} \cdot D}}$$

Expresión 02

Donde (en unidades M.K.S.):

P: es el cociente entre el área de perforaciones y total

D: profundidad de la cámara de aire (m)

l: longitud efectiva de las perforaciones (m)

En los resonadores de tipo membrana, como se deduce de su nombre, la parte móvil está constituida por una plancha, película o panel, manteniéndose como elemento elástico la cámara de aire posterior, como en el caso anterior, o bien un colchón o capa elástica para los absorbentes denominados tipo Békésy. Una de las principales características de este tipo de resonadores es obtener frecuencias de resonancia de los espectros de frecuencias más bajos, permitiendo por tanto junto con los materiales absorbentes descritos en apartados anteriores cubrir prácticamente todas la banda de frecuencias de la acústica de salas.

La frecuencia de resonancia en la que se produce un máximo de absorción de energía

$$\mathrm{fr} = \frac{1}{2\cdot\pi}\sqrt{\frac{\rho \cdot c^2}{M \cdot D}}$$

Expresión 03

Donde (en unidades M.K.S.):

M: masa por unidad de superficie (kg/m^2)

D: profundidad de la cámara de aire (m)

$\rho \cdot c^2$: módulo de compresión adiabática del aire

Si la profundidad de la cámara es infinita, es decir, cuenta con una dimensión muy superior en relación al espesor del material, las propiedades elásticas del material son las que regulan la absorción acústica, constituyéndose los resonadores de membrana

o placa propiamente dichos. La frecuencia fundamental de resonancia en estos casos viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathrm{fr} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{a^2}+\frac{1}{b^2}\right)} \cdot \frac{E \cdot d^3}{12 \cdot (1-\sigma) \cdot M}$$

Expresión 04

Donde:

a y b: lados del panel rectangular (m)

d: espesor del panel (m)

M: masa por unidad de superficie (kg/m^2)

E: módulo de Young

σ: Coeficiente de Poisson

MIXTOS [60]

Los dispositivos absorbentes mixtos o soluciones constructivas mixtas se forman por combinación tanto de los materiales porosos propiamente dichos como por los resonadores, constituyendo la mayor parte de los materiales que tratan de cubrir el mayor espectro de frecuencias posibles.

ANECOICOS [60]

Este tipo de dispositivos también se denominan de variación progresiva pues se basan en que la reflexión de una onda acústica se produce cuando se encuentra una variación de las características físicas del medio en que se propaga. Este tipo de sistemas adaptan la impedancia acústica específica del aire y de las superficies del recinto, obteniendo coeficientes de absorción acústica para incidencia normal muy elevado, superiores al 99% a partir de una determinada frecuencia llamada frecuencia de corte, lo cual los hace muy indicados (casi específicos) para el revestimiento de estudios de grabación (cámaras anecoicas).

CLASIFICACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 11654:1997 [62]

La norma EN ISO 11654:1997 tiene como objeto convertir en un índice de evaluación único los valores del coeficiente de absorción acústica en cada frecuencia de un determinado material. La propia disposición recomienda que para diseños más

esmerados de espacios no se emplee este método y que se utilicen los valores completos en las distintas frecuencias. No obstante, para usos más corrientes, se trata de una forma de simplificar las propiedades de un determinado producto.

El sistema de clasificación se establece en el anexo B de la citada norma en función del valor del coeficiente de absorción acústica ponderado (α_w) definido como el valor único independiente de la frecuencia igual al valor de la curva de referencia a 500 Hz, curva que se obtiene a partir del desplazamiento de la curva de absorción acústica a distintas frecuencias del material en cuestión.

De esta forma, la clasificación propuesta por esta norma internacional para los materiales absorbentes en función de su coeficiente de absorción acústica ponderado (α_w) es la siguiente:

Tabla 21. Clases de absorción acústica
Fuente: norma EN ISO 11654:1997 [62]

Clase de absorción acústica	α_w
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Sin clasificar	0,10; 0,05; 0,00

Para calcular el coeficiente de absorción acústica ponderado (α_w) partimos del coeficiente de absorción acústica práctico (α_{pi}) para cada frecuencia, obtenido mediante el método de ensayo de la norma ISO 10534 que explicaremos más adelante. Una vez obtenido se realiza una traslación de la curva de referencia por pasos de 0,05 hacia el valor medido hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea menor o igual que 0,10. Las curvas de referencia para la realización de dicha traslación son las que se muestran a continuación:

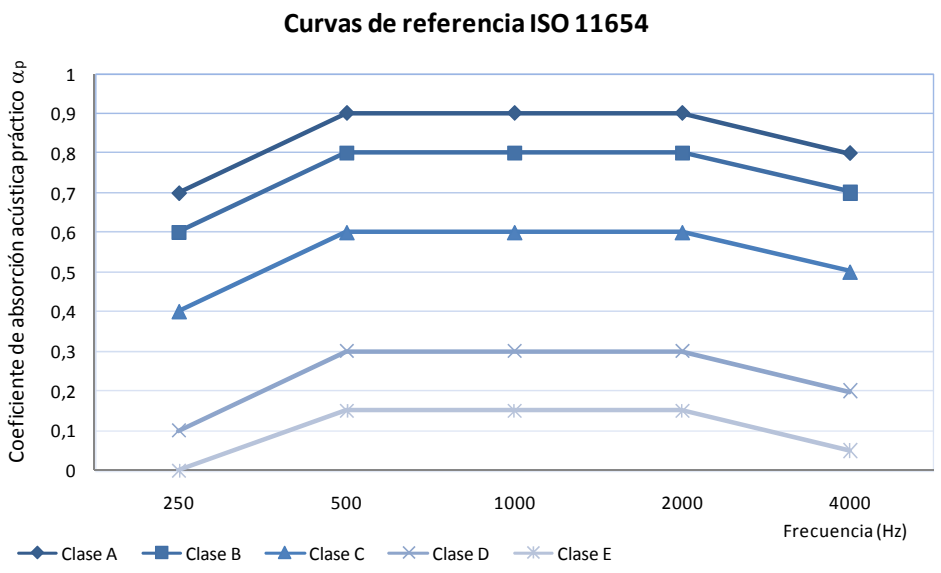


Figura 09. Curvas de referencia según ISO 11654 [62]

01.02.02. ABSORBENTES ACÚSTICOS A BASE DE NEUMÁTICO, CORCHO Y KENAF

En los apartados anteriores se han indicado de forma somera las principales aplicaciones con las que cuentan los residuos de neumáticos, los subproductos del corcho o la fibra de kenaf, entre las que se encuentran aplicaciones en el campo de la acústica. El objeto de este apartado es resumir las principales aplicaciones de estos materiales como materiales absorbentes, poniendo de manifiesto la práctica inexistencia de estudios específicos en la acústica de salas a excepción del corcho, material que se ha empleado de forma profusa en el revestimiento interior de salas de música, conferencias, audición... tanto por motivos estéticos y de diseño como por sus propiedades acústicas.

EL NEUMÁTICO

El neumático fuera de uso (NFU) se ha empleado como material absorbente en exteriores, principalmente en la formación de barreras acústicas de carreteras. Para este uso se han utilizado tanto enteros, formando estructuras que se recubren con tierra, como mediante la elaboración de paneles prefabricados a partir de caucho granulado aglomerado con resinas de poliuretano. No existen a priori experiencias con otro tipo de aglomerante, al menos desde un punto de vista comercial.

El empleo del neumático fuera de uso en el aislamiento acústico de edificios (lo que podríamos definir como "acústica arquitectónica") se encuentra en vía de experimentación, existiendo recientes publicaciones sobre la posibilidad de su empleo para garantizar el aislamiento acústico a ruido aéreo exigido por el Documento Básico de protección contra el ruido DB-HR incluido en el Código Técnico de la Edificación. [63] Estas publicaciones se han centrado especialmente en el aprovechamiento de la fibra textil que compone el neumático, un material que tiene un menor aprovechamiento que el resto de componentes que conforman este residuo, con el objeto de poder sustituir a materiales más convencionales en la acústica arquitectónica.

No existen, a priori, aplicaciones de este tipo de residuo en el acondicionamiento acústico del interior de salas ("acústica de salas") al objeto de dotar a las mismas de unos parámetros acústicos de calidad en función del uso al que se destine, o bien su empleo en zonas de circulación y áreas a las que sea de aplicación los tiempos de reverberación exigibles en el Documento Básico de protección contra el ruido DB-HR incluido en el Código Técnico de la Edificación.

EL CORCHO

El corcho es un clásico de los materiales de revestimiento interiores de salas al objeto de tratar de proporcionar unas adecuadas características acústicas al recinto. Este material natural se ha empleado de forma profusa para el revestimiento de paramentos verticales y horizontales de salas a las que se pretendía dotar de unos parámetros acústicos determinados, si bien en ocasiones, el mantenimiento de este material natural para determinadas aplicaciones (como por ejemplo la protección del suelo mediante encerado o barnizados) anulaba parte de las propiedades absorbentes.

El corcho granulado es un subproducto que viene a dar respuesta a este tipo de revestimiento permitiendo mantener la producción de la industria taponera, con un mayor margen de beneficio tal y como hemos podido comprobar. El corcho granulado es un material que permite su empleo en el acondicionamiento acústico de salas, conservando las propiedades del corcho natural y posibilitando la modificación de parámetros acústicos en función del tipo de granulometría empleada así como del

aglutinante empleado. Sin embargo, los productos disponibles en el mercado no suelen ofrecer esta posibilidad.

EL KENAF

La fibra de kenaf, desde un punto de vista acústico, se emplea como aislante a ruido de impacto, existiendo en el mercado productos comerciales que aprovechan esta propiedad, permitiendo obtener una reducción de hasta 33 dB de ruido a impacto y sirviendo para formar soluciones constructivas que cumplan con las prescripciones previstas en el Documento Básico de protección contra el ruido DB-HR incluido en el Código Técnico de la Edificación. Este tipo de aislamiento se incluye dentro de lo que denominamos acústica arquitectónica que comprende tanto el aislamiento acústico a ruido aéreo como el aislamiento acústico a ruido a impacto.

Sin embargo, en lo relativo a la acústica de salas, el kenaf no es comercializado como tal, si bien existen en el mercado materiales absorbentes a base de fibras, fundamentalmente de madera; algunos de ellos se han consolidado como conocidas marcas comerciales.

01.03. OBJETIVO E INTERÉS DE LA TESIS

La presente Tesis Doctoral trata sobre el empleo de residuos de neumático, subproductos de la industria del corcho y la incorporación de fibras de kenaf, para la fabricación de materiales que permitan su aplicación como revestimiento en el interior de salas de edificios para mejorar el comportamiento acústico de las mismas en función del uso previsto.

La Comunidad Autónoma de Extremadura cuenta con una gran producción de corcho y, potencialmente, de kenaf, motivo por el cual se ha tratado de buscar una aplicación alternativa a estos recursos naturales que permitan una continuidad al sector para el primer caso y una alternativa a la producción forestal para el segundo. Los productos preparados combinan las tres materias primas citadas con diversos ligantes, y se caracterizan en función de su granulometría, textura, estructura porosa y, especialmente, la determinación del coeficiente de absorción acústica e impedancia con ayuda de tubos de impedancia según la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002. Los resultados obtenidos permiten su aplicación en proyectos reales mediante software de simulación acústica. Con ello se puede comprobar la incidencia que puede tener el empleo de los mismos en la obtención de unos parámetros acústicos de calidad en función del uso al que se destine el edificio.

Los objetivos de esta tesis son los que se citan a continuación:

a) Análisis de los materiales de partida desde el punto de vista granulométrico y textural, esta última mediante la realización de isotermas de adsorción de N_2 a -196 ºC, porosimetrías de mercurio y determinación las densidades de He y Hg.

b) Caracterización de los materiales de partida mediante la realización de microscopías electrónica de barrido al objeto de constatar los parámetros texturales anteriormente ensayados.

c) Fabricación de materiales aglomerados a base de neumático, corcho y kenaf, con diferentes tipos de ligantes, modificando las proporciones de cada uno de los componentes hasta concluir con un amplio espectro de variables.

d) Caracterización de los materiales aglomerados mediante microscopía óptica con el fin de poder verificar la formación de poros intergranulares susceptibles de contribuir a la disipación de energía acústica de las muestras elaboradas.

e) Caracterización de los materiales aglomerados desde un punto de vista acústico mediante la determinación del coeficiente de absorción acústico con la ayuda de tubos de impedancia según norma UNE-EN ISO 10534-2:2002. Con esta información trataremos de poner en relación los resultados de la caracterización textural con los valores de los coeficientes de absorción acústica con el fin de dilucidar los mecanismos que inciden en la pérdida de energía acústica en este tipo de materiales porosos y las variables a tener en cuenta.

f) Selección de las muestras con las mejores propiedades y simulación mediante software de su comportamiento en proyectos de edificios reales para el acondicionamiento acústico de salas.

El interés del desarrollo de este trabajo de investigación viene motivado por las siguientes consideraciones:

- La necesidad de promover la utilización de materiales procedentes del reciclaje de los NFU tal y como establece el Plan Nacional Integrado de Residuos vigente. Para el año 2015 se establece que hasta un 45% este material se empleará en mezclas bituminosas y un hasta 10% debe ser empleado en otras aplicaciones en las que podría incluirse la elaboración de materiales para el acondicionamiento acústico de salas.

- La elaboración de paneles absorbentes prefabricados con diferentes aglomerantes además del poliuretano, que es el que se está empleando actualmente, nos permitirá investigar sobre la incidencia que tiene el ligante en este tipo de materiales aglomerados desde el punto de vista acústico.

- Investigar sobre las propiedades de un material tan abundante en Extremadura como es el corcho, permite dotar de nuevas perspectivas a la industria más allá

de la taponera con el objeto de que ésta pueda mantenerse pese a un posible aumento de empleo de tapones sintéticos.

- El empleo de corcho como revestimiento interior de espacios para mejorar sus parámetros acústicos no es algo nuevo. No obstante, la combinación de este material con otros (bien procedentes de residuos, bien de sencilla y fácil producción), puede arrojar una nueva amalgama de materiales que permita cubrir un espectro de necesidades mucho más amplio que el obtenido mediante el empleo de corcho únicamente en el revestimiento de estos paramentos.

- El kenaf es una planta que, por sus características, es susceptible de poder crecer en Extremadura, obteniendo por tanto una alternativa más de cultivo a las existentes de obtenerse una viabilidad a las aplicaciones que se pretenden.

- El empleo de kenaf actualmente se limita al aislamiento a ruido de impacto (acústica arquitectónica) no existiendo referencias de su empleo como material para el acondicionamiento acústico de salas aprovechando sus propiedades absorbentes, por lo que el resultado de este trabajo puede arrojar más información sobre la potencialidad de este material en el mundo de la acústica.

- El documento básico de protección frente al ruido (DB HR) incluido en el Código Técnico de la Edificación, en su apartado 2.2. limita uno de los parámetros acústicos de salas, el tiempo de reverberación, para aulas, salas de conferencias, comedores y restaurantes, lo que implica la necesidad de empleo de materiales con un determinado coeficiente de absorción acústica en los revestimientos de estos espacios. La obligatoriedad del cumplimiento de estas prescripciones, sin perjuicio de su empleo en salas de concierto o auditorios que requieren un estudio más pormenorizado, implica un aumento en la necesidad de materiales de los que se conozca su coeficiente de absorción acústica que permitan a los proyectistas optar por el más indicado en función del uso y características de los edificios.

- Para limitar el ruido reverberante en las zonas comunes los elementos constructivos, el documento básico de protección frente al ruido (DB HR)

incluido en el Código Técnico de la Edificación, en su apartado 2.2. prescribe además que los acabados superficiales y los revestimientos que delimitan una zona común de un edificio de uso residencial o docente colindante con recintos habitables con los que comparten puertas, tendrán la absorción acústica suficiente de tal manera que el área de absorción acústica equivalente, A, sea al menos 0,2 m^2 por cada metro cúbico del volumen del recinto. Al igual que el caso anterior, esta obligatoriedad implica una potencial mayor demanda de materiales absorbentes o, al menos, materiales caracterizados desde un punto de vista de su coeficiente de absorción acústica, con el objeto de poder diseñar estas zonas comunes.

01.04. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO I

1. Ambiente, M. M. *Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residos y la lista europea de residuos (BOE nº 43 19/02/02 - corrección errores BOE nº 61 de 12/03/02)*. 6494–6515 (2002).

2. TNU Cuarta memoria anual del Sistema de Gestión Integrado TNU. (2010).

3. Gobierno, P. del *Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos*. (1998).

4. Europea, E. C. de la U. *Directiva 1999/31/CE del Conejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos*. (1999).

5. Europea, E. C. de la U. *Directiva 2000/53/CE del Paralamento Europeo y del Consejo, de 18 de septiembre de 2000, relativa a lo vehíuclos al final de su vida últil.* (2000).

6. Ministros, C. de *Resolución de 8 de octubre de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, 2001-2006*. (2001).

7. Ambiente, M. M. *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de resiudos mediante depósito en vertedero.* (2001).

8. Presidencia, M. de la *Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.* (2005).

9. Ministerio de Medio Ambiente, M. R. y M. *Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015*. (2009).

10. Europea, E. C. de la U. *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. (2008).

11. SIGNUS-ECOVALOR Memoria anual 2010 del Sistema de Gestión Integrado SIGNUS ECOVALOR S.L. (2010).

12. López, F. A. *Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza*. (2005).

13. CEDEX Ficha Técnica 4.2. NFU del CEDEX. (2010).

14. ETRA Tyre Recicling after 2000: Status and Options. (2000).

15. TRB Appropiate Use Of Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry – An information Database. (2001).

16. EPPS, J. A. Use of recycled rubber tires in highways. (1994).

17. CIMTAN Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Actualización. (2008).

18. European Standard prEN 14243. End-of-Life Tyre-Recycling-Materials. (2005).

19. Leal, J. S. Jornada sobre utilización de neumáticos fuera de uso en carreteras: “Otras aplicaciones en ingeniería civil”. (2004).

20. Raz, T. Jornada sobre utilización de neumáticos fuera de uso en carreteras: “Panorámica General sobre la utilización de NFU en carreteras”. (2004).

21. Tejeda Otero, J. Jornada sobre utilización de neumáticos fuera de uso en carreteras: “Pavimentos de seguridad, deportivos y otras aplicaciones”. (2004).

22. Tejeda Otero, J. A. Campos de hierba artificial.

23. Fomento, M. de Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de Publicaciones. (2007).

24. Mesalles, A. Fabricación de granulado de caucho de NFU por molienda mecánica. Seminario sobre Innovación en el Aprovechamiento de NFUs. (2000).

25. Adhikari, B. & Maiti, S. Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science* 25, 909–948 (2000).

26. Mark, H., Bikales, N., Overberger, C. & Menges, G. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. 14–787 (1988).

27. Sharma, V., Fortuna, F., Mincarini, M., Berillo, M. & Cornacchia, G. Disposal of Waste Tyres of Energy Recovery and Safe Environment. *Applied Energy* 65–381 (2000).

28. Mastral, A., Murillo, R., Callen, M. & Garcia, T. Optimisation of scrap automotive tyres recycling into valuable liquid fuels. *Resources Conservation and Recycling* 29, 263–272 (2000).

29. Mastral, A., Alvarez, R., Callen, M., Clemente, C. & Murillo, R. Characterization of chars from coaltire copyrolysis. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38, 1856–2860 (1999).

30. Mastral, A., Murillo, R., Callen, M. & Garcia, T. Application of coal conversion technology to tire processing. *Fuel Process Technol.* 60, 231–242 (1999).

31. Merchant, A. & Petrich, M. Pyrolysis of scrap tires and conversion of chars to activated carbon. *AICHE J.* 39, 1370–1376 (1993).

32. Mastral, A., Murillo, R., Callen, M., Garcia, T. & Snape, C. Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydropyrolysis in a swept fixed bed reactor. *Energy Fuels* 14, 739–744 (2000).

33. ETRma Eurepean Tyre & Rubber manufactures association. at <http://www.etrma.org>

34. Sebastián, L. Aprovechamiento energético de NFU por gasificación. Seminario sobre Innovación en el Aprovechamiento de neumáticos fuera de uso. (2000).

35. Lee, J., Lee, J., Kim, J. & Kim, S. Pyrolysis of waste tires with partial oxidation in a fluidized-bed reactor. *Energy* 20, 969–976 (1995).

36. Cunliffe, A. & Williams, P. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 44, 131 (1998).

37. Murillo, R., Navarro, M. & Garcia, T. Production and application of activated carbons made from waste tire. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 7228–7233 (2005).

38. De Marco Rodriguez, I. *et al.* Pyrolysis of Scrap Tyres. *Fuel Processing Technology* 72, 9 (2001).

39. Murillo, R., Aranda, A., Aylon, E., Callen, M. & Mastral, A. Process for the separation of gas products from waste tire pyrolysis. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 1734–1738 (2006).

40. Williams, P. & Brindle, A. Temperature selective condensation of tyre pyrolysis oils to maximise the recovery of single ring aromatic compounds. *Fuel* 82, 1023–1031 (2003).

41. Ucara, S., Karagoza, S., Ozkanb, A. & Yanikc, J. Fuel. *Fuel* 84, 1884 (2005).

42. Berrueco, C., Esperanza, E., Mastral, F., Ceamanos, J. & Garcia-Bacaicoa, P. Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained. *J. Anal Appl .Pyrolysis* 74, 245–253 (2005).

43. Laresgoiti, M. *et al.* Chromatographic analysis of the gases obtained in tyre pyrolysis. *J. Anal Appl. Pyrolysis* 55, 43–54 (2000).

44. Marcos Fernández, A., Rodríguez Díaz, A. & Fernández Torres, A. Negro de carbono de calidad obtenido por tratamiento térmico de neumáticos usados. *Revista de Plásticos Modernos* 90, 230 (2005).

45. Aranda, A., Murillo, R., Garcia, R., Callen, M. & Mastral, A. Steam activation of tyre pyrolytic carbon black: Kinetic study in a thermobalance. *Chem. Eng. J.* 126, 79–85 (2007).

46. IPROCOR. at <http://www.iprocor.org/>

47. Jiménez, P. & Gil, L. Conservación de recursos genéricos de los Quercus mediterráneos en España.

48. Robert Hooke *Micrographia*. (1665).

49. ASECOR El corcho: ecológico, sostenible y reciclable.

50. ASECOR. at <http://www.asecor.com/index.php?lang=es>

51. FAO El uso del hielo en pequeñas embarcaciones de pesca. (2005).

52. Navascués, E., Calderón, F. & Suárez, J. A. El metabolismo microbiano en el binomio corcho-vino.

53. ASECOR Características del Mercado del Corcho Extremeño – Análisis Estratégico.

54. Jacob, M. & Sabu, T. Carbohydr Polym. (2008).

55. Mediavilla, V., Bassetti, P., Leupin, M. & Mosimann, E. Agarforschung. (1999).

56. Jayaraman, K. Compos Sci Tech. (2003).

57. *Physology and Biochemistry of Plant Cell Walls*. *Chapman & Hall* (Chapman & Hall: London, 1996).

58. Mohanty, A. Macromol Mater Eng. (2000).

59. CSIC Catálogo de elementos constructivos.

60. De la Colina, C. & Moreno, A. *Acústica de la Edificación*. (Madrid, 2005).

61. Dirección General de la Vivienda, la A. y el U. *Norma Básica de la Edificación de Condiciones Acústicas en los Edificios NBE CA-88*. (1988).

62. Normalización, C.-C. E. de *Norma EN ISO 11654 Acústica: Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica*. (1997).

63. Maderuelo-Sanz, R., Nadal-Gisbert, A. V., Crespo-Amorós, J. E. & Parres-García, F. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires. *Applied Acoustics* 402–408 (2012).

CAPÍTULO II – MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

02.01. MATERIALES 74
02.01.01. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU) 74
02.01.01.01. GENERALIDADES 74
02.01.01.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 74
02.01.02. EL CORCHO 75
02.01.02.01. GENERALIDADES 75
02.01.02.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 76
02.01.03. EL KENAF 77
02.01.03.01. GENERALIDADES 77
02.01.03.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 77
02.01.04. COLA 78
02.01.04.01. GENERALIDADES 78
02.01.04.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 79
02.01.05. ESCAYOLA 79
02.01.05.01. GENERALIDADES 79
02.01.05.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 82
02.01.06. FETADIT 83
02.01.06.01. GENERALIDADES 83
02.01.06.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 84
02.01.07. GOMA-LACA 85
02.01.07.01. GENERALIDADES 85
02.01.07.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 87
02.01.08. LIGNINAS 87
02.01.08.01. GENERALIDADES 87
02.01.08.01.01. Estructura y propiedades químicas 87
02.01.08.01.02. Propiedades físicas 90
02.01.08.01.03. Masa molecular y polidispersidad 90
02.01.08.01.04. Solubilidad 90
02.01.08.01.05. Ablandamiento con la temperatura 91
02.01.08.01.06. Ligninas comerciales 91
02.01.08.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 91
02.01.09. TEROKAL 92
02.01.09.01. GENERALIDADES 92

02.01.09.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 93
02.01.10. POLIURETANO 93
02.01.10.01. GENERALIDADES 93
02.01.10.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO .. 97

02.02. MÉTODOS EXPERIMENTALES 98
02.02.01. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE PARTIDA 98
02.02.01.01. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO 98
02.02.01.02. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES 102
02.02.01.02.01. Microscopía electrónica de barrido (SEM) 103
02.02.01.02.02. Densidades por desplazamiento de helio y mercurio 104
02.02.01.02.03. Porosidad total y volumen total de poros 105
02.02.01.02.04. Porosimetría de mercurio 106
02.02.01.02.05. Isoterma de adsorción 108
02.02.01.02.05.01. Interpretación 109
02.02.01.02.05.02. Ecuación de Brunauer-Emmett-Teller 111
02.02.01.02.05.03. Ecuación de Dubinin-Radushkevich 113
02.02.01.02.05.04. Lectura del volumen adsorbido en la isoterma 115
02.02.01.02.05.05. Método de Horvath-Kawazoe 115
02.02.01.02.05.06. Método DFT 116
02.02.01.02.05.07. Metodo de Barret-Joyner-Halenda (BJH) 117
02.02.02.PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS 118
02.02.02.01. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA 118
02.02.02.02. MÉTODOS DE PREPARACIÓN 120
02.02.03. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES AGLOMERADOS 124
02.02.03.01. MICROSCOPÍA ÓPTICA 124
02.02.03.02. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA 125
02.02.03.02.01. Introducción 125
02.02.03.02.01.01. Caracterización acústica de materiales 127
02.02.03.02.01.02. Métodos de medida basado en el tubo de impedancia 127
02.02.03.02.01.03. Métodos basados en el tubo de impedancia 129
02.02.03.02.01.04. Norma UNE-EN ISO 10534-2 139
02.02.03.02.02. Coeficiente de absorción acústica 143
02.02.03.02.03. Resistencia al flujo de aire 143
02.02.03.02.04. Porosidad 144
02.02.03.02.05. Factor de estructura o tortuosidad 146

02.02.03.02.06. Forma de poro y longitudes características 147
02.02.03.02.07. Distribución de tamaño de poro 149
02.02.03.02.08. Constante de propagación e impedancia característica y específica de materiales porosos 150
02.02.03.03. MODELOS ACÚSTICOS DE MATERIALES ABSORBENTES 151
02.02.03.03.01. Modelo de Delany-Bazey 152
02.02.03.03.02. Modelo de Horoshenkov, Attenborough y Chandler-Wilde (HAC-W) 154
02.02.03.03.03. Modelo de Miki 155
02.02.03.03.04. Modelo de Allard y Champoux 156
02.02.03.03.05. Modelo de Voronina 157
02.02.03.03.06. Modelo de Dunn y Davern 158
02.02.03.03.07. Modelo de Garay y Pompoli 159
02.02.03.03.08. Modelo utilizado 161
02.02.03.04. EQUIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA 162
02.02.04. APLICACIÓN COMO ABSORBENTE ACÚSTICO: SIMULACIÓN ACÚSTICA EN SALA 164
02.02.04.01. DIFERENCIA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA Y ACÚSTICA DE SALAS 164
02.02.04.02. TEORÍAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMPO SONORO EN RECINTOS 166
02.02.04.02.01. Teoría estadística 166
02.02.04.02.02. Teoría geométrica 168
02.02.04.02.03. Teoría ondulatoria 170
02.02.04.02.04. Teoría psicoacústica 171
02.02.04.03. PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA DE UNA SALA 172
02.02.04.03. MODELOS DE SIMULACIÓN 184
02.02.04.03.01. Generalidades 185
02.02.04.03.01.01. Modelos de dos dimensiones 185
02.02.04.03.01.02. Modelos de tres dimensiones 187
02.02.04.03.02. Modelos computacionales de simulación de acondicionamiento acústico de recintos 191
02.02.04.05. CASO CONCRETO Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN EMPLEADO 192
02.03. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO II 195

02.01. MATERIALES

02.01.01. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU)

02.01.01.01. GENERALIDADES

Poco queda por decir de este material que no se haya desarrollado con más o menos detalle en el capítulo primero de este trabajo. solo queda volver a hacer hincapié en la necesidad de promoción de los materiales procedentes del reciclaje de los NFU tal y como se establece en el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.[1]

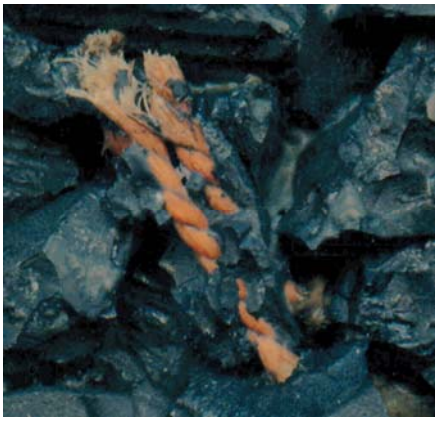
02.01.01.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

El material empleado para la realización de este trabajo ha tenido dos fuentes diferentes de suministro, tanto como material natural facilitado a través de un gestor de residuos autorizado como material ya procesado, suministrado a través de empresas de tratamiento de los NFU con las propiedades que se indican.

Las muestras, en un primer momento, se prepararon a partir de neumáticos usados cuyo destino inicial era el almacenaje hasta tanto no se pudiera proceder a una adecuada gestión por empresa autorizada. Tal y como se describirá en los siguientes apartados, este material de partida se sometió a un proceso de trituración primaria en un molino de mandíbulas con el fin de obtener un tamaño de partícula adecuado y de llevar a cabo una eliminación preliminar de impurezas como arena, polvo, etc. El producto resultante de esta trituración se hizo pasar por un molino de cuchillas para obtener el tamaño de partícula final.

El resultado de este primer procesado nos dio un material en el que se contaba con todos los componentes de los NFU, esto es, tanto las fases de material a base de caucho y elastómeros, como aquellas otras textiles y de acero ya que la molienda se realizaba de forma conjunta.

Tal y como puede observarse en la fotografía el material resultante contaba con fracciones de los distintos componentes. Con este producto se pudo hacer una primera aproximación a la granulometría óptima a emplear para las distintas mezclas con distintos aglomerantes. Se determinaron pues las fracciones granulométricas idóneas de este componente.



Fotografía 03
NFU tras molienda

En una segunda fase, para la fabricación de las probetas definitivas, se optó por emplear productos facilitados por la empresa "RECIPNEU" [2] de Sines (Portugal) dedicada al procesado y transformación de los NFU empleando la técnica ya descrita de los tratamientos criogénicos en los que se combinan los procesos mecánicos con los químicos o térmicos. Con este tipo de tratamiento obtenemos un material puro, únicamente a base de caucho y elastómeros, separando las fases textiles y metálicas, con el tamaño de partícula adecuado según el estudio granulométrico realizado.

El motivo por el cual se procede a emplear este tipo de material ya tratado es evitar que la presencia de fases textiles principalmente no aleatoriamente distribuidas en una probeta de reducidas dimensiones puedan desvirtuar el resultado del ensayo de absorción acústica. Los tamaños de partícula empleados son los que se indicarán en el apartado correspondientes a preparación y elaboración de las muestras.

02.01.02. EL CORCHO

02.01.02.01. GENERALIDADES

En el capítulo primero de este trabajo se ha puesto de manifiesto cuáles son los retos de futuro que debe afrontar la industria corchera en general, y la extremeña en particular. La búsqueda de nuevas aplicaciones que amplíen el abanico de posibilidades que ofrece este material natural es un reto que debe afrontarse con el fin de obtener nuevas alternativas al continuo avance de la industria taponera sintética.

El corcho con escasa aplicación industrial (desperdicios, granulado, triturado...) cuenta con muy poco rendimiento económico frente al corcho empleado en la industria taponera (975,74 €/tonelada del primero frente a los 22.974,54 €/tonelada que representan los segundos). Investigar sobre nuevas aplicaciones tecnológicas que permitan una mejor puesta en uso del primer grupo podría permitir un acercamiento entre ambas cifras, lo cual redundaría en un beneficio del sector. Por este motivo se ha tratado de incorporar como material de partida a los trabajos que se desarrollan en este apartado corchos con escasa o nula aplicación industrial.

02.01.02.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

Los "residuos" del corcho empleados han sido suministrados por la ya extinguida empresa Sanvicork de la pacense localidad de San Vicente de Alcántara. Esta empresa fabricaba granulados de corcho y tapones de aglomerado para vinos tranquilos, de aguja, cerveza y sidra, hasta que recientemente ha tenido que cerrar sus puertas dejando en el paro a una veintena de trabajadores con motivo de la reducción de consumo y avance de la industria sintética taponera, lo cual refuerza aún más la idea planteada anteriormente sobre la necesidad de búsqueda de alternativas tecnológicas a esta materia prima.

El material facilitado al inicio de este trabajo fueron residuos sin aplicación industrial que debemos considerar como subproductos y no como residuos propiamente dichos según la legislación vigente en materia de gestión de residuos. Al igual que hemos hecho con el neumático, al corcho lo hemos sometido a un proceso de trituración y molienda con el objeto de reducir el tamaño de partícula. En primer lugar se ha hecho pasar por un molino de mandíbulas, especialmente para reducir las piezas de mayor tamaño. Tras este proceso de molienda se ha sometido a la acción de un molino de cuchillas, obteniendo el producto definitivo al que haremos el análisis granulométrico que más adelante se describe.

02.01.03. EL KENAF

02.01.03.01. GENERALIDADES

El kenaf (*Hibiscus cannabinus*) tal y como se ha definido en el capítulo primero de este documento es una planta herbácea cuya característica principal es el rápido crecimiento, lo que se traduce en un interesante potencial aprovechamiento económico de sus fibras. Las fibras vegetales que se obtienen de esta planta provienen de su tallo, existiendo de dos tipos, las largas extraídas de la corteza exterior y las cortas procedentes del núcleo.

02.01.03.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

El kenaf empleado como material de partida en la realización de este trabajo ha sido facilitado por el centro de investigación de La Orden - Valdesequera, dependiente de la Dirección General de Modernización e Innovación Tecnológica de la actual Consejería de Empleo, Empresa e Innovación del Gobierno de Extremadura. Este centro con una trayectoria de 40 años inició su andadura en 1972 como Centro Regional de Investigación y Desarrollo Agrario de la División 8 (CRIDA 08)[3], llegando a nuestros días como un referente en la investigación en los sectores agrícolas y ganaderos así como recursos forestales y pastos. Las principales funciones de este centro de investigación son las relativas a:

- Experimentación
- Investigación
- Recursos fitogenéticos
- Desarrollo Tecnológico: Desarrollo de tecnologías novedosas para el sector agropecuario en relación con empresas.
- Formación: Formación de personal investigador y tecnólogos, así como formación práctica de estudiantes universitarios de facultades o escuelas relacionadas con el sector agropecuario.
- Transferencia de tecnología: Transferencia de los resultados de los proyectos a agricultores, empresas, cooperativas, asociaciones, universidades mediante la realización de jornadas, congresos, charlas, etc.

Este centro de investigación ha desarrollado en los últimos años numerosos estudios sobre la viabilidad de producción de kenaf en el clima extremeño con el fin de poder dinamizar el sector agrario con este tipo de cultivo como consecuencia de las posibilidades económicas que ofrece dado su rápido crecimiento.

Fotografía 04
Fibra larga de kenaf

Fotografía 05
Fibra corta de kenaf

La fibra suministrada ha sido tanto la fibra larga procedente de la parte exterior de la corteza como la fibra corta procedente de la parte interior del tallo.

02.01.04. COLA

02.01.04.01. GENERALIDADES

La cola blanca es un adhesivo en base a una dispersión acuosa de poliacetato de vinilo denominada por ello también cola vinílica. La característica principal de este tipo de adhesivo es que se trata de un producto con gran rapidez de fraguado alcanzando altos valores de resistencia a la tracción en un corto período de tiempo. En función del porcentaje de dispersión presenta diferentes valores en propiedades como su aspecto o viscosidad.

La cola es un líquido de color blanco, de espesor medio, cuyo periodo de secado suele ser entre una y dos horas, si bien el período de fraguado hasta alcanzar la máxima adhesión se prorroga durante más tiempo hasta aproximadamente las 24 horas. Se emplea en los talleres de carpintería, ebanistería y en bricolaje por su comodidad para el montaje de elementos de madera. No precisa de calentamiento como la antigua cola gelatinosa y tiene no solo aplicación en la unión de madera, sino en algunos otros materiales como son el papel con papel, papel con yeso etc.

02.01.04.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

La cola empleada para la realización del presente trabajo es una cola rápida blanca de una conocida casa comercial que fabrica este tipo de productos para la aplicación en la industria, en la construcción y para uso doméstico.

Las propiedades principales de este producto se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 22. Características técnicas COLA BLANCA

Parámetro	Valor
Aspecto:	Fluido de color blanco
Viscosidad:	Viscosímetro Brookfield RVT (aguja 6 a 20 rpm y 23ºC) 13,0 ± 2,0 Pa.s
Tiempo abierto:	Película de 200 micras sobre aglomerado de fibra a 23ºC y 65% de humedad relativa 5 - 7 minutos
Temp. mínima de formación:	4 - 7 ºC
Resistencia a la cizalladura:	Según norma UNE EN 204 y UNE EN 205: En 1 hora: 13 - 14 N/mm^2 En 24 horas: 16 - 17 N/mm^2 En 7 días (UNE EN 204 D1): > 17 N/mm^2

Existen otro tipo de productos de esta misma casa comercial con menores valores en cuanto a la viscosidad, lo que se traduce en menores valores de resistencia a la cizalladura conforme a las normas de ensayo UNE EN 204 y UNE EN 205. La elección de este tipo de cola se ha basado en criterios de eficiencia, al objeto de obtener mayores valores de resistencia en el menor tiempo posible lo que permite emplear una menor cantidad de producto.

02.01.05. ESCAYOLA

02.01.05.01. GENERALIDADES

La escayola es un producto obtenido a partir de la calcinación del aljez o piedra de yeso (sulfato de calcio hidratado $CaSO_4$ $2H_2O$), roca sedimentaria a partir de la cual se elaboran gran variedad de productos de construcción empleados principalmente como elementos de acabado y decoración.

Tal ha sido la profusa utilización de este material en la industria de la construcción (como conglomerante, como revestimiento de acabado de los paramentos, para la fabricación de elementos prefabricados de tabiquería, para la fabricación de falsos techos, elementos de decoración y un lago etcétera) que en 1985 se reguló en España un pliego general de condiciones para la recepción de este tipo de productos, aprobado por Orden de 31 de mayo de 1985. En dicha disposición se definía la escayola como el material "*constituido fundamentalmente por sulfato de calcio semihidrato (SO_4 Ca 1/2 H_2O) con la posible incorporación de aditivos reguladores del fraguado*" que en función de la resistencia mínima a flexotracción, que era el parámetro que las diferenciaba, tendrían unas u otras aplicaciones.

Así, la E-30 (escayola con una resistencia mínima a flexotracción de 30 kp/cm^2) es aquella que se utilizaría para la ejecución de elementos prefabricados tanto de tabiquería como de techos. Por otro lado, la E-35 (con resistencia a flexotracción de 35 kp/cm^2) tendría, por su mayor pureza en cuanto a composición, una aplicación más enfocada a trabajos de decoración así como adhesivo para la puesta en obra de productos prefabricados para techos.

En función de los períodos de trabajabilidad todos los tipos de yesos de construcción (yesos y escayolas) se clasificaban en dos "clases", la normal y la lenta. La primera contaba con un tiempo para pasar del estado líquido al plástico como máximo de 8 minutos, con una duración del estado plástico de 10 minutos como mínimo. La segunda (la lenta), que se identificaba en su designación mediante la adición de una "L" tras la designación del tipo, subía los tiempos anteriores a 20 y 30 minutos respectivamente, muy indicados para determinados trabajos como los relativos a decoración en los que se requiere de un tiempo adecuado para la puesta en obra de este tipo de producto.

Esta disposición hoy ya está derogada por el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. En dicha disposición se deroga esta Orden con motivo de que sus prescripciones resultan incompatibles con las del desarrollo del Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, del Ministerio de Relaciones con las Cortes y de la Secretaría del Gobierno, por el que

se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE, modificado por el Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, relativas al obligatorio Marcado CE, para dichos productos (hoy también ya derogado).

A partir de esta fecha, tanto la designación de yesos como de escayolas es diferente de la establecida en dicha Orden, unificando criterios en el ámbito de la Unión Europea para la caracterización de este material y su identificación, permitiendo una más eficaz circulación de productos. Actualmente la designación de los productos derivados de la piedra de yeso o aljez vienen dados por la norma UNE-EN 13279-1 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción (Parte 1: Definiciones y especificaciones)

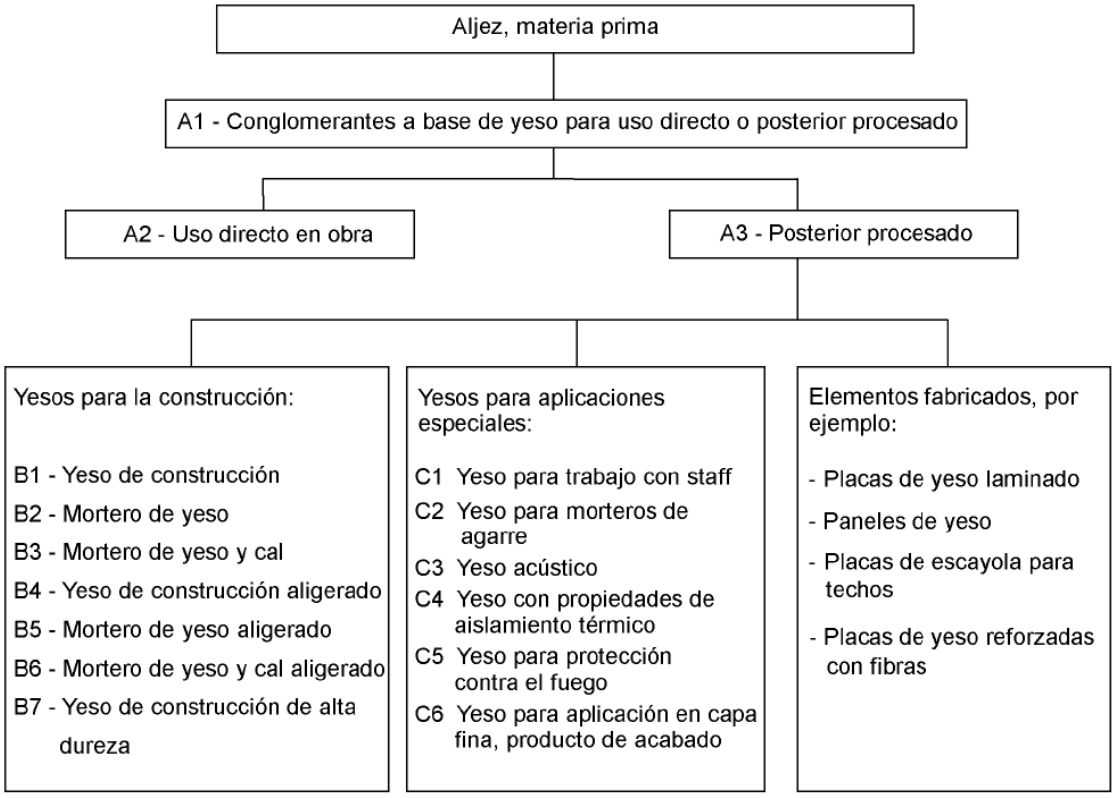


Figura 10. Clasificación de los yesos según UNE-EN 13279-1

Actualmente distintas casas comerciales emplean esta designación para la identificación de sus productos si bien en ocasiones la complementan con la designación tradicional de amplia profusión en España (por ejemplo no es difícil encontrar pasta de escayola tipo A referida a conglomerante a base de yeso para la

construcción y que igualmente indique que se trata de una E-35 en alusión a la resistencia mínima a flexotracción con la que cuenta).

02.01.05.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

El producto empleado para la realización de este trabajo ha sido escayola identificada como conglomerante A1 según la norma UNE-EN 13279-1 equivalente a una escayola E-35 según la anterior denominación establecida por la derogada RY-85 (Orden de 31 de mayo de 1985).

Tabla 23 − Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción según UNE-EN 13279-1

Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso*, por ejemplo:	A
– para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos);	A1
– para su empleo directo en la obra;	A2
– para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placas de yeso laminado, en placas de escayola para techos).	A3
Yeso para la construcción:	B
– yeso de construcción;	B1
– mortero de yeso;	B2
– mortero de yeso y cal;	B3
– yeso de construcción aligerado;	B4
– mortero de yeso aligerado;	B5
– mortero de yeso y cal aligerado;	B6
– yeso de construcción de alta dureza.	B7
Yeso para aplicaciones especiales:	C
– yeso para trabajos con staff;	C1
– yeso para morteros de agarre;	C2
– yeso acústico;	C3
– yeso con propiedades de aislamiento térmico;	C4
– yeso para protección contra el fuego;	C5
– yeso para su aplicación en capa fina, producto de acabado	C6
– producto de acabado	C7

* NOTA NACIONAL En esta norma puede entenderse que los productos identificados como A, A1, A2 y A3 incluyen la escayola.

La escayola es de una reconocida marca en el mundo de los elementos prefabricados de yeso que dispone de este tipo de conglomerantes para la puesta en obra y aplicaciones varias de terminación y acabado. Las propiedades principales de esta escayola se resumen en la siguiente tabla según la ficha de características técnicas del producto.

Tabla 24. Características técnicas ESCAYOLA

Parámetro	Valor
Designación UNE-EN 13.279	A (conglomerante a base de yeso para la construcción)
Resistencia mecánica flexión	≥ 3,50 N/mm^2
Coef. Conductividad Térmica λ	0,30 W/m K
Índice de pureza	≥ 0,90
pH	≥ 6
Trabajabilidad	15 - 22 minutos (clase normal)
Granulometría	0,00-0,20 mm
Reacción al fuego RD 312/2005	A1 (no contribución al fuego)

02.01.06. FETADIT

02.01.06.01. GENERALIDADES

El fetadit es una formulación epoxi de dos componentes predosificados. El componente A es una resina epoxi de base Bisfenol A y el endurecedor es de base poliamina. Este sistema epoxi es de mediana viscosidad y está preparado para ser base de múltiples formulaciones y usos en función de la carga que se le quiera adicionar. Admite todo tipo de cargas sólidas, áridos de sílice, mármol, granito, harina de pizarra, etc., cargas pulverulentas como talco, caolín, barita, carbonatos, etc., pigmentos naturales o sintéticos, tejidos de vidrio, tela, corcho, serrín, etc. La cantidad y características de la carga utilizada variará la formulación y sus valores de resistencia química y mecánica.

Este producto se utiliza en múltiples aplicaciones, cuya relación no exhaustiva se indica en los siguientes puntos:

- Adhesivo preparado para la unión de hormigón nuevo con hormigón curado, o soportes cerámicos, terrazo, baldosas,... en soleras o forjados con gran superficie.
- Trabajos de restauración en la madera tales como prótesis, rellenos y anclajes de varillas de fibra de vidrio o metálicas.
- En forma de emulsión acuosa como imprimación para todo tipo de revestimientos o pinturas y para el pintado de suelos, paredes... en toda clase de actividades en interiores.
- Formulaciones de muy baja viscosidad que sirven para inyección de fisuras, grietas,... en el hormigón. También sirve para inyección o colada de huecos

entre hormigón y chapas de acero de refuerzo, y anclaje y fijación de elementos metálicos en el hormigón.

- Formulaciones pastosas y tixotrópicas de alta viscosidad que se preparan específicamente para equipos de alta presión para la inyección de fisuras o grietas de hormigón, rocas o muros de sillería o mampostería.
- Como revestimiento específicamente preparado para recubrimientos de alta resistencia química.
- Formulaciones de viscosidad y reactividad medias que pueden emplearse como morteros, anclajes, sellados, recrecidos...
- Formulaciones de baja viscosidad, pigmentadas para revestimientos de pavimento con alta relación de carga de sílice. Este tipo de formulaciones se emplea en todo tipo de pavimentos industriales y decorativos con exigencias de alta resistencia química y mecánica en aplicaciones interiores.

02.01.06.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

De las numerosas aplicaciones específicas se ha elegido para la elaboración de las probetas un adhesivo epoxi de dos componentes predosificado. Este tipo de adhesivo está fundamentalmente especificado para la unión de hormigones con distintas edades así como otro tipo de productos de construcción.

Se presenta en dos componentes sin color específico si bien es posible contar con otro tipo de dosificaciones y colores. La relación de mezcla en peso de los dos componentes A:B es de 4:1. Las principales características de este tipo de aglomerante son las siguientes:

Tabla 25. Características técnicas FETADIT

Parámetro	Valor
"*Pot-Life*" (1)	A 10ºC ⇒ 120 minutos
	A 20ºC ⇒ 60 minutos
	A 30ºC ⇒ 30 minutos
Tiempo abierto (2)	A 10ºC ⇒ 4 horas
	A 20ºC ⇒ 2 horas
	A 30ºC ⇒ 45 minutos
Tiempo de curado (3)	A 10ºC ⇒ 5 días
	A 20ºC ⇒ 4 días
	A 30ºC ⇒ 3 días
Resistencia a compresión (24h)	800 kp/cm^2
Resistencia a flexión (24h)	200 kp/cm^2

(1) "*Pot-Life*" es el tiempo que tarda en endurecer el producto en el bote una vez mezclado. Este tiempo varía en función de la temperatura del producto y del volumen de la mezcla. Los valores indicados son aproximadamente para 10 kg.

(2) El tiempo abierto es el tiempo que tarda en curar el revestimiento y pasado el cual no debe repintarse pues faltaría adherencia entre capas.

(3) El tiempo de curado es el tiempo que tarda el producto en adquirir todas sus propiedades. Antes de este tiempo no debe ponerse en uso el revestimiento.

02.01.07. GOMA-LACA

02.01.07.01. GENERALIDADES

La goma laca o "*shellac*" es una resina natural de origen animal que se encuentra en la India y en Tailandia. Es la única resina animal usada comercialmente y difiere mucho de otras resinas naturales.

La goma laca se produce por la larva de Kerria lacca (*Laccifer lacca*), un insecto de la familia de los Hemiptera. Estos pequeños insectos de unos 0,5-0,6 mm de longitud, atacan las ramas del árbol donde habitan y absorben el jugo que extraen de las cortezas blandas. El insecto segrega un compuesto de laca cubriente sobre su cuerpo para proteger sus larvas de factores meteorológicos y de sus enemigos. Las secreciones de insectos vecinos forman una capa continua sobre la rama.

Este recubrimiento, cortado y troceado es conocido como "*sticklac*". Este material constituye la materia prima de la que se extrae, tras un refinado, todos los tipos de laca *shellac* que se emplean industrialmente.

Se estima que se requieren alrededor de 1.5 millones de insectos para la producción de suficiente resina o laca para la elaboración de 450 g de *shellac*. La laca denominada *Sticklac* es recogida levantando y enrollando la resina que cubre la rama. La resina después es cribada y lavada con agua o soda diluida para eliminar impurezas.

Posteriormente la resina es amasada en el agua para eliminar los carbohidratos solubles en agua y un tinte le aporta su color rojo. En este punto, la resina seca, conocida como *seed-lac*, es procesada a *shellac* o convertida en laca blanqueada.

La goma laca resulta todavía un producto muy importante para la industria de recubrimientos protectores, incluso con la aparición de resinas sintéticas que han pasado a ocupar una importante porción del mercado. La goma laca o *shellac* es empleada como recubrimiento protector en la industria farmacéutica, en dulces, frutas cítricas y manzanas. También se emplea en aplicaciones eléctricas y como endurecedor en diversos campos como la industria textil (como por ejemplo en la fabricación de sombreros de fieltro).

La goma laca es una resina dura y amorfa con una buena resistencia contra los solventes basados en hidrocarburos. No es tóxica y no produce daños fisiológicos. Se trata de un material termoplástico, con un punto de fusión bajo (sobre 65-75ºC), soluble en alcoholes y en agua en soluciones alcalinas y resistente a radiaciones UV. Tiene propiedades dieléctricas excelentes así como propiedades cubrientes muy importantes. Forma suaves y brillantes películas que cubren sin cambiar sus propiedades eléctricas al recibir radiación UV. Se adhieren muy fácilmente a muchos sustratos. Tiene una conductividad térmica muy baja y un bajo coeficiente de expansión.

La goma laca cuenta con numerosas aplicaciones entre las que podemos destacar las siguientes:

- Materia prima para la producción de tinta flexográfica a base de alcohol, dando como resultado una tinta de buen brillo, flexibilidad, secado rápido y buena adherencia.

- La solución alcohólica de goma laca puede ser utilizada en la fabricación de fuegos artificiales con las funciones de aglutinante, combustible y con el objeto de reducir la absorción de humedad.
- La goma laca puede ser utilizada en la producción de ceras para el tratamiento de maderas.
- En combinación con resinas sintéticas la goma laca puede ser empleada para la fabricación de barnices para muebles, mejorando la calidad de éste en lo relativo al brillo y los tiempos de secado.

02.01.07.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

La goma laca utilizada se presenta en polvo si bien cabe la posibilidad de que sea suministrada en escamas. Este producto para su aplicación es soluble en alcoholes y acetona, sin embargo es insoluble en disolvente orgánicos alifáticos, aromáticos y agua. Las principales propiedades se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 26. Características técnicas GOMA LACA

Parámetro	Valor
Índice de acidez	2 - 5 mg KOH/g (ASTM D-465)
pH en solución de etanol a 2%	4,5 - 6,5 (ASTM E-70)
Insolubles en etanol (%)	Máx. 1 (ASTM D-269)
Punto de ablandamiento (ºC)	80 - 95 (ASTM E-28)

02.01.08. LIGNINAS

02.01.08.01. GENERALIDADES

02.01.08.01.01. Estructura y propiedades químicas

La lignina es un polímero que forma parte de las paredes celulares de todas las plantas leñosas. Es uno de los polímeros naturales más abundantes constituyendo del 25 al 33% del peso seco total del árbol. Se combina con la hemicelulosa para ayudar a que las células permanezcan unidas y a dirigir el flujo de agua.

Junto con la celulosa, la lignina es la sustancia orgánica polimérica más abundante e importante en el mundo vegetal.

Se estima un contenido de lignina en la biosfera de $3{,}10^{11}$ t de lignina con un aumento anual de aproximadamente $2{,}10^{10}$ t.

La lignina puede definirse como un material amorfo polifenólico, un polímero natural formado a partir de unidades de fenilpropano. Se trata de un polímero tridimensional constituyente de la madera y otras plantas, pero su estructura química no es conocida completamente. La razón es que no existe aún un método para aislar la lignina completamente tal y como existe en las plantas. Se han ideado varios métodos para aislar lignina a partir de la madera. Algunos métodos de aislamiento se basan en tratamientos con ácidos en los cuales los componentes de carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) se hidrolizan hasta convertirse en materiales hidrosolubles. Sin embargo, con este tipo de procedimientos, hay serias dudas en cuanto a si la lignina aislada es representativa de la lignina natural. La digestión enzimática del carbohidrato en la harina de madera es un procedimiento prolongado y tedioso pero es el más eficaz para obtener lignina no alterada durante el aislamiento.

Los métodos de extracción pueden clasificarse en dos:

- Aquellos basados en la extracción de la celulosa por medio de hidrólisis. La lignina resulta un residuo insoluble de la extracción.
- Aquellos que separan la lignina de la celulosa disolviendo la lignina, tratando la planta con una solución básica de sosa, antraquinona y azufre, y después acidificando para precipitar la lignina.

Una característica muy importante es que, durante la producción de papel, se obtienen lignosulfatos como producto secundario al extraer la celulosa a partir de la madera. El uso de los lignosulfatos tiene dos grandes ventajas: existe una gran cantidad de lignina que nadie utiliza y que es obtenida a coste muy bajo. En general, los mercados para productos basados en lignina no son lo bastante grandes o atractivos como para compensar el coste del aislamiento y la energía derivada de su combustión. El lignosulfato es la excepción a este hecho. Esta es la razón por la que no se conoce mucho sobre métodos de extracción y estructura de este polímero natural.

Las plantas a partir de las cuales la lignina es susceptible de ser extraída pueden ser divididas en tres clases:

- maderas provenientes de árboles de hoja caduca (hardwoods)

- maderas provenientes de coníferas o árboles de hoja perenne (softwoods)
- plantas anuales: angiospermas monocotiledóneas.

Aunque los contenidos de lignina dentro de una misma especie vegetal son razonablemente constantes, existen considerables variaciones entre especies. Por ejemplo, en maderas procedentes de plantas gimnospermas (softwoods) la cantidad de lignina varía entre 27-37%, mientras que en maderas procedentes de plantas angiospermas (hardwoods) la cantidad de lignina oscila entre 16-29%.

La lignina es formada por las plantas mediante polimerización deshidrogenada enzimática de tres monómeros de fenilpropano. Las proporciones relativas de los monómeros que conforman la lignina varían con la especie de la planta.

La constitución final de la lignina está determinada principalmente por la reactividad y frecuencia de las unidades constituyentes envueltas en el proceso de polimerización. El primer paso del proceso bioquímico para la formación de la estructura macromolecular de la lignina es la deshidrogenación enzimática de estos monómeros para dar radicales fenol, cada uno de los cuales tiene cuatro formas mesoméricas.

Este polímero amorfo tridimensional resulta de reacciones aleatorias entre los diversos radicales, seguido por la adición de agua. La lignina carece de una estructura formada por unidades repetidas y ordenadas como ocurre con la celulosa o las proteínas. Se trata de uno de los polímeros naturales más complejos con relación a su estructura y heterogeneidad. Esta es la razón por la que la estructura de la lignina no ha podido aún definirse con exactitud aunque muchos modelos, representando una estructura media, han sido propuestos.

La composición de la lignina está influida por la especie, edad o condiciones de crecimiento de la planta de la que se extrae. En maderas jóvenes, en el centro del tronco, la proporción de lignina es mayor que en maderas viejas. La gran cantidad de factores que influyen tanto en los diferentes tipos de lignina como en la cantidad que puede extraerse de diferentes especies hace suponer la heterogeneidad entre diferentes muestras de lignina.

02.01.08.01.02. Propiedades físicas

La lignina no es un compuesto homogéneo con un tamaño molecular definido. Está formada por unidades monoméricas que forman a su vez largas cadenas poliméricas probablemente enlazadas.

Se llama protolignina a la lignina tal y como existen en el árbol y que es afectada de una manera o de otra por los tratamientos de extracción químicos o físicos. Esto significa que las propiedades físicas se ven afectadas por este pretratamiento. En el proceso de extracción de la lignina, ésta es degradada a fragmentos de tamaños diferentes y aleatorios.

Sobre el carácter amorfo de la lignina las investigaciones, utilizando el método de difracción con rayos X, dan lugar a conclusiones contradictorias en función del método de preparación empleado. También es posible que restos de carbohidratos o cenizas se encuentren en el preparado y que sea esto los que da un cierto carácter cristalino, pero la lignina es amorfa y las unidades que la componen carecen de un orden regular en el interior de la molécula.

02.01.08.01.03. Masa molecular y polidispersidad

La verdadera masa molecular de la lignina en la madera es desconocida. Esto se debe al hecho de que no es posible aislar la lignina sin degradarla. Para determinar la masa molecular se han empleado diferentes métodos, obteniendo valores entre 10^2 y 10^6 g/mol, dependiendo de la fuente de extracción de la lignina, del método de extracción, del método de medida, etc. Para lignosulfatos han sido obtenidos valores de pesos moleculares de 10^2 a 10^4 g/mol y para lignina-kraft se han registrado valores inferiores.

02.01.08.01.04. Solubilidad

La lignina en madera se comporta como una red tridimensional e insoluble. La solubilidad de la lignina es función de la densidad de energía cohesiva y la facilidad para formar enlaces por puentes de hidrógeno.

02.01.08.01.05. Ablandamiento con la temperatura

La protolignina es un polímero amorfo termoplástico, pero las preparaciones basadas en lignina obtenidas empleando métodos químicos pueden no ser termoplásticos dependiendo del método empleado. De hecho, los preparados de lignina aislados por los tratamientos químicos usuales no son termoplásticos y se descomponen antes de fundir, quemándose finalmente. La lignina natural aislada no tiene punto de fusión exacto, aunque tiene lugar un ablandamiento gradual y la fusión es observada en un intervalo de temperaturas de 120 a 150ºC.

02.01.08.01.06. Ligninas comerciales

Solo hay dos tipos de lignina comercialmente disponibles: lignosulfatos y kraft.

La lignina sulfonada es un producto intermedio en la extracción de la celulosa realizada empleando azufre. Se trata de una lignina heterogénea en términos de su polidispersidad molecular y de su estructura.

La lignina kraft es obtenida a partir de la extracción kraft por precipitación con ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o dióxido de carbono. La lignina kraft es menos polidispersa que la lignina sulfonada.

Ambas ligninas difieren ampliamente en sus propiedades físicas y químicas.

02.01.08.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

LIGNINA ALCALI

La lignina álcali que se ha empleado en la fabricación de las muestras se trata de un producto de color marrón suministrado en polvo, caracterizado por ser un polímero de alta superficie de aniónicos con un peso molecular de 1000-10000. Cuenta con buenas propiedades adhesivas, la viscosidad de la solución acuosa es mayor cuanto mayor es la concentración. Cuando ésta alcanza el 35% (proporción en peso) la viscosidad aumenta significativamente. Cuenta con una buena solubilidad en agua y estabilidad

química. Diluido en una proporción del 40% (en peso) en solución acuosa la calidad del producto es estable.

LIGNINA SULFONADA

La lignina sulfonada es un tensioactivo aniónico suministrado en polvo de color marrón. Se utiliza diluida o dispersa como componente auxiliar en múltiples aplicaciones tales como la fabricación de colorantes, superplastificante para la elaboración de hormigones, baterías, etc.

COMPARATIVA DE PROPIEDADES

De forma resumida, las características más significativas del producto empleado en la fabricación de las muestras son las siguientes:

Tabla 27. Características técnicas LIGNINAS

Parámetro	Lignina Alcali	Lignina Sulfonada
Pureza	45-55%	93%
pH	10-12	8-10
Humedad	Máx. 6,0%	-
Agua - sustancia insoluble	Máx. 2,5%	Máx. 1,0%
Reducción contenido de azúcar	Máx. 6,0%	-
Sales inorgánicas (Na_2SO_4)	Máx. 5,0%	-
Calcio y magnesio contenido	Máx. 1,5%	Máx. 0,3-1,5%

02.01.09. TEROKAL

02.01.09.01. GENERALIDADES

El terokal es un adhesivo de contacto basado en policloropreno con excelentes características de aplicación. Se utiliza para la unión de cauchos, tanto entre si como entre éste y el metal, lo que le hace muy indicado en la industria automovilística para la fijación de diferentes componentes. El adhesivo es de alta potencia lo que se demuestra ya en los primeros instantes tras su aplicación contando con una alta capacidad de unión. La unión se caracteriza por ser flexible y resistente al calor.

El terokal se utiliza para la realización de uniones sólidas, entre diferentes tipos de espumas de goma, fieltros o material de amortiguamiento de sonido a base de caucho,

metales, materiales de madera, poliéster, cartón, PVC rígido y cuero, lo cual le da una gran versatilidad.

Este adhesivo se utiliza con éxito en la industria de automoción para perfiles de goma y elementos de unión en vehículos. También se utiliza para juntas de unión de las puertas, materiales aislantes, etc. Sus características lo hacen en general muy adecuado para dotar de una correcta adhesión flexible que sea capaz de absorber el sonido contribuyendo al aislamiento acústico del habitáculo.

02.01.09.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

El terokal empleado en la elaboración de las probetas para el presente trabajo corresponde al producto "Terokal Record 56". Este producto es un adhesivo a base de caucho sintético que asegura uniones de excelente resistencia al agua, frío, calor y envejecimiento. Este material se emplea en la industria del calzado como adhesivo entre diferentes tipos de materiales como cuero, suela, caucho, etc, así como para la unión de materiales esponjosos como espumas de caucho y espumas de poliuretano entre sí.

Las propiedades físico-químicas más importantes de este producto se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 28. Características técnicas TEROKAL

Parámetro	Valor
Consistencia	Líquida
Color	Beige claro
Contenido de sólidos en peso	22,0-24,5%
Densidad	0,865-0,895 g/ml
Viscosidad de entrega	2.700-3.300 cps

02.01.10. POLIURETANO

02.01.10.01. GENERALIDADES

Los poliuretanos son polímeros que cuentan con una gran versatilidad siendo hoy utilizados en numerosas y diferentes aplicaciones [4–6]. Su elaboración parte de la reacción de un isocianato, un macroglicol (poliéster o poliéter) y un extendedor de

cadena (bien un glicol o una amina). En su composición, adicionalmente, los poliuretanos pueden contener otros aditivos tales como cargas o resinas [4,7,8]. En su formulación suele ser frecuente la presencia de grupos de amina o carboxilo. No obstante las propiedades más significativas de este polímero se deben a la existencia de grupos de uretano. Los poliuretanos cuentan en su formulación con un número significativo de grupos de uretano, si bien su disposición no tiene por qué repetirse en un orden regular.

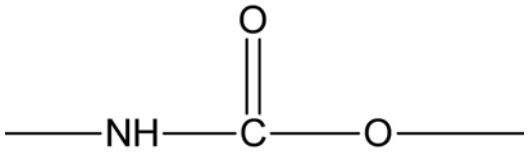


Figura 11. Configuración grupo URETANO

ADHESIVOS DE POLIURETANO

Los poliuretanos tienen múltiples aplicaciones en diferentes sectores. Una de las aplicaciones más habituales es el empleo de este polímero como adhesivo. Los adhesivos de poliuretano son conocidos también como adhesivos elásticos, puesto que en función de su composición pueden llegar a tener una extraordinaria elasticidad (hasta el 600%), pero a epoxi también existen adhesivos de poliuretano rígidos, debido a la alta resistencia a la fractura que presentan estos adhesivos (hasta 25 Mpa).

Dentro de los adhesivos de poliuretano podemos hacer una primera clasificación en dos grandes grupos:

a. Adhesivos monocomponentes.

   Este primer grupo de adhesivos de poliuretano está compuesto por adhesivos generalmente termoplásticos (dependiendo del tipo de curado). Para su obtención se parte de la reacción entre un poliéster, un isocianato y un extendedor de cadena. Existen dos procedimientos principales de curado de este tipo de poliuretanos, mediante humedad y mediante calor, variando las propiedades de unos y otros en función de dicho procedimiento.

Los adhesivos monocomponentes curados por humedad presentan las siguientes propiedades:

- Son materiales elásticos y flexibles
- Resistencia a esfuerzo normal 8 Mpa
- Elongación máxima sobre el 600 %
- Adhesivos viscosos
- Pobre resistencia a la radiación ultravioleta.
- Menor resistencia a los agentes químicos que las siliconas
- Se pueden pintar.
- Es necesario el uso de imprimaciones y o activadores para asegurar la adhesión

Los adhesivos monocomponentes curados por calor presentan las siguientes propiedades:

- Son adhesivos rígidos
- Resistencia a esfuerzo normal 15 Mpa
- Elongación máxima sobre el 20 %
- Alta resistencia a la fatiga
- Pobre resistencia a la radiación ultravioleta.
- Se pueden pintar.
- Algunos adhesivos modificados pueden absorber aceites.

b. Adhesivos bicomponentes

Este tipo de adhesivos está formado por dos componentes A y B que, al igual que otros adhesivos expuestos anteriormente se combinan y mezclan con carácter previo a su aplicación. Los componentes presentan las siguientes características:

b.1. Componente A: comprende una amplia diversidad de polímeros que contengan grupos reactivos con hidrógenos activos, no presentando isocianatos libres en disolución. Como componente A puede emplearse un adhesivo de poliuretano monocomponente de los descritos en el apartado anterior.

b.2. Componente B: es un isocianato reactivo, sensible a la humedad y a los compuestos que contienen hidrógenos activos.

En cuanto a las características generales que presentan este tipo de adhesivos se resumen en las siguientes:

Características mecánicas:

a. Adhesivos de poliuretano flexibles-elásticos:

- Elastómero
- Resistencia a la fractura 8 Mpa
- Elongación máxima sobre el 600 %
- Muy buena resistencia a fluencia (exposición durante mucho tiempo a cargas estáticas).

b. Adhesivos PUR rígidos :

- Termoestable
- Resistencia a la fractura 25 Mpa
- Elongación máxima sobre el 50 %

Características químicas

- Son sensibles a la radiación U.V.
- Menor resistencia a los agentes químicos que los adhesivos epoxi.
- Se pueden pintar.

Otra forma de clasificación de los adhesivos de poliuretano teniendo en cuenta no solo el número de componentes sino también la forma de presentación y curado según diversos autores [5,6,8] son los siguientes:

- Adhesivos monocomponentes reticulados con humedad.
- Adhesivos monocomponentes bloqueados
- Adhesivos termofusibles
- Adhesivos en base solvente
- Adhesivos en dispersión acuosa
- Adhesivos en polvo
- Adhesivos sensibles a la presión
- Adhesivos híbridos (aquellos compuestos por un adhesivo de poliuretano y otro de diferente naturaleza como por ejemplo una resina epoxi).

02.01.10.02. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO EMPLEADO

El adhesivo de poliuretano empleado para la elaboración de las muestras del presente trabajo ha sido un poliuretano bicomponente de una conocida marca comercial que elabora diferentes formulaciones de este tipo de adhesivo para diversas aplicaciones específicas. La formulación elegida es la correspondiente a un adhesivo polivalente que sirve para la unión de diferentes tipos de materiales, utilizándose con éxito tanto en la industria del transporte como en la marítima. Las características generales que lo definen en su ficha técnica son las siguientes:

- Producto no indicado para el relleno de espacios de 30 mm
- Apariencia blanca
- Excelente absorción de las vibraciones, de los impactos y de los ruidos, lo cual es interesante para el objeto del presente trabajo.
- Libre de disolventes
- Buen tiempo "pot-life" una vez abierto de aproximadamente 4 horas.

Desde un punto de vista técnico, las principales propiedades con las que cuenta el producto empleado son las siguientes:

Tabla 29. Características físicas y químicas ADHESIVO POLIURETANO

Parámetro	Norma/Ud			
Composición		POLIOL	ISOCIANATO	MEZCLA
Proporción de mezcla en peso		85	100	
Proporción de mezcla en volumen		100	100	
Color		Blanco/gris	Beige	Blanco/gris
Densidad a 25 ºC	ISO 1675:85	1,38	1,62	-
Densidad producto curado a 25ºC	ISO 2781:96	-	-	1,55
Viscosidad a 25 ºC	Brookfield	68.000	80.000	
Tiempo práctico de utilización	Min			30-40
Inicio curado a 25 ºC	(h)			4
Final curado a 25 ºC	(d)			7
Temperatura de trabajo				-40;+100 ºC

Tabla 30. Características mecánicas ADHESIVO POLIURETANO

Parámetro	Norma	Ud	Valor
Dureza	ISO 868:03	Shore D	60
Resistencia a tracción	ISO 527:93	MPa	12
Alargamiento a la rotura	ISO 527:93	%	60
Módulo de tensión	ISO 527:93	MPa	84
Módulo de cortante	ISO 527:93	MPa	30

02.02. MÉTODOS EXPERIMENTALES

02.02.01. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE PARTIDA

02.02.01.01. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO

Desde hace décadas se han desarrollado un gran número de métodos para determinar la distribución del tamaño de partícula de los sólidos [9–15]. El tamaño de partícula es quizá la característica física más importante de un sólido, especialmente de un aglomerado, puesto que ejerce una notable influencia en factores como, por ejemplo, la eficacia de la combustión del carbón pulverizado, el tiempo de fraguado del cemento, las características reológicas de los materiales granulados, el comportamiento de los polvos metalúrgicos en procesos tales como la compactación y sinterización y la capacidad de pigmentación de diversos colorantes [16]. Estos ejemplos sirven para ilustrar la notable influencia del tamaño de partícula en la generación de energía, en diversos procesos industriales, en el aprovechamiento de numerosos recursos y en muchos otros fenómenos.

El conocimiento de la distribución del tamaño de partícula es de gran importancia, independientemente de que se estén estudiando los subproductos de corcho, neumáticos fuera de uso o fibras de kenaf que se pretendan usar mediante el sometimiento previo de un proceso de triturado. El control de la distribución de tamaño de partícula permite optimizar el uso del material y seleccionar de manera más eficaz las distintas granulometrías en función de sus futuras aplicaciones.

Como resultado del proceso de molienda se obtiene una distribución de tamaño de partícula que puede tratarse de forma cumulativa o diferencial. La determinación y posterior tratamiento de dicha distribución requiere el uso de métodos adecuados para el análisis de los diferentes tamaños de partícula, cuya determinación será clave tanto en el diseño de los circuitos de molienda como de los de concentración o aglomeración de las partículas.

En la bibliografía se encuentran un gran número de métodos destinados a la determinación de la distribución del tamaño de partícula, tales como tamizado, microscopía, uso de ciclones, etc [17]. El uso de distintas técnicas de caracterización

para el análisis de la distribución de tamaño de partícula de un determinado material puede llevar a obtener información muy diferente [18,19]. Por lo tanto, la técnica elegida para realizar el estudio dependerá del fin último de la caracterización.

Los resultados del análisis de la distribución de tamaño de partícula se pueden expresar de diferentes formas. Lo más usual es expresar el peso en gramos o el porcentaje en peso de cada una de las fracciones obtenidas en el análisis [20,21].

El objetivo de este estudio es establecer la función de distribución $F(\varnothing)$ o fracción de masa y la función de densidad $f(\varnothing)$ entendida como el número de partículas comprendidas entre dos tamices de tamaño de luz de malla determinado. Como material de partida se han empleado residuos de corcho, neumático y kenaf, empleándose los modelos matemáticos propuestos por Rosin-Ramler (RR) y Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) [22].

Las muestras se someten a un proceso de trituración primaria en un molino de mandíbulas con el fin de obtener un tamaño de partícula adecuado y de llevar a cabo una eliminación preliminar de impurezas como arena, polvo, etc. El producto resultante de esta trituración primaria se hace pasar por un molino de cuchillas para obtener el tamaño de partícula final.

Una vez concluida la etapa de trituración, las partículas de cada uno de los materiales se separaran en función de su tamaño por medio de una torre de tamices de 200 mm de diámetro cuyos diámetros internos correspondían a los indicados en la parte II de la norma UNE 7.050. Dicha columna se sitúa sobre una superficie rotatoria que giraba a una velocidad de 100 rpm durante 12 minutos. Los valores resultantes permiten obtener las curvas experimentales de distribución de tamaño de partícula, en las que se representa el porcentaje en peso de la muestra frente al tamaño de partícula.

Como se ha indicado anteriormente, en la bibliografía se encuentran disponibles numerosos modelos matemáticos que permiten obtener las funciones de distribución y densidad a partir de datos experimentales de distribución de tamaño de partícula. Los métodos más comúnmente empleados son los de Rosin-Ramler (RR) y Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) [23,24].

La función de distribución de RR se ha usado desde hace tiempo para describir la distribución de tamaño de partícula de polvos de diferentes tipos y tamaños. Dicha función es particularmente útil para estudiar muestras pulverulentas obtenidas por trituración y molienda.

La expresión general de este modelo es:

$$F(\phi) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\phi}{l}\right)^m\right]$$

Expresión 05

Donde $F(\varnothing)$ es la función de distribución y $\varnothing$ es el tamaño de partícula en mm. Por su parte, l representa el tamaño medio de partícula (mm) y m es una medida de la dispersión de los tamaños de partícula. Tanto l como m son parámetros de ajuste que son característicos de cada distribución. La ecuación (5) se transforma fácilmente en

$$\ln\{-\ln[1 - F(\phi)]\} = m \ln \phi - m \ln l$$

Expresión 06

Por consiguiente, una representación del primer término de esta expresión frente al logaritmo neperiano de $\varnothing$ dará como resultado una línea recta de pendiente m si la distribución del tamaño de partícula se ajusta al modelo de RR.

La aplicación de esta función a una distribución específica y el cálculo de los correspondientes parámetros se hacen frecuentemente mediante la regresión lineal de los datos representados en la forma $ln\{-ln[1-F(\varnothing)]\}$ *vs.* $ln\ \varnothing$, que da una idea acerca de la aplicabilidad del modelo en cuestión a la distribución de tamaño de partícula obtenida. A menudo se emplea el análisis de regresión por mínimos cuadrados para ajustar los datos a una recta. El coeficiente de correlación se puede usar como un parámetro indicativo de la bondad del ajuste.

La función de densidad del modelo de RR se define como:

$$f(\phi) = \frac{m}{l^m} \cdot \phi^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\phi}{l} \right)^m \right]$$

Expresión 07

Por otra parte, desde los años 40 del pasado siglo, un modelo relativamente sencillo se ha venido usando en la industria minera. Dicho modelo es el de GGS, que viene definido por la ecuación:

$$F(\phi) = \left[\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right]^m$$

Expresión 08

donde $F(\varnothing)$ representa la fracción de muestra de tamaño de partícula menor que $\varnothing$, $\varnothing$ es el diámetro de la partícula, $\varnothing_{max}$ es el tamaño máximo de partícula en la distribución (también llamado módulo de tamaño) y m es un parámetro de ajuste también conocido como módulo de distribución.

Si se representa el logaritmo de $F(\varnothing)$ frente al logaritmo del tamaño de partícula, $\varnothing$, se suele obtener una línea recta cuya pendiente es igual a *m*:

$$\log F(\phi) = m \log \phi - m \log \phi_{\max}$$

Expresión 09

Por lo tanto, una representación del logaritmo de la función de distribución frente al logaritmo del tamaño de partícula dará como resultado una línea recta si la distribución del tamaño de partícula se ajusta al modelo de GGS. La función de densidad de este modelo será:

$$f(\phi) = \frac{m \cdot \phi^{m-1}}{\phi_{\max}^m}$$

Expresión 10

El equipo empleado para la operación de tamizado fue una agitadora marca CISA modelo RP.08 sobre la cual se dispusieron los tamices con luz de malla conforme a la norma UNE 7.050 con un último tamiz denominado "tamiz ciego" que recoge la fracción de tamaño de partícula más pequeña. Al hacer pasar la muestra por el tamiz superior y someterla durante un determinado tiempo e intensidad de agitación, ésta cae a través del resto de tamices separándose por tamaño de partícula.

Fotografía 06. Agitadora CIA RP.08 y tamices conforme a UNE 7.050

02.02.01.02. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES

Los tres parámetros texturales de cualquier sólido poroso que se han de evaluar en su caracterización son el área superficial, la porosidad y la distribución de porosidad. En relación con la superficie se suele distinguir entre la superficie interna y la superficie externa. La primera se refiere a la superficie del sólido que hay en las paredes de los poros, cavidades y grietas, siempre que sean más profundas que anchas. La superficie externa, en cambio, comprende el resto del área superficial del sólido. Ambas superficies, interna y externa, suelen expresarse como superficie específica, esto es, por gramo de sólido, siendo sus unidades $m^2\ g^{-1}$.

El término porosidad hace referencia al volumen de poros por unidad de masa del sólido y suele darse en $cm^3\ g^{-1}$. El volumen de poros mide el espacio vacío (libre de materia), o hueco, presente en el sólido. Los poros, en la mayoría de los sólidos porosos, suelen diferir en su forma, tamaño y volumen. Así, pueden poseer forma cilíndrica o ser poros entre varillas cilíndricas, de cuello de botella o de rendija, etc. Por último, la distribución de porosidad se refiere al reparto de los poros por tamaños.

En la actualidad, afortunadamente, son bastante numerosos los métodos disponibles que pueden seguirse en estudios de caracterización textural de sólidos porosos. Además, lo que es otra ventaja, muchos de estos métodos se basan en el empleo de

equipos que son cada vez de más fácil manejo y que proporcionan mejores resultados, más precisos y reproducibles. En la tabla 31 se resumen algunos de dichos métodos.

Tabla 31. Métodos de caracterización textural de sólidos porosos

MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN TEXTURAL DE SÓLIDOS POROSOS	
Dispersión de la radiación:	- Dispersión de rayos X a ángulos pequeños (SAS) - Microscopía electrónica - Microscopía óptica
Picnometría	
Adsorción / desorción de gases	
Métodos que dependen de la curvatura interfacial:	- Método de condensación capilar - Intrusión de mercurio - Método de succión

A continuación se describen con más detalle solamente los métodos que se han seguido en el presente estudio. Dichos son:

- Microscopía electrónica de barrido
- Medida de densidades y porosidad total
- Intrusión de mercurio (porosimetría)
- Medida de la isoterma de adsorción

02.02.01.02.01. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM por su acrónimo inglés *Scanning Electron Microscopy*) está orientada principalmente a la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, suministrando información principalmente acerca de la textura, tamaño y forma del material analizado.

Aunque la SEM no permite estudiar la superficie interna de sólidos porosos, la aplicación de esta técnica tiene interés en este estudio ya que la misma aporta una información complementaria sobre la porosidad, y más concretamente sobre la fracción de los poros presentes en el sólido que están directamente abiertos al exterior; esto es, los poros cuya abertura, o boca, se encuentra en la superficie externa. Dicha información atañe la forma y tamaño de dichos poros.

En general, el fundamento de la SEM se puede explicar de modo muy simple: se envía un haz de electrones sobre una muestra y mediante un detector apropiado se registra el resultado de esta interacción. Normalmente, cuando un haz de electrones incide sobre la superficie de una muestra se producen distintos tipos de señal es que se

generan desde la muestra (electrones retrodispersados, electrones secundarios, electrones Auger, electrones transmitidos, electrones absorbidos, luz visible, rayos X, radiación continua, calor, etc.). Todas estas señales se pueden utilizar para obtener información sobre la naturaleza de la muestra (morfología, composición, estructura cristalina, estructura electrónica, etc.) ya que un microscopio electrónico de barrido puede estar equipado con diversos detectores. Entre éstos destacan: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secundary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image) y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite colectar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas.

Las principales utilidades de la SEM son la alta resolución (~100 Å), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

Para la caracterización empleamos el microscopio electrónico de barrido modelo S-3600N de la marca comercial HITACHI que se muestra en la fotografía adjunta. La aplicación de esta técnica aporta una información complementaria sobre la porosidad, en especial la relativa a la fracción de los poros existentes en el sólido que están abiertos al exterior.

Fotografía 7. Microscopio electrónico de barrido

02.02.01.02.02. Densidades por desplazamiento de helio y mercurio

La densidad de un sólido, que relaciona su masa con el volumen, depende de una forma bastante compleja de una serie de factores como la constitución química del sólido, su estructura y espacio vacío existente bien en su parte material (porosidad) o bien entre sus partículas. Siempre que se estudien materiales que posean una constitución química y estructura parecidas, en cuyo caso los efectos sobre la densidad asociados con la masa atómica y con el ordenamiento atómico no ha de ser de consideración, la densidad de un sólido puede dar entonces una idea del menor o

mayor espacio vacío existente en el mismo, lo que tiene un valor que es sobre todo comparativo. Ahora bien, dicha idea será más o menos precisa dependiendo del tipo de densidad de que se trate, ya que cada densidad tiene un significado físico diferente.

La densidad de mercurio (ρ_{Hg}), o densidad aparente, de un sólido es el peso de un mililitro de partículas de sólido, excluyendo del mismo el volumen correspondiente al espacio intersticial existente entre dichas partículas. Por tanto, la densidad de mercurio es una función de la porosidad total del sólido, disminuyendo conforme aumenta esta última propiedad. Además, esta densidad es independiente del tamaño de los poros presentes en el sólido, lo cual es un hecho importante y digno por tanto de ser resaltado.

La densidad verdadera de un sólido es el peso de un mililitro de masa de sólido, excluyendo del mismo el volumen de poros [25]. En el presente estudio, dicha densidad se ha obtenido por desplazamiento de helio, que es el fluido picnométrico que posee un tamaño atómico más que pequeño y que puede acceder por tanto a poros de menores dimensiones. La densidad de helio (ρ_{He}) será tanto más alta cuanto menor sea la fracción de poros presentes en el sólido que sea inaccesible al helio. En este sentido se ha de hacer notar que el diámetro de la molécula de helio, que es monoatómica, es de 2,3 Å [26].

Para la determinación de la densidad de helio se empleó un picnómetro de la casa QuantaCrome (modelo Stereopycnometer) que se adjunta, mientras que para la determinación de la densidad de mercurio se empleó el mismo equipo utilizado para la determinación de porosimetrías que se definirá más adelante.

Fotografía 8. Picnómetro

02.02.01.02.03. Porosidad total y volumen total de poros

La porosidad total (ε) de un sólido se evalúa frecuentemente a partir de los valores de las densidades medidas por desplazamiento de mercurio (ρ_{Hg}) y de helio (ρ_{He}) utilizando la expresión (11) [27]:

$$\varepsilon = 100\left[1 - \frac{\rho_{Hg}}{\rho_{He}}\right]$$

Expresión 11

Asimismo, a partir de los valores de ρ_{Hg} y ρ_{He} se puede estimar el volumen total de poros de cualquier sólido, V_T, aplicando la expresión (12) [28]:

$$V_T = \frac{1}{\rho_{Hg}} - \frac{1}{\rho_{He}}$$

Expresión 12

El volumen total de poros, V'_T, puede estimarse de forma aproximada mediante la expresión:

$$V'_T = W_0 + V_{me} + V_{ma}$$

Expresión 13

donde W_0 es el volumen de microporos (determinado por la ecuación de Dubinin-Radushkevich, apartado 02.02.01.02.05.03.) y V_{me} y V_{ma} son los volúmenes de meso y macroporos (determinados por porosimetría de mercurio, apartado 02.02.01.02.04.), respectivamente.

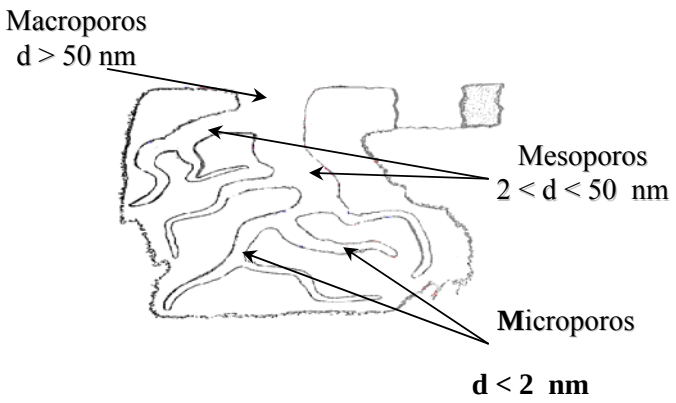


Figura 12. Características de los macroporos, mesoporos y microporos

02.02.01.02.04. Porosimetría de mercurio

La técnica de porosimetría de mercurio permite obtener información, principalmente, sobre la porosidad y distribución de porosidad de un sólido en las zonas de

macroporos y mesoporos, hasta un valor de radio (r) que depende de la presión (p) que pueda aplicarse en el porosímetro. La relación entre el radio de poro (supuesto cilíndrico) y la presión viene dada por la expresión (14) [27]:

$$r = 2 \cdot \sigma \cdot \frac{\cos\phi}{p}$$

Expresión 14

donde σ representa la tensión superficial del mercurio (0,480 N/m, generalmente) y ϕ es el ángulo de contacto de este líquido con la superficie del sólido, normalmente 140º. La porosimetría de mercurio proporciona información sobre la distribución de porosidad del sólido y sobre otras propiedades, texturales o no, como el espacio existente entre la partículas, la porosidad de sólido debida a los mesoporos y los macroporos, la tortuosidad del poro, la permeabilidad y la dimensión fractal, entre otras[27].

A partir de los datos obtenidos mediante esta técnica se pueden derivar los volúmenes acumulados de mesoporos (V_{me}) y macroporos (V_{ma}). Para ello, basta simplemente con leer en la representación del volumen acumulado de poros, VAP, frente al radio poro, r, a los valores de r correspondientes al llenado de los macroporos y de los macroporos y los mesoporos conjuntamente, o volumen total de poros a los que tiene acceso el mercurio bajo presión ($VAPT$). A efectos prácticos, $VAPT$ se toma como el VAP a la máxima presión aplicada (esto es, menor radio de poros en los que penetra el mercurio) en el porosímetro. Así, VAP a $r \geq 25$ nm es igual a V_{ma} y la diferencia entre $VAPT$ y V_{ma} es V_{me}.

Para la determinación de la porosimetría de Hg se empleó el equipo "Poremaster 60" de la casa Quantachrome Instruments. En este equipo se caracterizaron las muestras de neumático, corcho y kenaf obteniendo resultados relativos al Volumen Acumulado de Poros (VAP).

Fotografía 9. Porosímetro

02.02.01.02.05. Isoterma de adsorción

Se entiende por adsorción física de gases o vapores la interacción que tiene lugar cuando un gas (adsorbato) se pone en contacto con una superficie perfectamente limpia, de un sólido (adsorbente) sin que entre ambas fases se formen enlaces químicos verdaderos, sino que la interacción gas-sólido es de naturaleza física, tipo fuerzas de Van der Waals. Como consecuencia de dicha interacción se produce la fijación/adsorción del gas por el sólido.

Para un sistema de adsorción gas-sólido dado, si en el mismo aumenta progresivamente la presión del gas a temperatura constante y para cada dosis introducida de gas se mide la cantidad adsorbida de éste (V) en función de la presión de equilibrio (p), se obtienen los datos de V = f(p); esto es, la isoterma de adsorción, que suele representarse gráficamente.

El gas más utilizado como adsorbato es el N_2 a -196 °C, ya que es la sustancia que parece cumplir mejor los requisitos (a saber, relacionados con estructura molecular, propiedades físicas, inercia química, etc.) exigidos al adsorbato para ser considerado como ideal [29]. Asimismo, el método de medida del área superficial de un sólido basado en la obtención primero de la isoterma de adsorción de N_2 a -196 °C y en la posterior aplicación de la ecuación de BET a los datos de adsorción es aceptado como un método prácticamente estándar [30]. Otro adsorbato, complementario al N_2, muy utilizado y recomendado para el estudio de la microporosidad de sólidos porosos [31,32] es el CO_2. Esta sustancia presenta como principal ventaja respecto al N_2 a -196 °C, que debido a la mayor temperatura a la que se realizan las medidas (0 o 25 °C) tiene menos problemas de difusión para entrar en los microporos estrechos (si bien los diámetros cinéticos de las moléculas de N_2 y CO_2 son muy parecidas, 0,30 y 0,28 nm, respectivamente).

En estudios de caracterización textural de sólidos porosos, la medida de la isoterma es la primera etapa en el proceso global. Además, este método es el más seguido de todos con dicho fin, ya que permite obtener información fácil y simultáneamente sobre:

- El mecanismo de adsorción
- El área superficial del sólido
- Su porosidad

- Y su distribución de porosidad.

Para ello basta simplemente con proceder a la interpretación de la forma de la isoterma y al análisis de ésta aplicando modelos matemáticos adecuados, que proporcionan la información deseada sobre los parámetros texturales del sólido [29,33–36].

Para realizar la caracterización empleamos el equipo AUTOSORB-1 de la casa QuantaChrome con el que obtuvimos los valores para la representación de las isotermas de los diferentes materiales ensayados.

Fotografía 10. Autosorb-1

02.02.01.02.05.01. Interpretación

Normalmente, las isotermas de adsorción de diferentes sólidos no siempre presentan la misma forma, ya que suelen haber apreciables diferencias en los calores de adsorción de un adsorbato dado por distintos adsorbentes, lo que significa que la forma de la isoterma depende notablemente de una serie de factores como el adsorbente, el adsorbato y la temperatura de adsorción. Por esta razón, fundamentalmente, la forma de la isoterma de adsorción tiene un gran valor ya que a simple vista proporciona una información muy valiosa sobre el mecanismo del proceso de adsorción que tiene lugar en la interfase sólido-gas, el cual está estrechamente relacionado con las propiedades texturales del sólido objeto de estudio. Hasta la fecha se han propuesto numerosas clasificaciones de las isotermas de adsorción según su forma [37,38]. Sin embargo, la que suele aceptarse de forma casi unánime en la actualidad como la más adecuada de todas es la propuesta por Brunauer, Deming, Deming y Teller (BDDT) hace ahora casi setenta años [39], la cual incluye seis formas diferentes de isoterma:

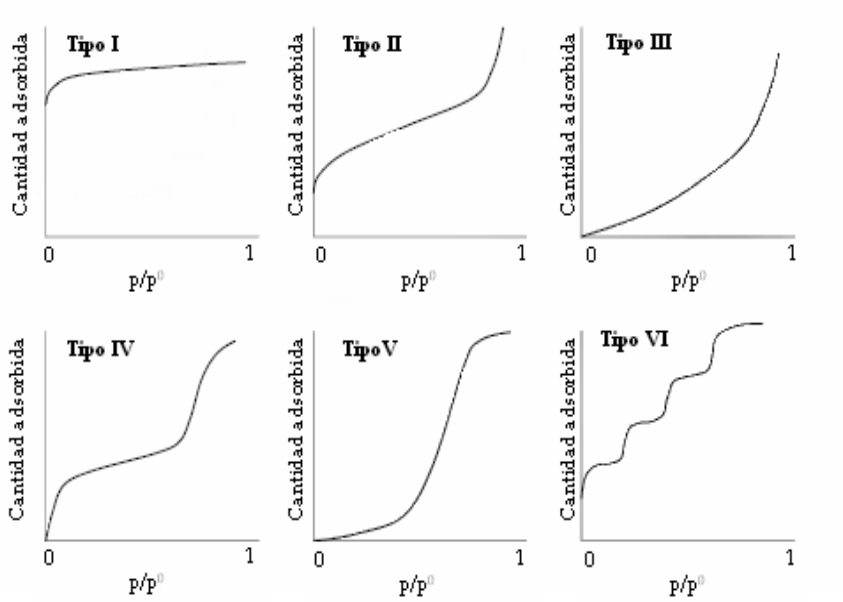


Figura 13. Representación esquemática de los seis tipos de isotermas de adsorción.

La isoterma tipo I se presenta cuando la adsorción tiene lugar con el adsorbato como líquido. Ocurre así en el caso de sólidos microporosos, con tamaño de poro inferior a unas pocas veces el diámetro de la molécula de adsorbato. En estos poros, dado su pequeño tamaño, solapa el potencial de adsorción debido a las paredes opuestas del poro, aumentando mucho el mismo en el centro del poro y causando el cambio de estado en el adsorbato. Debido a esto, se produce un gran aumento en la cantidad adsorbida a valores bajos de p/p^o. A valores más altos p/p^o, como los poros se encuentran ya llenos por el adsorbato, apenas si hay cambio en la cantidad adsorbida, lo que justifica la aparición de un "plateau" en la isoterma.

La isoterma tipo II se presenta con adsorbentes no porosos o cuando los mismos contienen poros de gran tamaño. El punto de inflexión, o rodilla, de la isoterma denota que ya se ha completado la primera capa, o monocapa, de adsorbato sobre la superficie del adsorbente. A valores más altos de p/p^o, continúa la adsorción en multicapa, formándose la segunda capa y capas superiores. Cuando se alcanza la saturación, el número de capas es igual a infinito.

La isoterma tipo III se caracteriza porque el calor de adsorción es inferior al calor de licuefacción del adsorbato. Así, conforme avanza la adsorción, el proceso se encuentra favorecido debido a que la interacción del adsorbato con una capa ya

adsorbida es mayor que la interacción del adsorbato con la superficie del adsorbente. Este tipo de isoterma, como la isoterma tipo II, se presenta en el caso se sólidos no porosos o macroporosos.

La isoterma tipo IV es típica de adsorbentes mesoporosos. El aumento tan importante que se produce en la adsorción a valores de p/p^o al punto de inflexión de la isoterma se relaciona con el fenómeno de condensación capilar. Tal como sucede para la isoterma tipo II, la rodilla de la isoterma indica la culminación de la formación de la monocapa.

La isoterma tipo V resulta cuando es débil el potencial de interacción entre el adsorbato y el adsorbente, como en el caso de la isoterma tipo III. Sin embargo, la isoterma tipo V suele asociarse con la presencia en el adsorbente de poros que poseen un radio en el mismo intervalo que aquéllos que dan lugar a la isoterma tipo IV (meporosos) y también para sólidos microporosos.

La isoterma tipo VI son muy raras y se presentan para adsorbentes con superficie muy uniformes y homogéneas.

02.02.01.02.05.02. Ecuación de Brunauer-Emmett-Teller

La ecuación de Brunauer - Emmett - Teller (abreviada BET) está basada en el modelo cinético del proceso de adsorción propuesto por Langmuir en el año 1918 [40]. En este modelo se establece que la adsorción está restringida a una monocapa completa y que el equilibrio dinámico entre la fase gaseosa y el estado adsorbido se alcanza cuando se igualan las velocidades de adsorción y desorción. Brunauer, Emmett y Teller, introduciendo una serie de supuestos adicionales sencillos y extendiendo la teoría cinética a la adsorción en multicapa sobre una superficie plana de sólidos llegan a la ecuación 15 [41], que relaciona el volumen de gas adsorbido con la presión relativa de equilibrio, p/p^0:

$$\frac{p/p^0}{V(1-p/p^0)} = \frac{1}{CV_m} + \frac{C-1}{CV_m}\left(\frac{p}{p^0}\right)$$

Expresión 15

donde p es la presión de equilibrio correspondiente al recubrimiento de una determinada fracción superficial del sólido, p^0 es la presión de saturación del adsorbato a la temperatura de trabajo, V representa el volumen de gas adsorbido a cada valor de p (o p/p^0), V_m es el volumen requerido para cubrir por completo la superficie del sólido con una capa monomolecular (monocapa) de adsorbato, y C es una constante relacionada con la magnitud de la energía de interacción entre el adsorbato y el adsorbente [42].

De los datos que se obtienen al efectuar el ajuste por mínimos cuadrados de la recta resultante al representar $p/p^0/V(1-p/p^0)$ frente a p/p^0 (esto es, de la pendiente y ordenada en origen) se derivan con facilidad los valores de los parámetros V_m (el volumen o capacidad de la monocapa) y la constate C de la ecuación de BET. Esta ecuación suele aplicarse en el intervalo de valores de p/p^0 comprendidos entre 0,05 y 0,3, [29,42] o 0,35 [37,43]. La ecuación de BET fue desarrollada para describir el proceso de adsorción de gases por sólidos no porosos o macroporosos, en cuyo caso se sigue el mecanismo de adsorción conocido como de mono-multicapa (isotermas tipo II) [39]. No obstante, en la actualidad, la ecuación de BET ha llegado a ser un método prácticamente estándar de medida del área superficial de un sólido,[30] con independencia de que éste sea o no poroso y, en el primer caso, del tamaño de los poros presentes en el sólido; esto es, de que los poros sean microporos, mesoporos o macroporos.

A partir de la capacidad de la monocapa, V_m, se puede estimar la superficie "aparente", o superficie BET (S_{BET}), del sólido objeto de estudio mediante la expresión 16:

$$S_{BET} = \left(\frac{V_m}{22414}\right) a_m \cdot N \cdot 10^{-20}$$

Expresión 16

en la que a_m es el área cubierta por una molécula de adsorbato (para el N_2 a -196 °C se toma a_m = 16,2 Å^2), M es el peso molecular del adsorbato y N el número de Avogadro. S_{BET} se expresa en metros cuadrados por gramo si V_m viene dado en cm^3 g^{-1} de adsorbente y a_m en Å^2. Aunque el área superficial "real" del sólido pueda ser diferente al valor proporcionado por este método de BET, este valor tiene un gran interés comparativo y de ahí que sea normal que en cualquier

estudio de caracterización de sólidos porosos siempre se proceda a su obtención.

02.02.01.02.05.03. Ecuación de Dubinin-Radushkevich

En el caso de la adsorción de gases por sólidos microporosos, como es bien sabido, la aplicación de la ecuación de BET es más que discutible debido al posible llenado de los poros por el adsorbato en estado líquido, en lugar de tener lugar la adsorción con formación primero de la monocapa y después en multicapa. Por este motivo, para estos sólidos se desarrolló una nueva teoría de adsorción bajo el supuesto de que en el interior de estos poros de pequeño tamaño se produce un aumento del potencial de adsorción debido al solapamiento de los potenciales de las paredes opuestas del poro que es capaz de originar el cambio de estado del adsorbato, y la adsorción de éste entonces como líquido, que llenaría el poro [35,36]. Dubinin y Radushkevich (D-R) propusieron una ecuación para describir el grado de llenado de los microporosos por el adsorbato [35,44,45], suponiendo que la distribución de porosidad en el adsorbente es de tipo Gausiano:

$$\theta = \frac{W}{W_0} = \exp\left[-\left(\frac{A}{\beta E_0}\right)^2\right]$$

Expresión 17

donde W es la fracción del volumen de microporos que se han llenado por el adsorbato a la presión relativa p/p^0 y W_0 es el volumen total de microporos presentes en el sólido y A es la afinidad (el diferencial de energía libre de adsorción):

$$A = RT\ \ln\left(\frac{p}{p^0}\right);$$

Expresión 18

siendo β un factor de escala característico de cada adsorbato (β = 1 para el benceno) y E_0 es la energía característica del sólido (kJ mol^{-1}). Combinando las ecuaciones anteriores, resulta la conocida ecuación de Dubinin-Radushkevich (ecuación de D-R):

$$\frac{W}{W_0} = \exp\left[-D \cdot \log^2\left(\frac{p^0}{p}\right)\right]$$

Expresión 19

donde D = 2,303 · ($RT/\beta E_0$).

La ecuación anterior se puede escribir también en forma logarítmica para obtener los parámetros W_0 y E_0:

$$\log W = \log W_0 - D \log^2\left(\frac{p^0}{p}\right)$$

Expresión 20

donde $D = B\ (T/\beta)^2$.

De la representación gráfica de los datos experimentales en la forma $logW$ frente a $log^2(p^0/p)$ se puede definir una línea recta de cuya ordenada en el origen se calcula el volumen de microporos, W_0, y de la pendiente el valor de D que suele considerarse como una medida semicuantitativa del tamaño medio de los microporos. Se suele preferir la evaluación de datos en la región de presiones relativas de 10^{-4} y 0,1.

Cuantitativamente, para microporos con forma de rendija y a partir del conocimiento de la energía característica (E_0) de la ecuación de D-R, es posible obtener el valor del tamaño medio de los microporos, L (nm). Así, y sobre la base de recientes investigaciones, Stoeckli y col. [46] han propuesto una correlación empírica:

$$L = \frac{10{,}8}{(E_0 - 11{,}4)}$$

Expresión 21

En lo que a área superficial se refiere, asumiendo también, que los microporos tienen formas de rendijas abiertas, localmente al menos, es posible estimar el área superficial correspondiente a las paredes de los microporos S_{mi} ($m^2\ g^{-1}$), mediante la relación geométrica siguiente [47]:

$$S_{mi} = 2 \cdot 10^3 \frac{W_0}{L}$$

Expresión 22

Por otro lado, el área no microporosa o superficie externa, S_e, que corresponde a la asociada a poros con diámetros mayores a 2 nm (meso y macroporos) puede ser estimada por comparación de la isoterma de adsorción con una isoterma de referencia determinada a la misma temperatura sobre un adsorbente no poroso de referencia [29,48,49] conocido tradicionalmente como método α_S.

02.02.01.02.05.04. Lectura del volumen adsorbido en la isoterma

Los métodos empleados en el análisis de la isoterma descritos hasta ahora permiten estimar el área superficial específica y el volumen de microporos. Hay un método muy sencillo que proporciona a la vez el volumen de microporos y el volumen de mesoporos. Este método se basa en hecho de que suele cumplirse la regla de Gurvitsch para sólidos microporosos (isoterma tipo I). Cuando el llenado del poro se produce con el adsorbato en estado líquido, el volumen que resulta es en general prácticamente el mismo con independencia de la sustancia empleada como adsorbato. En base a ello se puede considerar que el volumen microporos es aproximadamente igual al volumen adsorbido a p/p^0 = 0,1, mientras que el volumen de mesoporos viene dado por la diferencia entre los volúmenes adsorbidos a p/p^0 = 0,95 y p/p^0 = 0,1. Estos volúmenes se obtienen por lectura directa en la isoterma y han de expresarse como líquido.

02.02.01.02.05.05. Método de Horvath-Kawazoe

El método de Horvath-Kawazoe (HK) [50,51], a diferencia de los métodos anteriores, permite obtener una distribución de la porosidad del sólido en las zonas de los microporos a partir de la región de bajas presiones relativas de la isoterma de adsorción. Este método, como diferencia más significativa con respecto a otros métodos, es independiente de la ecuación de Kelvin. El método HK expresa el potencial de adsorción existente en microporos tipo rendija en función de la anchura de poro efectivo:

$$RT\ \ln\left(\frac{p}{p^0}\right) = K\ \frac{N_S A_S + N_A A_A}{\sigma^4 (l-d)} \times \left[\frac{\sigma^4}{3\left(l-\frac{d}{2}\right)^3} - \frac{\sigma^{10}}{9\left(l-\frac{d}{2}\right)^9} - \frac{\sigma^4}{3\left(\frac{d}{2}\right)^3} + \frac{\sigma^{10}}{9\left(\frac{d}{2}\right)^9}\right]$$

Expresión 23

donde K es el número de Avogadro, N_S el número de átomos por unidad de área del adsorbente, N_A es el número de moléculas por unidad de área de adsorbato,

$$A_S = \frac{6mc^2\alpha_S\alpha_A}{\frac{\alpha_S}{\chi_S} + \frac{\alpha_A}{\chi_A}}$$

Expresión 24

y m es la masa de un electrón, c la velocidad de la luz, α_S la polarizabilidad del adsorbente, α_A la polarizabilidad del adsobato, χ_S la susceptibilidad magnética del adsorbente y χ_A la susceptibilidad magnética del adsorbato,

$$A_A = \frac{3\,mc^2\alpha_A\chi_A}{2}$$

Expresión 25

$(l - d_s)$ es la anchura de poro efectiva, donde $d = d_s + d_A$, y d_s es el diámetro de la molécula de adsorbente, d_A el diámetro de la molécula de adsorbato, l es la distancia entre dos capas de adsorbente y σ = 0,858 d/2.

Seleccionado estas anchuras en el rango de los microporos, se pueden calcular las correspondientes presiones relativas. A partir de la isoterma de adsorción, se obtiene la cantidad de adsorción para cada una de estas presiones relativas. Después, derivando el volumen de gas adsorbido relativo al volumen total retenido (W/W_0) con respecto a la anchura de poro efectivo resulta una distribución de tamaños de poro en la región de los microporos.

02.02.01.02.05.06. Método DFT

A la hora de interpretar los datos de adsorción una alternativa al método de HK es el método DFT (Density Functional Theory) [52] que también proporciona una

distribución de la porosidad del sólido objeto de estudio en las zonas de los microporos y los mesoporos estrechos. Este segundo método tiene en cuenta el hecho de que las moléculas que se encuentran adsorbidas en los poros tienden a empaquetarse de acuerdo con las fuerzas de ambas superficies y las interacciones que tienen lugar con otras moléculas. Es decir, las moléculas adsorbidas dentro de los poros pequeños no pueden condensar tan eficazmente como aquéllas que se encuentran dentro de los poros grandes. Como resultado, su densidad molar varía en función del tamaño del poro. Aprovechando esta variación, la isoterma experimental de un sólido poroso puede ser interpretada en términos de la ecuación de una isoterma de adsorción generalizada (IAG):

$$N(p/p^0) = \int_{W_{MIN}}^{W_{MAx}} N(p/p^0, W) \times f(W) \times dW \ldots$$

Expresión 26

donde $N(p/p^0)$ son los datos de la isoterma de adsorción, W es la anchura de poro (considerando poros en forma de rendija), $N(p/p^0, W)$ es la isoterma en un solo poro de anchura W y $f(W)$ la función de distribución de tamaño de poro. La ecuación de la IAG simplemente señala que la isoterma total es la suma de un número de isotermas "de un solo poro" individuales multiplicadas por su distribución relativa, $f(W)$, a lo largo del rango de tamaños de poro. El método DFT deriva juegos de isotermas $N(p/p^0, W)$ usando una aproximación de densidad molar del campo medio local [53]. La función de distribución del tamaño de poro $f(W)$ puede obtenerse resolviendo la ecuación de la IAG numéricamente. El método DFT ha sido ampliamente aplicado para la caracterización de sólidos microporosos y mesoporosos vía adsorción de N_2 a -196 °C [54,55].

02.02.01.02.05.07. Metodo de Barret-Joyner-Halenda (BJH)

Para la determinar la distribución del tamaño de los mesoporos (poros de diámetro mayor de 2 nm y menor que 50 nm, se utiliza el método BJH - Barret, Joyner y Halenda [56]). Este método consiste básicamente en dividir la isoterma en varios intervalos. El valor medio de presión entre cada intervalo permite calcular el espesor de la capa adsorbida y el radio medio de los poros.

02.02.02.PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

02.02.02.01. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA

Para la preparación de las muestras debemos determinar el volumen de adhesivo a emplear en función del tipo de material utilizado. Como se ha expuesto anteriormente son diferentes tanto los adhesivos como los materiales a aglomerar, por lo que la cantidad de adhesivo variará en función de las características de unos y otros.

Para la determinación de los volúmenes de adhesivo necesarios partiremos en primer lugar del análisis granulométrico descrito en el apartado 02.02.01.01. del presente trabajo. De este estudio granulométrico, cuyo resultado se expondrá en el siguiente capítulo, obtendremos una curva de distribución de tamaño de partícula obtenida por tamizado para cada uno de los materiales de partida, esto es neumático fuera de uso, corcho y kenaf.

Obtenida la distribución de tamaños de partículas podremos aplicar los modelos RR y GGS para las diferentes muestras lo que nos dará información muy valiosa sobre el porcentaje de tamaño de partícula inferior a otro dado en puntos que no corresponden al sistema de tamizado empleado (norma UNE 7.050) ampliando con ello la información acerca de los tamaños de partícula. El empleo de estos modelos permite hacer un uso correcto de los tamaños de partícula para obtener muestras aglomeradas más homogéneas y compactas, (granulometría continua en la que aparecen fracciones de todos los tamaños de partícula), minorando la cantidad de adhesivo empleado optimizando la aportación de este material aglomerante obteniendo unos buenos resultados de adhesión y resistencia.

El conocimiento del tamaño medio de partícula es importante ya que el mismo es necesario para poder calcular la cantidad exacta de ligante que debe usarse para la elaboración de los materiales aglomerados.

La determinación de la cantidad necesaria de adhesivo es un aspecto fundamental ya que debemos tener en cuenta diversos factores como ser capaz de dotar de una buena adhesión entre partículas sin obstruir la porosidad entre las mismas, aspecto éste muy importante de cara al comportamiento acústico objeto del presente trabajo.

La cantidad de adhesivo debe variar según el tamaño de partícula, de tal forma que tamaños más pequeños requieren de una mayor cantidad de adhesivo al contar con una mayor superficie de contacto, lo que resulta contraproducente en relación con la porosidad dado que queda colmatada por el material ligante.

Al disminuir el tamaño de partícula, la superficie a cubrir del material aumenta por lo que el adhesivo no es capaz para un porcentaje fijo de cubrir la totalidad de la superficie de los materiales a aglomerar. Simplificando el modelo, considerando que las partículas de material se empaquetan en forma de cubos y se agrupan en un paralepípedo rectangular de lados L_1, L_2 y L_3, con un tamaño medio de partícula d_m y considerando que $L_i >> d_m$, la superficie que debe aglomerar el adhesivo es:

$$S_T = 3\left(\frac{\prod_1^3 L_i}{d_{mi}}\right)$$

Expresión 27

Para una determinada cantidad de material m_r podemos calcular la superficie total en función de la densidad del material ρ_r y el valor del tamaño medio, ambos valores conocidos.

$$S_T = 3\left(\frac{\rho_r}{d_{mi}}\right)m_r$$

Expresión 28

De la expresión anterior se deduce que para una misma cantidad de material al disminuir el tamaño de partícula existe una mayor superficie necesaria de adhesivo. Por debajo de cierto tamaño, existe un umbral en el cual la utilización de adhesivo no es conveniente.

Aplicando las expresiones anteriores y utilizando el tamaño medio predominante en cada intervalo del estudio granulométrico realizado se determinó el volumen de adhesivo a utilizar para la preparación de cada una de las probetas. No obstante lo anterior, dado que se emplea un modelo simplificado, en la elaboración de las muestras se optó por hacer tres diferentes con cada aglomerante, una con el valor de adhesivo resultante de cálculo, otra con un valor superior y otra con un valor inferior

con el fin de poder comprobar la influencia de la cantidad de adhesivo en la caracterización acústica de las muestras.

02.02.02.02. MÉTODOS DE PREPARACIÓN

Las partículas empleadas para el desarrollo del presente trabajo se han caracterizado de forma independiente con cada uno de los aglomerantes descritos así como mezclados de forma pareada con diferentes proporciones, también con cada uno de los aglomerantes.

El resultado de la combinación de diferentes materiales ofrece 12 variables diferentes de probetas aglomeradas en función del tipo de material. Por otro lado, si consideramos los 8 aglomerantes diferentes empleados descritos anteriormente con tres diferentes tipos de dosificación en volumen según las consideraciones realizadas en el apartado anterior (24 variables diferentes por tanto en función del tipo de aglomerante), obtenemos un total de 288 diferentes muestras que se caracterizarán desde un punto de vista acústico al objeto de obtener su coeficiente de absorción acústica.

Tabla 32. Designación de las muestras en función de las proporciones del material de partida

DESIGNACIÓN DE MUESTRAS EN FUNCIÓN DEL MATERIAL DE PARTIDA		
	Materiales	*Descripción*
1	100% CORCHO	Co100
2	75% CORCHO + 25% KENAF	Co75-K25
3	50% CORCHO + 50% KENAF	Co50-K50
4	25% CORCHO + 75% KENAF	Co25-K75
5	100% KENAF	K100
6	75% KENAF + 25% NEUMÁTICO	K75-Ne25
7	50% KENAF + 50% NEUMÁTICO	K50-Ne50
8	25% KENAF + 75% NEUMÁTICO	K25-Ne75
9	100% NEUMÁTICO	Ne100
10	25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO	Ne25-Co75
11	50% NEUMÁTICO + 50% CORCHO	Ne50-Co50
12	75% NEUMÁTICO + 25% CORCHO	Ne75-Co25

Sin perjuicio de la justificación más detallada de los volúmenes de aglomerante que se realizará en el capítulo III de este trabajo, los volúmenes y pesos de adhesivo empleados se resumen en la siguiente tabla:

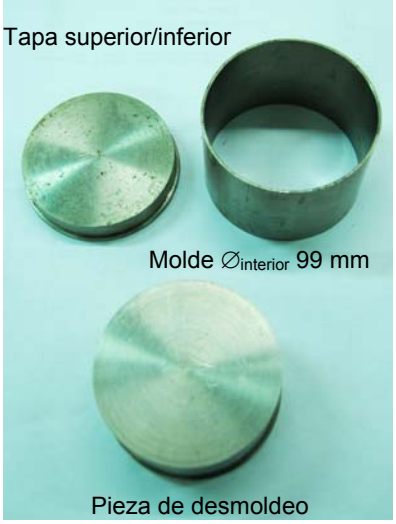
Tabla 33. Designación y dosificación de los diferentes aglomerantes empleados

AGLOMERANTES UTILIZADOS		
Cola	CO1	30 ml
	CO2	45 ml
	CO3	60 ml
Escayola	ES1	162 g
	ES2	189 g
	ES3	216 g
Fetadit	FE1	12 ml
	FE2	16 ml
	FE3	24 ml
Goma-laca	GL1	12 ml
	GL2	24 ml
	GL3	36 ml
Lignina-álcali	LGA1	36 ml
	LGA2	48 ml
	LGA3	60 ml
Terokal	TE1	12 ml
	TE2	16 ml
	TE3	20 ml
Poliuretano	PO1	6 ml
	PO2	12 ml
	PO3	24 ml

Para la fabricación de las probetas de material aglomerado a partir de la mezcla de los materiales de partida descritos, se han de tener en cuenta numerosos condicionantes tal y como hemos indicado. Debe tenerse en cuenta, entre otras, las cantidades de materias primas a emplear, sus granulometrías mayoritarias tras el triturado y tamizado según el estudio granulométrico realizado, las características de aprovechamiento económico de los residuos (fundamentalmente de los residuos de corcho) y la posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas de los aglomerados sin disminuir en exceso la porosidad intergranular [57].

Una vez mezclados los componentes se procede a su conformado en molde de acero inoxidable al objeto de obtener probetas cilíndricas de cara a su caracterización acústica. Las dimensiones de estas probetas son:

- 71,5 mm de altura y 99 mm de diámetro.
- 71,5 mm de altura y 29 mm de diámetro.



Fotografía 11 (izquierda) - Molde para probeta de ∅ 99 mm
Fotografía 12 (arriba) - Molde para probeta de ∅ 29 mm

Es necesario fabricar estas dos tipologías probetas tratando de mantener una constante proporción en las mezclas y conformando el producto resultante con las dimensiones indicadas dado que serán utilizadas más adelante en la determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica por el método de la función de transferencia conforme a la norma UNE-EN ISO 10534-2. La probeta de menor diámetro servirá para la determinación de la absorción acústica del material para altas frecuencias y la de mayor tamaño la utilizaremos en la determinación de la absorción acústica del material para bajas frecuencias.

Para la fabricación de las probetas se han seguido los pasos que se resumen en los siguientes puntos:

a. Mezclado y homogenización de las materias primas requeridas en las proporciones elegidas para cada probeta a fabricar según la denominación indicada en las tablas anteriores.
b. Adición del material ligante que en cada caso se aplicará de forma diferente. Para el caso de adhesivos con una baja viscosidad se ha procedido a una humectación en primer lugar con vaporizador de agua y seguidamente adición progresiva del aglutinante según las proporciones requeridas en el ensayo. Para los aglutinantes bicomponentes u otros con una mayor viscosidad se procede a su mezcla y amasado con el resto de componentes hasta lograr una adecuada homogeneización y reparto del adhesivo entre las diferentes partículas.

c. Se ha aplicado a los moldes de acero inoxidable una finísima y ligerísima capa de aditivo desmoldeante (vaselina) para su posterior vaciado.
d. Llenado de los moldes repartiendo uniformemente la mezcla, tanto el molde de diámetro interior 29 mm, como el de diámetro interior 99 mm, ejerciendo una ligera presión con la espátula con la que llenamos el molde para conseguir que la superficie exterior aparezca con la máxima uniformidad posible.
e. Posteriormente se colocan, sin ejercer presión adicional sobre la muestra, las tapaderas con respiraderos en el molde tanto por la parte superior como por la parte inferior y se procede a poner una mordaza para que las tapaderas no se suelten.
f. Se introducen los moldes de acero con la mezcla en su interior en una estufa calefactora durante 24 horas a una temperatura media de 100º C para eliminar el agua existente en la mezcla y lograr un curado adecuado en función del tipo de aglomerante utilizado.
g. Transcurridas las 24 horas se extraen los moldes de la estufa calefactora y tras un tiempo prudencial en el que se deja que los moldes adquieran la temperatura ambiente, se procede al desmoldeo, facilitado por el agente desmoldeante con el que se untaron en un principio los moldes. Para ello se utilizan las piezas de desmolde fabricadas a tal efecto.

Tras este proceso se obtienen las probetas necesarias para la realización de los distintos ensayos que se describirán en el siguiente apartado. En la siguiente fotografía se muestra un ejemplo de cómo quedan las probetas tras el proceso de conformado en los moldes descritos.

Fotografía 13 - Probetas de 29 y 99 mm de diámetro de Ne50-Co50 aglomerada con poliuretano PO2

Los moldes de acero inoxidable y las piezas para el desmoldeo a los que se ha hecho referencia anteriormente fueron torneados con las dimensiones adecuadas de acuerdo con las exigencias que plantean los ensayos a realizar. Las dimensiones de los moldes son:

Tabla 34. Dimensiones de los moldes de acero inoxidables empleados en la fabricación de probetas

DIMENSIONES DE LOS MOLDES			
Designación	*Altura*	*Espesor*	*Diámetro interior*
GRANDE	71,5 mm	2,0 mm	99,0 mm
PEQUEÑO	71,5 mm	2,0 mm	29,0 mm

Las piezas de desmoldeo encajan perfectamente en los moldes para lograr un fácil desmoldeo sin que la probeta conformada sufra el menor daño.

02.02.03. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES AGLOMERADOS

02.02.03.01. MICROSCOPÍA ÓPTICA

La microscopía óptica es una técnica de caracterización que permite de forma sencilla para materiales opacos como los que nos ocupan observar la superficie de la muestra utilizando la luz del microscopio en modo de reflexión.

Esta técnica de caracterización se emplea al objeto de obtener una información complementaria con un doble sentido; por un lado nos permite comprobar el grado de compactación y adherencia del aglomerante utilizado en cada caso en las diferentes muestras mono y bicomponentes y por otro lado nos permite comprobar la superficie de la muestra aglomerada con el fin de obtener una información adicional en relación al comportamiento acústico en función de los resultados que obtengamos con otras técnicas de caracterización.

Para la realización de esta caracterización se empleó un microscopio óptico Nikon EPIPHOT 300 como el que se muestra en la fotografía adjunta. En el siguiente capítulo se exponen algunos de los resultados más significativos para los diferentes materiales.

Fotografía 14. Microscopio óptico Nikon EPIPHOT 300

02.02.03.02. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

02.02.03.02.01. Introducción

El mecanismo de absorción sonora de un material consiste en la transformación de la energía sonora en calor por fricción. Este fenómeno depende, en mayor o menor medida, de los siguientes factores:

- Las irregularidades superficiales del material.
- Efectos de difracción de la onda sonora incidente a causa de los accidentes superficiales del material.
- Efecto de conducción térmica entre las partículas, poros, fibras y el aire.
- Efecto de viscosidad o pérdida de energía por fricción, causado por el flujo de aire en la zona perturbada por la onda sonora, que motiva una velocidad relativa entre el material y el aire.

En el apartado 01.02. del presente trabajo se expusieron diferentes formas de clasificación de los materiales y sistemas en función de la absorción acústica. Una de estas clasificaciones contemplaba a los materiales de tipo porosos como una tipología concreta aparte de los resonadores, los mixtos o los anecoicos.

En este trabajo nos ocuparemos de los materiales porosos. Dichos materiales se caracterizan por el hecho de que la naturaleza de su superficie permite que la energía sonora penetre en el material por multitud de pequeños poros. Éstos consisten en una serie de agujeros a modo de túneles y aberturas que forman los intersticios o tramas de los materiales.

Cuando las ondas sonoras inciden sobre un material poroso, las partículas de aire de la superficie del material y del interior de sus poros vibran forzadas, perdiendo parte de la energía original en conversión de calor por fricción y por viscosidad del aire con las paredes de los poros y los túneles de interconexión de éstos. A bajas frecuencias, puede considerarse que el intercambio calorífico que se produce en las compresiones y expansiones del medio es isotérmico, cosa que no se cumple en la región de las altas frecuencias, debido a que la oscilación del sonido es tan rápida que no da tiempo al intercambio de calor (condición adiabática).

Para modelizar teóricamente la propagación del sonido a través de un material poroso, es necesario en primer lugar caracterizar el comportamiento acústico del mismo mediante la realización de medidas de sus propiedades acústicas extrínsecas. Durante los últimos 100 años, desde que Sabine introdujo la acústica arquitectónica [58], se ha dedicado un considerable esfuerzo al estudio de absorción acústica en superficies. Durante todo este tiempo, se ha obtenido un considerable número de coeficientes de absorción mediante estándares de medida y se ha logrado alcanzar un gran conocimiento sobre el diseño y la aplicación de los materiales absorbentes acústicos.

Los valores del coeficiente de absorción acústica α dependerán sobre todo de:

- La frecuencia del sonido.
- El espesor del material.
- El método de montaje.

Los parámetros que intervienen en la descripción de la absorción acústica en los materiales absorbentes porosos son:

- Resistencia específica al paso del flujo del aire.
- Porosidad.
- El factor de estructura o tortuosidad.
- Forma de poro y longitudes características.
- Constante de propagación e impedancia característica y específica de materiales porosos.

Las propiedades estructurales acústicas de un material son las que determinan cómo se comporta el aire en el interior del mismo. Por lo tanto, este tipo de caracterización

solo se puede realizar en materiales porosos y fibrosos, que son los que tienen una parte sólida y otra fluida.

02.02.03.02.01.01. Caracterización acústica de materiales

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, son diversos los parámetros que sirven para caracterizar desde un punto de vista acústico un material tales como la impedancia superficial, constante de propagación, tortuosidad, porosidad, impedancia característica compleja, etc.

No obstante, de los citados existen dos parámetros que nos aportan la información más relevante para conocer el comportamiento de ese material desde un punto de vista acústico que son la impedancia característica compleja (Z) y la constante de propagación compleja (Γ). Estos dos parámetros son los directamente responsables de la capacidad de absorción acústica de los materiales.

Diversos modelos matemáticos han tratado de relacionar dichos parámetros con la absorción acústica, cuestión ésta que se desarrollará con más detalle en los siguientes apartados del presente capítulo.

02.02.03.02.01.02. Métodos de medida basado en el tubo de impedancia

Los métodos para la determinación de las propiedades absorbentes del sonido de los materiales pueden clasificarse en los siguientes tres grupos[59] :

a. Métodos de medida en tubos
b. Métodos de medida en cámara reverberante
c. Métodos de medida en campo libre

Con respecto al primero, el método más clásico para la determinación del coeficiente de absorción acústica a partir de la medida de la impedancia superficial de un material bajo incidencia normal es el basado en el tubo de impedancia acústica o tubo de ondas estacionarias. Este método se describe con detalle en la norma UNE-EN ISO 10534-2:1998 que desarrollaremos más

adelante y es la empleada en la caracterización acústica de los materiales objeto del presente trabajo.

En la citada norma se indica que el rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia entre las dos posiciones de los micrófonos. De los dos métodos, el más empleado de forma general es el método de los dos micrófonos (usando dos micrófonos en posiciones fijas) por lo que nos quedamos con el diámetro del tubo como una variable. Por tanto, una de las singularidades de este método es que la frecuencia más alta de muestreo es inversamente proporcional al diámetro del tubo.

Este método es conveniente para estudios de investigación en los que solo se dispone de pequeñas muestras de material absorbente, con la única limitación de que se calcula el coeficiente de absorción bajo incidencia normal y no difusa, si bien en el anexo F de la citada norma existe una relación para su transformación.

El método de medida de la absorción acústica en cámara reverberante determina (en condiciones ideales) el coeficiente de absorción acústica bajo incidencia difusa. Como ventaja frente al anterior cabe citar que al trabajar con campo sonoro difuso los resultados se ajustan en mayor medida a la realidad. Sin embargo, como contrapartida este método requiere de muestras de ensayo de dimensiones mucho mayores (entre 10 y 12 m^2 según el apartado 6.2.1.1. de la Norma EN 20354:1993 (ISO 354:1985) lo cual limita su aplicabilidad en el campo de la investigación de nuevos productos.

Este método de medición básicamente consiste en la medición del tiempo de reverberación antes y después de colocar una determinada muestra de material en el interior de una cámara de volumen y superficie conocida. Tras sendas mediciones es sencillo calcular el coeficiente de absorción acústica de dicho material.

02.02.03.02.01.03. Métodos basados en el tubo de impedancia

El tubo de impedancia acústica para ser empleado como método para la caracterización acústica de materiales se lo debemos al físico alemán August Adolf Eduard Eberhard Kundt (1839-1894), de ahí el nombre que recibe aparato, conocido como "tubo de ondas estacionarias" o "tubo de Kundt".

El trabajo de Kundt se centró fundamentalmente en los campos de la luz y del sonido. En el año 1866 desarrolló el valioso método para la investigación de ondas sonoras que viajan a través de tubos, basándose en el hecho de que el polvo se divide finamente en fragmentos pequeños, (por ejemplo el *lycopodium*) cuando es espolvoreado en el interior de un tubo que tiene una columna vibrante de aire, y tiende a acumularse en los nodos, permitiendo medir la distancia entre ellos. Una modalidad de este método permite medir la velocidad del sonido en diferentes gases.

De forma somera y por orden cronológico se citan a continuación algunos de los trabajos de diferentes investigadores en materia de caracterización acústica de materiales absorbentes del sonido empleando como base en sus estudios el método del tubo de ondas estacionarias.

a) **Scott** [60] en el año 1945 planteó un método para medir la constante de propagación y obtener la impedancia acústica de un material poroso, empleando para ello lana de roca con una densidad de 0,080 g/cm^3. La constante de propagación (Γ) describe la variación espacial de la perturbación acústica en el interior del medio poroso. La constante de propagación (a la que Scott denominaba h) la descompuso en una parte real (factor de propagación) y una parte imaginaria (factor de atenuación) y para su determinación se midió la atenuación y longitud de onda (λ) de una onda propagándose por la muestra de material poroso indicada.

   Para la determinación de la constante de propagación Scott empleó un tubo de ondas estacionarias cuyo montaje obedece al indicado en la siguiente figura:

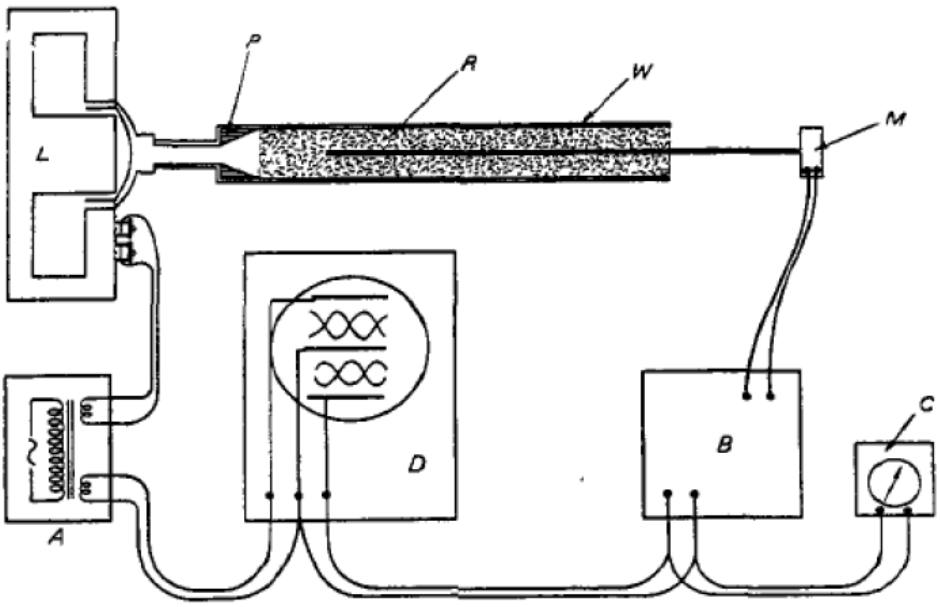


Figura 14.Montaje Scott para determinación de constante de propagación
Elementos significativos: L (fuente sonora), B (analizador eléctrico), C (voltímetro), M (micrófono), W (tubo), R (lana de roca) y P (goma en 5 primeros cm de tubo)

Con este ensayo Scott determina la constante de atenuación acústica mediante un gráfico en el que se representa la pendiente de la caída de la presión sonora (en dB) frente a la distancia. La impedancia característica se define como la relación entre la presión sonora y la velocidad de la onda en el medio.

La limitación de este método viene dada por la imposibilidad que presentan algunos materiales a ser atravesados por un micrófono a lo largo de la muestra sin que se originen perturbaciones que puedan afectar a los resultados.

b) En 1949 **Zwikker y Kosten** [61] plantearon estudios de la propagación del sonido en materiales porosos desde un punto de vista microscópico. En sus trabajos definieron un radio medio de poro así como una densidad efectiva compleja y una compresibilidad compleja del fluido contenido en el material.

c) **Ferrero y Sacerdote** [62] en el año 1951 proponen una nueva técnica para la determinación de la impedancia característica y de la constante de propagación de los materiales porosos a partir de la realización de dos

medidas de la impedancia acústica superficial, con la condición de que una muestra tuviera el doble del espesor que la otra. Este método se conoce como el método de los dos espesores y en él las medidas se realizan para una única frecuencia.

d) En el año 1969 **Delany y Bazley** [63] publican un trabajo en el que realizan medidas de la impedancia característica (Z) y la constante de propagación (Γ) de materiales tipo fibroso, que con independencia de la variación en el tamaño de la fibra y su distribución consideran homogéneos a los efectos de su caracterización mediante el empleo de ondas planas.

En el apartado correspondiente a "modelos acústicos de materiales absorbentes" del presente trabajo se desarrollan en detalle las expresiones empleadas por estos autores para la caracterización acústica de los materiales.

La resistencia específica al flujo por unidad de espesor (σ) es uno de los parámetros más significativos desde un punto de vista acústico, magnitud que depende de la densidad del material y del tamaño de la fibra. El valor de este parámetro lo obtuvieron midiendo la presión sonora a través de la muestra fibrosa para una velocidad volumétrica conocida del flujo de aire que hacían pasar a través de la misma. Los autores caracterizaron sus muestras de tipo fibroso abarcando un amplio rango de valores de la resistencia al flujo por unidad de espesor (σ) mediante el método del tubo de impedancia consiguiendo una serie de ecuaciones empíricas adecuadas para la evaluación general de materiales absorbentes del sonido.

e) **Yaniv** [64] en 1973 propone una mejora al método propuesto por Ferrero y Sacerdote de los dos espesores. El nuevo método que propone, al que denomina método de las dos cavidades, consta al igual que su antecesor de dos mediciones. Se procede a una primera medición en la que la muestra se ubica pegada a la terminación rígida del tubo mientras que en la segunda, la muestra se localiza a una distancia de un cuarto de la longitud de onda ($\lambda/4$) de dicha terminación. Las medidas al igual que en el modelo del que propone la mejora se realizan a una única frecuencia.

f) **Bies y Hansen** [65] en 1979 desarrollan un trabajo que recoge el testigo de Delany y Bazley, partiendo del parámetro de la resistencia al flujo para la caracterización acústica de los materiales de tipo poroso. Sus estudios van orientados al empleo de los materiales porosos en tres tipos de aplicaciones:
   - Control del campo sonoro reverberante en un recinto
   - Mejora del factor de pérdidas a través de tuberías y paredes
   - Atenuación de la propagación del sonido en tubos

   Al igual que sus antecesores emplean materiales fibrosos, siendo capaces de demostrar que la presión sonora en este tipo de materiales depende de la relación entre las densidades del material y de la fibra (ρ_m/ρ_f). Otra conclusión de su trabajo es la importante influencia que juega la impedancia acústica específica en la determinación de la efectividad del medio poroso en lo relativo a la absorción del sonido.

g) En 1982 **Attenborough** [66] revista la teoría de la propagación del sonido en materiales porosos de matriz rígida y poros cilíndricos situados de forma perpendicular en relación a la superficie del material, de gran relevancia en la aplicación de materiales absorbentes del sonido en la acústica arquitectónica. Este trabajo se desmarca de las teorías clásicas en las que se trabaja con parámetros tales como el factor de estructura o la densidad efectiva de los materiales.

   En su trabajo, además, se repasan las teorías de propagación del sonido en materiales porosos de estructura elástica que tienen en cuenta parámetros como la viscosidad y el calor por conducción, proponiendo el autor el uso de la teoría de Biot [67] que tienen en cuenta las constantes elásticas y funciones de disipación.

h) **Ingard y Dear** [68] en 1985 describen un método para medir la resistencia al flujo acústico en materiales porosos. La muestra se dispone entre dos micrófonos, uno en la cara incidente y otro en la parte posterior respecto de la fuente sonora próxima a la terminación rígida, tal y como se muestra en la siguiente figura:

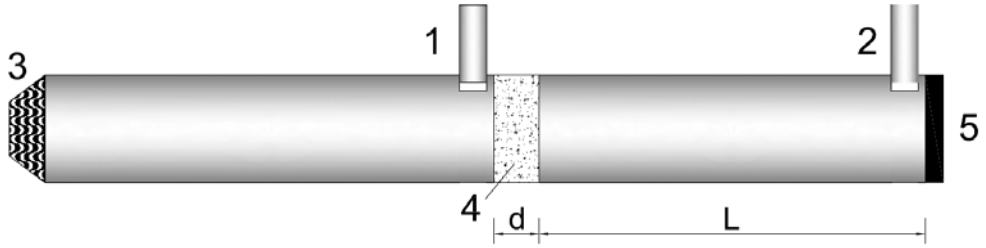


Figura 15. Montaje Ingar y Dear para la medida de la resistencia al flujo
1. Micrófono 1
2. Micrófono 2
3. Fuente sonora
4. Material poroso
5. Terminación rígida

La expresión de la impedancia al flujo normalizada viene dada por una ecuación en la que se distingue una parte real y otra imaginaria, para la que, según los autores, a bajas frecuencias la reactancia al flujo (parte imaginaria) es pequeña en relación con la resistencia al flujo (parte real) lo que permite la simplificación de la expresión.

i) En 1989 **Utsuno *et al*.** [69] publican un trabajo en el que introducen una modificación al método de las dos cavidades introduciendo dos micrófonos en las mediciones de la impedancia superficial. Mantienen la realización de dos medidas, una con la muestra pegada a la terminación rígida tal y como proponía Yaniv, y otra con un espacio arbitrario desde la muestra hasta la terminación. La diferencia de este método frente al método de dos cavidades o anteriormente el de los dos espesores, es que se obtienen resultados en un amplio rango de frecuencias.

Este método basado en la utilización de dos micrófonos cuenta con una variante que relaciona la impedancia superficial con la función de transferencia medida en dos direcciones a través de la muestra de material poroso, como en el trabajo de Bordone y Sacerdote [70]

j) **J.D. McIntosh *et al*** [71] en 1990 proponen un método más genérico para la medición a bajas frecuencias de la impedancia al flujo dinámica. Estos autores toman como referencia el método propuesto por Ingard y Dear salvo

en lo relativo a la disposición de una serie de micrófonos en la cara incidente de la muestra que permitan determinar la presión compleja y la velocidad de partícula. De esta manera únicamente con la presión sonora captada por el micrófono que se encuentra en la terminación rígida del tuvo es como se realiza la estimación de la resistividad al flujo dinámica.

k) **Champoux y Stinson** [72] en 1991 calculan la impedancia característica y la constante de propagación a partir de la medida de la impedancia superficial con el método de la función de transferencia. La novedad que presenta este método, que ya había sido usado para materiales de baja resistencia al flujo, es su empleo en materiales con alta resistencia al flujo.

Con este método se mide la impedancia de superficie y la función de transferencia en cada muestra en un rango de frecuencias comprendido entre 100 y 4000 Hz. A partir de estos valores se calcula la impedancia característica compleja y la constante de propagación del material, parámetros que caracterizan el comportamiento acústico de los materiales. La impedancia superficial (Z_S) es la relación entre la presión sonora en la superficie y la velocidad de partícula en el interior de la muestra. Su valor viene dado por la expresión:

$$Z_S = Z_m \frac{Z_b \cdot \cosh \Gamma l + Z_m \cdot \sinh \Gamma l}{Z_b \cdot \sinh \Gamma l + Z_m \cdot \cosh \Gamma l}$$

Expresión 29

Donde:

$$Z_b = -i \cdot \rho_0 \cdot c \cdot \coth(k \cdot d)$$

Expresión 30

La función de transferencia se calcula a partir de las presiones acústicas medidas en dos posiciones del micrófono, una situada inmediatamente antes de la muestra y otras inmediatamente después de la misma.

l) **Ren y Jacobsen** [73] en 1992 presentan un trabajo que puede considerarse como una particularización del realizado por Ingard y Dear. Como hemos

visto, el comportamiento acústico de los materiales porosos se define por la impedancia característica (Z) y por la constante de propagación (Γ) que según alguno de los métodos expuestos pueden calcularse en función de la resistencia al flujo del material (σ). Este último parámetro, la resistencia al flujo del material (σ) puede definirse como la relación entre la caída de presión y la velocidad del flujo a través de una determinada muestra, todas ellas números complejos como hemos visto anteriormente. En la siguiente figura se muestra el montaje de estos autores:

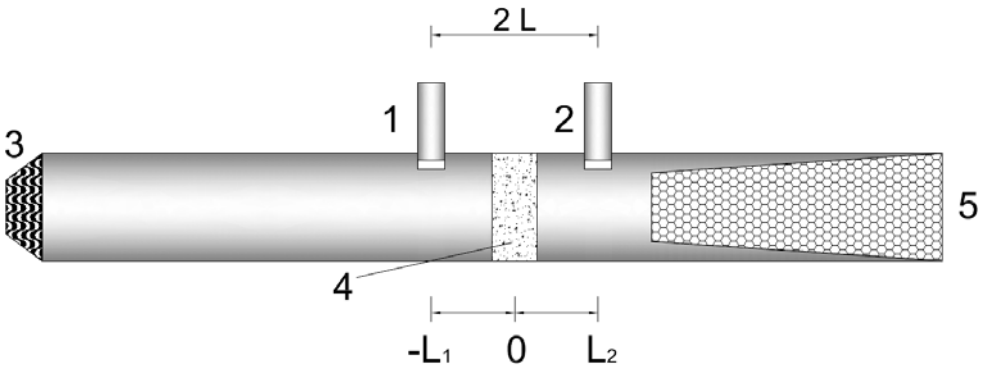


Figura 16. Montaje Ren y Jacobsen en tubo de impedancia
1. Micrófono 1
2. Micrófono 2
3. Fuente sonora
4. Material poroso
5. Terminación absorbente

La particularización que realizan los autores permite obtener la resistencia y la reactancia al flujo directamente a partir de la función de transferencia entre las señales de dos micrófonos situados tal y como se expone en la anterior figura, para unas determinadas frecuencias en las que existe una distancia entre la muestra y la terminación del tubo del tipo $(2n - 1)\lambda/4$, donde n = 1,2,3, etc.

Tal y como puede observarse en la figura, este método no requiere una terminación rígida en el tubo de ondas estacionarias sino que se basa en la función de transferencia y supone la descomposición del campo sonoro en ondas incidentes y ondas reflejadas.

Se plantean varias simplificaciones. La primera es asumir un campo sonoro armónico dependiente del tiempo ($e^{j\omega t}$) y la segunda es que el origen de

coordenadas se encuentra en el centro de la muestra. Con ello, el campo sonoro en el tubo puede expresarse como:

$$p(x) = p_i^L \cdot e^{-jkx} + p_r^L \cdot e^{jkx} \qquad x \leq -l$$

$$p(x) = p_i^R \cdot e^{-jkx} + p_r^R \cdot e^{jkx} \qquad x \geq l$$

Expresión 31

Donde:
l es la mitad del espesor de la muestra
p_i y p_r son amplitudes de las presiones sonoras de las ondas incidente y reflejada respectivamente
L y *R* indican los lados izquierdo y derecho de la muestra respectivamente

A partir de las expresiones anteriores puede determinarse la ecuación de la velocidad:

$$u_x(x) = \frac{p_i^L \cdot e^{-jkx} - p_r^L \cdot e^{jkx}}{\rho \cdot c} \qquad x \leq -l$$

$$u_x(x) = \frac{p_i^R \cdot e^{-jkx} - p_r^R \cdot e^{jkx}}{\rho \cdot c} \qquad x \geq l$$

Expresión 32

Las presiones sonoras en las posiciones relativas al primer y segundo micrófono respectivamente, tal y como se representan en la anterior figura pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$p_1 = p(L_1) = p_i^L \cdot e^{jkL_1} + p_r^L \cdot e^{-jkL_1}$$

$$p_2 = p(L_2) = p_i^R \cdot (e^{-jkL_2} + r \cdot e^{jkL_2})$$

Expresión 33

Donde r es el factor de reflexión complejo en x=0 (eje de donde se ubica la muestra), cuyo valor es el siguiente:

$$r = \frac{p_r^R}{p_i^R}$$

Expresión 34

El espesor de la muestra es suficientemente pequeño comparado con la longitud de onda como para poder considerar constante el flujo de velocidad

a través de la misma. Esta nueva simplificación permite suponer que la velocidad es la misma a ambos lados de la muestra, por lo que:

$$p_i^L \cdot e^{jkl} - p_r^L \cdot e^{-jkl} = p_i^R \cdot (e^{-jkl} - r \cdot e^{jkl})$$

Expresión 35

Del resultado de combinar las expresiones de presión sonora en ambos micrófonos con la expresión anterior, obtenemos dos parámetros que intervienen en la medida de la impedancia al flujo que son los siguientes:

$$X = \frac{p_i^L}{p_i^R} = \frac{e^{jk\Delta l}(r + e^{-j2kL_2}) + H_{12}e^{-j2kL_1}(1 - r \cdot e^{j2kl})}{H_{12}\left[1 + e^{-j2k(L_1 - l)}\right]}$$

$$Y = \frac{p_r^L}{p_i^R} = \frac{e^{jk(\Delta l + 2l)}(r + e^{-j2kL_2}) + H_{12}(1 - r \cdot e^{j2kl})}{H_{12}\left[1 + e^{-j2k(L_1 - l)}\right]}$$

Expresión 36

Donde:
H_{12} es la función de transferencia entre las señales de los dos micrófonos $H_{12} = p_2 / p_1$.
$\Delta L = L_2 - L_1$

Los autores llegan a la siguiente expresión para la impedancia al flujo normalizada:

$$\frac{Z}{\rho \cdot c} = \theta + j \cdot \chi = \frac{p(-l) - p(l)}{u(l) \cdot \rho \cdot c}$$

Expresión 37

Donde:
θ es la resistencia al flujo
χ la reactancia al flujo

La ecuación anterior los autores la expresan en función de X, Y y r, al hacer uso del factor de reflexión complejo (r) visto en la expresión 34 anterior. Con ello, obtienen una ecuación que es la base de su método y que expresa tanto la resistencia como la reactancia al flujo, que es la siguiente:

$$\theta + j \cdot \chi = \frac{X + (Y - 1) \cdot e^{-j2kl} - r}{e^{-j2kl} - r}$$

Expresión 38

El factor de reflexión complejo se puede calcular con una medida de la función de transferencia en el tubo de ondas estacionarias sin muestra mediante la siguiente expresión.

$$r = \frac{H'_{12} - e^{-jks}}{1 - H'_{12} \cdot e^{-jks}}$$

Expresión 39

De esta expresión se deduce que el factor de reflexión se vuelve indeterminado si la distancia entre los micrófonos es un múltiplo de $\lambda/2$. Para evitar esto, la distancia *s* debe ser inferior a media longitud de onda a la frecuencia más alta de interés.

De todo lo anterior se deduce que la resistencia y la reactancia al flujo pueden obtenerse con el cálculo de dos funciones de transferencia, una con la muestra y otra sin la muestra entre los dos micrófonos dispuestos en el tubo de ondas estacionarias.

m) Para terminar con esta revisión de a los principales métodos basados en tubos de impedancia cabe citar el trabajo de **Cummings y Beadle** [74], que en 1993 caracterizan acústicamente doce muestras de espumas de poliuretano. Los citados autores consideran que los parámetros acústicos de un medio poroso de estructura rígida dependen de las características geométricas de la microestructura del material sólido, así como de las propiedades del gas contenido en los poros. En su trabajo obtienen expresiones para la impedancia característica (Z) y la constante de propagación (Γ) en función de parámetros texturales que desarrollaremos con más detalle en el presente trabajo. Las expresiones citadas son:

$$Z = \left(\frac{q}{\Omega}\right)\left[\frac{\rho}{k(\omega)}\right]^{1/2} \cdot \left[1 - i\frac{\Omega \cdot \sigma \cdot F_{\mu}(\omega)}{\rho \cdot q^2 \cdot \omega}\right]^{1/2}$$

Expresión 40

$$\Gamma = i \cdot q \cdot \omega \cdot \left[\rho \cdot k(\omega)\right]^{1/2} \cdot \left[1 - i\frac{\Omega \cdot \sigma \cdot F_{\mu}(\omega)}{\rho \cdot q^2 \cdot \omega}\right]^{1/2}$$

Expresión 41

Expresiones que se encuentran en función de parámetros texturales y factores del medio de propagación del sonido en el interior de los poros del material. Así, magnitudes relacionadas con las propiedades del gas contenido en los poros serían:

- ω, frecuencia angular
- ρ, densidad del fluido
- $k(\omega)$, compresibilidad efectiva del gas contenido en los poros; se trata de un parámetro complejo que depende de la frecuencia.

Por su parte, magnitudes que dependen de las características geométricas y texturales que aparecen en las anteriores expresiones podemos destacar:

- Ω, **porosidad**
- σ, resistividad viscosa al flujo
- $F_{\mu}(\omega)$, función efectiva de la viscosidad, relacionada con los efectos de la viscosidad de las capas que rodean la estructura sólida del material, parámetro complejo que también depende de la frecuencia.
- q, **tortuosidad**, parámetro que al cuadrado recibe el nombre de "factor de estructura".

02.02.03.02.01.04. Norma UNE-EN ISO 10534-2

Tal y como señala la citada norma, el objeto de la misma es la determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia mediante el método de la función de transferencia. Este método de ensayo se aplica en la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal de absorbentes acústicos mediante un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal. Puede emplearse también para la determinación de la impedancia acústica superficial o de la admitancia acústica superficial de los materiales.

Puesto que, como hemos visto en apartados anteriores, los cocientes de impedancia de un material absorbente acústico se relacionan con sus propiedades físicas (resistencia al flujo, porosidad, densidad...) el empleo de este método es muy útil en investigación básica y en el desarrollo de los productos tal y como confirma la propia norma.

Esta norma plantea un método de ensayo en el que la muestra se monta en uno de los extremos de un tubo de impedancia recto, rígido, liso y estanco, generándose ondas planas en dicho tubo mediante una fuente sonora y se miden las presiones acústicas en dos posiciones cercanas a la muestra. Con estas medidas se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usa para calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal, y la impedancia normalizada del material de ensayo.

Las mediciones se pueden realizar por dos procedimientos:

- Método de los dos micrófonos
- Método de un micrófono

La propia norma recomienda la primera de las técnicas para fines generales ya que combina rapidez, gran precisión y sencillez de implementación frente a la segunda. Este procedimiento requiere un procedimiento de corrección previo o simultáneo al ensayo para minimizar las diferencias en características de amplitud y fase entre los dos micrófonos.

La frecuencia de trabajo debe estar comprendida entre los siguientes límites:

$$f_l < f < f_u$$

Expresión 42

Donde:

f_l es la frecuencia de trabajo más baja del tubo, limitada por el equipo de procesado de la señal.

f es la frecuencia de trabajo

f_u es la frecuencia de trabajo más alta del tubo,

Esta última es elegida para evitar que se produzcan modos de propagación de ondas no planas, para tubos de sección circular y diámetro interior d, expresado en metros y f_u en hercios:

$$d < 0{,}5\ \lambda_u;\ f_u \cdot d < 0{,}50\ c_0$$

Expresión 43

La norma prescribe que la instrumentación de ensayo debe conectarse entre si tal y como se indica en la siguiente figura, debiéndose comprobar antes de su utilización para una serie de ensayos.

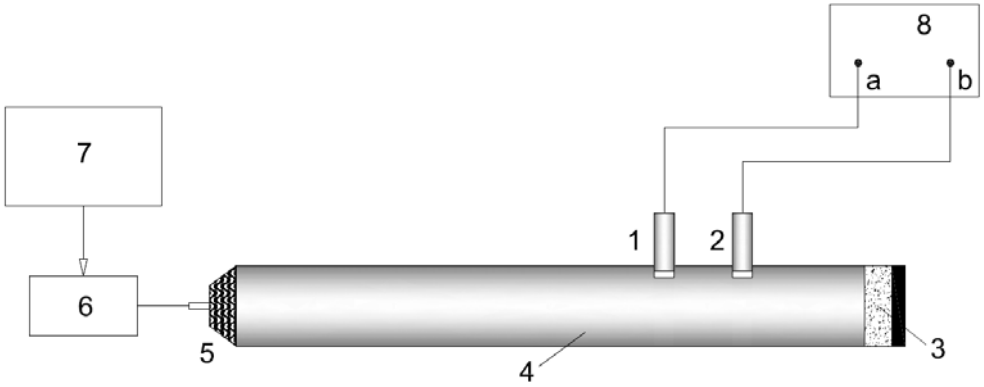


Figura 17. Montaje según norma UNE-EN ISO 10534-3 de tubo de impedancia

1. Micrófono A
2. Micrófono B
3. Muestra de ensayo
4. Tubo de impedancia
5. Fuente acústica
6. Amplificador
7. Generador de señal
8. Sistema de análisis en frecuencia

En apartado 7 de la citada norma es donde se establece el método de ensayo y donde se exponen las diferentes expresiones de interés para la determinación de los parámetros acústicos más importantes del material. Para la determinación del coeficiente de absorción acústica, la expresión que se propone es:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2$$

Expresión 44

Donde r es el coeficiente de reflexión a incidencia normal, que se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$r = |r| e^{j\phi_r} r_r + j r_i = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1}$$

Expresión 45

Donde

$r_r$es la componente real,

$r_i$es la componente imaginaria,

$x_l$es la distancia entre la muestra y la posición última del micrófono,

ϕ_r es el ángulo de fase del coeficiente de reflexión a incidencia normal y H_I y H_R son las funciones de transferencia de la onda incidente sola y la reflejada sola respectivamente. H_{12} es la función de transferencia para el campo acústico total y se obtiene a partir de las presiones acústicas p_1 y p_2 en las dos posiciones de los micrófonos.

Otro parámetro importante que se define en este apartado de la norma UNE es la impedancia acústica específica mediante la siguiente expresión:

$$\frac{Z}{\rho c_0} = \frac{R}{\rho c_0} + \frac{jX}{\rho c_0} = \frac{(1+r)}{(1-r)}$$

Expresión 46

Donde

Res la componente real,

Xes la componente imaginaria y

ρc_0 es la impedancia característica.

Por último y para concluir con este recorrido a los aspectos más relevantes de los métodos experimentales en materia de caracterización acústica mediante tubos de impedancia, cabe señalar la existencia de una fórmula empírica en el Anexo F de la citada norma en la que se permite obtener un valor de coeficiente de absorción difuso α_{st} de absorbentes de reacción local a partir de los resultados de la UNE-EN ISO 10534-2.

El coeficiente de absorción acústica para incidencia difusa α_{st}, es decir, omnidireccional, puede calcularse a partir de la impedancia normalizada $z = z' + j \cdot z''$ determinada según la citada norma para absorbentes de tipo de reacción local, es decir, sin propagación sonora en el interior del absorbente paralelamente a su superficie.

$$\alpha_{st} = 8\frac{z'}{z'^2+z''^2}\left[1-\frac{z'}{z'^2+z''^2}\cdot\ln\left(1+2z'+z'^2+z''^2\right)+\frac{1}{z''}\cdot\frac{z'^2-z''^2}{z'^2+z''^2}\cdot\arctan\frac{z''}{1+z'}\right]$$

Expresión 47

Donde:

$z = Z / \rho c_0$ es la impedancia normalizada,

$z' = R / \rho c_0$ es la parte real de la impedancia normalizada y

$z'' = X\rho c_0$ es la parte imaginaria de la impedancia normalizada

02.02.03.02.02. Coeficiente de absorción acústica

Coeficiente de absorción acústica α se define por la siguiente fórmula:

$$\alpha = 1-\left|\frac{Z_0-\rho c}{Z_0+\rho c}\right|^2$$

Expresión 48

donde:

- Z = ρc = impedancia característica del aire (ρ, densidad del aire; c, velocidad del sonido)
- Z_0 = impedancia especifica (combinada) del material en función de otras magnitudes físicas que más adelante se describen, tales como la porosidad ε, tortuosidad τ y resistividad al flujo de aire σ.

Para llevar a cabo estas medidas se utiliza el método previsto en la parte 2 de la norma UNE-EN ISO 10534-2 de la función de transferencia para la determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia.

02.02.03.02.03. Resistencia al flujo de aire

La resistencia al flujo de aire de un absorbente poroso, σ, es una de las características acústicas más importantes para obtener la capacidad o idoneidad acústica de un material, ya que se halla relacionada con la impedancia acústica del material y, por tanto, con su capacidad de absorción. Expresa el retardo que experimenta el aire por fricción, es decir, la resistencia al flujo del aire cuasiestático al paso por los poros del

material [75]. Las unidades de la resistencia al flujo de aire en el Sistema Internacional son rayl m^{-1} o $N \cdot s \cdot m^{-2}$. La expresión matemática viene dada por:

$$\sigma = \frac{\Delta p}{q_v}$$

Expresión 49

donde Δp es la diferencia de presión del aire con relación a la presión atmosférica (en pascales) entre ambos lados de la probeta y q_v es el caudal volumétrico de aire (en m^3/s) que atraviesa la probeta.

Observando que la resistencia al flujo de aire es el resultado de la fricción producida entre los poros del material y las partículas de aire que fluyen de los canales laberínticos que éstos forman, su magnitud en el sentido microscópico depende del tamaño y la forma de los poros, de su número en un volumen dado y de la forma en que se hallen orientados; y a nivel macroscópico del espesor del material, de la densidad superficial y del tamaño de poro.

Para que sea óptimo el valor de la resistividad al flujo del aire, éste debe estar entre 5 – 10 $kPa \cdot s \cdot m^{-2}$; por debajo de 5 $kPa \cdot s \cdot m^{-2}$, el aislante no proporciona amortiguación acústica suficiente; y por encima de 10 $kPa \cdot s \cdot m^{-2}$, la transmisión del ruido sería preponderantemente por vía sólida por tratarse de un material demasiado compacto.

02.02.03.02.04. Porosidad

La porosidad ε de un material es la fracción de volumen de aire dentro del material absorbente. Es la relación entre el volumen total de poros abiertos y el volumen total del material absorbente.

El aire existente dentro de los poros es obligado a moverse, produciéndose unas pérdidas de energía por el rozamiento de las partículas de aire con el esqueleto del material, con lo que produce una transformación de parte de la energía acústica incidente en energía calórica.

Los poros del material deben estar intercomunicados entre sí, ya que ésta es la vía por donde la onda acústica puede penetrar más profundamente en el interior del material. En el diseño de materiales porosos es posible compensar la resistencia al flujo mediante la porosidad. A la hora de determinar la porosidad, los poros cerrados deben ser excluidos del volumen total de poros, ya que estos poros no son accesibles a las ondas acústicas. Si V_{fluido} es el volumen de aire (que no está encerrado dentro de las celdas del material) y $V_{material}$ es el volumen total del material poroso, la porosidad ε, se define como:

$$\varepsilon = \frac{V_{fluido}}{V_{material}} \qquad 0 < \varepsilon < 1$$

Expresión 50

Un método simple para obtener la porosidad en el laboratorio, es medir la masa seca m_d y la masa mojada m_w (después de saturar el material con agua) de la muestra, de donde se obtiene el volumen total de poros interconectados del material [76], teniendo en cuenta que:

$$V_{fluido} = \frac{(m_w - m_d)}{1000}$$

Expresión 51

Los buenos absorbentes tienden a tener una porosidad muy alta. Por ejemplo, la mayoría de las lanas minerales tienen una porosidad en torno a 0,98. La siguiente tabla nos muestra valores típicos de porosidad de algunos materiales.

Tabla 35. Porosidades típicas de algunos materiales

Material	Porosidad
Lana de vidrio	0,92-0,99
Foam de celdas abiertas	0,95-0,99
Fieltros	0,83-0,95
Tablero de fibra de madera	0,65-0,80
Filtros cerámicos	0,33-0,42
Ladrillo	0,25-0,30
Ladrillo refractario	0,15-0,35
Mármol	~ 0,005

02.02.03.02.05. Factor de estructura o tortuosidad

La orientación relativa de los poros al campo sonoro incidente tiene gran efecto sobre la propagación del sonido en el seno del material. Este efecto está representado por el parámetro tortuosidad τ. Algunos autores utilizan el término "factor de forma estructural" para denominar a esta propiedad. Es una magnitud que mide las irregularidades en la forma de los poros y su distribución direccional. Básicamente, proporciona la facilidad que presenta el material a la hora de la penetración del sonido en él. Está directamente relacionada con la forma de los poros y con la variación de su sección a lo largo de su longitud así como con los absorbentes rígidos porosos. Las teorías clásicas parten de asumir microestructuras uniformes de poros de forma cilíndrica, alineados según la dirección de propagación de las ondas acústicas, estando relacionada la tortuosidad con el coseno al cuadrado del ángulo formado por la dirección de los ejes de los cilindros y la normal a la superficie de la muestra [77]. La estructura interna del material influye en gran medida en el comportamiento acústico de los absorbentes porosos.

En el caso de poros simples, con forma cilíndrica y todos ellos alineados en la misma dirección, la tortuosidad se define mediante la expresión:

$$\tau = \frac{1}{\cos^2(\psi)}$$

Expresión 52

donde ψ es el ángulo que forman los poros y la normal a la superficie.

En el caso de materiales absorbentes porosos reales, los poros normalmente no están bien alineados, por lo que la tortuosidad es un parámetro que ha de obtenerse obtenido mediante el empleo de técnicas experimentales [78].

La metrología más estudiada para este parámetro se fundamenta en la analogía existente entre las propiedades acústicas y eléctricas de los materiales granulares no conductores. Un material no conductor puede ser saturado con un fluido conductor y medirse entonces por lo tanto la resistividad eléctrica. De aquí podemos obtener la

tortuosidad. Para el caso general de materiales con poros no cilíndricos, la expresión de la tortuosidad viene dada por [79]:

$$\tau = \frac{\varepsilon \cdot r_a}{r_f}$$

Expresión 53

siendo r_f y r_a las resistividades eléctricas de un fluido conductor y del material saturado con respecto al fluido, respectivamente.

Valores típicos de la tortuosidad son, para el caso de materiales fibrosos, la unidad y para materiales granulares, dos.

Modernamente, se ha calculado la tortuosidad a partir de los datos proporcionados por la técnica de porosimetría de mercurio, que proporciona unos valores más ajustados a la situación real de la porosidad del material y que han sido ya descritos en esta memoria.

02.02.03.02.06. Forma de poro y longitudes características

Mientras que la porosidad y la resistencia al flujo son dos de los parámetros más importantes en la determinación del comportamiento acústico de los materiales porosos, otros parámetros secundarios como la forma de poro y las longitudes características térmica y viscosa, pueden tener importantes efectos. Unas formas de poro diferentes dan lugar a unas áreas superficiales también diferentes y por tanto a que los efectos térmicos y viscosos sean distintos. Obtener analíticamente las formas de poro para la mayoría de los absorbentes porosos es imposible, ya que no presentan formas geométricas simples. Debido a esto, la forma de poro es un parámetro que se puede obtener de forma experimental.

La *longitud característica viscosa*, Λ, muestra la relación entre el área superficial de los poros y el volumen de los mismos. Johnson et al [80] llevaron a cabo su cálculo teniendo en cuenta el cuadrado de la velocidad microscópica del fluido evaluada en la superficie del poro y teniendo en cuenta los efectos viscosos en la zona de altas frecuencias. Entonces Λ viene dada por:

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_A V^2(r_w)dA}{\int_V V^2(r)dV}$$

Expresión 54

donde $V(r)$ es la velocidad microscópica y $V(r_w)$ la velocidad macroscópica de un fluido no viscoso en las proximidades de la pared del poro, r es la posición de la partícula dentro de un único poro y r_w la posición relativa de la partícula respecto al material poroso, V es el volumen de poro y A el área superficial del poro.

En el caso de geometrías de poros simples, se utiliza la siguiente expresión [75]:

$$\Lambda = \frac{1}{S} \cdot \sqrt{\frac{8\eta\tau^2}{\varepsilon\sigma}}$$

Expresión 55

donde η es la viscosidad del aire y S es una constante que oscila entre 0,3 y 3, τ la tortuosidad, σ la resistencia al flujo de aire y ε la porosidad. El valor para formas de poro circulares, cuadrados y triangulares es: 1, 1,07 y 1,14, respectivamente.

En el caso de materiales con poros no cilíndricos y estructuras internas complicadas es necesario introducir otro parámetro para considerar los efectos térmicos [81]. Este parámetro es la *longitud característica térmica,* Λ', que se define mediante la siguiente expresión:

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int_A dA}{\int_V dV}$$

Expresión 56

El valor de la longitud característica térmica depende únicamente de la geometría del poro. También se puede aproximar mediante la expresión:

$$\Lambda' = \frac{2 \cdot V_p}{S_p}$$

Expresión 57

donde S_p y V_p son el área superficial y el volumen de los poros, respectivamente. Esta misma relación es utilizada para calcular la longitud característica viscosa, pero sin tener en cuenta la velocidad microscópica de las partículas. Los poros con geometría cilíndrica son un caso especial donde Λ y Λ' se pueden considerar que presentan el mismo valor. En general se cumple que $\Lambda \leq \Lambda'$.

La determinación de estos dos parámetros de longitudes características es uno de los grandes problemas en el uso de determinados modelos teóricos. En la mayoría de los materiales absorbentes porosos, la forma del poro es tan compleja que las longitudes características son aproximadas teóricamente. Existen complicaciones mayores cuando el material es anisótropo, algo común en este tipo de materiales. En el caso de lanas minerales, compuestas por varias capas, estas longitudes dependen del ángulo de incidencia.

02.02.03.02.07. Distribución de tamaño de poro

La distribución de tamaño de poro se introduce para hallar el factor de corrección de viscosidad introducido por Biot y poder explicar mayores variaciones en los tamaños y geometría de poro debido a que, en la realidad, existe una gran variabilidad en la geometría y tamaño de los mismos. Se han desarrollado varios modelos predictivos que introducen el factor de corrección por viscosidad y que precisan de la función de densidad de distribución de tamaño de poro. Algunos resultados experimentales sugieren que, para la mayoría de los casos reales, la distribución de tamaño de poro proporciona aproximaciones muy precisas de los procesos térmicos y viscosos que experimenta el material durante las interacciones con las ondas acústicas.

Horoshenkov, Attenborough y Chandler-Wilde [82] introdujeron el cálculo del factor de corrección viscosa mediante aproximaciones, incorporando la distribución de tamaño de poro:

$$F(\psi) = F(\overline{\psi}) \cdot \frac{1 + a_1\psi + a_2\psi^2}{1 + b_1\psi}$$

Expresión 58

donde,

$$\psi = \left(\frac{-i\omega\tau_\infty \rho_0}{\varepsilon\tau} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Expresión 59

siendo a_1, a_2 y b_1 coeficientes reales con valores que dependen únicamente de la geometría del poro. Para poros con sección circular, estos coeficientes son $a_1 = b_1 = \theta_1 / \theta_2$ y $a_2 = \theta_1$.

Las funciones para el cálculo de θ_1 y θ_2 las obtuvieron Horoshenkov, Attenborough y Chandler-Wilde [82] y se muestran en la tabla siguiente, donde,

$$\varsigma = (\delta \cdot \Phi \cdot \log(2))^2$$

Expresión 60

y Φ es la desviación estándar de la distribución de tamaño de poro.

Tabla 36. Coeficiente para el cálculo del factor de corrección viscosa

Parámetros	Poros lineales	Poros triangulares	Poros circulares
θ_1	$6/5 \cdot e^{4\varsigma-1}$	$10/7 \cdot e^{4\varsigma-1}$	$4/3 \cdot e^{4\varsigma-1}$
θ_2	$1/3^{1/2} \cdot e^{3/2\varsigma}$	$(3/5)^{1/2} \cdot e^{3/2\varsigma}$	$1/2^{1/2} \cdot e^{3/2\varsigma}$

02.02.03.02.08. Constante de propagación e impedancia característica y específica de materiales porosos

Los materiales acústicos porosos quedan completamente caracterizados mediante la constante de propagación compleja k_c y la impedancia característica compleja Z_F, que se definen por:

$$k_c = \alpha_F + j\beta$$

Expresión 61

$$Z_F = \left(\frac{\rho c}{\omega\varepsilon}\right) \cdot (\beta - j\alpha_F)$$

Expresión 62

donde:

- α_F es la constante de atenuación del material, que indica cuantitativamente la proporción energía sonora reducida al atravesar el material.
- β es la constante de fase, que es una medida de la velocidad de propagación del sonido en el material.

La impedancia acústica característica Z_F de un material poroso se define como la razón entre la presión sonora de una onda plana chocando perpendicularmente y la velocidad de la partícula de aire en la superficie de un material de extensión infinita. A diferencia de aquella, la impedancia acústica específica Z_0 de un material poroso se define como la razón entre la presión sonora de una onda chocando perpendicularmente y la velocidad del aire en la superficie de un material de espesor L.

Ambas magnitudes son números complejos, en el sentido matemático, y expresan, en cierta medida, la oposición al movimiento de las partículas de aire a una presión sonora de incidencia dada.

Tanto la constante de propagación compleja k_c como la impedancia característica compleja Z_F puede obtenerse de forma teórica mediante modelos empíricos (Delany & Bazley, Biot, Pfretzschner, etc.) a partir de la resistencia específica al flujo de aire σ, la porosidad ε y la tortuosidad τ.

02.02.03.03. MODELOS ACÚSTICOS DE MATERIALES ABSORBENTES

Son numerosas las investigaciones que se han dedicado a desarrollar modelos y teorías que intentan predecir el comportamiento de los materiales desde el punto de vista acústico. Algunos de los principales modelos matemáticos que han sido desarrollados para el estudio del comportamiento acústico de los materiales de tipo poroso y fibroso son los que se comentarán más adelante.

Los modelos que permiten determinar la impedancia acústica característica y la constante de propagación de los materiales fibrosos a partir de sus propiedades físicas

se clasifican en monoparamétricos, multiparamétricos o microestructurales, empíricos y fenomenológicos. Los materiales porosos también pueden ser estudiados con modelos teóricos.

El comportamiento acústico de los materiales absorbentes porosos fue primeramente estudiado por Kirchoff [83], quien propuso que la propagación del sonido en un fluido contenido dentro de un tubo estaba bajo la influencia de la viscosidad y la conductividad térmica. Posteriormente, fueron Zwikker y Kosten los primeros en explicar mediante modelos algunos de los fenómenos que tienen lugar en los absorbentes porosos.

La mayoría de los modelos utilizan parámetros que se obtienen fácilmente mediante diferentes técnicas experimentales y que relacionan las interacciones viscosas y térmicas entre fluido y sólido. Para simplificar el comportamiento físico autores como Delany y Bazley [63,84] han desarrollado modelos empíricos cuyo objetivo principal era simplificar los modelos teóricos para de este modo utilizar menos parámetros. A continuación se presentan algunos de los modelos más utilizados en este tipo de estudios.

02.02.03.03.01. Modelo de Delany-Bazey

En 1970 Delany y Bazley [63,84] utilizan la resistencia específica de flujo de aire por unidad de longitud para la evaluación de las características acústicas de un gran número de materiales absorbentes fibrosos, cubriendo un amplio abanico de resistencia al flujo de aire aplicando el método del tubo de impedancia. Mediante el análisis de estos parámetros acústicos consiguen caracterizar este tipo de materiales absorbentes.

Las relaciones empíricas que se obtienen sirven para la evaluación general de estos materiales y sus aplicaciones en diversos tipos de salas, diseño de ventilación etc. Estas relaciones empíricas solo precisan del conocimiento de la resistencia al flujo de aire de los materiales, que puede ser determinada mediante mediciones con un simple aparato, evitando y reduciendo considerablemente las medidas acústicas. Las relaciones empíricas que se obtienen como resultado del análisis de datos permiten

calcular la impedancia característica compleja (Z) y la constante de propagación compleja (Γ) mediante las siguientes expresiones:

$$Z = \rho_0 c_0 \left[1 + 0{,}0571 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0{,}754} - j0{,}087 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0{,}732} \right]$$

Expresión 63

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[1 + 0{,}0978 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0{,}700} - j0{,}189 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0{,}595} \right]$$

Expresión 64

Donde:

ρ_0 es la densidad del aire,

c_0 es la velocidad del sonido en el aire

f es la frecuencia y

σ es la resistencia específica al flujo por unidad de espesor

Mediante una serie de operaciones, se obtiene la expresión para el cálculo del coeficiente de absorción a incidencia normal:

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 \cdot c_0}{Z + \rho_0 \cdot c_0} \right|^2$$

Expresión 65

Según el modelo de Delany y Bazley para el cálculo tanto de la impedancia característica (Z) y de la constante de propagación compleja (Γ), solo es necesario el conocimiento de la resistencia específica al flujo (σ) que puede determinarse con el tubo de impedancia.

Este es uno de los modelos matemáticos más conocidos y para su determinación los autores emplearon materiales con alta porosidad.

02.02.03.03.02. Modelo de Horoshenkov, Attenborough y Chandler-Wilde (HAC-W)

El modelo (HAC-W) es teórico e incluye una función para describir la distribución del tamaño de poro mediante la cual se puede explicar la variación de porosidad a través del material [82,85]. A diferencia de algunos modelos teóricos anteriores que determinan el factor de forma a través de modelos empíricos, el modelo HAC-W utiliza otro tipo de aproximación. En el desarrollo del modelo presentan materiales porosos en los que los poros uniformes de sección variable han sido perforados. De esta forma el material puede ser modelado como un conjunto de tubos capilares con una cierta longitud pero cuyo tamaño sigue una distribución estadística característica.

Por otra parte, el modelo HAC-W utiliza una aproximación estadística para obtener la impedancia característica y el número de ondas. Basándose en la corrección viscosa aplicada a este tipo de proceso por otros autores, Yamamoto et al. [86] determinaron la ecuación correspondiente para la densidad compleja:

$$\rho_b(\omega) = \frac{\tau \cdot e^2}{\varepsilon}\left(\rho_0 - \frac{\varepsilon \cdot R_b}{i\omega \cdot \tau \cdot e^2} F(\omega)\right)$$

Expresión 66

Horoshenkov y col. [82] demostraron que la compresibilidad compleja podía escribirse como:

$$C_b(\omega) = \frac{\varepsilon}{\gamma \cdot P_0}\left(\gamma - \frac{\lambda - 1}{1 - \frac{\varepsilon \cdot \sigma}{i\omega \cdot \tau_\infty N_{PR}} F(\omega N_{PR})}\right)$$

Expresión 67

En realidad, la mayoría de los materiales absorbentes porosos están compuestos por poros de diferentes formas y tamaños que obedecen a una distribución estadística característica de cada uno de ellos. Aunque algunos autores sugieren que para este tipo de materiales la forma de estos poros carece de importancia, Horoshenkov et al. [82] se refieren a la densidad y a la compresibilidad compleja, promediadas dentro del rango de los tamaños reales de los poros identificados dentro del material. Este

argumento también se aplica a las propiedades acústicas como son la impedancia característica y a la constante de propagación. Esta aproximación es aplicable a medios porosos que presentan una distribución logarítmica normal de tamaño de poros.

El método HAC-W está basado en las aproximaciones que se llevan a cabo al modelo real del material a través de la medida de parámetros no acústicos como la porosidad, resistencia al flujo de aire, tortuosidad y la distribución de tamaño de poros.

02.02.03.03.03. Modelo de Miki

Este modelo se basa en el propuesto por Delany y Bazley y el autor lo desarrolló para la caracterización de materiales porosos de tipo bicapa fundamentalmente. En los materiales multicapa con el modelo anterior en ocasiones la parte real de la impedancia superficial era negativa por lo que Miki [87] introduce una serie de correcciones al objeto de solucionar esta carencia en la expresión.

Para este autor, la impedancia característica compleja (Z) y la constante de propagación compleja (Γ) pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$Z = \rho_0 c_0 \left[1 + 0{,}070 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0{,}632} - j0{,}107 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0{,}632} \right]$$

Expresión 68

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[0{,}160 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0{,}618} + j \left(1 + 0{,}109 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0{,}618} \right) \right]$$

Expresión 69

Como puede observarse las expresiones son equivalentes a las propuestas por Delany y Bazley, y en sendos modelos los materiales empleados se caracterizan por contar con porosidades cercanas a la unidad.

02.02.03.03.04. Modelo de Allard y Champoux

La principal novedad que introducen los autores Allard y Champoux [88] es advertir que en los modelos anteriores (principalmente Delany y Bazley así como Miki), no se ha considerado la geometría de los materiales. En este nuevo modelo, la impedancia característica (Z) y la constante de propagación compleja (Γ) se obtienen con las expresiones siguientes:

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

Expresión 70

$$\Gamma = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}}$$

Expresión 71

Donde

$\rho(\omega)$ es la densidad dinámica (en kg/m^3) y

$K(\omega)$ es el módulo de compresibilidad efectivo dinámico (en N/m^2)

Estos valores pueden calcularse con las siguientes expresiones considerando el aire a temperatura ambiente y la presión atmosférica:

$$\rho(\omega) = 1{,}2 + \sqrt{-0{,}0364\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-2} - j0{,}1144\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-1}}$$

Expresión 72

$$K(\omega) = 101320 \frac{j29{,}64 + \sqrt{2{,}82\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-2} + j24{,}9\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-1}}}{j21{,}17 + \sqrt{2{,}82\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-2} + j24{,}9\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-1}}}$$

Expresión 73

Donde f se expresa en Hz y σ en Rayls/m. Las expresiones anteriores solo son válidas a incidencia normal y considerando que parámetros texturales de los materiales tales como tortuosidad y porosidad cuentan con valores elevados cercanos a la unidad.

02.02.03.03.05. Modelo de Voronina

Voronina desarrolla un vasto trabajo en la búsqueda de modelos matemáticos para la caracterización acústica de materiales de tipo poroso y fibroso, que de forma muy somera a continuación se citan. El trabajo de Voronina [89–92] es extenso y una de las peculiaridades que introduce es caracterizar acústicamente a los materiales a partir de las propiedades físicas de los mismos, no siendo necesarias medidas experimentales para predecir el comportamiento acústico de los mismos. Esto lo consigue definiendo un parámetro *(Q)* al que denomina característica estructural que viene dado por las propiedades físicas del material.

Uno de sus primeros trabajos abordó el comportamiento acústico de los materiales fibrosos de estructura flexible[90]. En el modelo que el autor propone en este trabajo tanto la impedancia característica *(Z)* como la constante de propagación *(Γ)* las obtiene en función del nuevo parámetro de característica estructural *(Q)* con las siguientes expresiones:

$$Z = R + jX = 1 + Q - jQ$$

Expresión 74

$$\Gamma = \alpha + j\beta = k \cdot Q\frac{2+Q}{1+Q} + jk(1+Q)$$

Expresión 75

Donde

k es el número de onda (m^{-1}) con valor $k = (2\pi f)/c_0$ siendo c_0 la velocidad del sonido en el aire (m/s)

Q es la característica estructural, que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{(1-H)\cdot(1+q_0)}{H \cdot d}\sqrt{\frac{8\cdot\mu}{k\cdot\rho_0\cdot c_0}}$$

Expresión 76

Donde

μ es el coeficiente dinámico de viscosidad ($1{,}85\cdot10^{-5}$ Pa·s)

ρ_0 es la densidad del aire (kg/m^3)

d es el diámetro de la fibra (m)

H es la porosidad del material fibroso, cuyo valor para materiales homogéneos puede definirse como $H = 1 - (\rho_m / \rho_f)$ en el que ρ_m es la densidad del material y ρ_f es la densidad de las fibras.

q_0 es un factor definido por la siguiente ecuación empírica $q_0 = (1+2\cdot10^4(1-H)^2)^{-1}$

De lo anteriormente expuesto se deduce que tanto la impedancia característica *(Z)* como la constante de propagación *(Γ)* Voronina las obtiene a partir de características físicas y texturales del material tales como la porosidad H y el diámetro de la fibra *d*. Las expresiones anteriores el autor las modifica levemente introduciendo nuevos coeficientes con el fin de corregir desviaciones como consecuencia del efecto del tamaño de la fibra, las pérdidas por fricción del flujo de aire o el efecto del movimiento de las fibras en materiales con estructura flexible.

Otro de los trabajos que realizó Voronina al objeto de obtener un modelo matemático para predecir el comportamiento acústico de los materiales es el realizado con espumas de uretano (*urethane foams*) en 1998 [91]. El autor caracterizó materiales a base de espuma de uretano con distintos valores de diámetro de poros y de porosidad en un marco de estructura flexible. Son por tanto dos efectos los que se tienen en cuenta en este trabajo; por un lado las pérdidas de energía como consecuencia de la fricción del aire a través de los poros, en los que porosidad y diámetro del poro son los factores determinantes, y por otro el efecto de la estructura flexible y la capacidad de absorción de energía acústica de ésta.

Por último, en relación a este autor cabe solo citar como referencia otro de los trabajos de Voronina [92] en el que desarrolla un nuevo modelo para materiales porosos de estructura rígida de baja porosidad. En este trabajo y para este tipo de materiales propone nuevas expresiones empíricas para el cálculo tanto de la impedancia característica como de la constante de propagación.

02.02.03.03.06. Modelo de Dunn y Davern

Los autores Dunn y Davern [93] parten de las expresiones genéricas de Delany y Bazley para el cálculo de la impedancia característica como de la constante de propagación siguientes:

$$Z = R + jX$$

Expresión 77

$$\Gamma = \alpha + j\beta$$

Expresión 78

A las expresiones anteriores Dunn y Davern proponen unos nuevos coeficientes para los materiales sobre los que ha versado su trabajo (espumas de poliuretano). Estos coeficientes son los siguientes:

$$R = (\rho \cdot c) \cdot \left[1 + 0{,}114 \cdot \left(\frac{\rho \cdot f}{\sigma} \right)^{-0{,}369} \right]$$

Expresión 79

$$X = -0{,}0985 \cdot (\rho \cdot c) \cdot \left(\frac{\rho \cdot f}{\sigma} \right)^{-0{,}758}$$

Expresión 80

$$\alpha = 0{,}168 \cdot \left(\frac{2\pi f}{c} \right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot f}{\sigma} \right)^{-0{,}715}$$

Expresión 81

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c} \right) \cdot \left[1 + 0{,}136 \cdot \left(\frac{\rho \cdot f}{\sigma} \right)^{-0{,}491} \right]$$

Expresión 82

02.02.03.03.07. Modelo de Garay y Pompoli

Los autores Garay y Pompoli [94,95] presentan diferentes trabajos al objeto de establecer un modelo de predicción de parámetros tales como la resistividad al flujo, la impedancia acústica y el coeficiente de absorción acústica para fibras de poliéster.

El modelo para el cálculo de la resistividad al flujo lo denominan NMR (*New Resistivity Model*) y parten del modelo desarrollado por Bies y Hansen [65] para el cálculo de la resistividad al flujo a partir de la densidad del material fibroso y del diámetro de la fibra.

Para la determinación de la impedancia, los autores parten en este caso de las expresiones generales de Delany y Bazley a las que aplican unos nuevos coeficientes con el fin de obtener un nuevo modelo NMI (*New Impedance Model*) para la determinación de este parámetro acústico. Las expresiones características de este modelo son las siguientes:

$$Z_R = \rho_0 \cdot c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-C_2} \right]$$

Expresión 83

$$Z_l = -\rho_0 \cdot c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-C4} \right]$$

Expresión 84

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \cdot \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-C_6} \right]$$

Expresión 85

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \cdot \left[1 + C_7 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{\sigma} \right)^{-C_8} \right]$$

Expresión 86

El modelo NMR predice la resistividad al flujo (σ) a partir de la densidad aparente. Este valor se puede emplear en las expresiones anteriores (modelo NMI) al objeto de obtener la impedancia acústica específica y la constante de propagación. Ambas expresiones pueden combinarse en lo que los autores denominan "modelo integrado" (MI) que permiten caracterizar acústicamente un material a partir de su densidad aparente y el espesor con las siguientes expresiones:

$$Z_l = (Z_R + iZ_I)\left[\cot(\alpha + i\beta)l\right] = Z_{lR} + iZ_{lI}$$

Expresión 87

$$\alpha_n = \frac{4 \cdot Z_{lR} \cdot \rho_0 \cdot c_0}{|Z_l|^2 + 2 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot Z_{lR} + (\rho_0 \cdot c_0)^2}$$

Expresión 88

02.02.03.03.08. Modelo utilizado

Los diferentes modelos teóricos contemplados en esta memoria son los más utilizados en este tipo de estudios. Cada uno de los mismos estaba enfocado a un determinado tipo de material, si bien en este trabajo analizaremos fundamentalmente el modelo de Delany-Bazey, por su simplicidad a la hora de aplicarlo y por la buena correlación que se suele producir entre los datos teóricos y reales, y por ser uno de los modelos matemáticos más versátiles.

La expresión genérica para la obtención de la impedancia característica $Z = R + jX$ y la constante de propagación $\Gamma = \alpha + j\beta$ cuenta con las siguientes variables para los modelos expuestos en los apartados precedentes:

$$R = \rho_0 c_0 (1 + A_1 \cdot C^{-A_2})$$

Expresión 89

$$X = -\rho_0 c_0 A_3 \cdot C^{-A_4}$$

Expresión 90

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c_0} A_5 \cdot C^{-A_6}$$

Expresión 91

$$\beta = \frac{2\pi f}{c_0} (1 + A_7 \cdot C^{-A_8})$$

Expresión 92

Donde:

ρ_0 es la densidad del aire (kg/m^3),

c_0 es la velocidad del sonido en aire (m/s)

C parámetro denominado frecuencia normalizada cuyo valor es el siguiente:

$$C = \frac{\rho_0 f}{\sigma}$$

Expresión 93

A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7 y A_8 son coeficientes que dependen de cada modelo y se obtienen mediante ajuste por mínimos cuadrados. En la siguiente tabla se resumen los coeficientes de algunos de los modelos matemáticos más relevantes expuestos en los apartados precedentes.

Tabla 37. Coeficientes para algunos de los distintos modelos matemáticos

Modelo	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
Delany y Bazley	0,057	0,754	0,087	0,732	0,189	0,595	0,098	0,700
Miki	0,079	0,632	0,120	0,632	0,179	0,618	0,122	0,618
Dunn y Davern	0,114	0,369	0,099	0,758	0,168	0,715	0,136	0,491
Garay y Pompoli	0,078	0,623	0,074	0,660	0,159	0,571	0,121	0,530

02.02.03.04. EQUIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

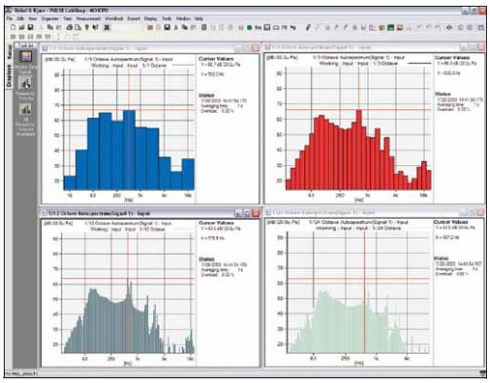
Para la realización de las medidas del coeficiente de absorción para las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz y el coeficiente NRC, de todas las muestras (probetas de 29 y 99mm de diámetro) de las distintas proporciones, se han empleado una serie de equipos de la marca Brüel & Kjær. Estos equipos cumplen la Norma UNE-EN-ISO 10534-2, para la determinación del coeficiente de absorción acústica.

El equipo de medida consta de un sistema de adquisición de datos (hardware Pulse 3560C), un amplificador de señal, un kit de tubos de impedancia y el software adecuado (la plataforma PULSE™ y la aplicación *Material Testing*), todo ello controlado por ordenador. Las principales características de los equipos y del software empleado se describen a continuación [96–98].

El hardware utilizado para la caracterización acústica es "*Pulse 3560*" , consistente en un sistema de adquisición de datos. Puede emplear cualquier combinación del módulo de control y del módulo de E/S (entrada/salida). El módulo de control se encarga de la comunicación con el ordenador, mientras que el módulo E/S se ocupa de la medida y proporciona la frecuencia de muestreo. Como todos los sistemas portátiles Pulse, requiere estrictas condiciones de temperatura y humedad.

Fotografía 15. Hardware Pulse 3560C

El software empleado es "Pulse™", que es la plataforma de Brüel & Kjær para el análisis de vibración y ruido. Además, esta plataforma de software permite extenderse conforme a la exigencia de los requisitos con motivo del desarrollo continuo de las nuevas aplicaciones. Otro aspecto importante de la plataforma es que satisface las soluciones específicas para la industria y para la investigación científica.



Fotografía 16. Pantalla de una aplicacíon de la plataforma Pulse™.

Para la realización de la caracterización acústica se ha empleado un Kit de tubos de impedancia y transmisión acústica de la casa Brüel & Kjær que ofrece un amplio intervalo de tubos para mediciones acústicas de materiales, tales como el coeficiente de absorción de sonido, coeficiente de reflexión, coeficiente de reflexión, impedancia y admitancia acústica y coeficiente de transmisión.

El sistema "Pulse Material Testing" puede medir las propiedades acústicas de casi cualquier muestra, incluidas las de materiales compuestos o irregulares como techos alicatados o baldosas acústicas agrietadas.

El sistema está basado en el método de medida de función de transferencia para dos micrófonos, lo que significa que las medidas se realizan en un tiempo mucho menor que con el método tradicional de onda estacionaria. Usando dos micrófonos fijos, el sistema de testeo realiza medidas simultáneas de todas las frecuencias de interés.

Fotografía 17. Tubo de impedancia

El software Pulse Material Testing 7758 funciona conjuntamente con el sistema de análisis múltiple y el tubo de impedancia (50 Hz- 6.4 kHz) o el tubo de impedancia (100 Hz- 3.2 kHz) tipo 4206A. Como consecuencia, es posible utilizar características avanzadas para calibración, mediciones, muestreo de datos y generación de informes. La interfaz de usuario permite realizar tareas de extrema precisión.

Por tanto, el sistema acústico empleado permite hacer medidas en muestras pequeñas según estándares internacionales de la ISO 10534-2 y ASTM E1050. El cálculo de la pérdida de transmisión se basa en el método de la función de transferencia de cuatro micrófonos.

Fotografía 18. Muestras y tubo de impedancia utilizado

02.02.04. APLICACIÓN COMO ABSORBENTE ACÚSTICO: SIMULACIÓN ACÚSTICA EN SALA

02.02.04.01. DIFERENCIA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA Y ACÚSTICA DE SALAS

Dentro del estudio de la acústica aplicada a edificios existen distintas ramas. La acústica arquitectónica se preocupa del aislamiento, especialmente a ruido aéreo, que proporcionan los distintos materiales y elementos constructivos a los edificios. Dentro de esta rama de la acústica existe una amplia documentación e incluso normativa dentro de nuestro ordenamiento jurídico. Esta necesidad de aislamiento es un requisito básico establecidos por el Real Decreto 314/2006 [99], de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. De esta forma, en el artículo 14 de dicha disposición, se establece de forma genérica como una exigencia básica la protección frente al ruido (HR).

El desarrollo de esta exigencia básica se realiza con el Documento Básico (DB) HR que fue publicado en 2007 [100] y en él se desarrollan los aspectos técnicos que deben cumplir los edificios que se proyecten y construyan a partir de la entrada en vigor de la citada disposición. Se trata de una normativa prestacional, lo que implica una importante modificación en relación a la normativa anterior, la Norma Básica de la Edificación NBE CA-81 sobre Condiciones Acústicas en los edificios, modificada por la Orden de 29/09/1988 (NBE CA-88). Otra novedad importante de esta disposición es que, por primera vez, se regula en España un parámetro significativo de la acústica de la sala para determinados usos concretos. Se trata del tiempo de reverberación, parámetro muy importante en la acústica de una sala que definiremos más adelante.

Para restaurantes, aulas, etc, hasta un determinado volumen se limita su valor, lo cual es una importante novedad ya que ahora los redactores de los proyectos deberán prestar más atención al comportamiento acústico en el interior de los recintos y no únicamente al aislamiento entre éstos o entre éstos y el exterior.

En el panorama autonómico, el Decreto 19/1997 por el que se aprueba el Reglamento de Ruido y Vibraciones, daba un paso más que la obsoleta NBE CA-88, fijando unos Niveles de Recepción tanto Internos (NRI) como Externos (NRE) que los propietarios deberán satisfacer, con independencia de que los elementos constructivos cumplan las prescripciones en cuanto a aislamiento a ruido aéreo indicadas anteriormente. Otro aspecto innovador de esta disposición es el tratamiento de las vibraciones, fijando unos parámetros máximos admisibles para las mismas.

Existen otras disposiciones como son la Ley 37/2003,[101] de 17 de noviembre, del Ruido, que tiene por objeto la regulación de la contaminación acústica para evitar y, en su caso, reducir, los daños que pueda provocar en la salud humana, los bienes o el medio ambiente. Con el mismo objeto se publica el Real Decreto 1513/2005,[102] de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de Noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

Sin embargo, cuando hablamos de acústica de salas nos vamos a referir a cómo el sonido se propaga en el interior de un recinto. En este caso, aunque la documentación es relativamente abundante (auge de esta especialidad desde principios del siglo XX), no lo es tanto la normativa, no existiendo prácticamente legislación al respecto salvo lo citado en el DB HR en cuanto a los tiempos de reverberación de determinados recintos. Así, en el apartado 3.2. del citado documento lo único que se regula es que en aulas y salas de conferencias hasta 350 m^3 de volumen, así como en restaurantes y comedores, el tiempo de reverberación no debe superar un determinado límite establecido en el apartado 2.2. de dicho documento básico. También se regula de forma muy somera la absorción mínima que deben tener las zonas comunes. En definitiva, son numerosos los usos y recintos que quedan fuera del ámbito de aplicación de esta disposición, si bien se ha dado un gran paso en esta materia dado que anteriormente estaba totalmente olvidada. El conocimiento de esta rama de la acústica no es más extenso que la legislación existente, por lo que en ocasiones los resultados de los proyectos no son nada satisfactorios.

Acústica de salas y arquitectónica van de la mano, pues para conseguir un adecuado tratamiento del sonido en el interior de una sala obviamente tendremos que tener en cuenta el aislamiento de ésta con respecto al exterior.

02.02.04.02. TEORÍAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMPO SONORO EN RECINTOS

Los autores Manuel Recuero [103] e Higini Arau [104] proponen tres principales tipos de teorías que permiten estudiar la acústica en un recinto (acústica de sala) con el fin de determinar los factores que tienen influencia sobre la calidad acústica del mismo. Dichas teorías son:

- Teoría estadística
- Teoría geométrica
- Teoría ondulatoria

A esta clasificación Manuel Recuero[103] aporta una cuarta teoría que sería la siguiente:

- Teoría psicoacústica

De forma somera se citan a continuación las características esenciales de cada una de estas teorías.

02.02.04.02.01. Teoría estadística

Esta teoría parte de la idea de que las ondas reflejadas en el interior de un recinto viajan en todas las direcciones, es decir, están distribuidas de una forma aleatoria al igual que la energía de una fuente sonora. Este planteamiento nos permite calcular la energía en cualquier punto del recinto mediante matemática estadística basada en la teoría de la probabilidad.

El método estadístico no analiza los aspectos físicos intrínsecos del comportamiento acústico en el interior de recintos; no obstante, permite a partir de unas operaciones matemáticas simples la obtención de unas conclusiones objetivas de los aspectos cuantitativos del proceso. Esta teoría considera el campo sonoro como *"aquel que consta de un gran número de ondas reflejadas por las superficies interiores del recinto, y dispersas en diferentes direcciones, a lo largo de las cuales se transfiere la energía sonora*" [103]. A partir de esta máxima

se plantean una serie de simplificaciones entre las que cabe señalar las siguientes:

- la llegada de las ondas reflejadas a cada punto del recinto desde diferentes direcciones es igualmente probable.
- el recinto es grande frente a la longitud de onda y sus superficies tienen una capacidad de absorción sonora baja y análoga en todas ellas.

Como contrapartida, por tanto, tenemos el hecho de que este método es aplicable a sucesos aleatorios, por lo que si el fenómeno deja de serlo, el análisis estadístico no se podría aplicar. La disposición de superficies interiores con propiedades de enfoque (como por ejemplo reflectores) nos puede llevar a que la naturaleza aleatoria de la dirección de llegada de las ondas reflejadas sea menor, restando validez a este método.

Con esta teoría se han formulado expresiones para la determinación del tiempo de reverberación, parámetro de gran importancia en la caracterización acústica de un recinto que más adelante se definirá. Una de las expresiones más importantes es la obtenida por W.C. Sabine, en 1896 que consideraba la absorción de energía continua, siendo válido para recintos que tengan un coeficiente de absorción medio no superior a 0,20.

$$T = \frac{0{,}162 \cdot V}{\alpha \cdot S} = 0{,}162 \frac{V}{A}$$

Expresión 94

Donde:

V Volumen del recinto (m^3)

α Coeficiente de absorción acústica

S Superficie del recinto (m^2)

A Absorción del recinto ($\alpha \cdot S$)

La expresión anterior, una de las más utilizadas a lo largo del último siglo para la predicción del comportamiento acústico de un recinto, adolece de las carencias de la teoría estadística de tal forma que a medida que el recinto se vuelve más y más absorbente la expresión se vuelve más inexacta. En el caso extremo de un recinto anecoico (aquel con α = 1) la expresión anterior nos da un valor finito

mientras que el campo reverberante en estas condiciones no puede existir por lo que el tiempo debe ser cero.

02.02.04.02.02. Teoría geométrica

La teoría geométrica considera el campo sonoro como una combinación de rayos, que se trazan a partir de las leyes de la óptica geométrica. Mediante esta teoría se pueden determinar los puntos de incidencia de las ondas convertidas en rayos en las paredes del recinto así como la pérdida de energía que experimentan éstas debido a la absorción acústica del material de revestimiento de dicha superficie. Esta teoría tiene especial relevancia cuando las superficies de los paramentos interiores de un recinto se encuentran revestidas con materiales de distintas propiedades absorbentes.

La analogía entre el método geométrico en óptica y acústica es mayor cuanto menor es la longitud de la onda sonora respecto de las dimensiones de las superficies reflectantes por lo que "*el método geométrico se puede emplear con exactitud solo cuando comparativamente se consideran grandes superficies reflectantes o bien cuando analizamos sonidos de media y alta frecuencia*" [103].

Otro aspecto importante a tener en cuenta de la teoría geométrica frente a la teoría estadística es la posibilidad de análisis que ofrece la primera de fenómenos como el eco. El eco en acústica de salas es un fenómeno nada deseable que se origina cuando la diferencia de tiempo entre la llegada al oyente de la onda directa y la primera onda reflejadas es mayor que un cierto tiempo mínimo de retardo de tal forma que el cerebro humano procesa sendas señales auditivas de forma independiente.

La siguiente figura es un ecograma, que representa la variación del nivel de presión sonora respecto del tiempo en un punto dado. El primero de los valores corresponde al sonido directo mientras que el resto de niveles corresponden al sonido reflejado que llega al oyente tras incidir en las superficies del recinto. La comprobación de la existencia de posibles ecos en el receptor se realiza observando si a más de 0,05 segundos existen reflexiones cuya magnitud sea

similar a la del sonido directo percibido por el oyente comparando los niveles de presión sonora.

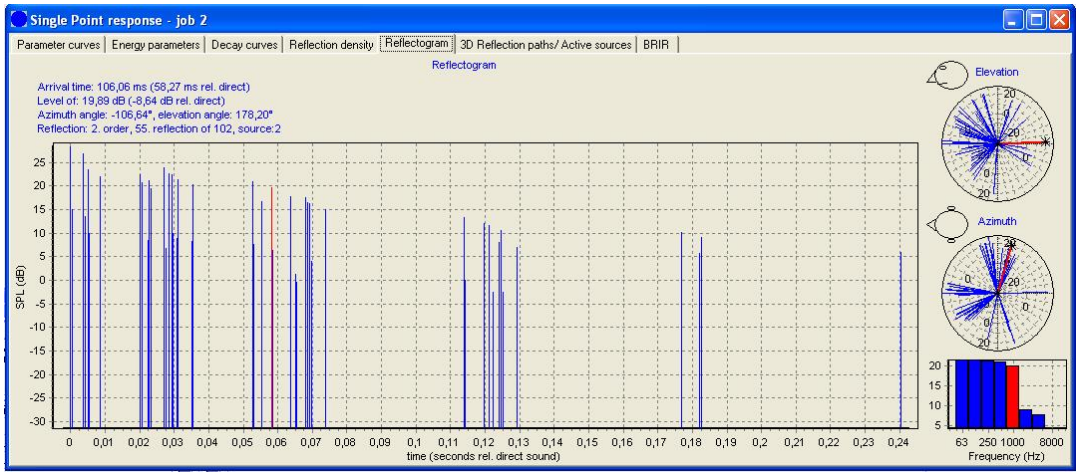


Figura 18. Ecograma

En el ecograma anterior puede observarse como sí existen valores de similar intensidad próximos a los 0,05 segundos por lo que la acústica geométrica permite predecir la existencia de este indeseable fenómeno.

Las reflexiones del sonido juegan en ocasiones un papel totalmente opuesto al caso anterior y contribuyen de forma notable a la percepción auditiva del sonido en una determinada parte de la sala a donde el sonido directo apenas llega o no lo hace en condiciones demasiado favorables.

El diseño de techos equipotenciales permite, basándonos en los principios de la acústica geométrica, diseñar el trazado del techo de una sala al objeto de poder direccionar las primeras reflexiones hacia una parte concreta de la audiencia tal y como se puede apreciar en la figura 19.

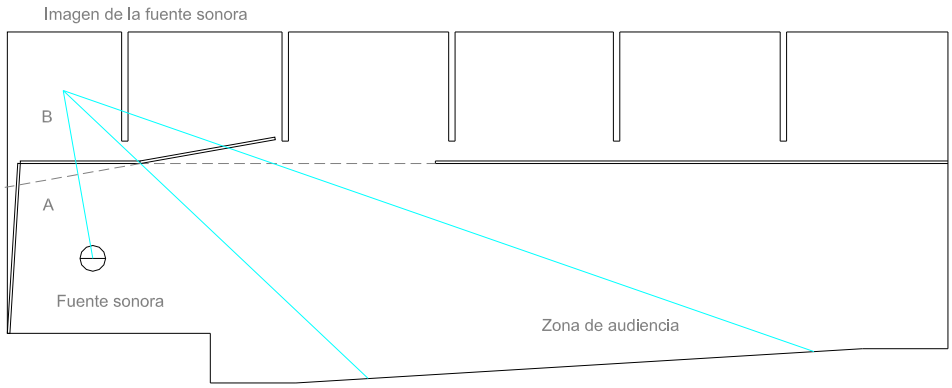


Figura 19. Diseño de techo equipotencial

02.02.04.02.03. Teoría ondulatoria

Ninguna de las teorías anteriores tienen en cuenta el carácter ondulatorio del sonido. Esta teoría tiene su fundamento en el que un espacio vacío dentro de un recinto se comporta como un sistema vibratorio, excitándose por la señal de una fuente sonora. Desde este punto de vista, el recinto se comporta como un resonador complejo, que cuenta con diversos modos normales de vibración, cada uno con su propia frecuencia de amortiguación de la vibración libre. Los valores de estas frecuencias discretas dependen exclusivamente de las dimensiones de la sala y se denominan en general autotonos o autofrecuencias.

Cuando un sonido que emite diferentes frecuencias, como la música, se introduce en una sala, sucede que aquellos componentes del sonido que están cerca de una autofrecuencia de la sala serán acentuados mientras el sonido esté presente, y tenderá a decaer más lentamente que los otros tonos cuando el sonido cese [104].

La teoría ondulatoria se desarrolló a partir de experimentos unidimensionales verificándose mediante matemáticas complejas. El avance de la informática ha permitido en nuestros días el desarrollo de potentes aplicaciones que permiten tener en cuenta este tipo de fenómenos obteniendo resultados cada vez más precisos.

02.02.04.02.04. Teoría psicoacústica

Este último campo, propuesto por el autor Recuero[103], se basa principalmente en que la valoración final de las bondades de un determinado recinto la realiza un oyente, una persona, por lo que nos introducimos en un campo de apreciación subjetiva. La determinación de la calidad acústica de una sala a partir de las opiniones subjetivas de los espectadores es algo complejo que depende de muchos factores tales como el tipo de oyente, su posición, expectativas, etc. Todas ellas son variables que deben tenerse en cuenta a la hora de obtener unos valores medios. Los juicios de calidad acústica de una sala son posibles cuando las opiniones van coincidiendo sesión tras sesión, evitando la disparidad de resultados de las primeras audiciones.

La componente subjetiva de los juicios de valor es notable. Por ejemplo, a la hora de valorar una sala son siempre favorables las de aquellos que han colaborado en el proyecto, son de la localidad donde se ubica o bien han hecho un largo recorrido para poder asistir a la misma (tienen una mayor expectativa). Otra cuestión a tener en cuenta es la imposibilidad de casar resultados entre músicos y oyentes, primero porque emplean lenguajes diferentes y segundo porque los primeros (los músicos) no suelen tener una graduación de la calidad, sino que aprecian que la sala o bien es una maravilla o bien es un desastre.

En definitiva, la teoría psicoacústica pone en relación valores objetivos relacionados con la calidad acústica de un recinto con la componente subjetiva de los espectadores. En la siguiente tabla se muestra un ejemplo en el que a partir de un valor objetivo, como es el índice de transmisión al habla (STI) se establece una graduación subjetiva de la calidad acústica de una sala a partir de las opiniones de los oyentes, campo éste de la teoría psicoacústica.

Tabla 38 – Escala de inteligibilidad según índice de transmisión del habla STI

ESCALA STI	
Mala	0,00 – 0,30
Pobre	0,30 – 0,45
Aceptable	0,45 – 0,60
Buena	0,60 – 0,75
Excelente	0,75 – 1,00

02.02.04.03. PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA DE UNA SALA [103–105]

Con el fin de poder valorar las condiciones acústicas de una sala existen diferentes parámetros objetivos, que en general se derivan de la respuesta impulsiva. Estos parámetros acústicos objetivos arrancaron con los estudios de Sabine y han ido ampliándose considerablemente al objeto de facilitar el diseño de espacios que puedan cumplir la función para los cuales se proyectan. A continuación se citan los principales parámetros de calidad acústica de una sala empleados hoy en día.

1. Tiempo de Reverberación Clásico (*Reverberation Time* - RT).

Se define como tiempo de reverberación normalizado "RT" en segundos, para una determinada frecuencia o banda de frecuencia, al intervalo de tiempo empleado por la presión acústica en un recinto para que se origine una disminución de 60 dB en el nivel de presión una vez desconectada la fuente sonora.

Este es uno de los parámetros más importantes en el estudio de la acústica de salas y de él se obtendrán otros complementarios. Muchos investigadores han propuesto expresiones para la determinación de este parámetro, desde que a finales del siglo XIX W.C. Sabine formulara sus resultados tras una profunda investigación de salas con importantes reflexiones (salas vivas). La fórmula del tiempo de reverberación de Sabine[106] de un recinto, se puede obtener a partir de la expresión:

$$RT = \frac{0{,}162 \cdot V}{\alpha \cdot S} = 0{,}162 \frac{V}{A}$$

Expresión 94

Esta expresión, a pesar de sus limitaciones (válida para recintos con coeficiente de absorción medio no superior a 0,20 es decir, salas vivas), sigue siendo aplicable hoy en día. No en vano, el propio Código Técnico de la Edificación en el apartado 3.2.2. del Documento Básico de Protección contra el Ruido, propone esta expresión al objeto de poder verificar el cumplimiento de las condiciones prestacionales al ámbito de aplicación previsto en el apartado 2.2. en el que se

expresan los valores límites del tiempo de reverberación para determinado tipo de salas.

Otros autores proponen diferentes aproximaciones para la determinación del tiempo de reverberación. Durante los años 1930 y 1932 los autores Eyring y Norris[107,108] buscaron de forma independiente una teoría de la reverberación tratando de obtener una expresión que sí fuera de aplicación para salas con una elevada absorción en los paramentos del recinto. La fórmula de Eyring[108] para el tiempo de reverberación, solo aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies límites, es:

$$RT = 0{,}161 \frac{V}{-S \cdot \ln(1-\alpha_m) + 4mV}$$

Expresión 95

donde m es el coeficiente de atenuación de energía sonora en el aire, de valor:

$$m = 8{,}94 \cdot 10^{-4} \frac{f^2}{\rho_0 \cdot c} = 1{,}89 \cdot 10^{-11} \cdot f$$

Expresión 96

donde "f" es el valor de la frecuencia (Hz), "ρ" la densidad del aire (kg/m^3) y "c" velocidad del sonido en el aire en condiciones normales de presión y temperatura (m/s). Las pérdidas de energía sonora en un recinto, debidas al aire, solo tienen influencia a altas frecuencias (2.000 - 4.000 Hz), y en recintos de gran volumen (superior a 5.000 m^3). Luego para recintos pequeños y frecuencias inferiores a 4.000 Hz, se puede despreciar el término $4mV$, y por tanto:

$$RT = 0{,}161 \frac{V}{-S \cdot \ln(1-\alpha_m)}$$

Expresión 97

Las expresiones de los autores expuestos anteriormente consideraban una distribución uniforme del material absorbente. Entre los años 1932 y 1933 Millington[109] y Sette[110] propusieron una expresión para la determinación del tiempo de reverberación para el caso de un reparto asimétrico de los materiales absorbentes. Los autores, sin embargo, continuaron con la idea de que el campo

sonoro fuese difuso por lo que contradice la hipótesis de partida de reparto no uniforme de material absorbente[104]. En general, cuando la variedad de materiales en el recinto es grande y la diferencia entre los valores de los coeficientes de absorción también, se obtiene una mayor aproximación al tiempo de reverberación empleando la fórmula de Millington-Sette en relación a los autores precedentes:

$$RT = 0{,}161 \frac{V}{-\sum_{i=l}^{i=n} Si \cdot \ln(1-\alpha_i)}$$

Expresión 98

donde S_i es el área del material i-ésimo y α_i el coeficiente de absorción de dicho material. Con esta expresiones, el tiempo de reverberación depende además de la forma del recinto, de las posiciones de la fuente sonora y de los materiales absorbentes, no siendo constante para todas las frecuencias, ya que la absorción sonora tanto en el aire como en las superficies interiores, depende de la frecuencia.

Tras estas expresiones vinieron otras tales como la propuesta por Fitzroy[111] en 1959, para el caso de salas con distribución no uniforme de material absorbente; Gomperts[112] en el año 1965 planteó una interesante teoría que cuestionaba la necesidad de definir el camino libre medio para hallar el tiempo de reverberación, contando con un mayor interés desde el punto de vista académico que práctico[104], siendo solo de aplicación para la distribución uniforme en la sala del material absorbente; más tarde, entre 1965 y 1966 W.C. Kosten[113] desarrollaría una variante de la expresión de Sabine en la que el mayor peso de la absorción recae sobre las áreas de audiencia y escenario; también Pujolle[114] en 1970 planteó una expresión para la obtención del tiempo de reverberación postulado la dependencia de este parámetro con el formato del tipo de sala; otras como la propuesta por H. Kuttruff[115] entre 1970 y 1976 cuyo modelo se basa en la utilización de distribuciones estadísticas del recorrido entre impactos y no valores medios; así como Wernly[116] que en 1978 obtiene una expresión para el tiempo de reverberación que sigue las líneas trazadas por sus predecesores Pujolle y Hunt.

Para concluir, cabe señalar la aproximación de H. Arau (1988) [117,118], el cual para hallar la base científica que justificara la expresión de la ley de extinción del sonido, para el caso de una distribución no uniforme de material absorbente en una sala considera que ni forzosamente el camino libre medio debe ser $l_m = 4V/s$ (como sugería Fitzroy) ni debe existir solo una pendiente del decaimiento, sino mínimo tres (para el caso de una sala rectangular). Cuando las paredes de la sala tienen un comportamiento distinto de absorción, el sonido reflejado en ellas tendrá también una razón de decaimiento muy diferente. Así, decaerá poco si la pared es reflectante y mucho si es absorbente, lo que nos conducirá a que la mezcla de sonidos reflejados de las distintas paredes tenga forzosamente una distribución no homogénea del sonido y, por tanto, resultará un campo sonoro no difuso. H. Arau admite que la falta de difusividad, que es equivalente a suponer una conducta no normal (gaussiana) del sonido, es principalmente debida al distinto grado de reflectividad de las paredes. H. Arau soluciona el problema tomando una distribución de valores denominada distribución logaritmo normal.[104] La expresión del tiempo de reverberación propuesta es la siguiente:

$$RT = \left[\frac{0{,}162V}{-S\ln(l-\overline{\alpha}_x)}\right]^{S_x/S}\left[\frac{0{,}162V}{-S\ln(l-\overline{\alpha}_y)}\right]^{S_y/S}\left[\frac{0{,}162V}{-S\ln(l-\overline{\alpha}_z)}\right]^{S_z/S}$$

Expresión 99

Esta expresión indica que el tiempo de reverberación medio de la sala es igual a la media geométrica ponderada de los períodos de reverberación de las razones de cada área en cada dirección.[104]

Así pues, el tiempo de reverberación objetivamente es el tiempo en que se producen 60 dB de caída de nivel de presión sonora una vez que la fuente emisora deja de producir una señal, calculado con alguna de las expresiones expuestas anteriormente. Subjetivamente, el tiempo de reverberación representa el tiempo de persistencia de un sonido en el interior de una sala hasta que deja de oírse.

Cuanto mayor es la absorción de los materiales de un recinto (en el denominador de las diferentes expresiones) menor será el valor del tiempo de reverberación

RT. Cuando el valor del tiempo RT es elevado la sala se denomina viva, mientras que cuando el valor de RT es bajo la sala se denomina apagada.

En el diseño acústico de una sala se debe conseguir que el valor RT se encuentre comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo, que dependerá del uso al que se destine la sala ya que los valores de los parámetros acústicos dependerán de si la sala se destina a la palabra, música de cámara o música sinfónica. Hay autores como Jordan[119] que recomiendan un intervalo para el valor de RT comprendido entre 1,4 y 2,8 segundos mientras que otros (Llinares et al.)[120], proceden a realizar un desglose más detallado del valor de RT en función del tipo de música que se interprete en la sala:

Tabla 39. Tiempo de reverberación RT en salas de concierto según tipo de música

Tipo de música	Valor RT
Barroca	$RT \leq 1{,}5$
Clásica	$1{,}5 \leq RT \leq 1{,}7$
Romántica	$1{,}9 \leq RT \leq 2{,}2$
Ópera no wagneriana	$RT \leq 1{,}5$
Ópera wagneriana	$1{,}6 \leq RT \leq 2{,}0$

2. Tiempo de Reverberación Temprano (Early Decay Time - EDT).

También conocido como tiempo de reverberación inmediato, el EDT se define como el tiempo en segundos que transcurrirían desde que el foco emisor deja de emitir sonido hasta que el nivel de presión sonora decae 60 dB calculado según la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB de caída. Inicialmente había sido definido por Atal, Schroeder y Sessler en 1965 según la pendiente de los primeros 160 ms o los primeros 15 dB de caída.

El EDT está determinado fundamentalmente por las primeras reflexiones. En una sala en la que exista una distribución homogénea de la absorción entre los paramentos la caída del nivel de presión sonora será prácticamente lineal por lo que no existirán notables diferencias entre los valores del EDT y RT. En general no obstante esto no ocurre así, y los valores de EDT son menores a los de RT.

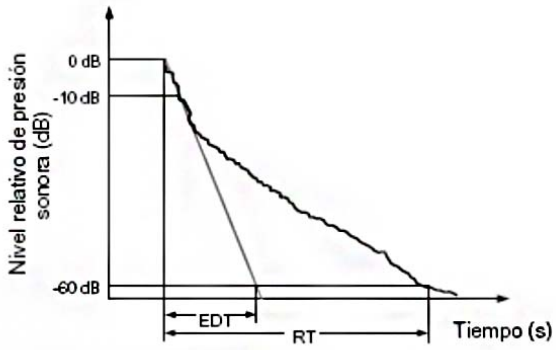


Figura 20. Ejemplo de representación de EDT y RT en campo no difuso
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EDT_y_RT.jpg

Un predominio del EDT sobre el RT equivale a un predominio del campo directo y las primeras reflexiones sobre el campo reverberado. Una sala con valores EDT muy por debajo del RT sonará desde un punto de vista subjetivo más apagada para la música pero más inteligible para la voz.

3. Definición (Definition - D_{50}).

La definición (D_{50}) mide, en tanto por ciento, la relación entre la energía recibida durante los primeros 50 ms y la energía total que compone la respuesta impulsiva. Fue definido por primera vez en 1953 por Thiele [121]:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \cdot 100\%$$

Expresión 100

donde la presión $p(t)$ es la respuesta a una señal impulsiva y $t=0$ coincide con la llegada del sonido directo al punto de observación. Los resultados pueden darse en banda ancha o en bandas de octava, previo filtrado de la respuesta al impulso.

Un valor bajo de la definición quiere decir que la energía sonora que se produce dentro de los primeros 50 ms es pequeña en relación a la energía sonora total que llega al receptor. Este valor pequeño quiere decir que la sala se percibe

como poco íntima y vendrá acompañada de un elevado valor del tiempo de reverberación (se tratará de una sala muy viva). Al igual que sucede con el resto de parámetros, existen valores de mérito sugeridos por diferentes autores en función del tipo de uso al que se destinará la sala.

4. Claridad (Clarity - C_{80} y C_{50}).

La Claridad (C_{80}) matemáticamente es un parámetro formalmente similar a la Definición sin expresión en términos de porcentaje sino en dB y más indicado para caracterizar la transparencia de la música en una sala de conciertos. Fue introducido por Reichardt en 1974[121] y en él se considera beneficiosa la energía que llega en los primeros 80 ms y perjudicial la posterior:

$$C_{80} = 10\log\frac{\int_0^{80ms} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}$$

Expresión 101

La expresión anterior nos da información en términos logarítmicos de la cantidad de energía sonora inmediata que se produce dentro de los 80 ms respecto de la energía sonora tardía que se produce después de transcurrido este tiempo. Un valor de C_{80} alto implica que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía, por lo que diremos que el sonido es muy claro.[104]

El intervalo de valores óptimos para este parámetro acústico varía en función del autor. Para Cremer y Müller[121] estos valores deben encontrarse entre ± 1,60 dB. Según Jordan[119] es recomendable el intervalo ± 2 dB. Según un trabajo más detallado de Reichardt y Lehmann en 1981[122], se fijaba el valor de mérito de la claridad dependiendo de que se trate de filas delanteras o traseras en la sala. Por último Higini Arau[104], además de hacer referencia a los intervalos anteriores desde su propia experiencia distingue rangos que están en función del uso al que se destine la sala que son los que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 40. Intervalos óptimos de C_{80} según uso de la sala

Tipo de sala	Valor C_{80}
Salas de conciertos	-2 dB < C_{80} < 4 dB
Salas de ópera	2 dB < C_{80} < 6 dB
Salas de teatro	C_{80} > 6 dB

El parámetro C_{50} se define de igual manera que el C_{80} pero cambiando el límite temporal de integración del numerador de la ecuación a 50 ms.

5. Tiempo Central (Center Time, T_s).

Es la distancia T_s en segundos desde el origen hasta el "centro de gravedad" de la respuesta impulsiva[105]. Este parámetro acústico fue establecido por primera vez por el autor Kürer[123] en el año 1969 y está relacionado con la valoración subjetiva de claridad. La expresión que lo define es la siguiente:

$$T_S = \frac{\int_0^\infty t \cdot p^2(t)dt}{\int_0^\infty p^2(t)dt}$$

Expresión 102

En general se recomienda que su valor no exceda los 140 ms[121]. En función de la frecuencia hay que señalar que el umbral de percepción de este parámetro según Cox para frecuencias medias es de 8 ms, aunque para bajas frecuencias puede aumentar hasta los 46 ms[124].

6. Tiempo de Ascenso (Rise Time, T_r).

Es el tiempo necesario para que la energía recibida en el receptor, una vez alcanzado el valor estacionario, decrezca a la mitad respecto al valor asintótico final, es decir, disminuya 3 dB[105].

$$\int_0^{T_r} p^2 dt = \int_{T_r}^\infty p^2 dt$$

Expresión 103

Este parámetro fue introducido por primera vez por Jordan [121] en el año 1959. No se dispone de valores óptimos o intervalos de mérito de este parámetro acústico motivo por el cual en general es poco empleado en la caracterización acústica de salas.

7. Fracción de Energía Lateral (Lateral Energy Fraction, LEF').

Los autores Barron y Marshall[125] experimentaron con reflexiones laterales en la caracterización acústica de salas simuladas con altavoces distribuidos en una sala anecoica (con una alta absorción). En sus experimentos encontraron la existencia de una importante correlación entre el atributo subjetivo que denominaron "impresión espacial" y el valor de la energía lateral. En su publicación definieron el parámetro fracción de energía lateral con la siguiente expresión:

$$LEF' = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2 \cos\theta \cdot dt}{\int_{0}^{80ms} p^2 dt}$$

Expresión 104

donde θ es el ángulo lateral (en el que el valor $\theta = 0$ se corresponde con el eje de los oídos) y p es la presión sonora medida en el mismo punto con un micrófono omnidireccional. Según se deduce de esta expresión, el factor de energía lateral es el cociente entre la proyección, sobre el eje de los oídos, de la energía de las reflexiones que llegan entre 5 y 80 ms, y la energía total del conjunto de reflexiones entre 0 y 80 ms. Este parámetro, fuera de las condiciones controladas de un experimento en una cámara anecoica, es muy difícil de medir y, por tanto, obtener experimentalmente. Para facilitar su medida se recomienda utilizar esta otra expresión propuesta por los autores Jordan[119] e Hidaka[126]:

$$LEF' = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{\infty}^2 dt}{\int_{0}^{80ms} p^2 dt}$$

Expresión 105

donde p_∞ es la presión sonora medida en un punto de la sala con un micrófono de gradiente de presión, donde el eje nulo apunta a la fuente. El intervalo óptimo del parámetro LEF se encuentra entre el 0,2 y 0,3[119].

8. Tiempo de Retraso (Initial Time Delay Gap, $ITDG$).

El tiempo de retraso inicial es un parámetro acústico que mide el tiempo en segundos entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión significativa en dicho punto[127]. Este parámetro está muy relacionado con la intimidad o sensación de que la música se percibe como interpretada en una sala pequeña. Según el autor Beranek[128] el $ITDG$ se corresponde con la impresión subjetiva de la intimidad sonora. Éste ha encontrado una importante correlación entre la calidad sonora subjetiva de varios auditorios y el hecho de que el tiempo de retraso sea corto. Este parámetro se mide utilizando la respuesta impulsional o el ecograma tal y como puede observarse en la siguiente figura, con las frecuencias en bandas de octava[104].

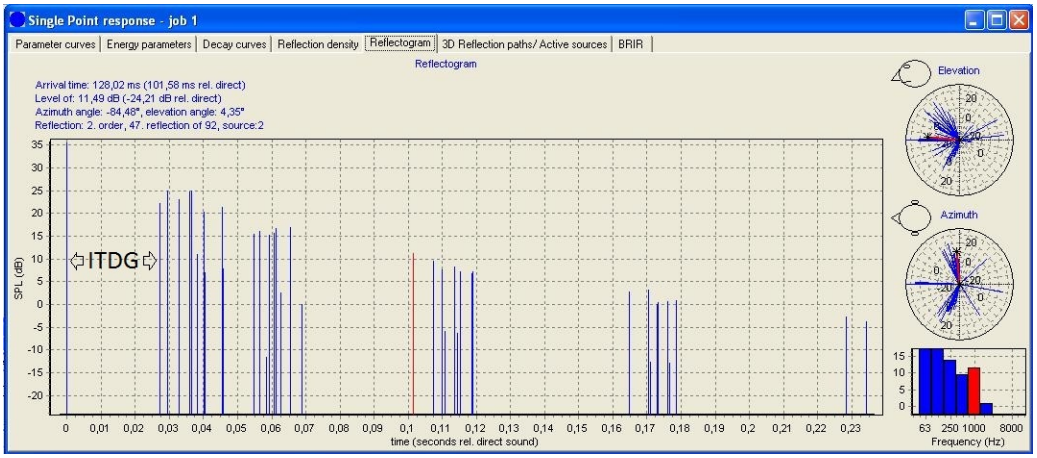


Figura 21 - Representación ITDG en un ecograma

Existen diferentes valores óptimos para este parámetro según los diferentes autores, si bien, se recomienda que el tiempo de retraso debe ser menor de 20 ms en salas de concierto y de 25 ms en salas de ópera.

9. Reflexiones y ecos.

Al igual que el parámetro acústico anterior, de la respuesta impulsional, que es el comportamiento de una sala frente a un estímulo, se pueden deducir las

reflexiones indeseables que se producen en el recinto y, en especial, aquellas que pueden considerarse como eco. La representación habitual de la respuesta impulsional es el ecograma, que tal y como hemos podido observar en figuras anteriores no es más que la representación logarítmica de la repuesta impulsional. A menudo este método es, predictivamente, el más válido para la determinación de las reflexiones y los ecos. El ecograma representa la energía sonora relativa al sonido directo (en dB), en función del tiempo (en ms).

En este caso, el criterio acústico es muy estricto, ya que se admiten como favorables las reflexiones que se producen con un retardo máximo respecto al sonido directo inferior o igual a los 50 ms para salas de conferencias y de teatro, de 60 ms para salas de ópera y de 80 ms para salas de conciertos. Así, por ejemplo, una reflexión importante más allá de los 50 ms puede resultar favorable para música y nada deseable para voz. Por lo tanto si el sonido directo ha llegado al cabo de t_d ms y una reflexión importante al cabo de t_r ms ésta se considerará perjudicial si ha llegado con un retardo t_r-t_d superior a 80 ms para música, 60 ms para ópera y 50 ms para la palabra.[104]

10. Brillo y calidez.

El brillo y la calidez son dos parámetros que se obtienen a partir del RT (tiempo de reverberación) y que dan una idea de la respuesta de la sala a baja y a alta frecuencia. Se dice que una sala tiene calidez acústica si presenta una buena respuesta a las frecuencias graves. Como medida objetiva de la calidez se suele utilizar la relación entre el valor medio de RT a frecuencias graves (125 Hz y 250 Hz) que denominamos RT_{low}, y el valor medio de RT a frecuencias medias (500 Hz y 1kHz), al que definimos como RT_{mid}.[104]

$$I_{calidez} = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1kHz)} = \frac{RT_{low}}{RT_{mid}}$$

Expresión 106

El factor de mérito de este parámetro acústico (calidez) depende del uso de la sala, contando con unos valores óptimos si se destina a la música ($1{,}1 \leq I_{calidez} \leq 1{,}3$) y otros diferentes si el uso es teatro ($0{,}9 \leq I_{calidez} \leq 1{,}3$).

De forma similar se dice que el sonido de una sala es brillante si presenta una buena respuesta a frecuentas altas. El brillo de una sala depende fundamentalmente de la relación entre el valor medio de los RT a frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz), a los que denominaremos RT_{high}, y el valor medio de los RT correspondientes a frecuencias medias que ya hemos definido como RT_{mid}. El valor de este parámetro tiene que ser lo más alto posible, teniendo presente que es difícil que pueda llegar a 1 dB la absorción del aire, pero intentando que no sea en ningún caso inferior a 0,80. En este caso, a diferencia de lo expuesto para la calidez, solo se define un factor de mérito para música y teatro ($0{,}8 \leq I_{brillo} \leq 1$).

$$I_{brillo} = \frac{RT(2kHz) + RT(4kHz)}{RT(500Hz) + RT(1kHz)} = \frac{RT_{high}}{RT_{mid}}$$

Expresión 107

11. Nivel total de sonido $L_t(10)$:

El nivel total de sonido, conocido por *Total Sound Level* o *Strength*, se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente sonora cualquiera en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional de la misma potencia situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m de la fuente. Ambos niveles se miden en bandas de octava (desde 125 Hz a 4 kHz). Es conveniente que los valores de $L_t(10)$ en los distintos puntos de la sala y a las distintas frecuencias de interés sean siempre superiores a 0 dB.[104]

El valor de $L_t(10)$ se corresponde con la impresión de sonoridad de la sala y depende de la distancia al escenario, de la energía de las primeras reflexiones y del tiempo de reverberación (RT).

12. Índice de inteligibilidad:

El índice de inteligibilidad es un parámetro acústico no fundamental en una sala de conciertos, pero sí en una sala de teatro. En realidad, la inteligibilidad para música no tiene que ser muy buena, mientras que para teatro es un requisito esencial. El caso de la ópera es un intermedio de los dos anteriores. El índice de

inteligibilidad, definido por ST de Lochner y Burger [129] o bien RASTI de Hourtgast y Steeneken [130] se obtiene como una función que depende del tiempo de reverberación y de la relación de la señal respecto al ruido en la sala de los posibles ecos.[104]

El factor de mérito de este parámetro acústico ya se expuso en apartados anteriores como ejemplo en la parametrización de la teoría psicoacústica.

13. Factor de Mérito Global:

El factor de mérito global se obtiene realizando la media aritmética de todos los factores de mérito que se hayan escogido en cada caso para evaluar la sala.

$$FM_{GLOBAL} = \sum_{i}^{n} FM_i \Big/ n$$

Expresión 108

Debemos comparar el valor FM_{GLOBAL} en relación a los $FM_{mínimo}$ que se hayan obtenido con alguno de los criterios considerados. Si la desviación que existe entre ellos y la media fuera superior a 0,2 (para valores de FM_{GLOBAL} inferiores a 0,8) debe revisarse la acústica del recinto en relación al criterio o criterios que la han perjudicado.[104]

02.02.04.03. MODELOS DE SIMULACIÓN

Para el diseño acústico de un auditorio o sala de conciertos es necesario buscar un equilibrio entre el diseño (o cálculo) de esta sala y la selección de materiales empleados en la misma, sus propiedades y características frente a la propagación del sonido con el fin de obtener unos resultados de calidad sonora adecuados.

Con el avance de las nuevas tecnologías se han desarrollado programas informáticos que permiten obtener una primera aproximación del comportamiento acústico de la sala. El resultado de software se traduce en la caracterización de diferentes parámetros acústicos objetivos e incluso la representación de ecogramas en una serie de receptores, información necesaria para la evaluación del recinto. Esta información

da una buena idea del comportamiento de la sala aunque, inevitablemente, está ligada a las hipótesis y simplificaciones que se encuentran en la base del modelo de simulación utilizado. Estos métodos de simulación permiten, una vez dimensionado el recinto, "jugar" con los materiales que vamos a emplear en su interior, ofreciendo un amplio abanico de posibilidades para combinar propiedades acústicas con el acabado final de la sala.

02.02.04.03.01. Generalidades

El principal objetivo que se persigue con la simulación acústica es la posibilidad de predecir el comportamiento sonoro de un teatro o auditorio, con antelación a su construcción o remodelación, con el fin de poder conocer con exactitud cómo sonará esa sala una vez la actuación que se pretende materializar (obra nueva, reforma o rehabilitación) haya sido terminada.

El conocimiento del comportamiento acústico de una sala requiere el estudio de su respuesta impulsiva tal y como hemos podido constatar en apartados anteriores de este trabajo. A partir de esta información, podemos evaluar diferentes parámetros acústicos muy relacionados con los efectos subjetivos de nuestra audición. Hoy en día, el avance de los modelos de simulación permite, a través de esta respuesta impulsiva con cualquier señal sonora libre de reverberación, incluso reproducir el sonido tal como sonaría en la sala.

Actualmente podemos calcular la respuesta impulsiva de una sala a través de modelos numéricos en una simulación por ordenador, o bien midiéndola directamente en modelos a escala construidos a tal efecto. En este apartado describiremos de forma muy somera los diferentes modelos de simulación que se han desarrollado al efecto, tanto en lo relativo a dos como a tres dimensiones.

02.02.04.03.01.01. Modelos de dos dimensiones

MODELOS DE ONDAS SUPERFICIALES DE AGUA

Con esta técnica se emplea un recipiente de agua adaptado a la planta de la sala objeto de estudio. El recipiente en general está diseñado con algún material

transparente para que pueda ser iluminado con haces paralelos de luz y así facilitar la visualización de las ondas. Se llena de agua hasta un nivel comprendido en general entre los 7 u 8 mm y posteriormente se genera un pequeño impulso ondulatorio (por ejemplo con un pequeño punzón en el agua). De esta forma podremos visualizar y fotografiar las pequeñas ondas superficiales que se propagarán a lo largo de todo el recipiente. Los primeros antecedentes de esta técnica los encontramos en el año 1843, en el que Scott Russel utilizó ondas superficiales de agua para sus estudios de acústica de salas[121].

Los modelos de ondas superficiales en el agua presentan como ventaja su facilidad de empleo en demostraciones ya que la velocidad de propagación de los frentes de onda es muy baja, y pueden seguirse fácilmente con la vista. En este tipo de modelos, al igual que sucede con las maquetas a escala, debe tenerse en cuenta que la longitud de onda λ_m y la longitud l_m características del modelo deben estar en la misma proporción que las dos longitudes λ_r y l_r respectivas en la escala real.

MODELOS DE FOTOGRAFÍAS DE PULSOS SONOROS

En 1864 el físico alemán August Toepler mostró la interacción que se produce entre la luz y el campo acústico. En su trabajo de investigación pudo mostrar que cuando un haz de rayos de luz paralelos atraviesa perpendicularmente un campo sonoro definido en un plano, la parte del frente de ondas sonoro que tangencialmente intersecta con las rayos de luz, refracta la luz produciendo dos líneas visibles cercanas, una luminosa y otra oscura. Si este fenómeno lo trasladamos a una pantalla de proyección, podemos obtener una imagen visual del frente de ondas sonoro que puede ser estudiada directamente o fotografiada para su posterior estudio. Esta técnica de visualización se conoce con el nombre de "*método de rayado de Toepler*" y fue utilizado por W.C. Sabine en algunos de sus estudios acústicos en edificios concretos.[131]

Los pulsos sonoros que se utilizan suelen ser chispas eléctricas de muy corta duración (del orden de 10^{-6} segundos), para conseguir que el tiempo de exposición sobre la pantalla sea muy corto y la imagen salga borrosa. Para iluminar, también se suele utilizar una chispa eléctrica de corta duración, de

manera que el intervalo de tiempo entre ambas señales determinará qué instante del avance del frente de ondas se fotografiará, consiguiéndose un efecto estroboscópico con la secuencia intermitente de exposiciones.

Como principal ventaja, este método presenta la claridad con que quedan representadas las ondas sonoras reflejadas, incluso para pequeños obstáculos. La precisión de las imágenes obtenidas para visualizar y estudiar diferentes fenómenos de difracción y difusión hacen de este método una herramienta muy interesante para el análisis detallado de salas y auditorios en estudios de acústica ondulatoria.

Por contra, el principal inconveniente de este método, es que solo pueden utilizarse para el estudio de problemas en dos dimensiones, es decir, para estudiar la propagación de ondas sonoras en un plano.[105]

02.02.04.03.01.02. Modelos de tres dimensiones

MODELOS ÓPTICOS

Salvo en lo relativo a la magnitud de las velocidades de propagación, las leyes de propagación de la ondas sonoras y las ondas luminosas son similares. Para el rango visible de frecuencias la luz se comporta básicamente como rayos luminosos, y los fenómenos de difracción son poco importantes. Por tanto, los modelos a pequeña escala de salas con fuentes luminosas y espejos ópticos pueden remplazar a fuentes sonoras y reflectores acústicos, especialmente en el rango de las frecuencias altas. Esta técnica se utiliza de forma particular para calcular la orientación que deberá darse a posibles reflectores que vayan a ponerse en las paredes o en el techo de un teatro calculados conforme a la acústica geométrica tal y como hemos expuesto en apartados precedentes.

En el año 1936, Vermeulen y De Boer [121] además de utilizar los modelos de rayos de luces para obtener los caminos de las reflexiones geométricas, trataron además de calcular la distribución de intensidad sonora en función de la variación de brillo de las reflexiones de luz. Sin embargo, este experimento no tuvo el resultado esperado por los autores porque el brillo de la luz de los rayos

disminuye con el coseno del ángulo de incidencia y desaparece para ángulos de incidencia próximos a 90º. No se comporta como la intensidad sonora incidente, dado que el coeficiente de absorción sonora de una superficie aumenta con el ángulo de incidencia, pero para una onda rasante se produce un cambio drástico en esta situación, produciéndose una reflexión casi total [121].

En el año 1953, R.W. Leonard[131] utilizó esta técnica en modelos de dos dimensiones para diseñar el auditorio de música "*Schoenberg Hall*" en California, obteniendo excelentes resultados al conseguir una adecuada distribución uniforme de reflexiones provenientes del techo.

La desventaja de estos métodos es que no pueden proporcionar ninguna información sobre el tiempo de retraso asociado con una reflexión, algo que es de gran importancia para el estudio de salas al objeto de evitar la aparición de fenómenos indeseables como ecos en zonas del recinto. Esta limitación debe suplirse con el dibujo de los rayos sobre los planos del edificio, por ejemplo, calculando la distancia que recorre el sonido hasta el receptor, verificándose que ésta es inferior a 17 m (sabiendo que la velocidad estándar del sonido a 14° C es de 320 m/s, y que el oído humano es capaz de integrar sonidos reflejados con una diferencia de 1/20 de segundo con respecto al sonido directo, tenemos que: 320 m/s x 1/20 s = 17 m). Por último, con la aplicación de esta técnica tampoco se obtiene información sobre tiempos de reverberación y otros parámetros acústicos, por lo que su utilidad queda reducida al diseño inicial de reflectores acústicos.

MODELOS A ESCALA

De los modelos citados anteriormente, solo los modelos ópticos se utilizan aún en la actualidad, tanto por su sencillez como por su adecuación para la resolución de problemas de tres dimensiones.

Dentro de los modelos de tres dimensiones, las maquetas a escala obtuvieron un importante auge desde su aparición, a mediados de los años 30 del siglo pasado, hasta la actualidad, en que su importancia se está viendo desplazada por el importante desarrollo de las técnicas de simulación por ordenador,

principalmente por la mayor precisión que cada vez se está obteniendo con las segundas y por el excesivo coste de las primeras.

En este método, las ondas sonoras son radiadas en la maqueta de la sala con longitudes de onda λ_m que deben estar relacionadas con la longitud de onda en la sala real λ_r de la misma manera que el cociente entre las dimensiones del modelo l_m y la sala original l_r. Con un factor de escala 1:10, por ejemplo, todas las frecuencias utilizadas en el modelo deberán ser 10 veces mayores que las de la sala original, y así el rango 63-4.000 Hz es desplazado a 630-40.000 Hz. Si la maqueta contiene aire, la relación anterior se seguirá cumpliendo para cualquier longitud de onda o frecuencia emitida por la fuente sonora, ya que al tratarse del mismo gas, la velocidad de propagación del sonido es la misma en el modelo y en la realidad.[105]

En el año 1934, Spandock realizó las primeras investigaciones en este campo de trabajo con modelos tridimensionales de tres salas conocidas, escaladas a 1:5, para lo que utilizó frecuencias de 2.500 y 4.000 Hz (frecuencias altas) en la maqueta, lo que correspondía a las frecuencias de 500 y 800 Hz, (frecuencias medias) respectivamente, en la sala real[131]. Posteriormente continuaron estas investigaciones con modelos a escala 1:10.

Jordan en 1941, Reichardt en 1955 ó Lochner y Burger en 1964, llevaron a cabo algunos de los principales trabajos pioneros en los que se fundamenta esta técnica[131], aplicándose al estudio de la influencia de diferentes aspectos arquitectónicos, de aislamiento y de acondicionamiento en salas o auditorios, consiguiéndose simular de manera objetiva el campo sonoro, para cualquier frecuencia.

El principal inconveniente de este método radica en el elevado coste de la construcción de las maquetas y, sobre todo, en la dificultad de la selección y obtención de materiales absorbentes adecuados, tales que en el rango de frecuencias del modelo presenten un comportamiento similar al de los materiales reales. Otro problema añadido a la reducción de escala es que debemos trabajar en el campo de ultrasonidos, lo que conlleva utilizar micrófonos y analizadores de elevado coste.

Además, como la atenuación sonora del aire húmedo influye en los resultados de altas frecuencias, puede hacerse necesario utilizar maquetas llenas de aire seco, lo que aumenta el coste y dificultad de estas técnicas.

Como ejemplo más reciente tenemos la maqueta del nuevo auditorio del Palacio de Congresos, Exposiciones y Artes Escénicas de Vitoria que, con un coste de alrededor de 160.000 € nos da idea de la complejidad de recurrir a este tipo de modelado a la hora de estudiar el comportamiento acústico de una sala.

Fotografía 19. Modelo a escala de auditorio de Vitoria
Fuente: http://www.elcorreo.com/alava/v/20111104/alava/ayuntamiento-desmontara-maqueta-auditorio-20111104.html

MODELOS COMPUTACIONALES

Dentro del ámbito de la Acústica Geométrica se han desarrollado modelos por ordenador de indudable interés y utilidad, por su continuo desarrollo y la gran cantidad de información que podemos obtener. La Acústica Geométrica está basada en una solución especial de la ecuación de ondas solo válida cuando la longitud de onda del sonido es pequeña comparada con las dimensiones características de las superficies del problema, y grande respecto a su rugosidad y curvatura. Si esta condición se cumple, las ondas sonoras de presión pueden

tratarse como ondas de luz y, en tal caso, todas las reflexiones son especulares[132].

Estos modelos presentan como relativo inconveniente que no pueden incluir efectos característicos de la propagación de ondas, como la difracción o interferencias de ondas, si bien cada vez más los modelos computacionales tratan de corregir estos efectos por lo que, en la mayoría de los casos, la Acústica Geométrica puede darnos respuestas muy satisfactorias a los problemas planteados.

Dos son los algoritmos básicos que se conocen en el modelado de campos sonoros utilizando la Acústica Geométrica: el método de las imágenes y el método del trazado de rayos. Ambos métodos han sido aplicados al estudio de la acústica de salas desde inicios de los años 30 del siglo pasado, y su validez ha sido contrastada con otros métodos en multitud de ocasiones. El primero de ellos es de tipo determinístico, pero tiene el inconveniente de que requiere un excesivo tiempo de cálculo, además de que solo puede aplicarse a superficies planas. El segundo es de tipo estadístico, lo que significa que sus resultados están ligados a un cierto error, pero tiene la ventaja de que puede contemplar reflexiones en superficies curvas e incluso tener en cuenta el importante efecto de la difusión[105].

02.02.04.03.02. Modelos computacionales de simulación de acondicionamiento acústico de recintos

En la actualidad existen numerosos programas de ordenador capaces de realizar predicciones de la acústica de un recinto, obteniendo la mayoría de los parámetros acústicos característicos de una sala descritos en los apartados precedentes de este documento. Entre los más conocidos podemos citar EASE que distribuye Renkus Heinz (www.renkus-heinz.com), ODEON (www.odeon.dk) distribuido por Brüel & Kjær (www.bksv.com), aunque podemos mencionar otros como CATT Acoustic, Bose Modeler, Epidaure...

La utilización de este software requiere de ciertos conocimientos en Física y Acústica para aprovechar al máximo su funcionamiento. Empezaron a

desarrollarse a mediados de los años ochenta del pasado siglo, aunque hasta el año 1990 no empezaron a crearse como tal. Sin lugar a duda, el continuo desarrollo de los mismos y su competitividad frente a otros tipos de modelado (como los modelos a escala que hemos visto) tanto económica como en la entrega de resultados, hace prever que, cada vez más, este tipo de simulación o modelado se implante en la redacción de los proyectos de arquitectura.

Estos programas permiten visualizar, y en algunos casos oír, simulaciones acústicas de un determinado equipo de sonido en cualquier recinto.

Tenemos que saber que, para realizar simulaciones, los datos que tenemos que introducir en el programa deberán ser los más numerosos posible, para obtener resultados lo más cercanos a la realidad. De ahí la complejidad de la simulación, ya que debemos conocer todas las dimensiones del recinto, así como el de los obstáculos existentes en él. Una de la información más valiosa y necesaria a la hora de simular una sala es la característica de los materiales que rodean la misma, tanto en lo relativo a su coeficiente de absorción acústica, finalidad última del presente trabajo, como del coeficiente de difusión o scattering que dependerá de la geometría del revestimiento.

02.02.04.05. CASO CONCRETO Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN EMPLEADO

Para completar los resultados obtenidos de la caracterización acústica de los materiales y con el fin de comprobar la idoneidad de su posible aplicación en casos concretos para el acondicionamiento acústico de salas se ha procedido a realizar una simulación para un caso concreto aplicando uno de los software más extendidos y validados actualmente.

El edificio elegido es el auditorio de la Institución Ferial de Extremadura FEVAL, de relativa reciente construcción, cuyo diseño ha exigido emplearse a fondo a proyectistas e ingenieros en la sabia elección de materiales dado que, por su geometría, era susceptible

Fotografía 20. Exterior de nuevo auditorio

de presentar defectos no admisibles en la acústica de una sala de este tipo.

La Institución Ferial de Extremadura FEVAL, se sitúa en la localidad de Don Benito (Badajoz). Es un consorcio que cuenta con 30 años de experiencia en la organización de certámenes comerciales y otras actividades relacionadas con el comercio y la promoción empresarial.

Las amplias instalaciones con las que cuenta recientemente se han ampliado, en especial su oferta expositiva con un edificio polifuncional de 10.000 m^2, que constituye el elemento vertebrador de todas las instalaciones proporcionando a expositores y a visitantes un espacio donde poder encontrar las más modernas tecnologías al servicio de la actividad comercial y empresarial.

En esta zona de ampliación se localiza un nuevo auditorio que, con una capacidad para 700 personas, viene a cubrir importantes necesidades de la Institución Ferial. Este auditorio ya construido presentó importantes dificultades en cuanto a la elección de materiales en su diseño con motivo de la geometría del mismo en parte limitada por la configuración de los edificios existentes.

El software utilizado para la simulación de este caso práctico de aplicación de los resultados de los materiales caracterizados es ODEON. Se trata de una herramienta informática de modelización de la acústica interior fiable y fácil de manejar. El programa fue desarrollado en la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) y es el resultado de más de veinte años de estudios centrados en el desarrollo de un método avanzado de cálculo del sonido que se escuchará en el interior de los edificios para utilizarlo durante la fase inicial de planificación de los mismos. El programa ODEON para PC simula la acústica interior de los edificios, que se puede calcular, visualizar y escuchar a partir del conocimiento de la geometría y las propiedades de sus superficies. De hecho, además de realizar los cálculos acústicos, permite escuchar el sonido que se percibirá en cualquier asiento del auditorio mediante la creación de un modelo informático de la sala y de las características acústicas de los materiales que conforman su superficie.

El cálculo se realiza a partir de la geometría y de las características de las superficies. Los resultados pueden visualizarse o incluso escuchar. ODEON está disponible en 3

versiones: versión industrial, versión auditorios y versión combinada. ODEON es una herramienta probada para predecir la acústica de edificios nuevos, así como para mejoras de evaluación y de recomendación en los ya existentes. Las características principales son las siguientes:

- Funcionamiento en entorno Windows
- Modelización a partir de la edición de los parámetros de la sala
- Permite importar datos de CAD
- Verificación del modelo y selección flexible de emisores, receptores y materiales
- Resultados visuales: reflectogramas, caminos de reflexión en 3D, mapas 3D
- Posibilidad de auralización (según versiones)

Para el desarrollo del presente trabajo hemos utilizado este software con el fin de hacer la simulación de las tres opciones de diseño de una misma sala con distintos materiales. Agradecer desde aquí a INTROMAC, en especial a D. Manuel Martín Castizo, la aportación de la licencia de este software en su versión 8.50 para poder llevar a cabo con éxito el presente trabajo.

02.03. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO II

1. Estado, S. *Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015*. 19893–20016 (2009).

2. Recipneu Recipneu. at <http://www.recipneu.com/>

3. Extremadura, G. Web Centro de Investigacion La Orden - Valdesquera. at <http://centrodeinvestigacionlaorden.gobex.es/>

4. Dollhausen, M. Polyurethane Adhesives. *Polyurethane Handbook* Capítulo 11 (1985).

5. Martín Martínez, J.M. y Orgilés Barceló, A. C. *Poliuretanos*. (INESCOP & Universidad Alicante: Alicante, 1994).

6. Wirpsa, Z. *Polyurethanes: Chemistry, Technology and Applications*. (Ellis Horwood: Nueva York, 1993).

7. Dollhausen, M. *Polyurethane Adhesives based on Baycoll, Desmocoll and Desmodur*. (BAYER AG: Leverkusen, 1988).

8. Ferrari, G. Los poliuretanos en la industria del calzado. (1991).

9. Lynch, A. J. *Mineral crushing and grinding circuits - Their simulation, optimization, design and control, developments in mineral processing - Vol. 1*. 18–25 (Elsevier: Amsterdam, 1977).

10. Bond, F. C. *Testing and calculations in Mineral Processing Handbook*. 16–27 (SME American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers: New York, 1985).

11. Lynch, A. J. *Simulation and modeling in Mineral Processing Handbook*. 28–53 (SME American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers: New York, 1985).

12. Stamboltzis, G. A. *Modification of Rosin-Ramler and Gates-Gaudin-Schumann equations in repeated single fracture of brittle materials*. 36–44 (Mining and Metallurgical Annals: 1983).

13. Stamboltzis, G. A. *Calculation of Gates-Gaudin-Shuhmman and Rosin-Ramler parameters from the size analysis of the coarse part of the distribution*. 72–73 (Mining and Metallurgical Annals: 1989).

14. Y. Xiang, Zhang, J. & Liu, C. *Verification for particle size distribution of ultrafine powders by the SAXS method - Materials Characterization, 44*. 435–439 (2000).

15. Fang, Z., Patterson, B. R. & Turner, M. E. *Modeling particle size distribution by the Weibull distribution function - Materials Characterization, 31*. 177–182 (1993).

16. Dajmarani, K. M. & Clark, I. M. *Characterization of particle size based on fine and coarse fractions - Power Technology, 93*. 101–108 (1997).

17. Dierickx, D., Basu, B., Vlegugels, J. & Biest, O. Van der *Statistical extreme value modeling of particle size distributions: experimental grain size distribution type estimation and parameterization of sintered zirconia - Materials Characterization, 45*. 61–70 (2000).

18. Gibson, L. J. & Ashby, M. F. *Cellular solids. Structure and properties*. (Pergamon Press: Oxford, 1988).

19. Ramakrishnan, K. N. *Investigation of the effect of powder particle size distribution on the powder microestructure and mechanical properties of consolidated material mad from a rapidly solidfied Al, Fe, Ce alloy powder. Part. Powder microstructure Materials Caracterization,* . 129–134 (1994).

20. Soto, R. *Introduction to Material Processing*. (Ed.. El Autor: Madrid, 1982).

21. Ballester, A., Verdeja, L. F. & Sancho, J. *Metallurgy - Vol. 1*. (Ed. Sintesis: Madrid, 2000).

22. Macías-Garcia, A., Díaz-Parralejo, A., Díez, M. A. D., Blanco, P. de la R. & Serrano, V. G. Bending Sthength of black and composite agglomerates of cork - Materials Letters 57. 4004–4008 (2003).

23. Rosin, P. & Ramler, E. *J. Inst. Fuel*. 29–33 (1933).

24. Shumann, J. *Trans. AIME*. 1189 (Tech. Publ.: 1940).

25. Smisek, M. & Cerny, S. *Active Carbon. Manufacture, Properties and Applications*. (Elsevier: Amsterdam, 1970).

26. Cheremisinoff, P. N. & Ellerbusch, F. *Carbon Adsortion Handbook*. (Ann Arbor SCI: 1980).

27. León, C. L. L. y *Avd. Colloid*. 76–77 (Inter. SCI: 1998).

28. Walker Jr., P. L. & Mahajan, O. P. *Analytical Methods for Coals and Coal Products - Vol. 1*. 125 (Ed. C. Karr. Jr. Academic Press: London, 1978).

29. Gregg, S. J. & Sing, K. S. W. *Adsorption, Surface Area and Porosity*. (Academia Press: London, 1982).

30. ASTM *ASTM D 4820 Annual Book of standard 9.01.* 764 (1990).

31. Marsh, H. *Fuel 44*. 253 (1965).

32. Marsh, H. & J, B. R. *Colloid Interfac Sci. 23*. 557 (1967).

33. Rudzinski, W. & Everett, D. H. *Adsorption of gases on heterogeneous surfaces*. (Academic press: San Diego, 1992).

34. Lowell, S. & Shields, J. E. *Powder, surface area and porosity*. (Chapman and Hall: New York, 1991).

35. Dubinin, M. M. The Potential Theory of Adsorption of Gases and Vapors for Adsorbents with Energetically Nonuniform Surfaces. *Chemical Reviews* 60, 235–241 (1960).

36. Dubinin, M. M. *Chemistry and physics of carbon - Vol. 2*. (Marcell Dekker: New York, 1966).

37. Dollimore, D., Spooner, P. & Turner, A. *Surf. Technolo. 4*. 121 (1976).

38. Sutherland, J. *Porous Caron Solid*. (Academic Press: London, 1976).

39. Brunauer, S., Deming, L. S., Deming., W. E. & Teller, E. *J. Am. Chem. Soc. 62*. 1723 (1940).

40. Langmuir, I. The adsortion of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society* 40, 1361–1403 (1918).

41. Brunauer, S., Emmett, P. H. & Teller, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society* 60, 309–319 (1938).

42. Sing, K. S. . W. *et al.* Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry* 57, 603 (1985).

43. Dollimore, D., Spooner, P. & Turner, A. The effect of heat treatment on the adsorption properties of solids. II. The effect of heat treatment on the character of the adsorption isotherm. *Thermochimica Acta* 38, 15–26 (1980).

44. Dubinin, M. M. Characterisation OP Adsorption Properties and Microporous Structures of Carbonaceous Adsorbents. *Characterization of Porous Solids Proceedings of the IUPAC Symposium (COPS I), Bad Soden a. Ts.* Volume 39, 127–137 (1988).

45. Dubinin, M. M. Microporous structures and absorption properties of carbonaceous adsorbents. *Carbon* 21, 359–366 (1983).

46. Stoeckli, H. F., Rebstein, P. & Ballerini, L. On the assessment of microporosity in active carbons, a comparison of theoretical and experimental data. *Carbon* 28, 907–909 (1990).

47. Marsh, H. & Rand, B. The characterization of microporous carbons by means of the dubinin-radushkevich equation. *Journal of Colloid and Interface Science* 33, 101–116 (1970).

48. Kaneko, K., Ishii, C., Ruike, M. & kuwabara, H. Origin of superhigh surface area and microcrystalline graphitic structures of activated carbons. *Carbon* 30, 1075–1088 (1992).

49. Setoyama, N., Suzuki, T. & Kaneko, K. Simulation study on the relationship between a high resolution αs-plot and the pore size distribution for activated carbon. *Carbon* 36, 1459–1467 (1998).

50. Horváth G. & Kawazoe, K. Method for the calculation of effective por size distribution in molecular sieve carbon. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 16, 470–475 (1983).

51. Horvath, G. Energetic interactions in phase and molecular level pore characterisation in nano-range. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 141, 295–304 (1998).

52. Evans, R., Marconi, U. M. B. & Tarazona, P. Fluids in narrow pores: Adsorption, capillary condensation, and critical points. *The Journal of Chemical Physics* 84, 2376–2399 (1986).

53. Lastoskie, C., Gubbins, K. E. & Quirke, N. Pore size distribution analysis of microporous carbons: a density functional theory approach. *The Journal of Physical Chemistry* 97, 4786–4796 (1993).

54. Seaton, N. A., Walton, J. P. R. B. & quirke, N. A new analysis method for the determination of the pore size distribution of porous carbons from nitrogen adsorption measurements. *Carbon* 27, 853–861 (1989).

55. Russell, B. P. & Levan, M. D. Pore size distribution of BPL activated carbon determined by different methods. *Carbon* 32, 845–855 (1994).

56. Oya, A., Yoshida, S., Alcaniz-Monge, J. & Linares-Solano, A. Preparation and properties of an antibacterial activated carbon fiber containing mesopores. *Carbon* 34, 53–57 (1996).

57. Blanco, P. de la R. Aplicación de subproductos de corcho mediante proyección para el acondicionamiento térmico y acústico de salas de audición. (1994).at <http://www.unex.es/investigacion/grupos/inma/estructura/tesis/pagina_tesis?listado_personal=1&idtesis=3939>

58. Sabine, W. W. *Architectural acoustics. The American Architect Building News - Vol. 62*. 71–73 (1898).

59. De Geetere, L. *Analysis and improvement of the experimental techniques to assess the acoustical reflection properties of boundary surfaces*. 21–38 (Katholieke Universiteit Leuven – Faculteit Toegepaste Wetenschappen: Leuven (Belgium), 2004).

60. Scott, R. A. The propagation of sound between walls of porous material. *Proceedings of the Physical Society* 58, 358 (1946).

61. Zwikker, C. & Kosten, C. W. *Sound Absorbing Materials*. (Elsevier: New York, Amsterdam, London and Brussels, 1949).

62. Ferrero, M. A. & Sacerdote, G. G. Parameters of sound propagation in granular absorption materials. *Acustica* 1, 135–142 (1951).

63. Delany, M. E. & Bazley, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics* 3, 105–116 (1970).

64. Yaniv, S. L. Impedance tube measurement of propagation constant and characteristic impedance of porous acoustical material. *The Journal of the Acoustical Society of America* 54, 1138–1142 (1973).

65. Bies, D. A. & Hansen, C. H. Flow resistance information for acoustical design. *Applied Acoustics* 13, 357–391 (1980).

66. Attenborough, K. Acoustical characteristics of porous materials. *Physics Reports* 82, 179–227 (1982).

67. Biot, M. A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America* 28, 168–178 (1956).

68. Ingard, K. U. & Dear, T. A. Measurement of acoustic flow resistance. *Journal of Sound and Vibration* 103, 567–572 (1985).

69. Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T. & Seybert, A. F. Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America* 86, 637–643 (1989).

70. C., B.-S. & Sacerdote, G. G. A method for measuring the acoustic impedance of porous materials. *Acustica* 34, 77–80 (1975).

71. McIntosh, J. D., Zuroski, M. T. & Lambert, R. F. Standing wave apparatus for measuring fundamental properties of acoustic materials in air. *The Journal of the Acoustical Society of America* 88, 1929–1938 (1990).

72. Champoux, Y. & Stinson, M. R. Measurement of the characteristic impedance and propagation constant of materials having high flow resistivity. *The Journal of the Acoustical Society of America* 90, 2182–2191 (1991).

73. Ren, M. & Jacobsen, F. A method of measuring the dynamic flow resistance and reactance of porous materials. *Applied Acoustics* 39, 265–276 (1993).

74. Cummings, A. & Beadle, S. P. Acoustic Properties Of Reticulated Plastic Foams. *Journal of Sound and Vibration* 175, 115–133 (1994).

75. Cox, T. J. & D'Antonio, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Desing and Application*. (Taylor and Francis: London, 2004).

76. Horoshenkov, K. V. Characterisation of acoustic porous materials. *Proceedings of the Institute of Acoustics* 28, (2006).

77. Rodríguez, R. M., Pfretzshner, J., Colina, C. de la, Moreno, A. & Simon, F. Determinación experimental de los parámetros acústicos característicos de materiales porosos de diseño. *Tecniacústica Oviedo* 28, (1997).

78. Allard, J. F., Castagnede, B., Henry, M. & Lauriks, W. Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air. *Review of Scientific Instruments* 65, 754–755 (1994).

79. Brown, R. Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling factor in Biot's equations for acoustic waves in fluid-filled porous media. *GEOPHYSICS* 45, 1269–1275 (1980).

80. Johnson, D. L., Koplik, J. & Dashen, R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics* 176, 379–402 (1987).

81. Champoux, Y. & Allard, J.-F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics* 70, 1975–1979 (1991).

82. Horoshenkov, K. V, Attenborough, K. & Chandler-Wilde, S. N. Pad[e-acute] approximants for the acoustical properties of rigid frame porous media with pore size distributions. *The Journal of the Acoustical Society of America* 104, 1198–1209 (1998).

83. Kirchoff, G. *Vorlesungen uber Mathematische Physik*. (Leipzig: 1876).

84. Delany, M. E. & Bazley, E. N. Acoustical Characteristics of Fibrous Absorbent Material. *The Journal of the Acoustical Society of America* 48, (105–116) 434 (1970).

85. Horoshenkov, K. V & Swift, M. J. The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110, 2371–2378 (2001).

86. Yamamoto, T. & Turgut, A. Acoustic wave propagation through porous media with arbitrary pore size distributions. *The Journal of the Acoustical Society of America* 83, 1744–1751 (1988).

87. Miki, Y. Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 11, 19–24 (1990).

88. Allard, J.-F. & Champoux, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America* 91, 3346–3353 (1992).

89. Voronina, N. Acoustic properties of fibrous materials. *Applied Acoustics* 42, 165–174 (1994).

90. Voronina, N. Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material. *Applied Acoustics* 48, 121–132 (1996).

91. Voronina, N. An empirical model for elastic porous materials. *Applied Acoustics* 55, 67–83 (1998).

92. Voronina, N. An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity. *Applied Acoustics* 58, 295–304 (1999).

93. Dunn, I. P. & Davern, W. A. Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers. *Applied Acoustics* 19, 321–334 (1986).

94. Garai, M. & Pompoli, F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics* 66, 1383–1398 (2005).

95. Garai, M. & Pompoli, F. Definition and first validation of a new mathematical model of polyester fibre materials. *Forum Acusticum* XXXIII, (2002).

96. Hassall, J. R. & Zaveri, K. Acoustic Noise Meaurements Bruel & Kjaer. (1988).

97. Yunseon, R. The acoustic impedance measurement system using two microphones.

98. User Manual: Impedancie - Transmision Loss Measurement Tubes type 4206. (2004).

99. Vivienda, M. de *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.* (2006).

100. Vivienda, M. de *Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de* . (2007).

101. Estado, J. del *Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.* (2003).

102. Estado, J. del *Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.* (2005).

103. Lopez, M. R. *Acondicionamiento Acustico*. 15–17 (Paraninfo S.A.: Madrid, 2001).

104. Arau, H. *ABC de la acústica arquitectónica*. (Grupo Editorial CEAC: Barcelona, 1999).

105. Rubio, J. G. Aplicación del Método de Monte Carlo en la simulación numérica de respuestas impulsivas en salas. Validación y detrminación del error de la técnica del trazado de rayos. 18–22 (1997).

106. Sabine, W. C. *Collected papers on acoustics*. (Cambridge: Harvard University Press: 1922).

107. Norris, R. F. & Andree, C. A. The Application of the Norris-Andree Method of Reverberation Measurement to Measurements of Sound Absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America* 3, 312 (1932).

108. Eyring, C. F. Reverberation time in “dead” rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1, 217–241 (1930).

109. Millington, G. A modified formula for reverberation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 4, 69–82 (1932).

110. Sette, W. J. A NEW REVERBERATION TIME FORMULA. *The Journal of the Acoustical Society of America* 4, 193–210 (1933).

111. Fitzroy, D. Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America* 31, 893–897 (1959).

112. Gomperts, M. C. Do the classical reverberation time formulas still have the right to existence? *Acustica* 16, 255–268 (1965).

113. Kosten, C. W. New method for the calculation of the reverberation time of halls for public assembly. *Acustica* 16, 325–330 (1966).

114. Pujolle, J. Nouvelle formule pour la dureé de réverbération. *Revue d´Acoustique* 9, (1972).

115. Kuttruff, H. *Room acoustics*. (Applied Science: 1979).

116. Wernly, J. A. Tiempo de reverberacion en recintos prismáticos. *Revista de Acustica* 9, (1978).

117. Arau, H. An improved reverberation formula. *Acustica* 65, 163 (1988).

118. Arau, H. Teoria general de las magnitudes energeticas del sonido en recintos con distribución asimétrica de la absorción. *Revista de Acustica* 27, 23 (1996).

119. Jordan, V. L. A group of objective acoustical criteria for concert halls. *Applied Acoustics* 14, 253–266 (1981).

120. Jaime, G. L., Fco. Javier, V. S. & Llopis Reyna, Ana *Acústica arquitectónica y urbanística*. (Editorial Universitat Politècnica de València: 1996).

121. Cremer, L., Muller, H. A. & Schultz, T. J. *Principles and aplications of room acoustics*. (Applied Science: 1982).doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.2916055

122. Makrinenko, L. I. *Acoustics of Auditoriums in Public Buildings*. (1994).

123. Abdou, A. & Guy, R. W. Spatial information of sound fields for room-acoustics evaluation and diagnosis. *The Journal of the Acoustical Society of America* 100, 3215–3226 (1996).

124. Davies, W., Cox, T. J. & Lam, Y. W. Subjective perception of seat dip attenuation. *Acustica* 82, 784–792 (1996).

125. Barron, M. & Marshall, A. H. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure. *Journal of Sound and Vibration* 77, 211–232 (1981).

126. Hidaka, T., Beranek, L. L. & Okano, T. Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America* 98, 988–1007 (1995).

127. Beranek, L. L. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture (Second Edition). *The Journal of the Acoustical Society of America* 117, 987–988 (2005).

128. Beranek, L. L. Concert hall acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America* 92, 1–39 (1992).

129. Lochner, L. P. A. & Burger, J. F. Acustica. *Acustica* 8, (1958).

130. Houtgast, T. & Steeneken, H. J. M. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America* 77, 1069–1077 (1985).

131. Knudsen, V. O. Model Testing of Auditoriums. *The Journal of the Acoustical Society of America* 45, 302 (1969).

132. Lehnert, H. & Blauert, J. Principles of binaural room simulation. *Applied Acoustics* 36, 259–291 (1992).

CAPÍTULO III – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

03.01. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE LOS MATERIALES DE PARTIDA 206
03.01.01. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU) 206
03.01.02. EL CORCHO 210
03.01.03. EL KENAF 214
03.01.04. RESUMEN DE LOS RESULTADOS 218

03.02. ESTUDIO TEXTURAL DE LOS MATERIALES DE PARTIDA..... 222
03.02.01. ISOTERMA DE ADSORCIÓN 222
03.02.02. POROSIMETRÍA DE MERCURIO..... 227
03.02.03. DENSIDADES POR DESPLAZAMIENTO DE HELIO Y MERCURO 228
03.02.04. POROSIDAD TOTAL Y VOLUMEN TOTAL DE POROS..... 229
03.02.05. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) 230

03.03. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS..... 233
03.03.01. ELECCIÓN DEL VOLUMEN DE AGLOMERANTE 233
03.01.02. ELECCIÓN DE LAS MUESTRAS..... 238
03.01.03. MICROSCOPÍA ÓPTICA..... 240

03.04. CARACTERÍZACIÓN ACÚSTICA DE LAS MUESTRAS AGLOMERADAS . 245
03.04.01. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA 245
03.04.02. INFLUENCIA DEL TIPO DE AGLOMERANTE 247
03.04.02.01. MUESTRAS AGLOMERADAS CON COLA 247
03.04.02.02. MUESTRAS AGLOMERADAS CON ESCAYOLA..... 268
03.04.02.03. MUESTRAS AGLOMERADAS CON FETADIT 284
03.04.02.04. MUESTRAS AGLOMERADAS CON GOMA-LACA..... 301
03.04.02.05. MUESTRAS AGLOMERADAS CON LIGNINA-ÁLCALI 317
03.04.02.06. MUESTRAS AGLOMERADAS CON LIGNINA SULFONADA..... 324
03.04.02.07. MUESTRAS AGLOMERADAS CON POLIURETANO 331
03.04.02.08. MUESTRAS AGLOMERADAS CON TEROKAL 347

03.05. EJEMPLO DE APLICACIÓN 363
03.05.01. PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN..... 363

03.05.01.01. CASO I - MATERIALES INICIALES 366
03.05.01.02. CASO II - INCORPORACIÓN DE KE50-NE50 COLA 370
03.05.01.03. CASO III - INCORPORACIÓN DE KE75-NE25 FETADIT 371
03.05.02. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 372
03.05.02.01. OPCIÓN I – MATERIALES INICIALES..... 372
03.05.02.02. OPCIÓN II – KE50-NE50 AGLOMERADO CON COLA 377
03.05.02.03. OPCIÓN III – KE25-NE25 AGLOMERADO CON FETADIT 381
03.05.02.04. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS Y FACTOR DE MÉRITO GLOBAL..... 384

03.06. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO III 387

03.01. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE LOS MATERIALES DE PARTIDA

Tal y como se ha indicado en el apartado correspondiente a métodos experimentales, los materiales de partida fueron sometidos a un proceso de trituración previa para posteriormente proceder a la determinación de la distribución del tamaño de partícula, es decir, su función de distribución $F(\varnothing)$ así como la función de densidad $f(\varnothing)$, definida ésta última como el número de partículas comprendidas entre dos tamices de luz de malla determinado.

Los resultados obtenidos permiten trazar las curvas experimentales de distribución de tamaño de partícula, representando el porcentaje en peso de la muestra frente al tamaño de partícula.

Con esta información se aplican diferentes modelos matemáticos que permiten obtener las funciones de distribución y densidad a partir de los datos experimentales de distribución de tamaño de partícula. Los modelos matemáticos más comúnmente utilizados son los de Rosin-Ramler (RR) y Gates-Gaudin-Schumann (GGS)[1,2]. En los siguientes apartados veremos los resultados de la aplicación de cada uno de estos modelos a los resultados obtenidos así como la elección del idóneo para el estudio realizado.

03.01.01. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU)

Tabla 41. Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra NFU

Intervalo (mm)	Luz malla (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)
			Parcial (%)	Acum. (%)	
< 0,71	0,71	9,21	1,84%	1,84%	98,16%
0,71-1,00	1,00	22,38	4,48%	6,32%	93,68%
1,00-1,40	1,40	35,52	7,10%	13,42%	86,58%
1,40-2,00	2,00	41,71	8,34%	21,76%	78,24%
2,00-2,80	2,80	118,10	23,62%	45,38%	54,62%
2,80-4,50	4,50	137,15	27,43%	72,81%	27,19%
4,50-5,60	5,60	67,84	13,57%	86,38%	13,62%
5,60-8,00	8,00	49,03	9,81%	96,19%	3,81%
8,00-11,20	11,20	19,06	3,81%	100,00%	0,00%

En la tabla anterior se exponen los valores del peso de las distintas fracciones de neumático fuera de uso (NFU) obtenido en el proceso de tamizado, así como los porcentajes acumulados de los mismos.

Gráficamente los valores anteriores se muestran en la siguiente representación característica relativa al porcentaje retenido (parcial y acumulado) frente a la abertura del tamiz o luz de malla.

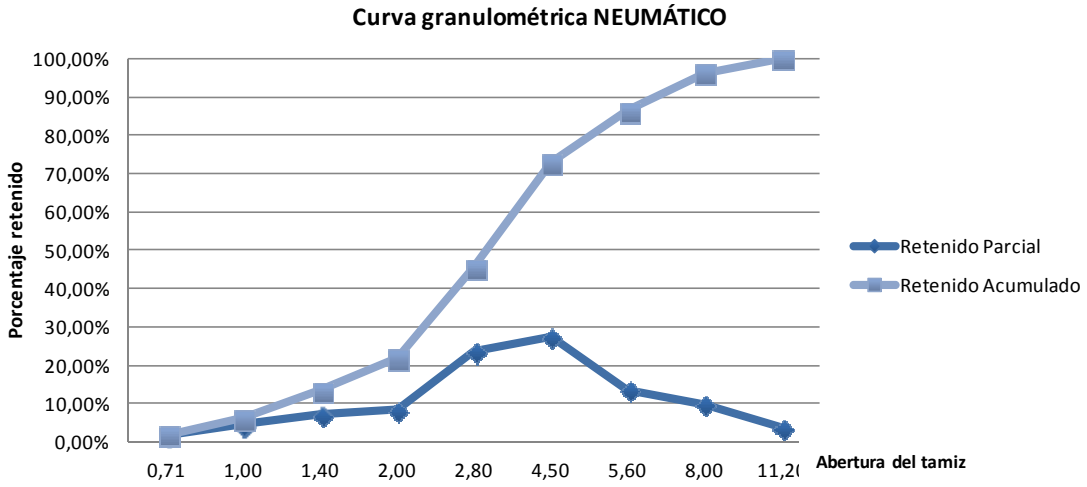


Figura 22. Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra NFU

Tal y como puede observarse en la anterior gráfica, la mayor fracción de tamaños de partículas se encuentran comprendidas en aberturas del tamiz entre los 2,80 y los 5,60 mm, representando aproximadamente un 60% de la muestra. A partir de los datos experimentales obtenemos los siguientes parámetros:

Tabla 42. Ajuste modelo RR para muestra NFU

Intervalo (mm)	Luz malla (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)	$F(\phi)$	$ln(\phi)$	$ln\{-ln[1-F(\phi)]\}$
			Parcial (%)	Acum. (%)				
< 0,71	0,71	9,21	1,84%	1,84%	98,16%	0,018	-0,342	-3,985
0,71-1,00	1,00	22,38	4,48%	6,32%	93,68%	0,063	0,000	-2,729
1,00-1,40	1,40	35,52	7,10%	13,42%	86,58%	0,134	0,336	-1,937
1,40-2,00	2,00	41,71	8,34%	21,76%	78,24%	0,218	0,693	-1,405
2,00-2,80	2,80	118,10	23,62%	45,38%	54,62%	0,454	1,030	-0,503
2,80-4,50	4,50	137,15	27,43%	72,81%	27,19%	0,728	1,504	0,264
4,50-5,60	5,60	67,84	13,57%	86,38%	13,62%	0,864	1,723	0,690
5,60-8,00	8,00	49,03	9,81%	96,19%	3,81%	0,962	2,079	1,184
8,00-11,20	11,20	19,06	3,81%	100,00%	0,00%	1,000	2,416	

Tal y como hemos visto en el apartado correspondiente a métodos experimentales, la expresión general del modelo RR se transformaba fácilmente en la expresión siguiente:

$$\ln\{-\ln[1-F(\phi)]\} = m\ln\phi - m\ln l$$

Expresión 06

Recordemos que una representación del primer término de esta expresión frente al logaritmo neperiano de ∅ daría como resultado una línea recta de pendiente *m* si la distribución del tamaño de partícula se ajusta al modelo de RR. Para el caso concreto del NFU la representación sería la siguiente:

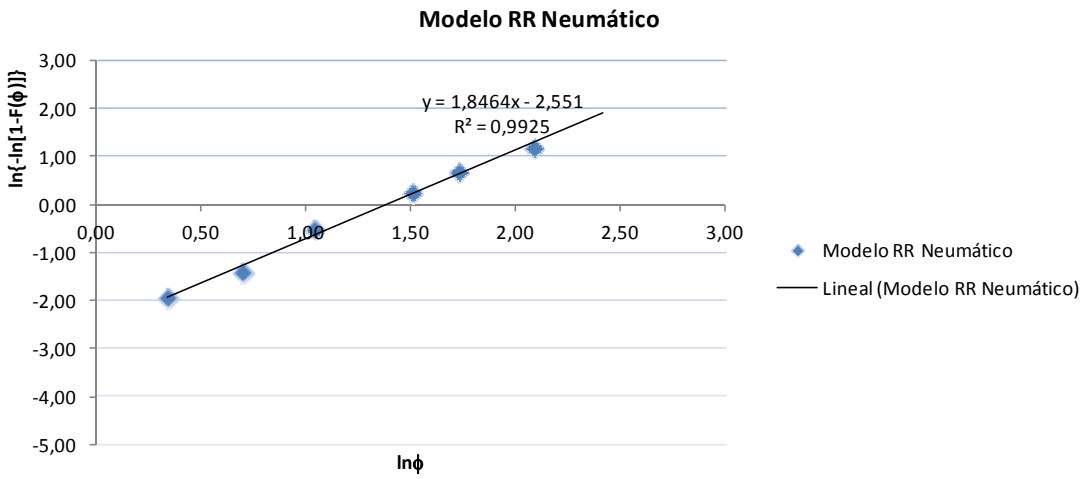


Figura 23. Ajuste de los datos experimentales modelo RR para muestra NFU

Tal y como puede observarse en la figura anterior la representación de los valores experimentales ajustados conforme a la expresión del modelo matemático RR se adapta a una recta de pendiente m (en este caso de valor 1,846) y valor de R^2 0,9925 lo cual da muestra de la bondad de este modelo para la muestra de neumático.

Del mismo modo se procede al ajuste por el modelo GGS. En este caso recordemos que F(∅) representa la fracción de muestra de tamaño de partícula menor que ∅, obteniendo el ajuste necesario para su representación mediante el cálculo de su logaritmo tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 43. Ajuste modelo GGS para muestra NFU

Intervalo (mm)	Luz malla (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)	$F(\phi)$	$\log(\phi)$	$\log F(\phi)$
			Parcial (%)	Acum. (%)				
< 0,71	0,71	9,21	1,84%	1,84%	98,16%	0,018	-0,149	-1,735
0,71-1,00	1,00	22,38	4,48%	6,32%	93,68%	0,063	0,000	-1,199
1,00-1,40	1,40	35,52	7,10%	13,42%	86,58%	0,134	0,146	-0,872
1,40-2,00	2,00	41,71	8,34%	21,76%	78,24%	0,218	0,301	-0,662
2,00-2,80	2,80	118,10	23,62%	45,38%	54,62%	0,454	0,447	-0,343
2,80-4,50	4,50	137,15	27,43%	72,81%	27,19%	0,728	0,653	-0,138
4,50-5,60	5,60	67,84	13,57%	86,38%	13,62%	0,864	0,748	-0,064
5,60-8,00	8,00	49,03	9,81%	96,19%	3,81%	0,962	0,903	-0,017
8,00-11,20	11,20	19,06	3,81%	100,00%	0,00%	1,000	1,049	0,000

Al igual que ocurre con el modelo anterior, si se representa el logaritmo de F(∅) frente al logaritmo del tamaño de partícula ∅, se suele obtener una línea recta de pendiente m que marca la bondad del modelo. Para nuestro caso la representación gráfica de esta relación es la siguiente:

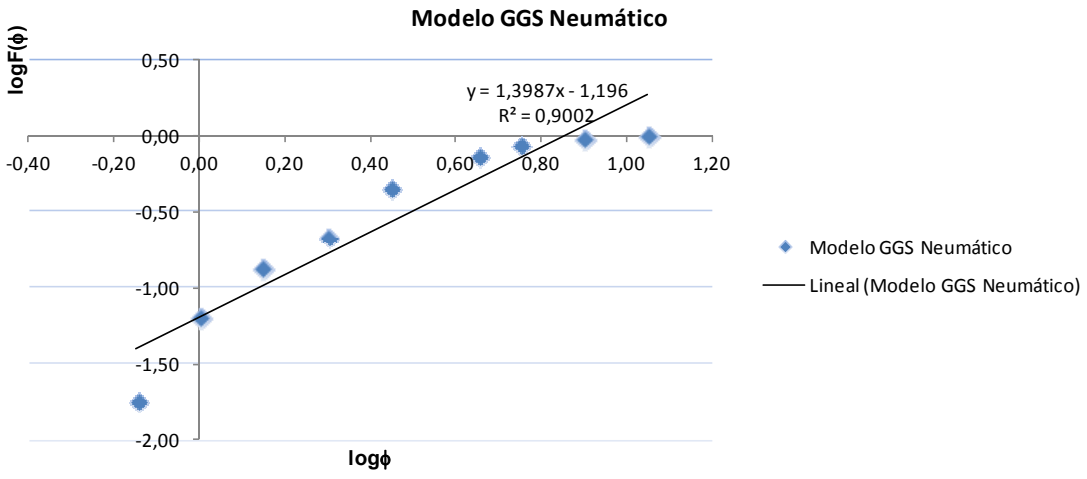


Figura 24. Ajuste de los datos experimentales modelo GGS para muestra NFU

Tal y como puede comprobarse, aunque los datos experimentales se ajustan aceptablemente a una recta de pendiente m (en este caso 1,3987), existe una mayor dispersión en los resultados respecto del modelo anterior, especialmente en los valores de tamaño de partícula extremos.

Tras comparar los dos modelos matemáticos anteriores podemos observar como el modelo de RR cuenta con una mayor bondad para la representación de la función de distribución del tamaño de partícula por contar con una menor dispersión en relación a

los datos experimentales y con un mayor valor de R^2. De esta forma, si representamos la función de distribución tomando como referencia la expresión del modelo RR el resultado es el que se muestra en la siguiente figura:

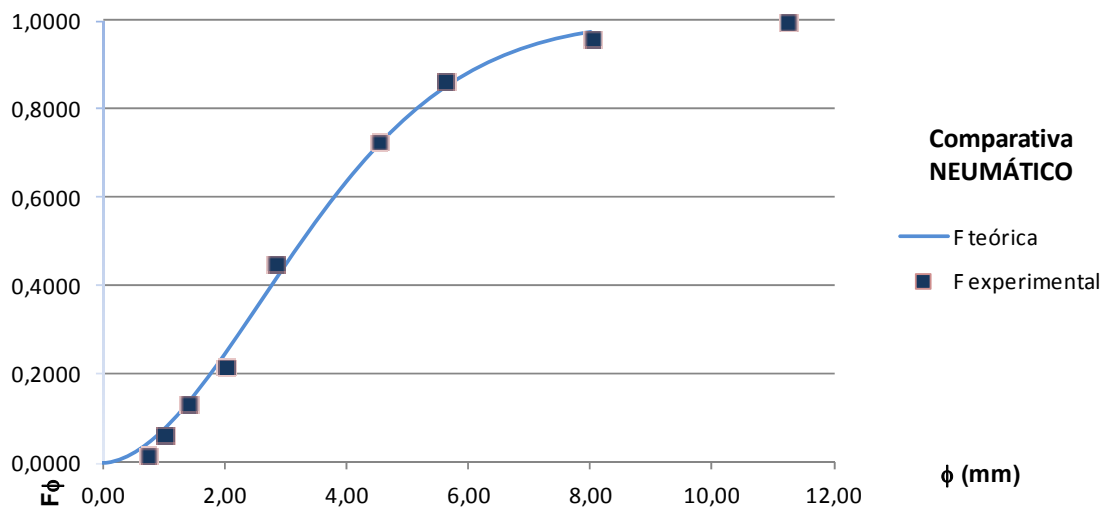


Figura 25. Función de distribución frente a tamaño de partícula modelo RR para muestra NFU

03.01.02. EL CORCHO

Al igual que hemos realizado para el neumático, se procede a la caracterización de la muestra de corcho mediante tamizado obteniendo los siguientes resultados en peso de retenidos parciales y acumulados para cada uno de los tamices con la luz de malla indicada en la siguiente tabla:

Tabla 44. Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra CORCHO

Intervalo (mm)	Luz malla (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)
			Parcial (%)	Acum. (%)	
< 0,71	0,71	1,31	1,75%	1,75%	98,25%
0,71-1,00	1,00	1,92	2,56%	4,31%	95,69%
1,00-1,40	1,40	9,04	12,05%	16,36%	83,64%
1,40-2,00	2,00	7,59	10,12%	26,48%	73,52%
2,00-2,80	2,80	18,11	24,15%	50,63%	49,37%
2,80-4,50	4,50	20,90	27,87%	78,49%	21,51%
4,50-5,60	5,60	11,68	15,57%	94,07%	5,93%
5,60-8,00	8,00	2,62	3,49%	97,56%	2,44%
8,00-11,20	11,20	1,83	2,44%	100,00%	0,00%

Gráficamente los valores anteriores se representan en la siguiente figura, que relaciona los porcentajes de retenidos parciales y acumulados para cada dimensión de luz de malla.

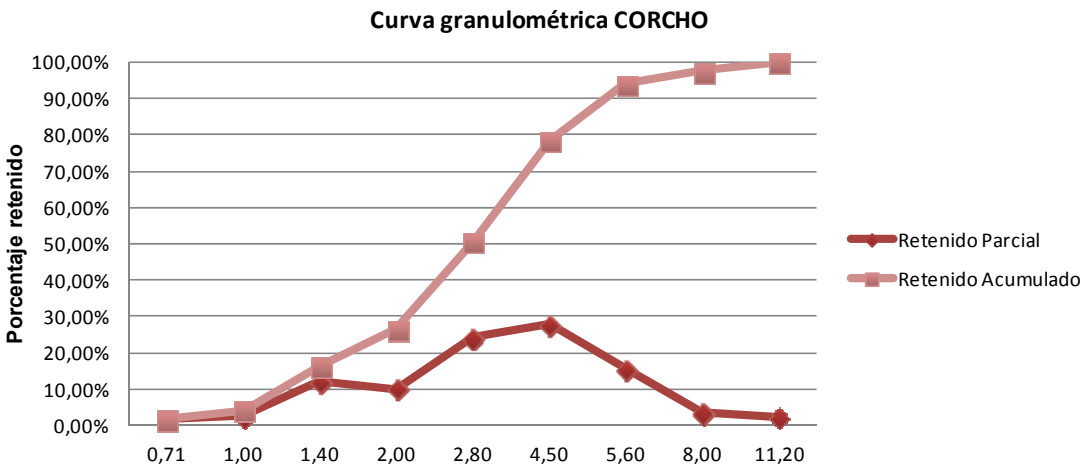


Figura 26. Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra CORCHO

De la gráfica anterior se puede concluir que la mayor parte de los tamaños de partícula se localizan en los tamaños comprendidos entre 1,40 y 5,60 mm de luz de malla, existiendo una cierta heterogeneidad en el reparto, observándose como para 2,00 mm cae la curva concentrándose los mayores porcentajes parciales en los 2,80 y 4,50 mm, que prácticamente suponen más de la mitad de la muestra. Otra cuestión a tener en cuenta en la distribución anterior es que existen retenidos prácticamente en la totalidad de los tamices utilizados lo que implica una granulometría sensiblemente continua si bien como se ha indicado es más relevante en tamaños de partícula medios.

Las granulometrías continuas son en general más favorables para la elaboración de materiales aglomerados (como sucede en hormigones) dado que optimizan el consumo de material ligante o aglomerante. Para nuestro caso tendrá una importancia relativa ya que, si bien es aconsejable la búsqueda de granulometrías que optimicen el consumo de adhesivo, la formación de poros de un cierto tamaño en la estructura macroscópica del material contribuirá a la disipación de la energía acústica y por tanto previsiblemente mejorará la absorción de este material.

El siguiente paso, al igual que hiciéramos con el neumático es la determinación de los valores necesarios de la expresión del modelo RR a partir de los datos experimentales

con el fin de poder verificar que la representación de las magnitudes indicadas es una recta de pendiente m y cuyo valor de R^2 que nos permitirá conocer la bondad del modelo.

Tabla 45. Ajuste modelo RR para muestra CORCHO

Intervalo (mm)	Luz malla ϕ (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)	$F(\phi)$	$ln(\phi)$	$ln\{-ln[1-F(\phi)]\}$
			Parcial (%)	Acum. (%)				
< 0,71	0,71	1,31	1,75%	1,75%	98,25%	0,017	-0,342	-4,039
0,71-1,00	1,00	1,92	2,56%	4,31%	95,69%	0,043	0,000	-3,123
1,00-1,40	1,40	9,04	12,05%	16,36%	83,64%	0,164	0,336	-1,722
1,40-2,00	2,00	7,59	10,12%	26,48%	73,52%	0,265	0,693	-1,179
2,00-2,80	2,80	18,11	24,15%	50,63%	49,37%	0,506	1,030	-0,348
2,80-4,50	4,50	20,90	27,87%	78,49%	21,51%	0,785	1,504	0,430
4,50-5,60	5,60	11,68	15,57%	94,07%	5,93%	0,941	1,723	1,038
5,60-8,00	8,00	2,62	3,49%	97,56%	2,44%	0,976	2,079	1,312
8,00-11,20	11,20	1,83	2,44%	100,00%	0,00%	1,000	2,416	3,604

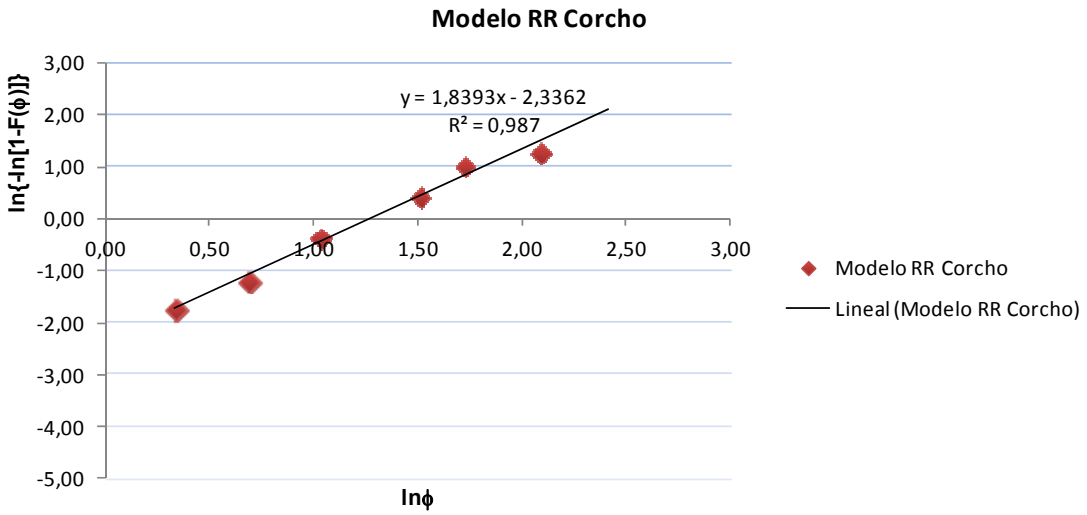


Figura 27. Ajuste de los datos experimentales modelo RR para muestra CORCHO

En la representación gráfica de la recta a la que hace referencia el modelo RR para los datos experimentales de la muestra de corcho, al igual que ocurriera con el neumático, se puede observar en la representación anterior la escasa dispersión existente entre los valores experimentales con respecto a la recta de pendiente m (en este caso 1,8393), lo que permite afirmar que este modelo matemático es adecuado para la determinación de la fracción granulométrica también de esta muestra.

Al objeto de comparar nuevamente la bondad de los dos modelos matemáticos más utilizados, procedemos a la determinación de los ajustes necesarios para el método

GGS, obteniendo para los datos experimentales los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 46. Ajuste modelo GGS para muestra CORCHO

Intervalo (mm)	Luz malla ϕ (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)	$F(\phi)$	$log\ (\phi)$	$log\ F(\phi)$
			Parcial (%)	Acum. (%)				
< 0,71	0,71	1,31	1,75%	1,75%	98,25%	0,017	-0,149	-1,758
0,71-1,00	1,00	1,92	2,56%	4,31%	95,69%	0,043	0,000	-1,366
1,00-1,40	1,40	9,04	12,05%	16,36%	83,64%	0,164	0,146	-0,786
1,40-2,00	2,00	7,59	10,12%	26,48%	73,52%	0,265	0,301	-0,577
2,00-2,80	2,80	18,11	24,15%	50,63%	49,37%	0,506	0,447	-0,296
2,80-4,50	4,50	20,90	27,87%	78,49%	21,51%	0,785	0,653	-0,105
4,50-5,60	5,60	11,68	15,57%	94,07%	5,93%	0,941	0,748	-0,027
5,60-8,00	8,00	2,62	3,49%	97,56%	2,44%	0,976	0,903	-0,011
8,00-11,20	11,20	1,83	2,44%	100,00%	0,00%	1,000	1,049	0,000

La representación gráfica de los dos logaritmos debe darnos una recta:

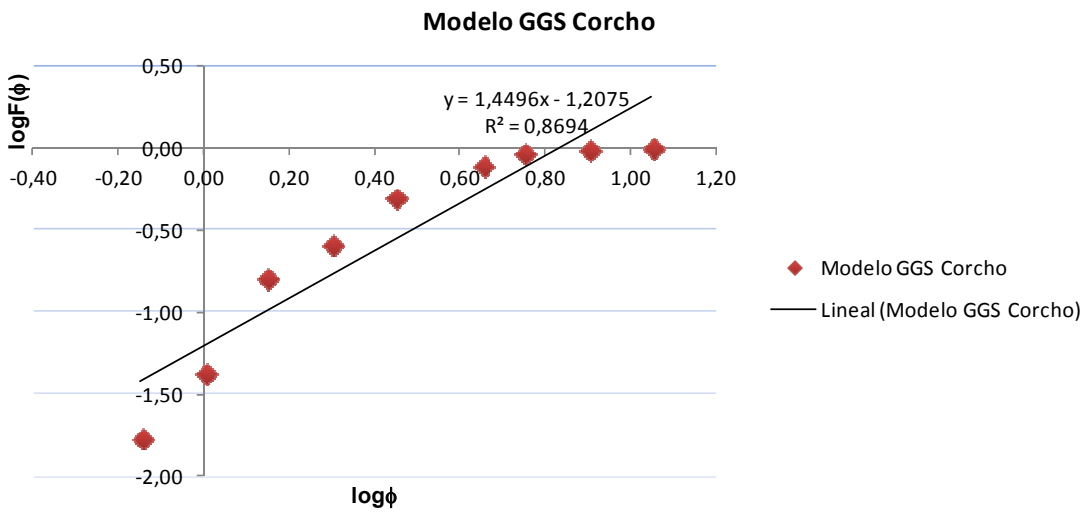


Figura 28. Ajuste de los datos experimentales modelo GGS para muestra CORCHO

De nuevo podemos observar que existe una mayor dispersión en el modelo GGS para unos mismos datos experimentales que en el modelo RR, nuevamente más acusado en los tamaños más pequeños y mayores de partículas. Estos resultados nos llevan de nuevo a elegir como modelo matemático más adecuado para expresar la función de distribución del tamaño de partícula del corcho el modelo RR por contar con una menor dispersión en los valores obtenidos a partir de los resultados experimentales.

Así, la función de distribución sería la siguiente utilizando el modelo RR tal y como hemos visto:

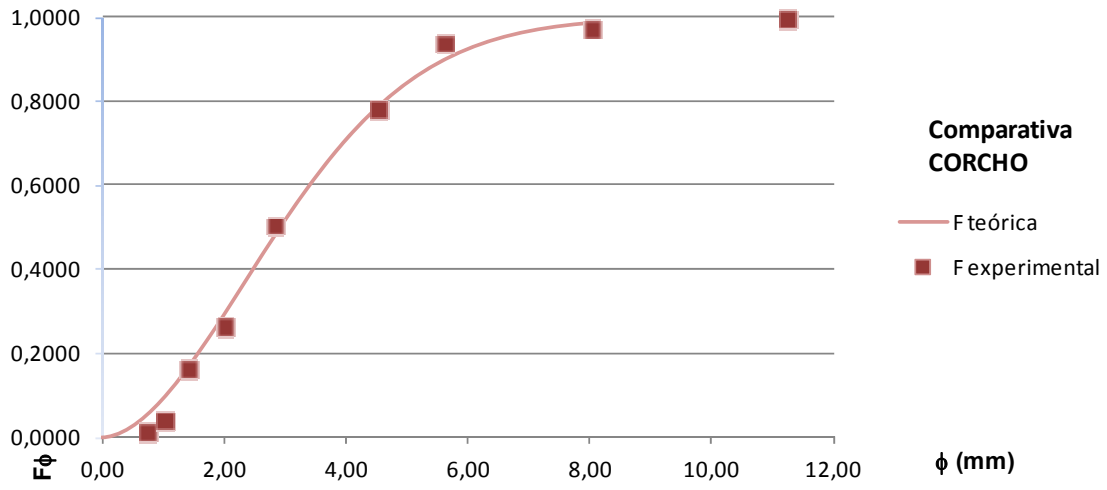


Figura 29. Función de distribución frente a tamaño de partícula modelo RR para muestra CORCHO

03.01.03. EL KENAF

Al igual que lo realizado con los dos materiales anteriores al kenaf una vez triturado en un molino de cuchillas marca FRITSCH, de 2.100 W de potencia (nº de serie 15.4020/02184) se le sometió al proceso de tamizado, obteniendo los pesos retenidos y acumulados para cada luz de malla que se muestran en la siguiente tabla:

Fotografía 21. Muestra de kenaf tras proceso de triturado

Tabla 47. Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra KENAF

Intervalo (mm)	Luz malla (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)
			Parcial (%)	Acum. (%)	
< 0,71	0,71	5,12	5,12%	5,12%	94,88%
0,71-1,00	1,00	8,22	8,22%	13,34%	86,66%
1,00-1,40	1,40	16,26	16,26%	29,60%	70,40%
1,40-2,00	2,00	22,37	22,37%	51,97%	48,03%
2,00-2,80	2,80	22,66	22,66%	74,63%	25,37%
2,80-4,50	4,50	15,55	15,55%	90,18%	9,82%
4,50-5,60	5,60	7,97	7,97%	98,15%	1,85%
5,60-8,00	8,00	1,54	1,54%	99,69%	0,31%
8,00-11,20	11,20	0,31	0,31%	100,00%	0,00%

Los resultados anteriores se representan gráficamente en la siguiente curva granulométrica que relaciona los porcentajes retenidos parciales y acumulados frente a la luz de la malla empleada en el tamizado:

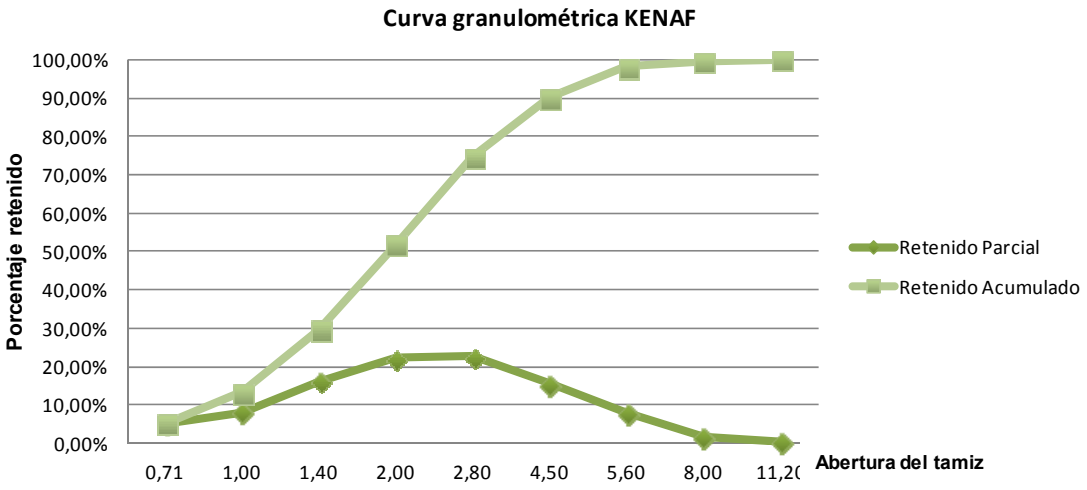


Figura 30. Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra KENAF

Al igual que ocurriera para el caso anterior, se aprecia una notable presencia de tamaños medios de partículas comprendidas entre 1,00 y 5,60 mm, con una distribución si cabe más homogénea que la del corcho. Este caso es un ejemplo de granulometría prácticamente continua si bien existe ausencia de tamaños superiores (en torno a los 11,20 mm) como consecuencia de la trituración de la fibra.

Al igual que en los dos casos anteriores procedemos a continuación a la determinación de los valores necesarios para proceder a la representación gráfica del modelo matemático RR a partir de los valores experimentales.

Tabla 48. Ajuste modelo RR para muestra KENAF

Intervalo (mm)	Luz malla (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)	$F(\phi)$	$ln(\phi)$	$ln\{-ln[1-F(\phi)]\}$
			Parcial (%)	Acum. (%)				
< 0,71	0,71	5,12	5,12%	5,12%	94,88%	0,051	-0,342	-2,946
0,71-1,00	1,00	8,22	8,22%	13,34%	86,66%	0,133	0,000	-1,944
1,00-1,40	1,40	16,26	16,26%	29,60%	70,40%	0,296	0,336	-1,047
1,40-2,00	2,00	22,37	22,37%	51,97%	48,03%	0,520	0,693	-0,310
2,00-2,80	2,80	22,66	22,66%	74,63%	25,37%	0,746	1,030	0,316
2,80-4,50	4,50	15,55	15,55%	90,18%	9,82%	0,902	1,504	0,842
4,50-5,60	5,60	7,97	7,97%	98,15%	1,85%	0,982	1,723	1,384
5,60-8,00	8,00	1,54	1,54%	99,69%	0,31%	0,997	2,079	1,754
8,00-11,20	11,20	0,31	0,31%	100,00%	0,00%	1,000	2,416	

La representación gráfica de los dos términos de la expresión 6 nos debe dar una línea recta tal y como hemos constatado para los dos materiales precedentes. Para el caso del kenaf el resultado es el que se muestra a continuación:

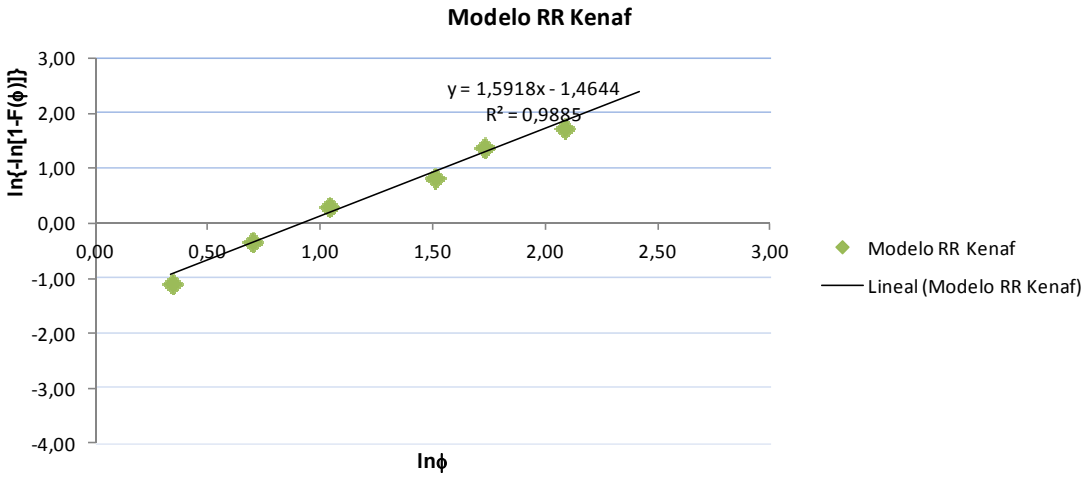


Figura 31. Ajuste de los datos experimentales modelo RR para muestra KENAF

De nuevo queda demostrada la idoneidad del modelo RR para la determinación de la función de distribución del tamaño de partícula de la muestra, al obtenerse una recta de pendiente m (de valor 1,5918) con una escasa dispersión en relación a los valores experimentales.

De forma similar a lo realizado para las muestras de neumático y corcho, se procede a la determinación de los parámetros de ajuste del modelo GGS con el fin de proceder a una nueva comparación. Para el caso del kenaf, los valores experimentales nos permiten obtener la información que se expone en la siguiente tabla:

Tabla 49. Ajuste modelo GGS para muestra KENAF

Intervalo (mm)	Luz malla (mm)	Retenido (g)	Retenidos		Pasa acum. (%)	$F(\phi)$	$log\ (\phi)$	$log\ F(\phi)$
			Parcial (%)	Acum. (%)				
< 0,71	0,71	5,12	5,12%	5,12%	94,88%	0,051	-0,149	-1,291
0,71-1,00	1,00	8,22	8,22%	13,34%	86,66%	0,133	0,000	-0,875
1,00-1,40	1,40	16,26	16,26%	29,60%	70,40%	0,296	0,146	-0,529
1,40-2,00	2,00	22,37	22,37%	51,97%	48,03%	0,520	0,301	-0,284
2,00-2,80	2,80	22,66	22,66%	74,63%	25,37%	0,746	0,447	-0,127
2,80-4,50	4,50	15,55	15,55%	90,18%	9,82%	0,902	0,653	-0,045
4,50-5,60	5,60	7,97	7,97%	98,15%	1,85%	0,982	0,748	-0,008
5,60-8,00	8,00	1,54	1,54%	99,69%	0,31%	0,997	0,903	-0,001
8,00-11,20	11,20	0,31	0,31%	100,00%	0,00%	1,000	1,049	0,000

La representación gráfica del logaritmo de F(∅) frente al logaritmo del tamaño de partícula ∅ nos da la siguiente figura:

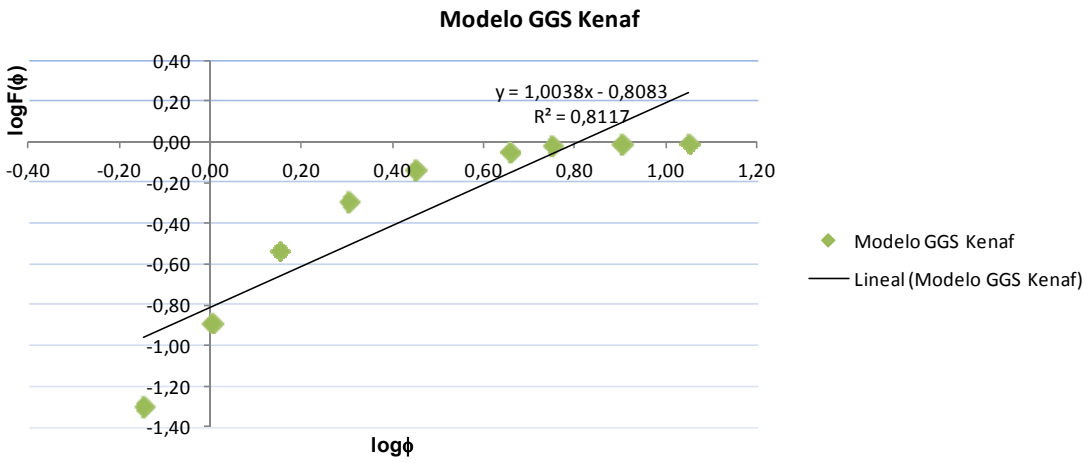


Figura 32. Ajuste de los datos experimentales modelo GGS para muestra KENAF

De nuevo se constata que existe una mayor dispersión en los resultados experimentales con la aplicación del método GGS frente al método RR por lo que será este último el que utilizaremos para la determinación de la función de distribución del tamaño de partícula en los tres materiales.

Aplicando el modelo matemático RR para el kenaf obtenemos la siguiente función de distribución del tamaño de partícula:

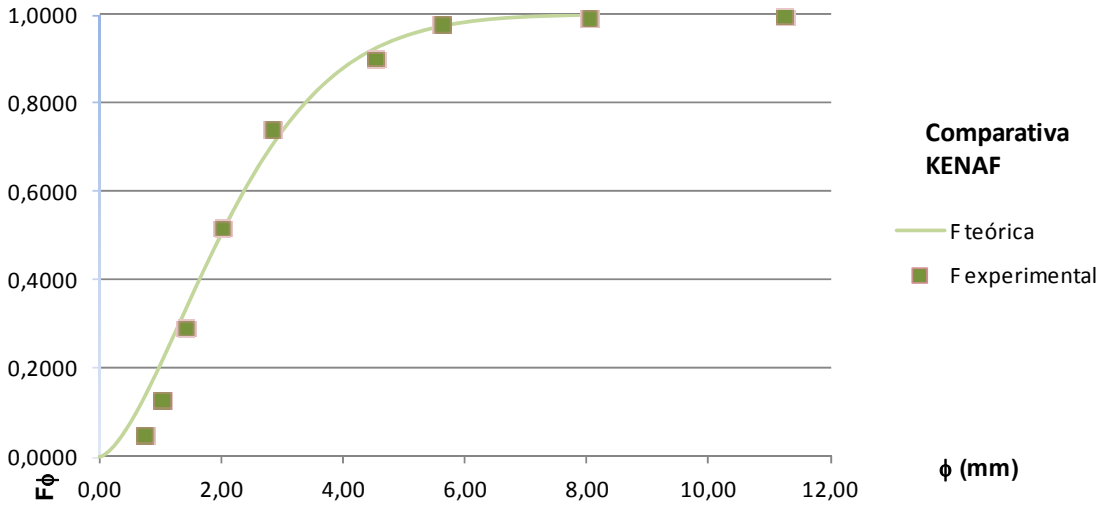


Figura 33. Función de distribución frente a tamaño de partícula modelo RR para muestra KENAF

03.01.04. RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Del estudio de los dos modelos matemáticos anteriores se desprende que el modelo de Rosin-Ramler (RR) proporciona un mejor ajuste a los valores experimentales de la curva de distribución de tamaño de partícula frente al obtenido por el método Gates-Gaudin-Shuhmann (GGS) en el que obteníamos una mayor dispersión en los resultados. En base a lo anterior, las funciones de distribución y densidad obtenidas aplicando el modelo RR serían las que se muestran a continuación:

NEUMÁTICO (NFU)

Los valores de ajuste que hemos obtenido de la gráfica anterior son los que se señalan a la derecha de este párrafo, por lo que las funciones de distribución y densidad aplicando el modelo RR para el neumático son las siguientes:

$y = mx + n$	
m	1,8464
n	-2,5510
$l = e^{(-n/m)}$	3,9813

$$F(\phi) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\phi}{3{,}98}\right)^{1{,}85}\right]$$

Expresión 109

$$f(\phi) = 0{,}14 \cdot \phi^{0{,}85} \exp\left[-\left(\frac{\phi}{3{,}98}\right)^{1{,}85}\right]$$

Expresión 110

La representación gráfica de la función densidad para el NFU sería la que se muestra a continuación:

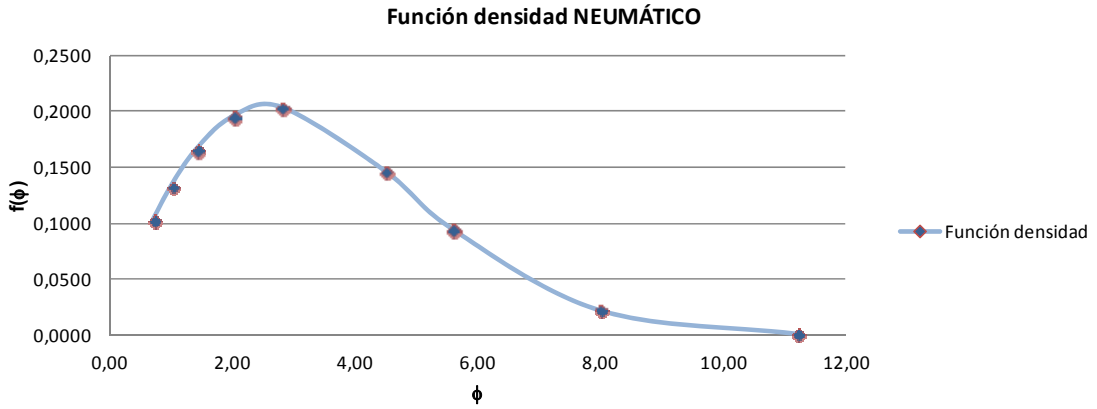


Figura 34. Función de densidad según el modelo RR para la muestra de NFU

CORCHO

Los valores de ajuste que hemos obtenido de la gráfica anterior son los que se señalan a la derecha de este párrafo, por lo que las funciones de distribución y densidad aplicando el modelo RR para el corcho son las siguientes:

y = mx + n	
m	1,8393
n	-2,3362
$l = e^{(-n/m)}$	3,5614

$$F(\phi) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\phi}{3{,}56}\right)^{1{,}84}\right]$$

Expresión 111

$$f(\phi) = 0{,}18 \cdot \phi^{0{,}84} \exp\left[-\left(\frac{\phi}{3{,}56}\right)^{1{,}84}\right]$$

Expresión 112

La representación gráfica de la función densidad para el corcho sería la que se muestra a continuación:

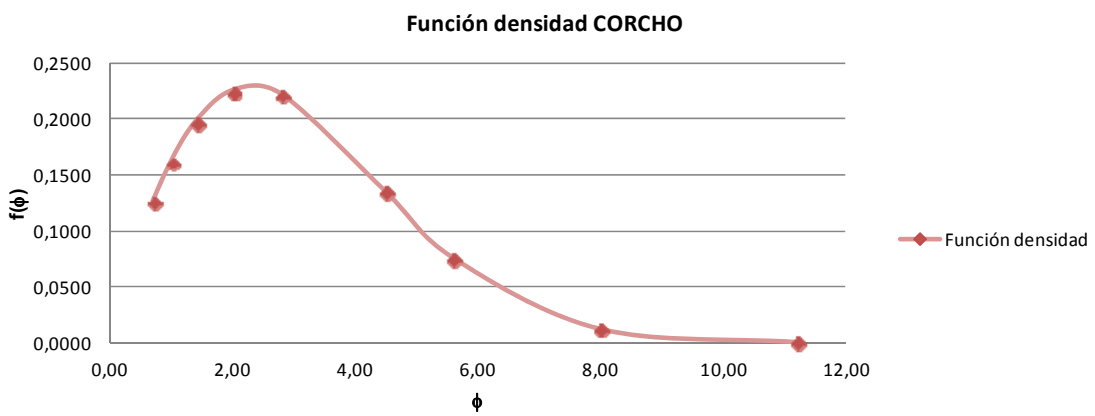


Figura 35. Función de densidad según el modelo RR para la muestra de CORCHO

KENAF

Los valores de ajuste que hemos obtenido de la gráfica anterior son los que se señalan a la derecha de este párrafo, por lo que las funciones de distribución y densidad aplicando el modelo RR para el kenaf son las siguientes:

y = mx + n	
m	1,5918
n	-1,4644
$l = e^{(-n/m)}$	2,5091

$$F(\phi) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\phi}{2{,}51}\right)^{1{,}59}\right]$$

Expresión 113

$$f(\phi) = 0{,}37 \cdot \phi^{0{,}59} \exp\left[-\left(\frac{\phi}{2{,}51}\right)^{1{,}59}\right]$$

Expresión 114

La representación gráfica de la función densidad para el kenaf sería la que se muestra a continuación:

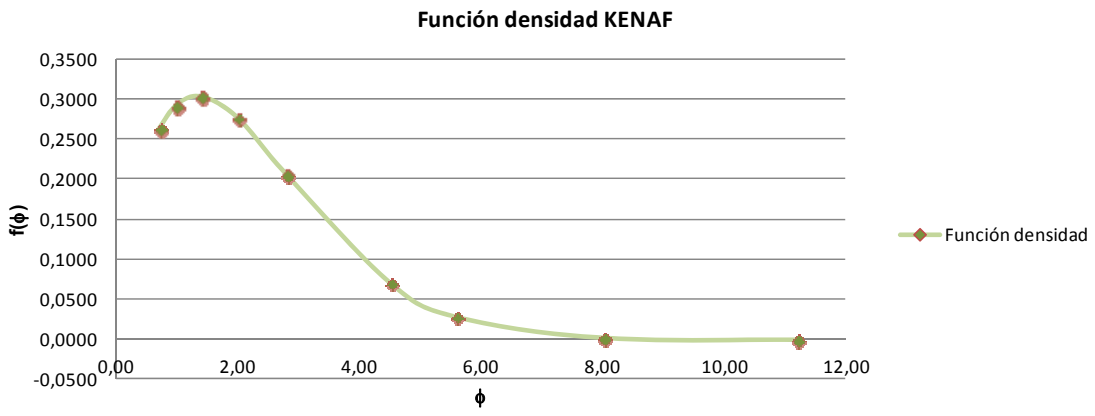


Figura 36. Función de densidad según el modelo RR para la muestra de KENAF

La aplicación de las expresiones anteriores a la curva de distribución de tamaño de partícula permite extrapolar, con fines exclusivamente estimativos, el porcentaje de muestra de tamaño de partícula diferente a otro dado en los puntos que no corresponden al sistema de tamizado empleado, lo que permite obtener información acerca de los extremos de la curva granulométrica de tamaños de partícula.

El uso del modelo de RR puede suministrar valiosa información para hacer un correcto uso de los tamaños de partícula y obtener muestras aglomeradas más homogéneas como consecuencia de buscar granulometrías continuas tanto para el neumático, el corcho o para el kenaf, con el fin de poder emplearlos con fines industriales.

Del estudio granulométrico realizado se puede deducir que existen unos tamaños de partícula más representativos en porcentaje de las diferentes muestras, que en

general coincidían en torno a los tamaños medios comprendidos entre los 2,00 mm y los 4,50 mm aproximadamente. Esta fracción granulométrica representa el 51,05% del peso total de la muestra para el neumático, el 52,01% para el corcho y algo menos, el 38,21% para el caso del kenaf, eligiéndose por tanto este intervalo por ser el que mejor se ajusta a los tres materiales al objeto de que los resultados pudiesen ser comparables. La fracción gruesa de los materiales según los resultados obtenidos representan el 27,19%, 21,51% y 9,82% para el neumático, corcho y kenaf respectivamente, mientras que la fracción fina de las muestras caracterizadas representa el 21,76%, el 26,48% y el 51,97% para los tres materiales respectivamente.

A la vista de este estudio se procede a la selección de tres diferentes series granulométricas tomando como referencia esos tamaños más representativos de las muestras. Las fracciones o intervalos granulométricos seleccionados para la fabricación de las muestras de neumático, corcho y kenaf son las que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 50. Intervalos granulométricos seleccionados

Material	Tamaño (mm)
Neumático	< 2,0 mm
Corcho	< 2,0 mm
Kenaf	< 2,0 mm
Neumático	2,0-4,5 mm
Corcho	2,0-4,5 mm
Kenaf	2,0-4,5 mm
Neumático	> 4,50 mm
Corcho	> 4,50 mm
Kenaf	> 4,50 mm

03.02. ESTUDIO TEXTURAL DE LOS MATERIALES DE PARTIDA

03.02.01. ISOTERMA DE ADSORCIÓN

La caracterización mediante isoterma de adsorción de gases de un material es una de las técnicas que mayor información nos aporta relativa a la estructura porosa del material en cuestión ya que no solo obtendremos valores de volúmenes de poros en función de su tamaño (microporos y mesoporos) sino que también podremos obtener otros parámetros importantes de cara a conocer la estructura porosa del material como son la superficie específica, S_{BET}, dimensión fractal, D, o la tortuosidad, τ.

Para la realización de este ensayo empleamos N_2 a -196 ºC por contar, tal y como se ha indicado en el apartado correspondiente a métodos experimentales, con buenas propiedades tanto en lo relativo a la estructura molecular, propiedades físicas, inercia química, etc que se exigen a un absorbato para ser considerado ideal [3].

Al realizar la caracterización obtuvimos las isotermas de los diferentes materiales ensayados que se muestran en la siguiente figura:

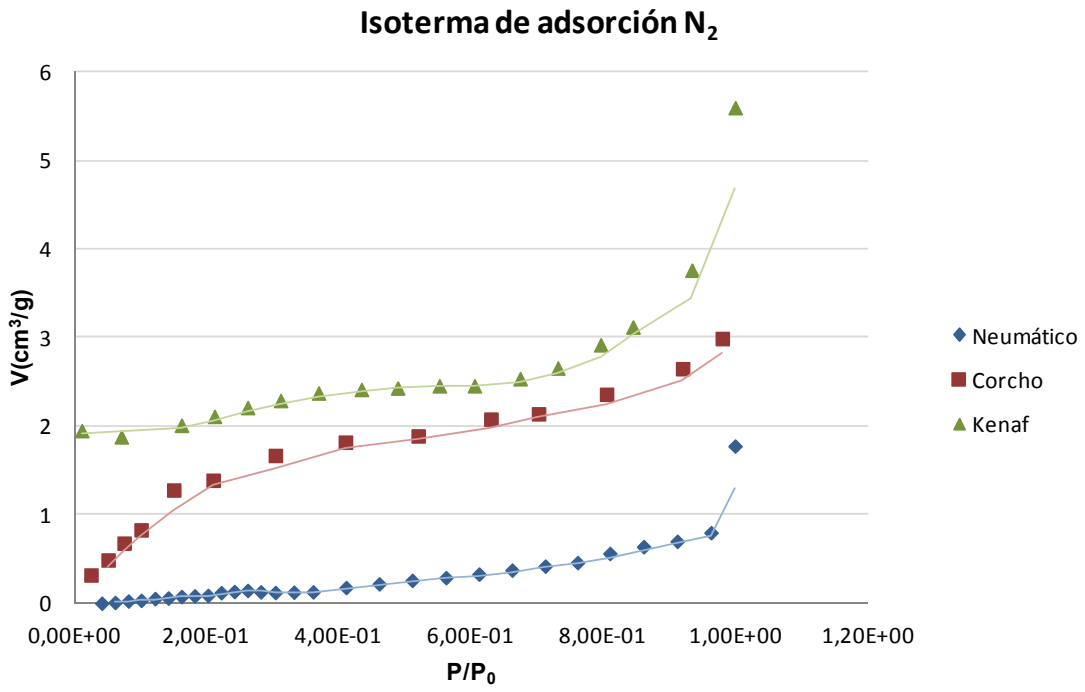


Figura 37. Resultados isotermas de adsorción de N_2 a -196ºC

A la vista de las isotermas que se representa en la figura anterior, lo primero que llama la atención es el hecho de que los valores de volumen de nitrógeno adsorbido es, en todos los casos, extremadamente bajo (inferior a 6 cm^3/g), lo que hace prever que los valores de superficie específica y volúmenes de micro y mesoporos serán también bajos. Dicho esto, para la interpretación de las isotermas nos basaremos en la propuesta realizada por Brunauer, Deming, Deming y Teller (BDDT) hace ahora casi setenta años[4] la cual suele aceptarse de forma casi unánime en la actualidad como la más adecuada. Esta propuesta como vimos cuenta con seis diferentes tipos de isoterma.

El neumático se adapta sensiblemente a una isoterma tipo III, la cual se caracteriza porque el calor de adsorción es inferior al calor de licuefacción del adsorbato. Como vimos, este tipo de isoterma es característico de sólidos no porosos o macroporosos. Para el caso del neumático y como complemento a lo observado en las anteriores técnicas de caracterización nos encontramos en el primer caso, esto es, se trata de un sólido poco poroso, especialmente a nivel de microporos y mesoporos.

El corcho presenta una isoterma asimilable a la tipo IV de la clasificación citada. Esta isoterma es típica de los adsorbentes mesoporosos y se caracteriza por que el aumento tan importante que se produce en la adsorción a valores de p/p_0 al punto de inflexión de la isoterma se relaciona con el fenómeno de condensación capilar. Esta conclusión coincide en cierta forma con los resultados obtenidos en las anteriores técnicas de caracterización por cuanto el volumen mayor de poros se han localizado en tamaños de meso y macroporos para este material.

Por último, el kenaf cuenta con una isoterma de adsorción muy similar al corcho por lo que podríamos considerar su clasificación dentro del tipo IV. No obstante lo anterior ofrece leves diferencias, especialmente en los primeros valores de P/P_0 donde se asemejaría a una isoterma tipo I característica de los sólidos microporosos. No en vano, el kenaf cuenta con un mayor volumen de microporos que los dos materiales precedentes, y levemente superior que el corcho para el caso de mesoporos y macroporos. Al igual que ocurre con los resultados de los dos materiales anteriores existe una coincidencia en la información facilitada por la isoterma en relación a la información de la porosidad obtenida mediante otras técnicas de caracterización.

Los valores obtenidos para los diferentes materiales con esta técnica de caracterización textural son los siguientes:

Tabla 51. Resultados isotermas de adsorción de N_2 a -196ºC

Muestra	V_{mi} (cm^3/g)	V_{me} (cm^3/g)	S_{BET} (m^2/g)	D	τ
Neumático	0,000	0,001	0,01	2,5	1,2
Corcho	0,001	0,003	6,59	2,7	2,9
Kenaf	0,003	0,006	7,51	2,3	2,2

A la vista de los resultados mostrados en la tabla anterior se observa que el neumático es el que menor superficie específica tiene de los tres materiales (S_{BET}) de lo que se deduce que el neumático es un material prácticamente no poroso. El valor bajo de tortuosidad (τ) nos muestra que los poros que presenta el neumático son superficiales y poco profundos. Por último, el valor de la dimensión fractal (D) con la que cuenta el neumático nos indica que la superficie externa es muy rugosa, previsiblemente como consecuencia del efecto del sistema de trituración y molienda ya que, al tratarse de un material elástico, es posible que se produzcan arranques bruscos de materiales durante ese procedimiento. Esta rugosidad superficial es susceptible de favorecer la porosidad interparticular mejorando con ello la absorción acústica del material aglomerado.

En segundo lugar el corcho presenta una superficie específica (S_{BET}) muy superior al neumático. Este hecho, junto a la mayor tortuosidad (τ) en el interior de los poros está relacionada con la estructura del corcho, caracterizada como sabemos por un entramado celular abierto, lo cual ha justificado su tradicional empleo como material de revestimiento para correcciones acústicas. La dimensión fractal (D) presenta un valor muy similar al neumático y la justificación de éste, al igual que en el caso anterior, puede deberse a la naturaleza elástica de este material y a los procesos de trituración y molienda previos que se realizan.

Por último el kenaf es el material de partida que presenta en general un mejor desarrollo poroso, contando con una mayor superficie específica (S_{BET}). De los parámetros texturales obtenidos, llama la atención el valor de la tortuosidad (τ) próximo a 2, (2,30) lo que puede considerarse indicativo de que este material presenta poros de geometría cilíndrica al contrario que los anteriores. La dimensión fractal (D) relacionada con la rugosidad superficial, es menor que la de los anteriores materiales

como consecuencia de la menor elasticidad de éste y de la naturaleza de la superficie de sus poros.

En otro orden de cosas, con el objeto de profundizar en mayor medida sobre lo expuesto anteriormente se pueden aplicar los métodos de Horvath-Kawazoe (HK) y DFT, a los resultados obtenidos de la isoterma.

Tal y como se expuso en el apartado de métodos experimentales el método HK [5,6] permite obtener una distribución de la porosidad del sólido en las zonas de los microporos a partir de la región de bajas presiones relativas de la isoterma de adsorción.

No obstante lo anterior, uno de los principales métodos que sirve como alternativa al HK es el método DFT[7] el cual proporciona información de la distribución de la porosidad del sólido en las zonas de los microporos y de los mesoporos estrechos. Tanto la mayor versatilidad como la mayor cantidad de información facilitada por este segundo método hace que éste sea más ampliamente aceptado y empleado. En el presente trabajo se ha optado por proceder a la representación gráfica únicamente según este segundo método por los motivos anteriormente expuestos.

La representación gráfica empleando este método en el cual se obtiene el ancho de poro para los tres materiales caracterizados es la que se muestra en la siguiente figura en la que se corrobora el escaso desarrollo poroso que presentan las tres muestras. Además e pone de relieve que el neumático prácticamente carece de poros de ese intervalo de tamaños (microporos y mesoporos estrechos) y que, por tanto en esta zona, este material puede ser considerado como virtualmente no poroso, cuestión ésta que coincide con los resultados obtenidos con otras técnicas de caracterización.

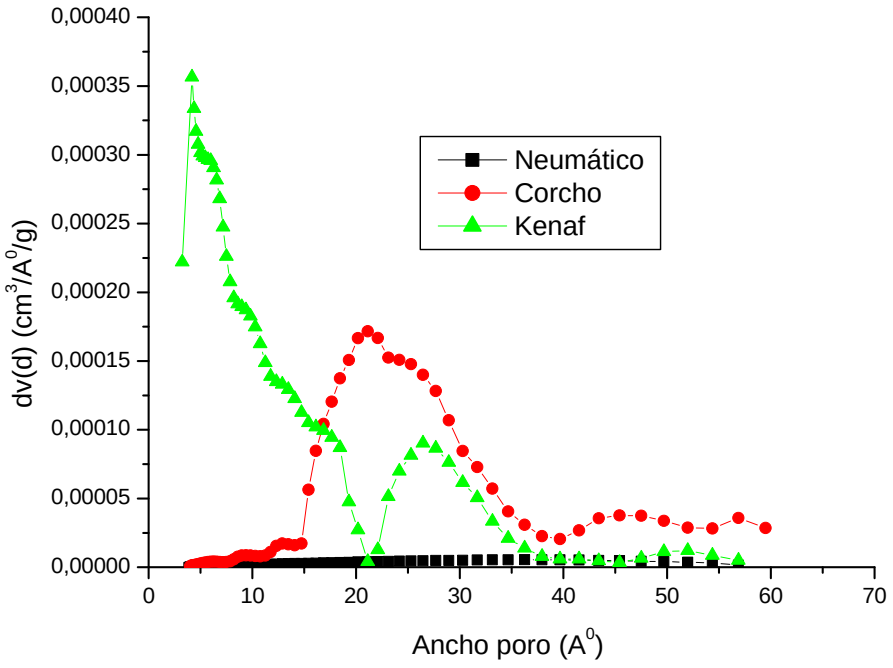


Figura 38. Distribución de tamaño de poros por aplicación del método DFT

En segundo lugar para el corcho, considerando que cuando indicamos "ancho de poro" en el eje de abscisas nos referimos a "diámetro de poro", su microporosidad (indicada por el volumen acumulado hasta un tamaño de poro de 20 Å) es muy escasa, apareciendo un incipiente desarrollo de los microporos más anchos y de los mesoporos. El hecho de que la distribución de tamaño de poros quede abierta en su parte final, es decir, que no llegue a hacerse cero el volumen diferencial, apunta a que existirá una cierta contribución de los mesoporos más anchos y macroporos.

Por último, el kenaf parece mostrar la distribución más amplia de tamaños de poro, lo que se corresponde con una mayor apertura del "codo" de la isoterma de adsorción de nitrógeno representada anteriormente. La figura muestra una contribución más notable de la microporosidad, si bien se observa igualmente un cierto desarrollo de la mesoporosidad más estrecha. Los mesoporos medianos no parecen contribuir de forma apreciable a la porosidad de esta muestra.

03.02.02. POROSIMETRÍA DE MERCURIO

Tal y como se indicó en el apartado de métodos experimentales la porosimetría de mercurio es una técnica que permite obtener información sobre la porosidad y distribución de la misma de un sólido en las zonas de macroporos (tamaño superior a 500 Å) y mesoporos (tamaño comprendido entre 20 y 500 Å), hasta un valor de radio que depende de la presión que pueda aplicarse en el porosímetro.

Se caracterizaron las muestras de neumático, corcho y kenaf obteniendo resultados relativos al Volumen Acumulado de Poros (VAP). Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica:

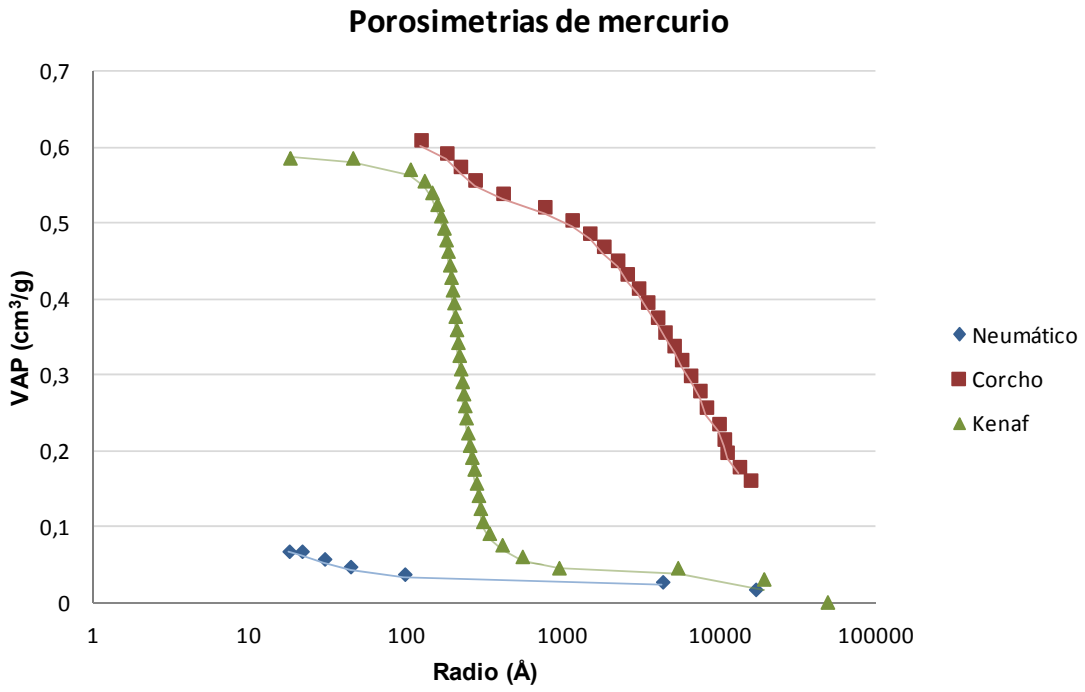


Figura 39. Resultados porosimetrias de mercurio

A partir de la gráfica anterior, se puede deducir que el neumático es un material con un muy escaso desarrollo de la porosidad (tanto en meso como macroporos). Por su parte, el corcho muestra en su representación de VAP frente a radio de poro dos zonas de pendiente elevada. La primera de ellas se sitúa en la zona de los mesoporos más anchos y la segunda, incluso más marcada, en la zona de los macroporos. Finalmente, el kenaf se revela como un absorbente de marcada mesoporosidad. Todo ello se ve corroborado a la vista de los valores de volúmenes de poros que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 52. Resultados porosimetrias de mercurio

Muestra	V_{me-p} (cm^3/g)	V_{ma-p} (cm^3/g)
Neumático	0,04	0,03
Corcho	0,08	0,56
Kenaf	0,37	0,22

A la vista de los resultados mostrados en la tabla anterior se pone de manifiesto que el neumático es, de los tres materiales, el menos poroso, tanto en lo relativo al volumen de mesoporos como al volumen de macroporos, por lo que las propiedades acústicas estarán basadas fundamentalmente en la porosidad intergranular de la muestra aglomerada siendo escasa la componente porosa intrínseca del material. Todo ello sin perjuicio de los resultados en lo relativo a volumen de microporos que en el próximo apartado se expondrán.

En lo relativo a los resultados obtenidos para el corcho, se observa como cuenta con un mayor volumen de mesoporos que el neumático. No obstante la mayor peculiaridad de este material es la existencia de una notable presencia de macroporos (aquellos con tamaño comprendido entre 2 y 50 nm) que puede tener su justificación en las características de su entramado celular tal y como se explicó en capítulos anteriores.

Por último como ya se ha indicado, el kenaf muestra un importante desarrollo mesoporoso frente a los dos materiales precedentes, contando igualmente con una componente notable macroporosa, lo cual es susceptible de favorecer las propiedades de absorción acústica de este material.

03.02.03. DENSIDADES POR DESPLAZAMIENTO DE HELIO Y MERCURO

Las densidades por desplazamiento de helio y mercurio nos dan información acerca de la densidad aparente y real de un sólido de forma global, sin arrojar más información acerca del mayor o menor tamaño con el que cuenta la estructura porosa de ese material, cuestión importante a tener en cuenta.

La diferencia entre la determinación de la densidad de helio y mercurio reside en que el primero cuenta con un tamaño atómico (2,6 Å) más pequeño que el segundo y que, por tanto, puede acceder a poros de menores dimensiones dando una cifra más precisa de la porosidad del absorbente que en el caso del mercurio cuanto menor sea

su entramado poroso. En la siguiente tabla se muestran los resultados de las densidades en función de cada técnica utilizada así como el valor del volumen total de poros existente en el material.

Tabla 53. Densidades por desplazamiento de helio y mercurio

Muestra	ρ_{Hg} (g/cm^3)	ρ_{He} (g/cm^3)	V_T (cm^3/g)
Neumático	1,07	1,17	0,08
Corcho	1,06	1,18	0,10
Kenaf	1,02	1,20	0,15

Tal y como puede observarse tanto corcho como kenaf son relativamente los dos materiales más porosos, especialmente este último, lo cual es susceptible de influir en un mejor comportamiento absorbente al contar con una mayor superficie para la disipación de energía. El neumático por contra es el menos poroso de los tres por lo que la porosidad intergranular del material aglomerado deberá jugar un papel muy importante de cara al comportamiento acústico de este material.

03.02.04. POROSIDAD TOTAL Y VOLUMEN TOTAL DE POROS

Resultado de la aplicación de las dos técnicas de caracterización anteriores se resumen los resultados globales de porosidad de los distintos materiales en la siguiente tabla, así como la indicación de los parámetros texturales analizados.

Muestra	V_{mi} (cm^3/g)	V_{me} (cm^3/g)	V_{me-p} (cm^3/g)	V_{ma-p} (cm^3/g)	S_{BET} (m^2/g)	D	τ
Neumático	0,000	0,001	0,04	0,03	< 1	2,5	1,2
Corcho	0,001	0,003	0,08	0,56	7	2,7	2,9
Kenaf	0,003	0,006	0,37	0,22	8	2,3	2,2

Tabla 54. Resumen porosidad de de lo diferentes materiales

Tal y como puede deducirse de la anterior tabla el material más poroso de los caracterizados en términos globales es el kenaf, contando con un cierto desarrollo poroso tanto a nivel de mesoporos como de macroporos. Le sigue el corcho, el cual destaca fundamentalmente en el desarrollo de una estructura macroporosa previsiblemente como consecuencia de su estructura celular. El material menos poroso de los tres es el neumático, el cual muestra una casi total ausencia de poros a nivel de mesoporos y macroporos. No obstante, los valores texturales, especialmente

el relativo a su dimensión fractal, hacen pensar que este material puede favorecer unas adecuadas condiciones de absorción como muestra aglomerada.

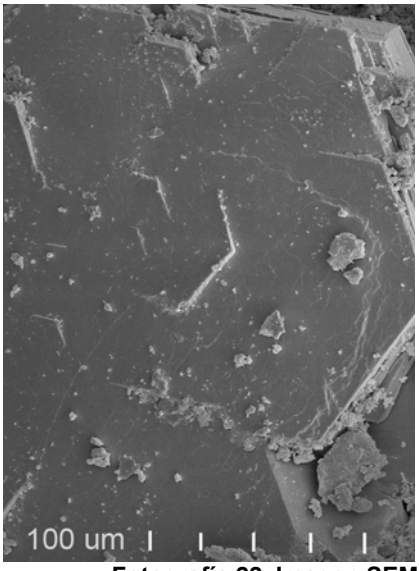
03.02.05. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

La microscopía electrónica de barrido, SEM (por su acrónimo inglés *Scanning Electron Microscope*), tal y como se ha indicado en el apartado de métodos experimentales está indicada principalmente para la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, aportando información acerca de la textura, tamaño y forma del material analizado.

Como se indicó en el apartado anterior, muchos de los resultados obtenidos mediante las técnicas de porosimetría y adsorción de N_2 se justifican o corroboran observando qué es lo que ocurre en los poros que están abiertos en el exterior.

La SEM no permite estudiar la superficie interna de estos sólidos porosos. Sin embargo, la aplicación de esta técnica aporta una información complementaria sobre la porosidad, en especial la relativa a la fracción de los poros existentes en el sólido que están abiertos al exterior.

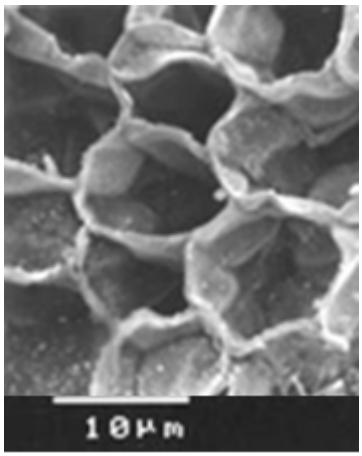
NEUMÁTICO



Fotografía 22. Imagen SEM del neumático

Tal y como se puede observar en la fotografía adjunta, apenas existen poros en este material tal y como corrobora el estudio textural. Se observan, no obstante, unas roturas angulosas presumiblemente como consecuencia del desgarro en el proceso de triturado por tratarse de un material elástico. También se observan formaciones a modo de "laminillas" que pueden compartir el mismo origen. Estas formas angulosas son susceptibles de generar una mayor porosidad interpartícula en el material aglomerado.

CORCHO



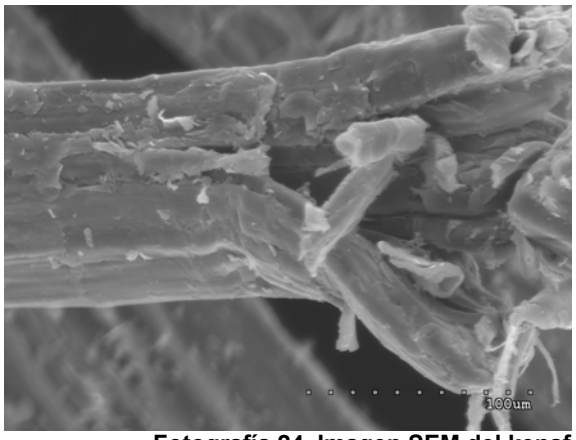
Fotografía 23. Imagen SEM del corcho

En la SEM de este material se puede observar de forma nítida la estructura de celdillas formada por lagunas poliédricas semejantes a la cédulas de un panal que el inglés Robert Hooke describiera en su libro Micrographia[8] en el año 1665. Las paredes que conforman dichas cédulas contribuyen a la elasticidad de este material susceptible de generar superficies rugosas en el proceso de molienda lo que justificaría los valores de dimensión fractal.

Una de las cuestiones más relevantes que se extraen de la anterior imagen SEM es la elevada superficie en relación a su peso con la que cuenta este material lo cual no se traduce solo en una baja densidad sino que además permite contar con una mayor superficie porosa y por lo tanto absorbente en relación a otros materiales.

KENAF

En la imagen SEM del kenaf se pone de manifiesto la elevada porosidad que presentan las fibras de este material, lo cual coincide con los resultados obtenidos en la caracterización realizada tanto por porosimetrías de Hg como mediante adsorción de N_2. Esta porosidad se asocia a roturas en las fibras lo cual se ve favorecido adicionalmente por el proceso previo al que fueron sometidas.



Fotografía 24. Imagen SEM del kenaf

En la imagen se aprecian cilindros en la formación de la estructura de este material fibroso, lo cual confirma el valor de la tortuosidad de valor próximo a 2 característico de materiales con poros de geometría cilíndrica.

Otra cuestión a tener en cuenta es la ordenación aleatoria de las fibras, que tal y como puede observarse en la anterior SEM contrasta con el esquema de celdas ordenadas del corcho. La observación realizada mediante la técnica SEM aporta información adicional susceptible de abrir un nuevo campo de investigación en la absorción acústica tratando de preparar materiales compuestos o aglomerado de kenaf utilizando las fibras orientadas.

03.03. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

03.03.01. ELECCIÓN DEL VOLUMEN DE AGLOMERANTE

Una vez seleccionados los intervalos granulométricos en función del estudio de las fracciones granulométricas presentes en los diferentes materiales, realizado el estudio textural obteniendo información acerca de la porosidad y antes de proceder a la preparación definitiva de las muestras que se caracterizarán acústicamente en el tubo de impedancia o tubo de Kundt, fue necesario estudiar el volumen de aglomerante que se debería aplicar para la obtención de dichas probetas de ensayo.

Como factor determinante para la elección del volumen de aglomerante se ha tenido en cuenta el menor valor de éste que proporcione unas propiedades mecánicas adecuadas con el fin de obtener el máximo volumen de poros interpartícula a la vez que optimizar económicamente el procesado de este tipo de materiales aglomerados. Hay que tener presente que los materiales aglomerados reciclados que se desean fabricar no van a tener carácter estructural, sino que su fin último será su utilización como material de revestimiento (principalmente en el interior de salas si bien es susceptible de poder utilizarse en otras aplicaciones) empleados como potenciales absorbentes acústicos en el interior de recintos. Es por ese motivo por el que las propiedades mecánicas de estos materiales pasan a un segundo plano respecto a sus propiedades acústicas.

Se han considerado adecuadas para estos materiales características mecánicas que permitan la autosustentación del mismo al objeto de que pueda utilizarse como elemento constructivo de revestimiento interior de salas, a la vez que garantice una mínima durabilidad evitando la degradación del mismo o la falta de desgrane del material al roce de la mano.

Un factor importante a tener en cuenta por tanto es la cantidad de aglomerante que debe ser añadido a cada material, considerando que debe permitir una buena adhesión entre las partículas por un lado y no obstruir la porosidad interpartícula por otro. Tras una serie de ensayos en blanco se determinó que las cantidades de aglomerante debían variar según el tamaño de partícula; de tal forma que para tamaños más pequeños, se necesitaba mayor cantidad de aglomerante ya que

presentaban mayor superficie de contacto, efecto éste contraproducente en relación con la porosidad ya que se cubren en mayor proporción la porosidad.

El grado de adherencia fue estudiado para las diferentes muestras con las distintas fracciones granulométricas indicadas en apartados anteriores. Para cada una de ellas se procede a emplear una determinada cantidad de ligante y comprobar el resultado de su resistencia a tracción. Dada la gran cantidad de variables en este ensayo de caracterización (tipo de material, fracción granulométrica, cantidad y tipo de ligante) se expone a continuación únicamente un breve resumen de los resultados obtenidos para los ligantes cola y poliuretano como más representativos, empleando una metodología similar para el resto de aglomerantes.

Fotografía 25.
Shimadzu modelo AG-IS

Para la realización de este ensayo de resistencia mecánica se empleó una maquina de ensayos universal (modelo AG-IS 10kN de la marca Shimadzu) que se muestra en la fotografía 25. Las probeta ensayadas eran análogas a la que se puede ver en la fotografía 26. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Fotografía 26.
Probeta ensayo a tracción

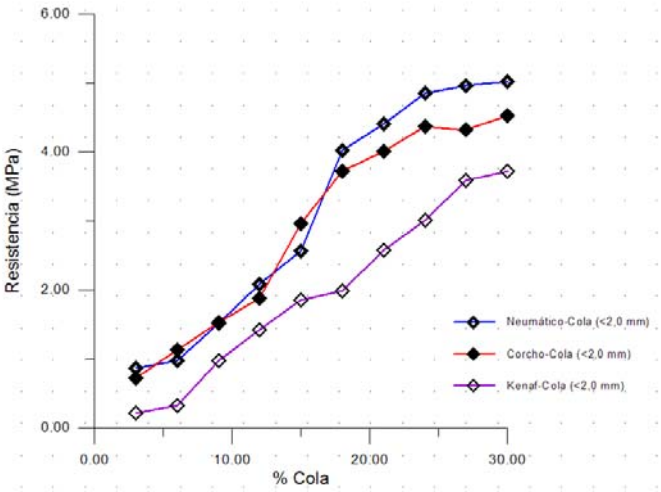


Figura 40. Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano de <2 mm frente al porcentaje de COLA.

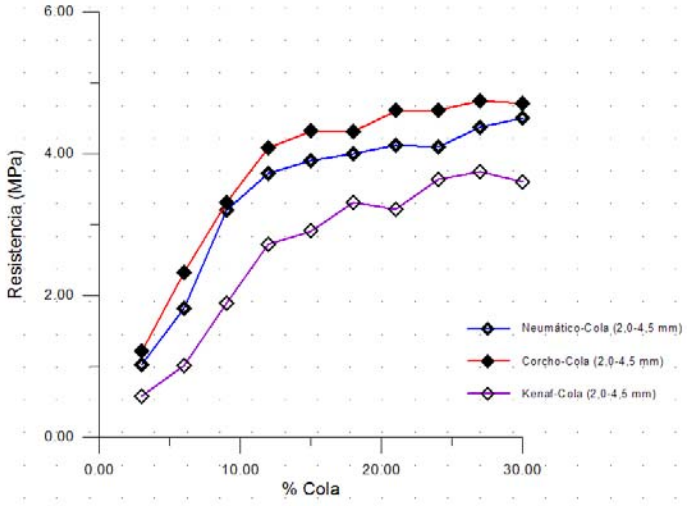


Figura 41. Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano entre 2-4.5 mm frente al porcentaje de COLA.

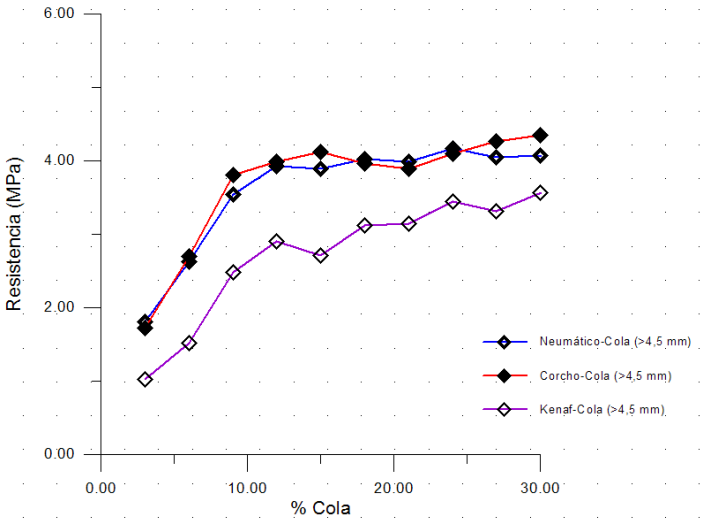


Figura 42. Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano de >4.5 mm frente al porcentaje de COLA.

A la vista de las figuras anteriores se pone de manifiesto que el comportamiento de resistencia mecánica aumenta al incrementar la cantidad de ligante de manera más acusada en los valores iniciales de cola y posteriormente el aumento es mucho menor.

Sin embargo, al aumentar el volumen de aglomerante, especialmente en fracciones granulométricas de menor tamaño, previsiblemente se reducirá la porosidad interpartícula con lo cual empeorará el comportamiento acústico del material, cuestión ésta que deberá ser demostrada con el correspondiente ensayo de caracterización

acústica. Por ese motivo se han seleccionado los volúmenes de ligante de tal forma que queden en la zona de transición entre la de crecimiento rápido y lento de la resistencia mecánica del material.

Los volúmenes de aglomerante cola que presentaban mejor comportamiento según los resultados de la caracterización de resistencia a tracción anterior se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 55. Porcentaje óptimo de aglomerante COLA para las distintas muestras.

Material	Tamaño (mm)	Aglomerante (%)
Neumático	< 2mm	20%
Corcho	< 2 mm	20%
Kenaf	< 2 mm	20%
Neumático	2,0-4,5 mm	10%
Corcho	2,0-4,5 mm	10%
Kenaf	2,0-4,5 mm	10%
Neumático	> 4,5 mm	7%
Corcho	> 4,5 mm	7%
Kenaf	> 4,5 mm	7%

Al igual que en el caso anterior, se procede a la determinación de la resistencia mecánica a tracción de las muestras con otro tipo de aglomerante, en este caso el poliuretano. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que es necesario un aumento de adhesivo para mejorar las propiedades del material a temperatura de 100 ºC, aumento que es mayor cuanto menor es el tamaño de partícula.

Además, al disminuir el tamaño de partícula, la superficie a cubrir del material aumenta por lo que el adhesivo no es capaz, para un porcentaje fijo, de cubrir la totalidad de la superficie, para lo cual se hacen también ensayos complementarios de caracterización como el que se muestra en la siguiente figura:

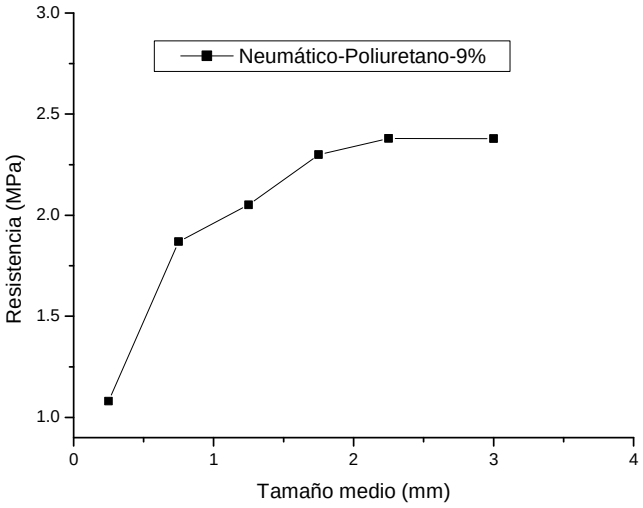


Figura 42. Variación de la resistencia del material con el tamaño de partícula para un porcentaje de poliuretano del 9% y transformado a 100 ºC y presión constante.

En la gráfica anterior se pone de manifiesto como, para un porcentaje fijo de ligante a base de poliuretano (en este caso un 9% de la muestra), la resistencia crece hasta los aproximadamente 2 mm de tamaño medio de partícula a partir del cual la cantidad de aglutinante deja de ser importante. En los tamaños más pequeños la resistencia es menor debido a que el poliuretano no es capaz de cubrir la totalidad de la superficie de las partículas, no produciéndose una adecuada adhesión entre las mismas.

Otro tipo de ensayo de resistencia realizado con el fin de determinar la cantidad óptima de poliuretano en función del tamaño de partícula es el que se muestra en la siguiente gráfica, similar al realizado con la muestra de cola. Este ensayo nos permite calcular el valor óptimo del ligante para obtener unas adecuadas prestaciones mecánicas.

En la representación de la variación del porcentaje de adhesivo frente a la resistencia se observa el siguiente comportamiento.

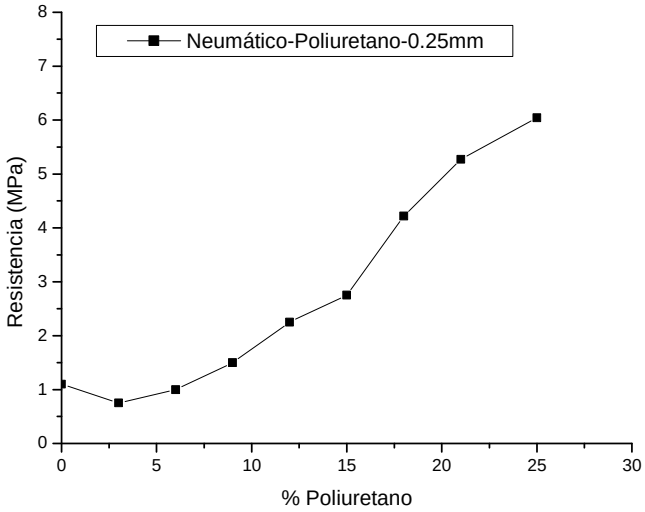


Figura 43. Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano de 0.25 mm variando el porcentaje de poliuretano prensado a 100º C.

En la anterior figura al igual, que ocurría con la cola, se observa un crecimiento lineal de la resistencia con el porcentaje de adhesivo, siendo necesario alcanzar valores del 12% aproximadamente de poliuretano para encontrar valores de resistencia similares al aglomerado formado por grano más grueso.

La utilización de poliuretano, al igual que ocurría con la cola como aglomerante, no es efectiva para tamaños de granos pequeños, obteniendo resultados poco satisfactorios en cuanto a cohesión del material. No obstante, si el proceso se realiza a temperatura suficiente y presión adecuada, nos encontramos con que se produce un proceso de sinterizado que permite a priori obtener un material con buenas cualidades mecánicas.

La metodología utilizada para los dos aglutinantes anteriores se empleó para el resto de adhesivos o ligantes, caracterizándolos en función de la fracción granulométrica observando cuál era la cantidad óptima de ligante a añadir para obtener unas adecuadas propiedades mecánicas. El resultado de estos ensayos se omite por simplicidad documental si bien en el siguiente apartado se muestran los volúmenes óptimos de aglomerantes obtenidos para la fabricación de cada una de las muestras.

03.01.02. ELECCIÓN DE LAS MUESTRAS

A la vista de los resultados de resistencia obtenidos en el apartado anterior se realizan muestras de distinta granulometría aglomeradas con diferente cantidad de ligante

abarcando un gran número de variables posibles en cuanto a mezcla de los tres materiales tal y como se ha definido en el apartado 02.02.02.02. del presente trabajo.

Tabla 56. Cantidad de aglomerante utilizado I

	CANTIDAD DE AGLOMERANTE UTILIZADO											
Descripción	COLA			ESCAYOLA			FETADIT			GOMA-LACA		
	CO1	CO2	CO3	ES1	ES2	ES3	FE1	FE2	FE3	GL1	GL2	GL3
	(ml)	(ml)	(ml)	(g)	(g)	(g)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)
Co100	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
Co75-K25	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
Co50-K50	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
Co25-K75	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
K100	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
K75-Ne25	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
K50-Ne50	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
K25-Ne75	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
Ne100	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
Ne25-Co75	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
Ne50-Co50	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36
Ne75-Co25	30	45	60	162	189	216	12	16	24	12	24	36

Tabla 57. Cantidad de aglomerante utilizado II

	CANTIDAD DE AGLOMERANTE UTILIZADO								
Descripción	LIGN-ALCALI			TEROKAL			POLIURETANO		
	LGA1	LGA2	LGA3	TE1	TE2	TE3	PO1	PO2	PO3
	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)
Co100	36	48	60	12	16	20	6	12	24
Co75-K25	36	48	60	12	16	20	6	12	24
Co50-K50	36	48	60	12	16	20	6	12	24
Co25-K75	36	48	60	12	16	20	6	12	24
K100	36	48	60	12	16	20	6	12	24
K75-Ne25	36	48	60	12	16	20	6	12	24
K50-Ne50	36	48	60	12	16	20	6	12	24
K25-Ne75	36	48	60	12	16	20	6	12	24
Ne100	36	48	60	12	16	20	6	12	24
Ne25-Co75	36	48	60	12	16	20	6	12	24
Ne50-Co50	36	48	60	12	16	20	6	12	24
Ne75-Co25	36	48	60	12	16	20	6	12	24

Cabe reiterar que en la tabla anterior los volúmenes de mayor aglomerante (CO3, ES3, FE3...) se refieren a las fracciones granulométricas de menor tamaño (inferiores a 2 mm) que requieren una mayor cantidad de ligante para poder garantizar unas mínimas condiciones mecánicas según el ensayo de caracterización expuesto en el

apartado anterior. De manera inversa, las referencias con menor cantidad de aglomerante (CO1, ES1, FE1...) corresponden a la fracción granulométrica con tamaños de partícula mayores según el proceso de tamizado descrito, que requieren una menor cantidad de ligante al contar con una menor relación de superficie respecto del volumen de la probeta.

De la tabla anterior se deduce que se han estudiado un total de doce variables en cuanto a composición de los materiales de partida en diferentes porcentajes; tres tipos diferentes de fracciones granulométricas, las cuales implican una dosificación diferente en el tipo de aglomerante empleado; y siete tipos diferentes de ligantes. Ello arroja un total 252 probetas a fabricar que serán caracterizadas mediante la determinación de su coeficiente de absorción acústica.

En base a las cantidades de materias primas, sus granulometrías mayoritarias tras el triturado y tamizado, las características de aprovechamiento económico de los residuos (fundamentalmente de los residuos de corcho) y la posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas de los aglomerados sin disminuir en demasía la porosidad intergranular, se ha decidido realizar los ensayos para las muestras con un espesor constante de 71,5mm.

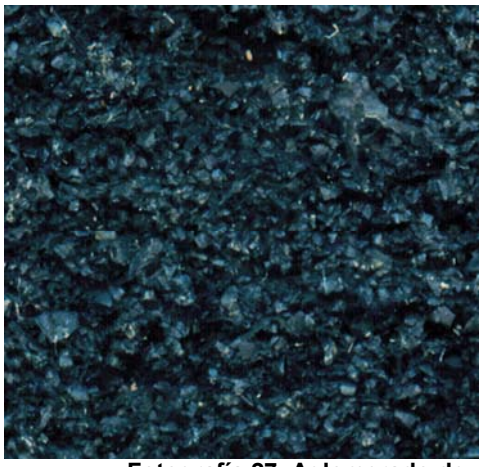
03.01.03. MICROSCOPÍA ÓPTICA

Se han preparado una serie de probetas cuyo modo de fabricación y características vienen descritos en el capítulo anterior. Para comprobar el grado de compactación y adherencia del aglomerante se sometieron las muestras a microscopía óptica.

Primeramente se procedió a estudiar el grado de aglomeración y compactación de los materiales monocomponentes para, de este modo, poder establecer estudios comparativos cuando se proceda al aglomerado bicomponente. De especial interés será poner en correlación los resultados obtenidos en la caracterización acústica de estas muestras con la porosidad observada interpartícula a través de la microscopía óptica, cuestión ésta que se realizará en el apartado correspondiente.

MUESTRAS MONOCOMPONENTES

En las siguientes fotografías se muestran los resultados de la observación a través del microscopio óptico de algunas de las muestras monocomponentes con diferentes tamaños de partícula y por tanto con diferente necesidad de aglomerante.



Fotografía 27. Aglomerado de neumático < 2,0 mm

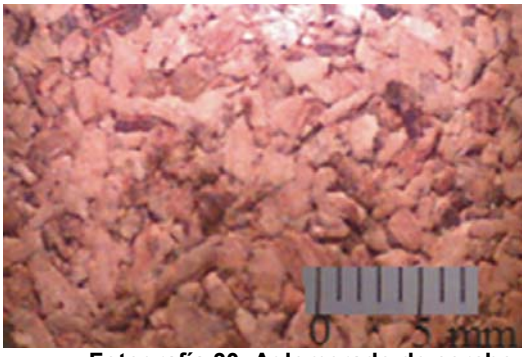
Fotografía 28. Aglomerado de neumático 2,0-4,5 mm

Fotografía 29. Aglomerado de neumático > 4,5 mm

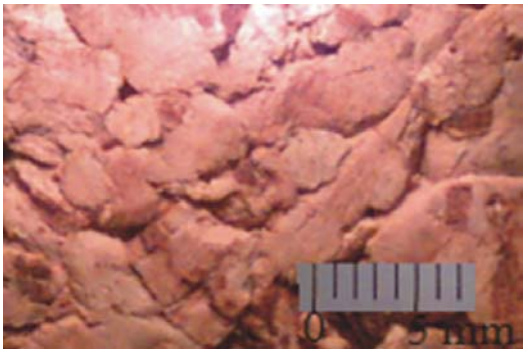
En las fotografías anteriores, resultado de la microscopía óptica realizada a muestras de neumático aglomeradas con cola, se puede observar como el grado de compactación aumenta conforme disminuye el tamaño de partícula, disminuyendo en estos casos la porosidad interpartícula que será una de las variables que contribuya al resultado final del coeficiente de absorción acústica del material aglomerado. En aquellas muestras con un tamaño de partícula mayor (> 4,50 mm), tal y como se ha expuesto anteriormente, la cantidad de ligante es menor para obtener una adecuada resistencia mecánica.

Una menor cantidad de ligante para la muestra aglomerada implica que éste cubre en menor medida la porosidad del material caracterizada en apartados anteriores por lo que, presumiblemente, las muestras aglomeradas con mayor tamaño de partícula contarán con una importante contribución tanto de la porosidad del propio material de

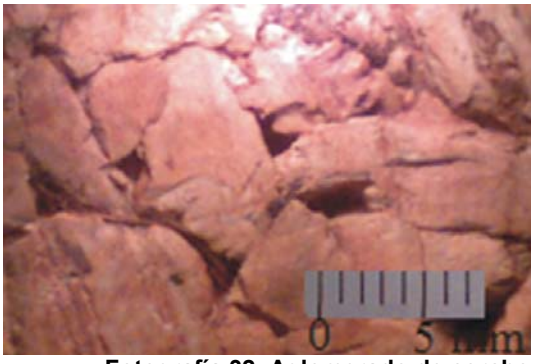
partida como interpartícula del material aglomerado. Para el primer caso jugará presumiblemente además un papel importante el tipo de aglomerante utilizado.



Fotografía 30. Aglomerado de corcho < 2,0 mm



Fotografía 31. Aglomerado de corcho 2,0-4,5 mm



Fotografía 32. Aglomerado de corcho > 4,5 mm

Al igual que hemos podido observar para la muestras de neumático, en el caso de corcho aglomerado con cola podemos observar un mayor grado de compactación conforme más pequeño es el tamaño de partícula. Así, para la muestra aglomerada con cola con un tamaño de partícula inferior a 2,0 mm, la compactación es máxima en relación con el resto de muestras, contando además con una mayor proporción de volumen de aglomerante tal y como se ha justificado en el apartado anterior.

Cuanto mayor es el tamaño de partícula empleado más aumenta la porosidad interpartícula. Otro hecho a tener en cuenta es la característica de los tamaños de las partículas. El corcho, como consecuencia de su elasticidad, presenta formas aciculares con desgarros en el proceso de molienda, de mayor magnitud que el caso de neumático, el cual presentaba formas más poliédricas presumiblemente como consecuencia del proceso criogénico al que se ve sometido.

Esta característica de la forma de las partículas como consecuencia del proceso de molienda conlleva diferencias además en la porosidad intergranular según el tipo de material, más acusado en las muestras de material monocomponente.

Por último queda comentar las muestras aglomeradas con kenaf. Esta muestra, por su especial carácter fibroso, presenta una peor compactación a nivel interpartícula a excepción del caso de la muetra con menor tamaño de partícula en el que la compactación es mayor. Recordemos que este material era el que obtenía un mayor grado de porosidad tanto a nivel de microporos como mesoporos estrechos. Se habrá que discutir cómo influye el ligante a la hora de restar porosidad cuando se lleve a cabo la caracterización acústica de este material.

Fotografía 33. Aglomerado de kenaf < 2,0 mm

MUESTRAS BICOMPONENTES

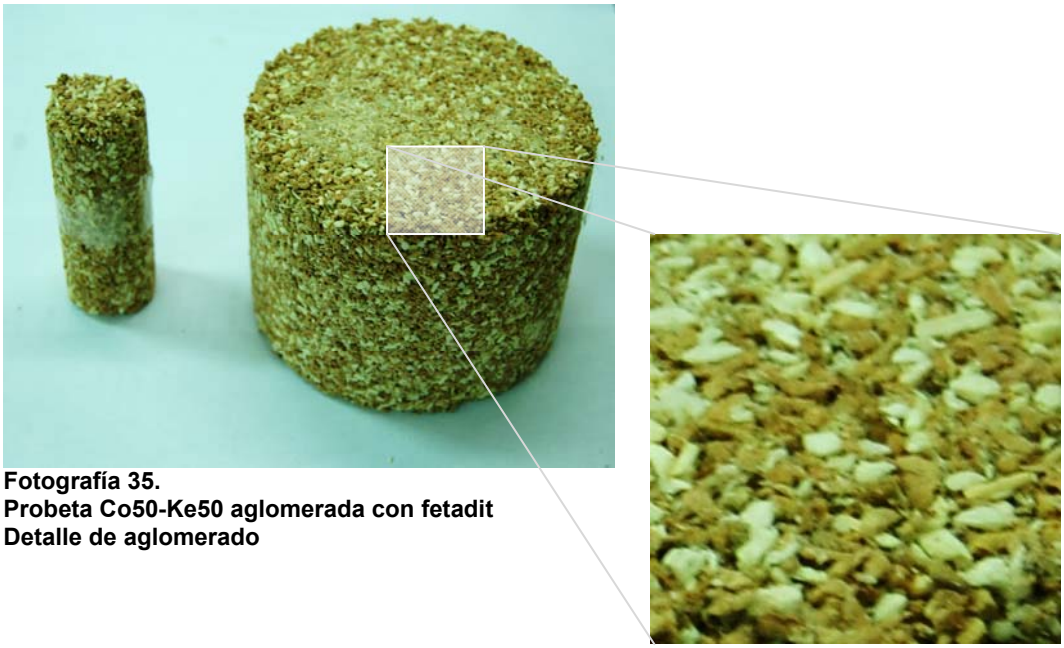
Tal y como se ha puesto de manifiesto anteriormente, cada material de partida cuenta con una forma característica que depende del proceso de elaboración (trituración previa) así como de las características inherentes a cada material, sus propiedades mecánicas y físicas.

Fotografía 34. Aglomerado de corcho y neumático 2.0-4.5 mm

Las muestras elaboradas a partir de corcho y neumático presentaban en general una buena adherencia como consecuencia de la cierta similitud en cuanto a la forma de la

partícula (véase fotografía 34). El corcho, con desgarres más pronunciados tras el proceso de triturado permite una adecuada compatibilidad en su mezcla con el neumático, cuyas partículas son levemente más poliédricas tal y como podemos observar al microscopio. No obstante lo anterior, ambos materiales permiten dejar una estructura interpartícula susceptible de disipar energía acústica contribuyendo por tanto a la mejora de su coeficiente de absorción acústica.

En el otro lado se encuentra el kenaf, cuya naturaleza fibrosa condiciona de forma notable una adecuada compactación con las partículas tanto de neumático como de corcho. La forma acicular de la fibra vegetal no permite una compactación uniforme tal y como ocurre con el resto de muestras aglomeradas. No obstante lo anterior permite tener espacios interpartícula mayores lo que, unido a la porosidad intrínseca de este material es susceptible de arrojar a priori buenos resultados. En la fotografía 35 se muestra una probeta elaborada al 50% de corcho y kenaf, aglomerada con fetadit. En la muestra se puede observar la dificultad que presenta esta mezcla para obtener una muestra homogénea como consecuencia de la notable diferencia en cuanto a la geometría de los materiales de partida empleados. A pesar de ello, esta diferencia es menor cuanto menor es el tamaño de partícula de los materiales de partida empleados.



Fotografía 35.
Probeta Co50-Ke50 aglomerada con fetadit
Detalle de aglomerado

03.04. CARACTERÍZACIÓN ACÚSTICA DE LAS MUESTRAS AGLOMERADAS

03.04.01. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

Las condiciones de trabajo correspondientes a los ensayos de caracterización acústica se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 58. Condiciones de trabajo de la caracterización acústica

Tubo	Grande	Pequeño
Espaciado entre micrófonos	0,05 m	0,02 m
Distancia a la muestra desde Mic. B, Pos. 3	0,1 m	0,035 m
Distancia a la muestra desde Mic. A, Pos. 2	0,15 m	0,37 m
Diámetro	0,1 m	0,029 m
Límite inferior de frecuencia	50Hz	500 Hz
Límite superior de frecuencia	1.6 kHz	6.4 kHz
Generador		
Forma de la onda	Random	Random
Nivel de señal	1,414 Vrms	1,414 Vrms
Filtro de picos	Off	Off
Condiciones ambientales		
Presión atmosférica:	101,325 kPa	101,325 kPa
Temperatura	293,15 K	293,15 K
Humedad relativa	80,0 %	80,0 %
Velocidad del sonido	343,24 m/s	
Densidad del aire	1,202 kg/m³	
Impedancia característica del aire	412,6 Pa/(m/s)	
Opciones		
Ratio Señal-ruido inferior a	10,0 dB	10,0 dB
Autospectrum (Max-Min) superior a	80,0 dB	80,0 dB
Exceso permitido del factor de calibración	1,0 dB	1,0 dB
Exceso permitido del factor de calibración	5,0 degrees	5,0 degrees
Medias	100	100
Estimación de la función de transferencia	H1	H1

El coeficiente de absorción acústica (α) se determinó, para todas las muestras, en 1/1 octava y a las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. Para el cálculo del coeficiente de reducción de ruido (Noise Reduction Coefficient, NRC) se realizó la media aritmética de los valores del coeficiente de absorción acústica comprendidos entre 250 y 2000 Hz.

En primer lugar se midió por ambas caras la probeta de una muestra de una proporción de materias primas concretas, por ejemplo la probeta de 99 mm (para

medidas a bajas frecuencias). Empleando software el Pulse-Material Testing se realiza una media del coeficiente de absorción respecto de la frecuencia de ambas caras.

A continuación se procede de la misma manera para la probeta de 29 mm (medición a altas frecuencias) de las mismas proporciones de materias primas. Con ambos resultados de coeficientes de absorción respecto de la frecuencia del mismo material compuesto, se realiza con el software Pulse-Material Testing una combinación de ambos resultados en el rango de frecuencias que solapan, que se corresponde con 500-1600 Hz.

Fotografía 36. Tubo de impedancia y muestras ensayadas I

Tras realizar las medidas descritas, ya se dispone del espectro del coeficiente de absorción frente a la frecuencia en el rango de 0-6400 Hz. Así pues, se extraen gracias al programa este valor en 1/1 octavas para poder observar con mayor claridad los valores del coeficiente de absorción a 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, como indica la norma, y con estos valores obtener el NRC para las muestras analizadas.

Fotografía 37. Tubo de impedancia y muestras ensayadas II

Para proceder a un análisis más detallado de los resultados obtenido se muestran éstos ordenados según el aglomerante utilizado en primer lugar. Para cada uno de esos aglomerantes posteriormente se estudian en función de la combinación de las materias primas utilizadas así como de la cantidad de ligante requerida (relacionada como hemos visto con la granulometría de las muestras). En el siguiente apartado se

muestra toda la información obtenida durante la caracterización acústica de los materiales.

03.04.02. INFLUENCIA DEL TIPO DE AGLOMERANTE

Debido a la gran cantidad de muestras caracterizadas, al final de la discusión pormenorizada de los resultados obtenidos para cada tipo de ligante se expone un resumen en el que figuran todos los valores tanto de α como NRC, así como unas conclusiones específicas para cada tipología de muestra.

03.04.02.01. MUESTRAS AGLOMERADAS CON COLA

100% CORCHO (C100)

Los resultados del coeficiente de absorción acústica de las muestras aglomeradas con cola constituidas por un 100% de corcho como material base se muestra en la siguiente tabla. En ella se reflejan, además, los resultados diferenciados en función del volumen de aglomerante utilizado. Para el caso de cola se emplean 30, 45 y 60 ml para las denominaciones CO1, CO2 y CO3 respectivamente (que corresponden a un 7%, 10% y 20% también respectivamente). Recordemos que este volumen de aglomerante está relacionado con la resistencia del material, correspondiendo la menor cantidad a aquellas muestras con una mayor dimensión de su fracción granulométrica, mientras que la mayor cantidad se usa en aquellas que cuenta con un menor tamaño medio de partícula y por lo tanto con una mayor superficie de contacto. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 59. NRC CO100 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**CO100 CO1**	**CO100 CO2**	**CO100 CO3**
125	0,042	0,042	0,037
250	0,151	0,145	0,130
500	0,570	0,524	0,500
1000	0,530	0,623	0,636
2000	0,412	0,410	0,560
4000	0,395	0,369	0,479
NRC	0,416	0,426	0,457

En la tabla anterior se puede constatar que se obtienen coeficientes de absorción acústica muy similares para diferentes granulometrías con un mismo tipo de aglomerante. También llama la atención el hecho de que el valor global del NRC (determinado a partir de la media aritmética de los valores del coeficiente de absorción acústica comprendidos entre 250 y 2000 Hz) es levemente superior para aquellos tamaños de partícula más pequeños que requieren un mayor volumen de ligante (CO3). En la siguiente gráfica se representa el coeficiente de absorción acústica para estos tres materiales en función de la frecuencia.

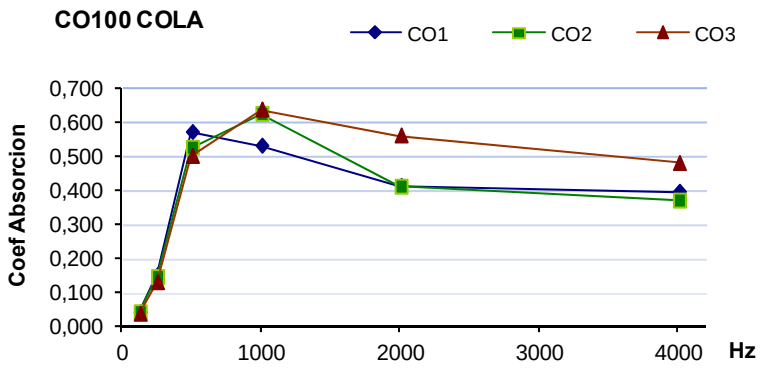


Figura 45. NRC CO100 aglomerado con COLA

En la gráfica anterior podemos observar cómo el corcho aglomerado presenta en general un valor medio en todo el espectro de frecuencia, alcanzando su máxima absorción en torno a los 1000 Hz. Existe, como se ha indicado, una leve mejora en la absorción con la reducción de la granulometría, lo que puede tener su origen en el hecho de que para este material juega un papel más importante su desarrollo poroso propio que la porosidad interpartícula.

El corcho, como hemos visto en apartados anteriores, cuenta con un desarrollo mesoporoso y macroporoso como consecuencia de su peculiar estructura interna que hemos tenido ocasión de observar mediante microscopía electrónica de barrido. Esta porosidad propia del material juega un papel tanto más importante cuanto mayor superficie de éste aparece en la muestra aglomerada, lo que

justificaría el leve aumento del NRC cuando empleamos un tamaño de partícula menor.

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

En la serie de muestras objeto de este apartado se sustituye un 25% de corcho por kenaf con el fin de comprobar qué incidencia tiene este material fibroso en el comportamiento acústico de la probeta. Tal y como hemos indicado, el kenaf es una fibra natural que, a la vista de los ensayos textuales realizados, cuenta con un importante desarrollo microporoso y mesoporoso estrecho. En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos del NRC para esta muestra:

Tabla 60. NRC CO75-KE25 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**CO75 KE25 CO1**	**CO75 KE25 CO2**	**CO75 KE25 CO3**
125	0,090	0,085	0,078
250	0,270	0,264	0,234
500	0,725	0,662	0,721
1000	0,408	0,484	0,472
2000	0,175	0,315	0,270
4000	0,225	0,341	0,308
NRC	0,395	0,431	0,424

Lo primero que llama la atención de la tabla anterior en relación con los resultados obtenidos para la muestra en la que únicamente se empleaba corcho como material de partida es el descenso generalizado en el NRC en todas las granulometrías empleadas.

A pesar de que la contribución de la fibra es relativamente pequeña (un 25%), el nivel generalizado del coeficiente de absorción acústica desciende. No obstante lo anterior, para poder comprender qué es lo que ocurre en el seno de este material aglomerado debemos proceder a analizar su comportamiento en función del rango de frecuencias estudiado.

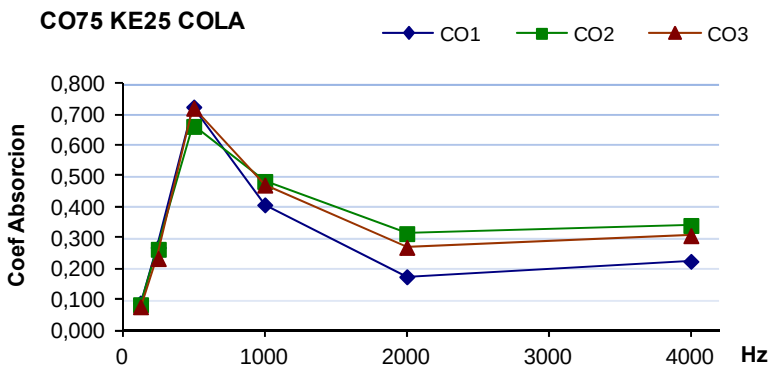


Figura 46. NRC CO75-KE25 aglomerado con COLA

Tal y como se observa en la gráfica anterior, el coeficiente de absorción acústica sufre una considerable disminución para los espectros de medias y altas frecuencias (a partir de 1 kHz aproximadamente) lo cual implica que, en términos globales, el NRC de este material sea inferior al obtenido para la muestra aglomerada únicamente con corcho.

No obstante lo anterior, se observa cómo la nueva muestra presenta valores elevados e incluso puntualmente superiores a las anteriores para el intervalo de bajas frecuencias (en torno a los 500 Hz). Este hecho puede deberse a que para este rango de frecuencias, el kenaf tiene escasa incidencia y la contribución del corcho es la que mantiene los valores de absorción acústica de forma muy similar a los anteriores.

El kenaf, tal y como hemos podido constatar en el estudio textural realizado, es el material que cuenta con un desarrollo poroso más elevado seguido del corcho y, por último, el neumático. Sin embargo, la adición de este material al corcho, lejos de mejorar las propiedades de absorción acústica las empeora, en particular en el espectro de altas frecuencias. Una justificación a este hecho puede encontrarse en el desarrollo microporoso con el que cuenta este material en relación al resto de materiales de partida. El material ligante empleado es susceptible de restar eficacia al desarrollo microporoso en mayor medida frente al mesoporoso o macroporoso del corcho, lo cual justificaría la considerable reducción del coeficiente de absorción acústica en el régimen de las altas frecuencias.

Por último, la gráfica indica cómo en el espectro de altas frecuencias la muestra que mayor coeficiente de absorción acústica ofrece es la correspondiente a tamaños medios de partícula (comprendidos entre 2,0 y 4,5 mm). No obstante existe poca diferencia frente a la muestra CO3 de menor tamaño. La muestra CO1 (con un menor volumen de aglomerante y por tanto un mayor tamaño de partícula) contribuye peor al NRC que los tamaños más pequeños lo que nuevamente, al igual que ocurriera en el caso anterior la porosidad interpartícula juega un papel menos relevante que la porosidad del propio material.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Continuando con el proceso de ensayo acústico, se caracterizó la muestra formada por un 50% de corcho y un 50% de kenaf obteniendo como resultado los coeficientes de absorción acústica en bandas de octava que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 61. NRC CO50-KE50 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**CO50 KE50 CO1**	**CO50 KE50 CO2**	**CO50 KE50 CO3**
125	0,183	0,201	0,145
250	0,396	0,405	0,393
500	0,505	0,480	0,596
1000	0,403	0,395	0,425
2000	0,324	0,297	0,355
4000	0,400	0,351	0,446
NRC	0,407	0,394	0,442

Tal y como puede observarse, en este caso mantienen aproximadamente los niveles de NRC obtenidos anteriormente, con una reducción global de los coeficientes en relación al corcho más acusada en el intervalo de las medias y bajas frecuencias. Nótese, además, que cada vez son menos relevantes las diferencias entre el empleo de diferentes granulometrías tal vez como consecuencia de que la fibra de kenaf sea susceptible de colmatar la porosidad intergranular de las muestras elaboradas.

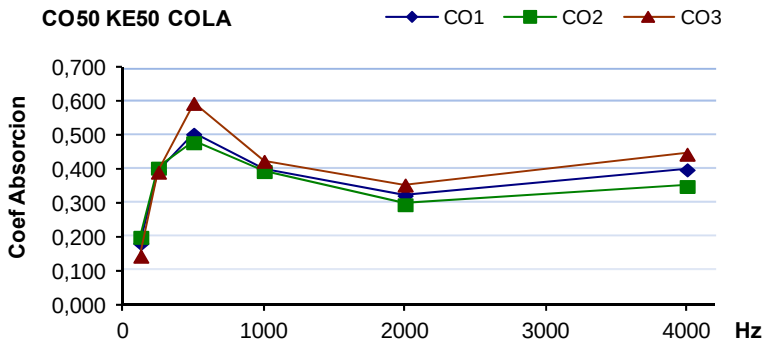


Figura 47. NRC CO50-KE50 aglomerado con COLA

Al igual que ocurriera en el caso anterior, se observa cómo la muestra conserva un pico de absorción a 500 Hz que se mantiene en todas las muestras con independencia de su granulometría, lo que hace prever que no se debe a los poros integranulares. Este pico, además, que aparece en la muestra de corcho, no empeora con la adición de kenaf, mientras que en el resto de espectros de frecuencias sí se observa una notable caída del coeficiente de absorción acústica.

25% CORCHO + 75% KENAF (CO25+KE75)

Al aumentar aún más la cantidad de kenaf se observa cómo los NRC globales siguen descendiendo levemente en relación a las muestras anteriores. En general, son prácticamente iguales para las muestras con mayor y menor tamaño de partícula y levemente superiores para la muestra con tamaño comprendido entre los 2,0 y 4,5 mm con una cantidad intermedia de volumen de aglomerante.

Los resultados de caracterización acústica de las series formadas por corcho (un 25%) y kenaf (un 75%) se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 62. NRC CO25-KE75 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**CO25 KE75 CO1**	**CO25 KE75 CO2**	**CO25 KE75 CO3**
125	0,224	0,224	0,213
250	0,327	0,336	0,357
500	0,399	0,397	0,438
1000	0,379	0,452	0,382
2000	0,298	0,438	0,286
4000	0,398	0,516	0,375
NRC	0,351	0,406	0,366

Aparentemente, la porosidad interpartícula tiene poca incidencia dado que las muestras con granulometría totalmente opuestas (CO1 y CO3) cuentan prácticamente con el mismo coeficiente NRC.

No obstante lo anterior, los tamaños de partículas mejoran en más de un 10% los resultados parciales obtenidos, especialmente en el campo de las medias y altas frecuencias por lo que el tamaño de partícula si parece jugar un papel importante.

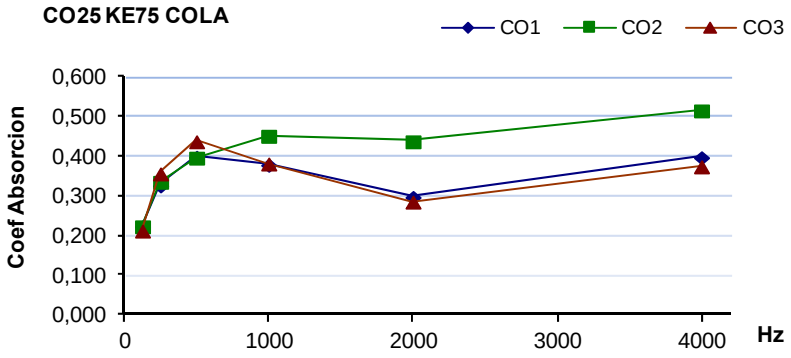


Figura 48. NRC CO25-KE75 aglomerado con COLA

El descenso de la absorción acústica a bajas frecuencias sigue aumentando, lo que corrobora la hipótesis de que es el corcho, gracias a la particularidad de su estructura y características texturales, el marterial que permitía obtener unos coeficientes de absorción mayores en las anteriores muestras. En este rango de frecuencias ha ido descendiendo paulatinamente el NRC conforme hemos ido sustituyendo corcho por kenaf.

En el rango de las medias y altas frecuencias llama la atención la correspondencia entre los coeficientes obtenidos para muestras con tamaño de partícula totalmente opuestos. No obstante, los coeficientes de absorción acústica son similares a los obtenidos anteriormente. A este nivel, la justificación que podemos encontrar es que la porosidad interpartícula de la muestra CO1 compense una pérdida en la absorción acústica como consecuencia de tener una menor superficie de material poroso en contacto con la onda estacionaria. Mientras tanto, en la muestra CO3, la menor porosidad interpartícula se compensa con una mayor cantidad de superficie porosa sin perjuicio de que ésta pueda quedar puntalmente colmatada por el material ligante. De ser así, se produciría gráficamente una representación tipo campana de gauss en la que existirá un tamaño de partícula óptimo en el que ambas contribuciones mejoren el NRC del material, obteniéndose como se muestra en la gráfica para el intervalo de 2,0 - 4,5 mm.

100% KENAF (KE100)

Los valores de NRC para cada banda de octava obtenidos para este material se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 63. NRC KE100 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**KE100 CO1**	**KE100 CO2**	**KE100 CO3**
125	0,205	0,214	0,213
250	0,273	0,294	0,305
500	0,346	0,382	0,378
1000	0,400	0,485	0,381
2000	0,425	0,536	0,344
4000	0,529	0,595	0,401
NRC	0,361	0,424	0,352

Al igual que ocurriera en el caso anterior, en el que la componente de kenaf cada vez cobraba más importancia en la composición material de la muestra, existe una importante reducción del NRC en relación al corcho.

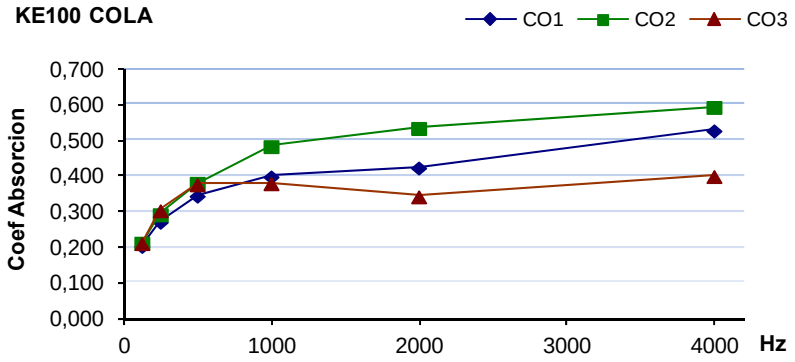


Figura 49. NRC KE100 aglomerado con COLA

Tal y como puede observarse, el kenaf tiene valores muy bajos de absorción acústica en el rango de las bajas frecuencias, cuestión ésta que se ha podido constatar ya en el análisis de la caracterización acústica de las muestras anteriores.

Al igual que ocurriera con la muestra anterior, el mejor coeficiente NRC lo obtenemos para un intervalo de granulometrías comprendido entre 2,0 y 4,5 mm, que se corresponde además con la cantidad media de aglomerante (el 10% de cola). En este caso, las muestras con granulometría opuesta no guardan la correlación a altas frecuencias que tenían anteriormente como consecuencia de la presencia aún de corcho, material que contribuye a la absorción acústica en este rango de frecuencias. Para el caso de esta muestra debemos pensar, tal y como se indicaba inicialmente, que el material ligante es susceptible de taponar la incipiente estructura microporosa del kenaf deducida de la caracterización textural practicada, cobrando una mayor importancia relativa la porosidad interpartícula.

75% KENAF + 25% NEUMÁTICO (KE75+NE25)

Un nuevo material aparece en la caracterización acústica de la muestras. Se trata del neumático, con una pequeña contribución en la composición del material aglomerado (tan solo un 25%). Los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 64. NRC KE75-NE25 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**KE75 NE25 CO1**	**KE75 NE25 CO2**	**KE75 NE25 CO3**
125	0,189	0,000	0,184
250	0,250	0,259	0,369
500	0,328	0,329	0,449
1000	0,355	0,334	0,446
2000	0,237	0,280	0,418
4000	0,312	0,396	0,539
NRC	0,293	0,301	0,421

Tal y como puede observarse en los resultados obtenidos, los NRC son en general inferiores a los obtenidos en las combinaciones anteriores, a excepción de la muestra con un menor tamaño de partícula. En éstos, la adición de neumático mejora levemente los valores obtenidos para la fibra de kenaf sola.

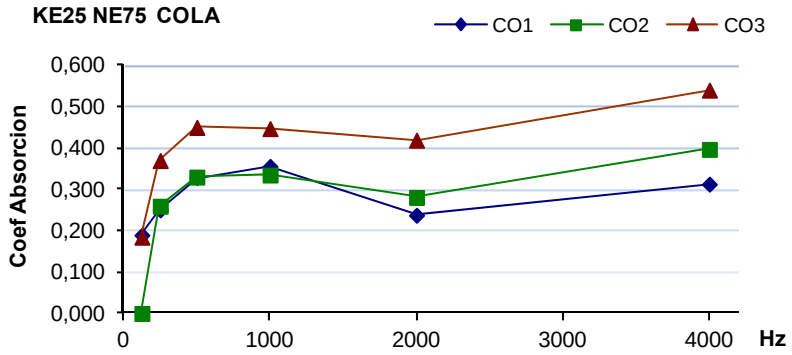


Figura 50. NRC KE75-NE25 aglomerado con COLA

El empeoramiento de los resultados no debe sorprender a la vista de la caracterización textural. No en vano el neumático es, con diferencia, el material menos poroso de los tres empleados, por lo que la contribución a la mejora de este material como absorbente acústico debe basarse fundamentalmente en los poros intergranulares que, en su caso, se formen en el procesado de las muestras.

En la gráfica anterior se observan curvas de coeficiente de absorción acústica de esquema similar a las que ofrece el kenaf solo, caracterizadas por una baja contribución en el rango de las bajas frecuencias y levemente más significativas a altas frecuencias. La principal diferencia estriba en el menor valor global de los

coeficientes obtenidos, como consecuencia de la sustitución del material más poroso por el menos poroso de los tres caracterizados.

La adición de neumático, sin embargo, mejora de forma notable con respecto del resto de dosificaciones la correspondiente a la serie granulométrica CO3. Esta serie cuenta con un menor tamaño de partícula y, por lo tanto, con mayor volumen de aglomerante. Es evidente que en este caso la mejora solo se puede deber a una única causa ya que, dado que el neumático es el material menos poroso, la adición de este material contribuye a la creación de una mayor porosidad intergranular en el material conglomerado que se forma por la unión de neumático y kenaf, mejorando levemente su absorción acústica en comparación con la fibra sola.

50% KENAF + 50% NEUMÁTICO (KE50+NE50)

Tal y como hemos visto en la caracterización de la muestra anterior, la adición de neumático al kenaf implica la modificación de las propiedades acústicas del material aglomerado, con dos consecuencias totalmente opuestas. Por un lado, el neumático caracterizado por ser la materia prima menos porosa, minora la absorción debida al propio material mientras que, por otro lado, la adición de este material provoca la aparición de poros intergranulares susceptibles de mejorar el coeficiente de absorción acústica de la muestra.

La adición de una mayor cantidad de neumático respecto de la muestra anterior favorece aún más la formación de poros intergranulares entre los dos materiales. De esta forma todos los coeficientes mejoran con independencia de la fracción granulométrica que se está empleando.

Los valores así obtenidos para la mezcla de materiales indicada se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 65. NRC KE50-NE50 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**KE50 NE50 CO1**	**KE50 NE50 CO2**	**KE50 NE50 CO3**
125	0,141	0,118	0,117
250	0,385	0,372	0,401
500	0,618	0,689	0,615
1000	0,507	0,415	0,457
2000	0,556	0,317	0,421
4000	0,617	0,423	0,532
NRC	0,517	0,448	0,474

En la tabla anterior se muestra como los niveles de NRC obtenidos son de lo más elevados para este ligante, superando incluso los valores obtenidos para el corcho, un material tradicionalmente asociado al acondicionamiento acústico de salas de concierto como más idóneo.

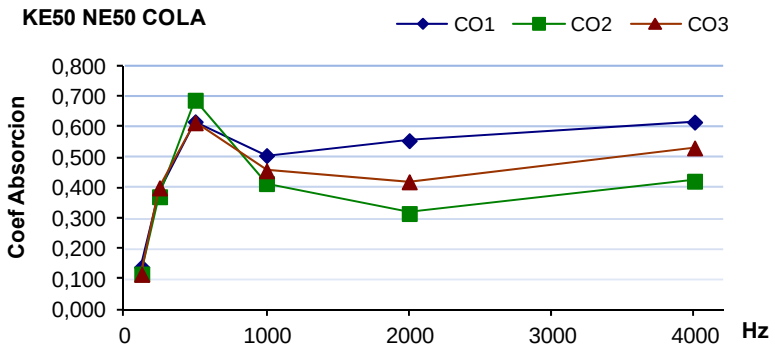


Figura 51. NRC KE50-NE50 aglomerado con COLA

Analizando con detalle el rango de frecuencias podemos observar cómo nuevamente aparece un pico en las bajas frecuencias, que son las que cuentan con una mayor mejora con respecto a la muestra anterior. A altas frecuencias el comportamiento está supeditado a la granulometría, contando con un mejor comportamiento la muestra con un mayor tamaño de partícula y, por lo tanto, una menor cantidad de material ligante frente al resto. Este comportamiento se justifica por la aparición de importantes poros intergranulares, que son la característica fundamental con la que el neumático contribuye dada su escasa porosidad.

25% KENAF + 75% NEUMÁTICO (KE25+NE75)

Una mayor adición de neumático en el material aglomerado implica un aumento de la porosidad interpartícula. No obstante lo anterior, también implica una disminución en la absorción acústica intrínseca debida a cada material:

Tabla 66. NRC KE25-NE75 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**KE25 NE75 CO1**	**KE25 NE75 CO2**	**KE25 NE75 CO3**
125	0,056	0,051	0,051
250	0,210	0,178	0,178
500	0,738	0,743	0,743
1000	0,451	0,459	0,459
2000	0,330	0,403	0,403
4000	0,400	0,394	0,394
NRC	0,432	0,446	0,446

En la tabla anterior se observa cómo los coeficientes de absorción acústica son inferiores a los obtenidos con el material aglomerado anterior por cuanto hemos eliminado gran parte de fibra de kenaf. El kenaf, el material de partida más poroso de los tres empleados, lo hemos sustituido por neumático, el material menos poroso, tal y como ha quedado demostrado en la caracterización textural practicada.

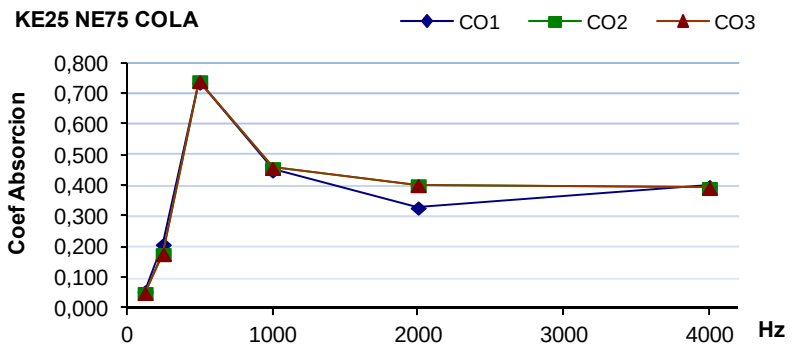


Figura 52. NRC KE25-NE75 aglomerado con COLA

De la gráfica anterior llaman la atención dos cuestiones. La primera es la elevada correspondencia entre los resultados obtenidos con independencia de la fracción

granulométrica empleada en la elaboración de las probetas. Las tres muestras de diferente tamaño de partícula cuentan con unos valores NRC muy similares. En segundo lugar, corroborando lo analizado en el resto de muestras, se observa como existe un buen comportamiento a bajas frecuencias debido a la porosidad interpartícula de este material aglomerado.

100% NEUMÁTICO (NE100)

La muestra compuesta únicamente por neumático aglomerado con cola presenta valores aún menores respecto de los expuestos anteriormente. El neumático, tal y como hemos indicado, es el material con menor volumen de poros en su caracterización textural, por lo que la disipación de la energía acústica la debe confiar prácticamente en exclusividad a la formación de poros entre las partículas que conforman la muestra.

Tabla 67. NRC NE100 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**NE100 CO1**	**NE100 CO2**	**NE100 CO3**
125	0,035	0,032	0,033
250	0,098	0,082	0,091
500	0,437	0,377	0,409
1000	0,587	0,463	0,404
2000	0,585	0,520	0,305
4000	0,649	0,392	0,339
NRC	0,427	0,360	0,302

Así se deduce de la tabla anterior, en la que se constata con claridad que el mayor NRC en términos generales se obtiene para la muestra CO1, con tamaño de partícula mayor y con poros intergranulares también mayores. Estos poros se pueden observar en la microscopía óptica realizada. Conforme el tamaño de partícula disminuye, la porosidad intergranular también lo hace, y por lo tanto, el coeficiente de absorción acústica del material aglomerado es cada vez menor. En este caso no se puede compensar esta pérdida de porosidad por un aumento en la superficie de material absorbente, debido a que el neumático no es un material tan poroso como los anteriores.

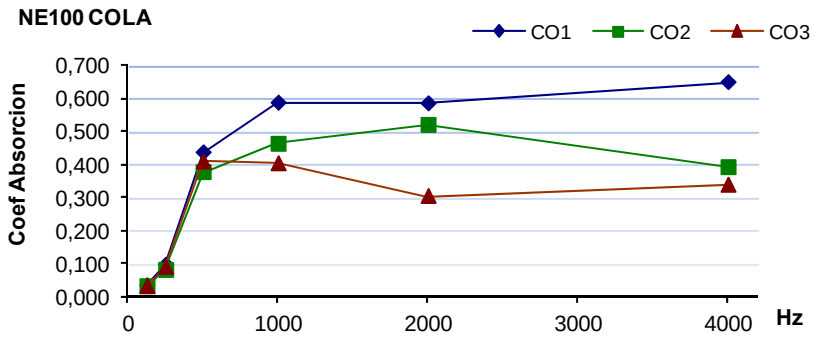


Figura 53. NRC NE100 aglomerado con COLA

La gráfica anterior viene a confirmar lo expuesto en el análisis de los resultados del NRC del neumático. Se observa un mayor coeficiente de absorción acústica cuanto mayor es el tamaño de partícula empleado, al carecer el neumático de una estructura porosa interna que permita optimizar el aumento de superficie de material al reducir el tamaño de partícula.

75% NEUMÁTICO + 25% CORCHO (CO25+NE75)

La introducción de una mínima cantidad de corcho en la muestra aglomerada mejora notablemente el NRC en aquellas muestras que cuentan con un tamaño de partícula menor y, por lo tanto, una mayor superficie porosa de material para disipar energía. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 68. NRC CO25-NE75 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**CO25 NE75 CO1**	**CO25 NE75 CO2**	**CO25 NE75 CO3**
125	0,034	0,035	0,032
250	0,095	0,100	0,102
500	0,387	0,463	0,504
1000	0,521	0,529	0,483
2000	0,384	0,630	0,496
4000	0,417	0,511	0,427
NRC	0,347	0,430	0,396

La introducción de corcho en la mezcla aglomerada, aunque escasa (un 25%), modifica de forma notable las propiedades acústicas del neumático. En general mejora su comportamiento acústico a excepción de la muestra CO1, con un mayor tamaño de partícula, lo que implica que el corcho es capaz de reducir la porosidad interpartícula entre sendos materiales.

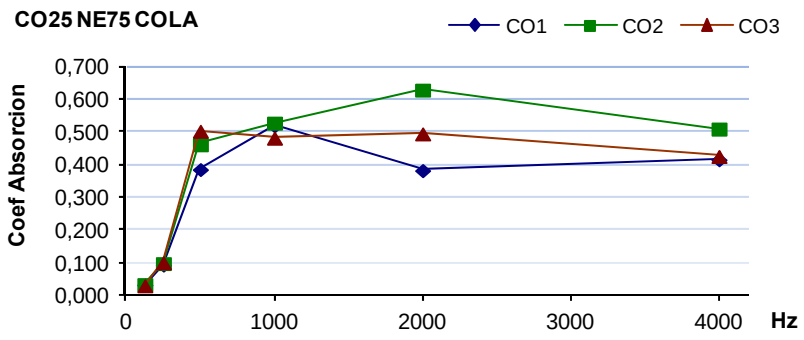


Figura 54. NRC CO25-NE75 aglomerado con COLA

En la gráfica anterior se muestra cómo prácticamente no existe variación en la absorción acústica en el espectro de bajas frecuencias. En esta zona de la gráfica, la absorción se basa fundamentalmente en la porosidad intergranular y, dada la escasa aportación realizada de corcho, no sufre modificaciones importantes, salvo para la muestra CO1 tal y como se ha puesto de manifiesto anteriormente.

En el intervalo de medias y altas frecuencias, al igual que ocurriera con la muestra de kenaf y neumático, existe un punto de equilibrio en el que el tamaño de partícula juega un doble papel, uno a favor y otro en contra de la mejora del coeficiente de absorción acústica del material aglomerado. A favor, por la adición de corcho, material con una importante contribución de macroporos y mesoporos grandes. Este tipo de poros no están presumiblemente taponados por la cola, lo que permite incrementar el coeficiente de absorción acústica del material aglomerado conforme disminuimos el tamaño de partícula. En contra, por reducir la porosidad interparticula, en particular del neumático, que es el componente mayoritario. Esta doble consecuencia es la que permite que la muestra con un tamaño medio de partícula obtenga los mayores valores de absorción, por sumar en positivo los dos mecanismos de absorción acústica anteriormente expuestos.

50% NEUMÁTICO + 50% CORCHO (CO50+NE50)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de las muestras elaboradas con cantidades iguales de neumático y corcho aglomerado con cola son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 69. NRC CO50-NE50 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**CO50 NE50 CO1**	**CO50 NE50 CO2**	**CO50 NE50 CO3**
125	0,039	0,039	0,038
250	0,108	0,116	0,117
500	0,403	0,492	0,548
1000	0,628	0,502	0,441
2000	0,429	0,348	0,314
4000	0,480	0,358	0,385
NRC	0,392	0,365	0,355

Tal y como observamos, aunque en general existe un leve descenso en relación a los resultados anteriores, se constata nuevamente una fuerte dependencia de la granulometría por obtener mayores resultados del NRC para la muestra elaborada a partir de tamaño de partícula superiores a 4 mm y menores para aquellos de menos de 2,0 mm.

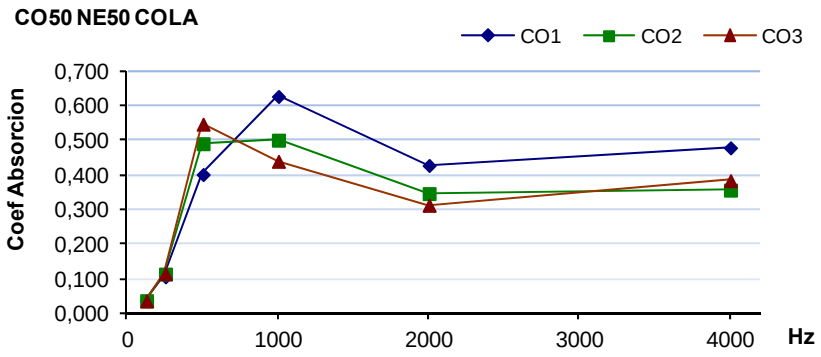


Figura 55. NRC CO50-NE50 aglomerado con COLA

La causa, al igual que ocurriera en la muestra elaborada solo a base de neumático, se centra en la importancia de los poros intergranulares para esta

combinación de materiales, si bien las diferencias en los resultados obtenido son poco relevantes.

Los mayores valores de absorción acústica se obtienen para las bajas y medias frecuencias, en correlación con la curva de absorción con la que cuenta el corcho, que cada vez se incorpora en mayor cantidad a la muestra aglomerada.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

Los valores obtenidos para la muestra indicada son similares a los obtenidos en la caracterización del corcho y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 70. NRC CO75-NE25 aglomerado con COLA

	α		
Hz	**CO75 NE25 CO1**	**CO75 NE25 CO2**	**CO75 NE25 CO3**
125	0,036	0,035	0,039
250	0,126	0,124	0,144
500	0,478	0,497	0,589
1000	0,601	0,559	0,504
2000	0,353	0,334	0,365
4000	0,380	0,370	0,406
NRC	0,390	0,379	0,401

La disminución de la cantidad de neumático en la muestra hace que los poros intergranulares sean los principales responsables de la absorción acústica del material aglomerado. En esta muestra cobran más importancia otros métodos de absorción de energía acústica debidos fundamentalmente a la porosidad interna de cada material, caracterizada en el estudio textural del presente trabajo.

En el rango de frecuencias vuelve a aparecer el pico de absorción a bajas y medias frecuencias tal y como se intuía en la muestra anterior. Conforme vamos aumentando la cantidad de corcho la gráfica se insinúa con un trazado muy similar al obtenido para el corcho.

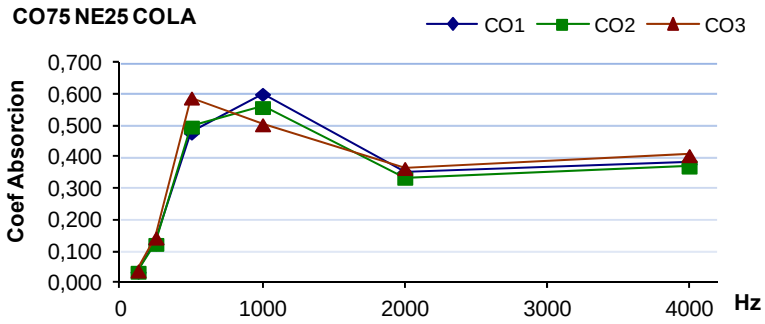


Figura 56. NRC CO75-NE25 aglomerado con COLA

Por último, llama la atención la correspondencia entre las tres gráficas lo que descarta la formación de poros intergranulares como principal mecanismo de absorción acústica.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS MUESTRAS AGLOMERADAS CON COLA

Los resultados obtenidos y analizados con detalle en los apartados anteriores son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 71. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con COLA

	α								
Hz	**CO100 CO1**	**CO100 CO2**	**CO100 CO3**	**CO75 KE25 CO1**	**CO75 KE25 CO2**	**CO75 KE25 CO3**	**CO50 KE50 CO1**	**CO50 KE50 CO2**	**CO50 KE50 CO3**
125	0,042	0,042	0,037	0,090	0,085	0,078	0,183	0,201	0,145
250	0,151	0,145	0,130	0,270	0,264	0,234	0,396	0,405	0,393
500	0,570	0,524	0,500	0,725	0,662	0,721	0,505	0,480	0,596
1000	0,530	0,623	0,636	0,408	0,484	0,472	0,403	0,395	0,425
2000	0,412	0,410	0,560	0,175	0,315	0,270	0,324	0,297	0,355
4000	0,395	0,369	0,479	0,225	0,341	0,308	0,400	0,351	0,446
NRC	**0,416**	**0,426**	**0,457**	**0,395**	**0,431**	**0,424**	**0,407**	**0,394**	**0,442**

	α								
Hz	**CO25 KE75 CO1**	**CO25 KE75 CO2**	**CO25 KE75 CO3**	**KE100 CO1**	**KE100 CO2**	**KE100 CO3**	**KE75 NE25 CO1**	**KE75 NE25 CO2**	**KE75 NE25 CO3**
125	0,224	0,224	0,213	0,205	0,214	0,213	0,189	0,000	0,184
250	0,327	0,336	0,357	0,273	0,294	0,305	0,250	0,259	0,369
500	0,399	0,397	0,438	0,346	0,382	0,378	0,328	0,329	0,449
1000	0,379	0,452	0,382	0,400	0,485	0,381	0,355	0,334	0,446
2000	0,298	0,438	0,286	0,425	0,536	0,344	0,237	0,280	0,418
4000	0,398	0,516	0,375	0,529	0,595	0,401	0,312	0,396	0,539
NRC	**0,351**	**0,406**	**0,366**	**0,361**	**0,424**	**0,352**	**0,293**	**0,301**	**0,421**

	α								
Hz	**KE50 NE50 CO1**	**KE50 NE50 CO2**	**KE50 NE50 CO3**	**KE25 NE75 CO1**	**KE25 NE75 CO2**	**KE25 NE75 CO3**	**NE100 CO1**	**NE100 CO2**	**NE100 CO3**
125	0,141	0,118	0,117	0,056	0,051	0,051	0,035	0,032	0,033
250	0,385	0,372	0,401	0,210	0,178	0,178	0,098	0,082	0,091
500	0,618	0,689	0,615	0,738	0,743	0,743	0,437	0,377	0,409
1000	0,507	0,415	0,457	0,451	0,459	0,459	0,587	0,463	0,404
2000	0,556	0,317	0,421	0,330	0,403	0,403	0,585	0,520	0,305
4000	0,617	0,423	0,532	0,400	0,394	0,394	0,649	0,392	0,339
NRC	**0,517**	**0,448**	**0,474**	**0,432**	**0,446**	**0,446**	**0,427**	**0,360**	**0,302**

	α								
Hz	**CO75 NE25 CO1**	**CO75 NE25 CO2**	**CO75 NE25 CO3**	**CO50 NE50 CO1**	**CO50 NE50 CO2**	**CO50 NE50 CO3**	**CO25 NE75 CO1**	**CO25 NE75 CO2**	**CO25 NE75 CO3**
125	0,036	0,035	0,039	0,039	0,039	0,038	0,034	0,035	0,032
250	0,126	0,124	0,144	0,108	0,116	0,117	0,095	0,100	0,102
500	0,478	0,497	0,589	0,403	0,492	0,548	0,387	0,463	0,504
1000	0,601	0,559	0,504	0,628	0,502	0,441	0,521	0,529	0,483
2000	0,353	0,334	0,365	0,429	0,348	0,314	0,384	0,630	0,496
4000	0,380	0,370	0,406	0,480	0,358	0,385	0,417	0,511	0,427
NRC	**0,390**	**0,379**	**0,401**	**0,392**	**0,365**	**0,355**	**0,347**	**0,430**	**0,396**

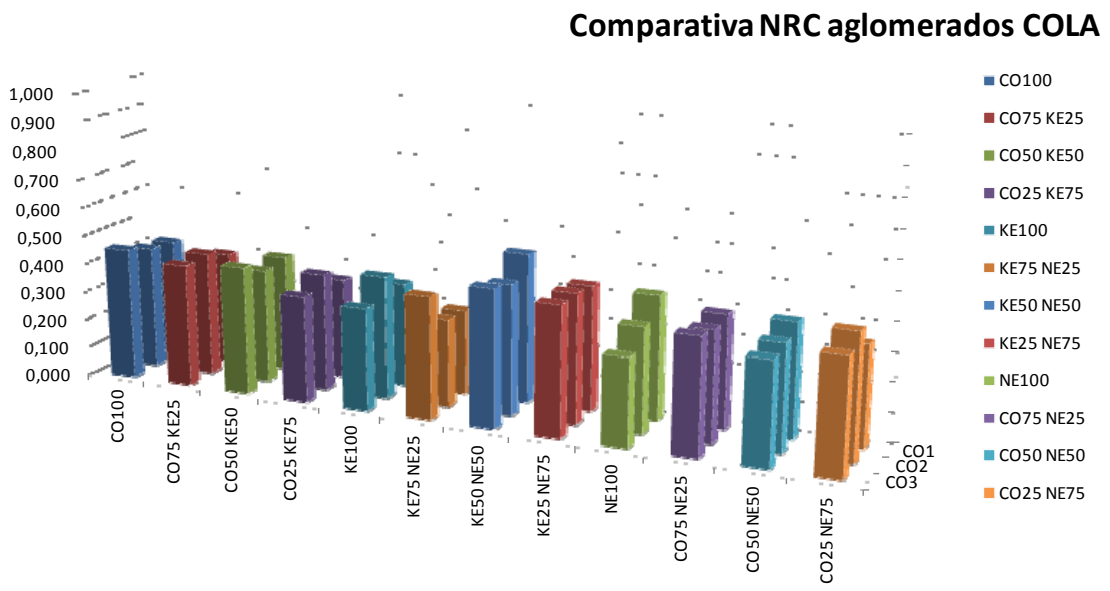


Figura 57. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con COLA

De los resultados anteriores se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Los mayores NRC se obtienen para las mezclas de kenaf y neumático. Se combinan presumiblemente las propiedades porosas del primero frente a la formación de una porosidad intergranular del segundo.

- En general, los volúmenes intermedios de material aglutinante son los que obtienen mejores resultados de reducción acústica (muestras con denominación CO2). En ellos es donde los dos principales mecanismos de disipación de la energía acústica suman de tal forma que se aumenta la porosidad interpartícula, especialmente relevante para el caso del neumático. También se aumenta la superficie porosa de material de partida, indicada para el kenaf y corcho.

- La porosidad interpartícula es especialmente relevante en el rango de las medias y bajas frecuencias, mientras que la porosidad del material de partida y sus parámetros texturales contribuyen a la absorción acústica en el rango de las altas frecuencias.

- La cola, en general, permite un adecuado desarrollo poroso de los materiales utilizados en el aglomerado si bien puntualmente es susceptible de taponar los poros de menor tamaño (microporos) como ocurre en el caso del kenaf.

03.04.02.02. MUESTRAS AGLOMERADAS CON ESCAYOLA

De las muestras aglomeradas con escayola lo primero que llama la atención es la escasa porosidad interpartícula que se puede observar a simple vista, debido a de que la elevada viscosidad del material ligante. Éste apenas deja poros intergranulares entre las partículas de los materiales de partida. Este tipo de muestras se asimilan más a materiales compuestos formados por una matriz (la escayola) y por un refuerzo (las partículas granuladas de los diferentes materiales de partida) que a materiales compuestos objeto de estudio en el presente trabajo. Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de las muestras son los que se indican a continuación.

100% CORCHO (CO100)

Los resultados obtenidos del NRC en la caracterización acústica en tubo de impedancia para la muestra de corcho aglomerada con escayola con diferente tamaño de partícula son lo que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 72. NRC CO100 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**CO100 ES1**	**CO100 ES2**	**CO100 ES3**
125	0,076	0,06	0,094
250	0,161	0,15	0,200
500	0,161	0,14	0,333
1000	0,171	0,14	0,160
2000	0,217	0,16	0,162
4000	0,199	0,18	0,179
NRC	0,18	0,15	0,21

Tal y como puede observarse existe una notable disminución de los niveles de NRC con respecto a los obtenidos con otros ligantes y la principal causa se debe a la capacidad que tiene la escayola para taponar no solo la porosidad del propio material sino incluso la porosidad intergranular.

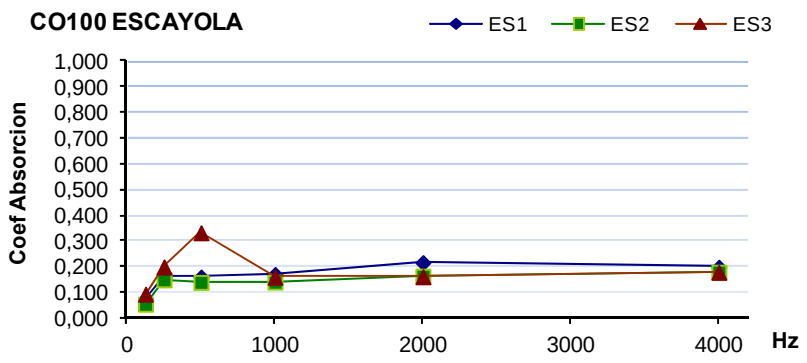


Figura 58. NRC CO100 aglomerado con ESCAYOLA

Un leve pico a bajas frecuencias para la muestra con menor tamaño de partícula es el único resultado que evoca a los obtenidos para este mismo material con otros materiales ligantes. Para el resto de muestras y frecuencias prácticamente se mantienen los valores de coeficiente de absorción acústica, independientemente del tipo de granulometría empleada. Se deduce que la escasa absorción con la que cuenta esta mezcla es atribuible a la porosidad debida al propio material y no a la formación de poros integranulares.

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 73. NRC CO75-KE25 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**CO75 KE25 ES1**	**CO75 KE25 ES2**	**CO75 KE25 ES3**
125	0,233	0,292	0,133
250	0,316	0,349	0,177
500	0,236	0,331	0,169
1000	0,234	0,298	0,173
2000	0,198	0,205	0,183
4000	0,202	0,193	0,159
NRC	0,25	0,30	0,18

Al igual que ocurriera con otros aglomerantes, la incorporación de fibra de kenaf en la composición de la muestra en general aumenta los niveles medios de absorción acústica. Dado que no existe una correlación inequívoca entre tamaño

de partícula y NRC se deduce, como en casos anteriores, la presencia de dos mecanismos de disipación de energía acústica asociados que dan como resultado que la muestra con mejor comportamiento sea aquella que cuenta con un tamaño de partícula medio y una cantidad media de aglomerante.

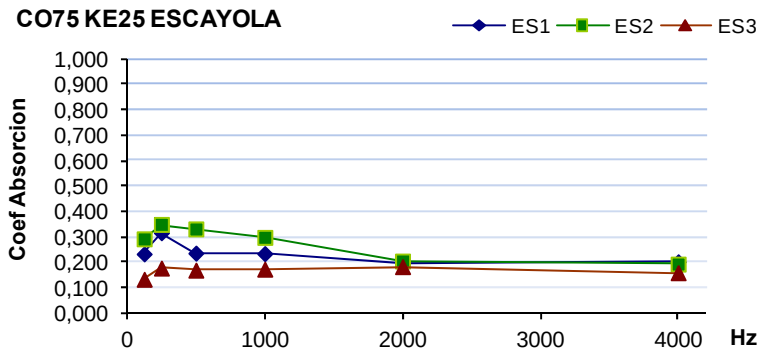


Figura 59. NRC CO75-KE25 aglomerado con ESCAYOLA

En la figura anterior se observan curvas prácticamente planas de absorción en todo el espectro de frecuencias. A bajas frecuencias el pico del corcho se suaviza paulatinamente.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Con la adición a la muestra de una mayor cantidad de fibra de kenaf los resultados que obtenemos son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 74. NRC CO50-KE50 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**CO50 KE50 ES1**	**CO50 KE50 ES2**	**CO50 KE50 ES3**
125	0,255	0,263	0,227
250	0,300	0,294	0,274
500	0,308	0,235	0,254
1000	0,350	0,233	0,210
2000	0,358	0,233	0,123
4000	0,401	0,257	0,115
NRC	0,33	0,25	0,22

Tal y como puede observarse, los coeficientes globales se mantienen e incluso mejoran pero cada vez más se marca la dependencia con la porosidad

interpartícula como mecanismo principal de disipación de energía acústica en el interior de la mezcla aglomerada. La muestra con un mayor tamaño de partícula cuenta con un mejor coeficiente de absorción acústica frente a la muestra que cuenta con un menor tamaño y mayor volumen de ligante.

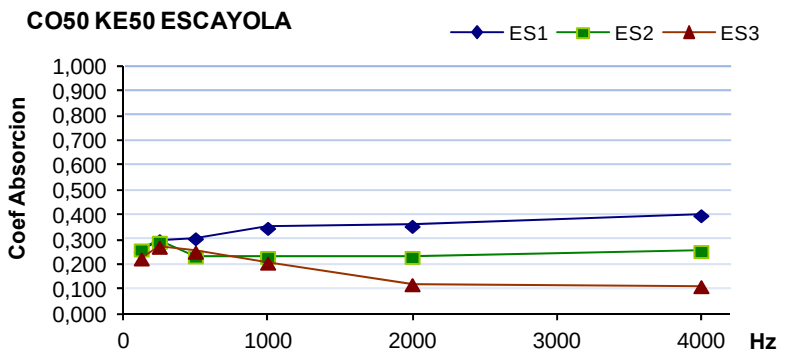


Figura 60. NRC CO50-KE50 aglomerado con ESCAYOLA

En la gráfica anterior se observa cómo se modifica el comportamiento acústico de la muestra en relación a las anteriores ya que, si bien se mantienen los valores a bajas frecuencias (con coeficientes en torno a 0,30), se mejora la absorción acústica a altas frecuencias, mayor cuanto mayor es el tamaño de partícula lo que está relacionado con la porosidad intergranular.

25% CORCHO + 75% KENAF (CO25+KE75)

Los resultados obtenidos para la muestra con la composición de referencia son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 75. NRC CO25-KE75 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**CO25 KE75 ES1**	**CO25 KE75 ES2**	**CO25 KE75 ES3**
125	0,302	0,125	0,198
250	0,678	0,249	0,343
500	0,485	0,229	0,224
1000	0,539	0,177	0,285
2000	0,494	0,259	0,299
4000	0,516	0,393	0,336
NRC	0,55	0,23	0,29

De los resultados anteriores llama la atención la notable diferencia existente entre la muestra con mayor tamaño de partícula y el resto de muestras, cuyos valores se encuentran más próximos entre sí. La sustitución de corcho por kenaf permite la creación de poros intergranulares de mayor dimensión no taponados por el material ligante obteniendo muy buenos resultados de NRC.

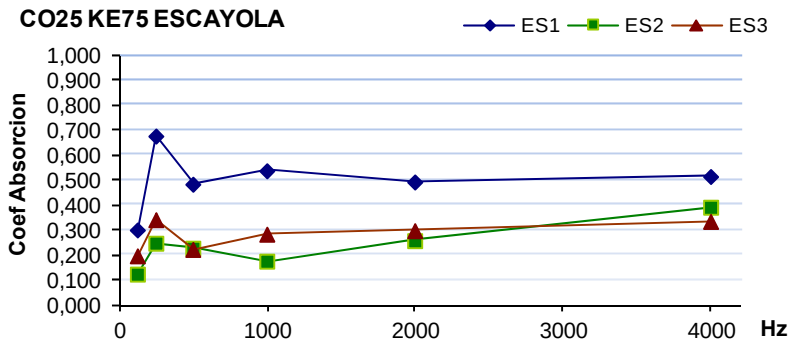


Figura 61. NRC CO25-KE75 aglomerado con ESCAYOLA

En la gráfica anterior se observa cómo el kenaf, a partir de un determinado tamaño de partícula, es susceptible de crear poros intergranulares que mejoren de forma notable el coeficiente de absorción acústica del material. Para el resto de granulometrías el ligante anula el efecto de mejora que tienen los poros intergranulares así como los poros intrínsecos, como consecuencia del aumento de la superficie del material más poroso de los tres empleados como es el kenaf.

100% KENAF (KE100)

Tabla 76. NRC KE100 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**KE100 ES1**	**KE100 ES2**	**KE100 ES3**
125	0,329	0,424	0,201
250	0,346	0,414	0,259
500	0,403	0,485	0,334
1000	0,484	0,434	0,403
2000	0,576	0,346	0,468
4000	0,600	0,335	0,515
NRC	0,45	0,42	0,37

Tal y como ocurría en las muestras anteriores, se obtienen valores más elevados del coeficiente global de absorción acústica de la muestra ensayada. Se observa, además, una dependencia en relación al tamaño de partícula.

La fibra de kenaf, tal y como se muestra en la siguiente figura, permite mejorar notablemente la absorción acústica a altas y medias frecuencias en relación con las anteriores. Esta contribución es más relevante cuanto mayor es el tamaño de partícula. La razón que puede justificar este hecho es, por un lado, el hecho de que la porosidad interpartícula para las muestras aglomeradas con escayola se ve más acentuada cuando empleamos kenaf. Por otro lado, el material ligante empleado tapona una gran cantidad de poros de este material de partida no presentando en general mejora en el NRC al reducir el tamaño de partícula.

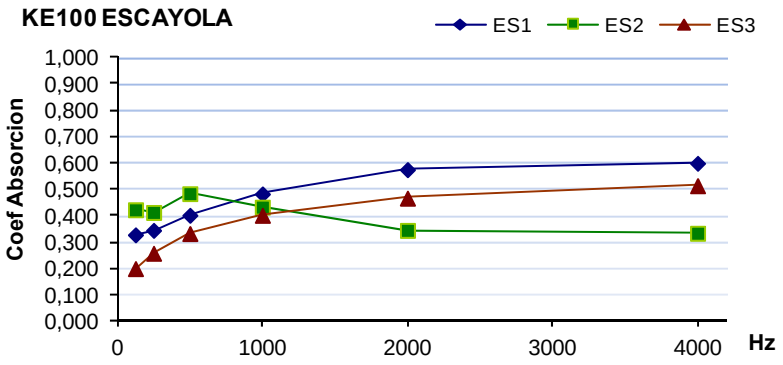


Figura 62. NRC KE100 aglomerado con ESCAYOLA

75% KENAF + 25% NEUMÁTICO (KE75+NE25)

Los resultados de la caracterización acústica del material aglomerado a base de kenaf y neumático en las proporciones indicadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 77. NRC KE75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**KE75 NE25 ES1**	**KE75 NE25 ES2**	**KE75 NE25 ES3**
125	0,318	0,292	0,133
250	0,540	0,349	0,177
500	0,496	0,331	0,169
1000	0,515	0,298	0,173
2000	0,359	0,205	0,183
4000	0,433	0,193	0,159
NRC	0,48	0,30	0,18

Tal y como podemos observar, siendo la tónica general con este aglomerante, existe una importante dependencia entre el NRC obtenido y el tamaño de la muestra empleada. Aquellas con un mayor tamaño de partícula y por tanto, una menor cantidad de aglomerante, presentan un mayor coeficiente de absorción acústica frente a los que tienen un tamaño de partícula menor.

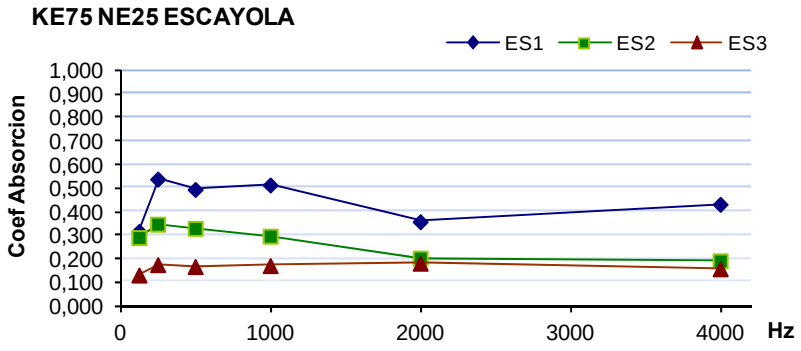


Figura 63. NRC KE75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA

Gráficamente podemos constatar curvas prácticamente planas para aquellas muestras en las que la escayola anula casi por completo la porosidad del material. Este hecho se da especialmente en la fibra de kenaf, dado que el neumático apenas presenta porosidad, tal y como se deduce del estudio textural. Conforme aumentamos el tamaño de partícula, los coeficientes de absorción acústica suben, especialmente en el rango de las bajas frecuencias, como consecuencia de la porosidad interpartícula.

50% KENAF + 50% NEUMÁTICO (KE50+NE50)

La caracterización acústica de la muestra formada por el 50% de kenaf y 50% de neumático aglomerada con escayola arroja los resultados que se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 78. NRC KE50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**KE50 NE50 ES1**	**KE50 NE50 ES2**	**KE50 NE50 ES3**
125	0,249	0,272	0,283
250	0,256	0,231	0,240
500	0,305	0,225	0,193
1000	0,306	0,209	0,212
2000	0,281	0,257	0,300
4000	0,313	0,345	0,448
NRC	0,29	0,23	0,24

Al igual que ocurre con el resto de dosificaciones, se constata una dependencia con la granulometría por lo que el mecanismo más probable de disipación de energía acústica estará relacionado con la porosidad interpartícula. No obstante, la diferencia en los NRC es cada vez menor, solo levemente superior a partir de un tamaño de partícula superior a los 4,5 mm.

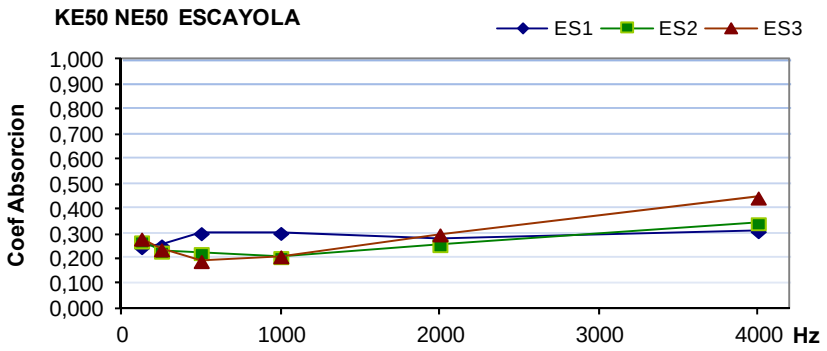


Figura 64. NRC KE50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA

En la gráfica anterior se constata la presencia de curvas de absorción acústica prácticamente planas en todo el espectro de frecuencias. La dependencia de la

granulometría es mínima como se ha indicado, manifestándose más a bajas frecuencias que a altas frecuencias.

25% KENAF + 75% NEUMÁTICO (KE25+NE75)

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 79. NRC KE25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**KE25 NE75 ES1**	**KE25 NE75 ES2**	**KE25 NE75 ES3**
125	0,271	0,162	0,082
250	0,350	0,252	0,155
500	0,286	0,210	0,254
1000	0,333	0,223	0,178
2000	0,436	0,348	0,293
4000	0,583	0,434	0,324
NRC	0,35	0,26	0,22

Se mantiene la dependencia con la granulometría presente en todas las muestras anteriores, si bien con valores inferiores como consecuencia de la sustitución paulatina de kenaf por neumático.

Con independencia de que la principal contribución al mecanismo de disipación de energía acústica está basada en la porosidad interpartícula, dadas las características del material aglomerante, en todas las muestras en las que se ha empleado kenaf ha existido un incremento más notable de la absorción acústica en las fibras de mayor tamaño.

El kenaf contribuye a una mejora del coeficiente de absorción acústica tanto por la formación de poros intergranulares como por su porosidad intrínseca caracterizada en el estudio textural. Esta contribución, además, es mayor en la medida de que las muestras presentan un tamaño de partícula superior a los 4,5 mm como consecuencia de que para partículas de menor dimensión el material aglutinante ciega prácticamente por completo la superficie de los poros de este material.

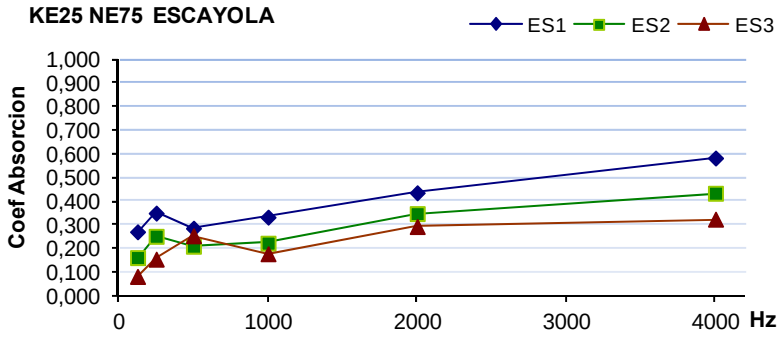


Figura 65. NRC KE25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA

En la anterior gráfica se constata de nuevo la correlación entre el tamaño de partícula y la absorción acústica de los materiales que presentan kenaf en su composición tal y como hemos visto anteriormente.

100% NEUMÁTICO (NE100)

El neumático es el material menos poroso de los empleados por lo que la absorción acústica de este material debe asociarse a porosidad interpartícula y no a la porosidad del propio material, ya que ésta es despreciable. Los resultados obtenidos para este material aglomerado con escayola son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 80. NRC NE100 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**NE100 ES1**	**NE100 ES2**	**NE100 ES3**
125	0,060	0,051	0,042
250	0,136	0,108	0,091
500	0,238	0,533	0,218
1000	0,136	0,132	0,110
2000	0,183	0,135	0,165
4000	0,200	0,156	0,188
NRC	0,17	0,23	0,15

Tal y como puede observarse en la tabla de resultados anteriores, no existe una clara dependencia del NRC en relación con el tamaño de partícula tan evidente como cuando empleamos kenaf. De hecho, los valores son prácticamente

coincidentes a excepción de la muestra con tamaño de partícula comprendido entre 2,0 y 4,5 mm.

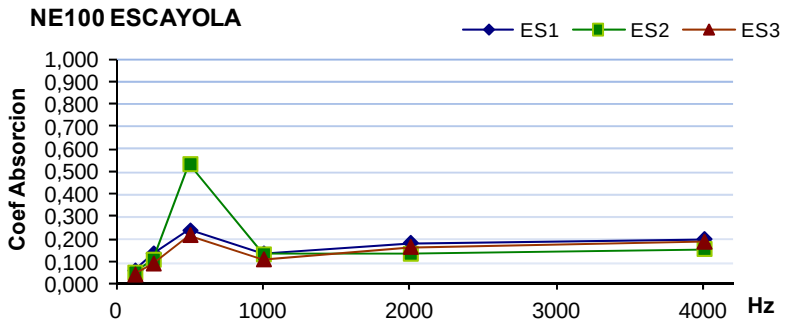


Figura 66. NRC NE100 aglomerado con ESCAYOLA

En la anterior gráfica se observan curvas de absorción prácticamente planas en todo el rango de las frecuencias caracterizadas. Un leve pico a frecuencias bajas (500 Hz) para la muestra ES2 es la única cuestión reseñable en unas muestras que presentan prácticamente el mismo NRC con independencia del tamaño de partícula empleado. En general, los coeficientes de absorción acústica son bastante bajos en todos los rangos de frecuencias.

75% NEUMÁTICO + 25% CORCHO (CO25+NE75)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de esta muestra son los que se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 81. NRC CO25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**CO25 NE75 ES1**	**CO25 NE75 ES2**	**CO25 NE75 ES3**
125	0,098	0,098	0,047
250	0,180	0,086	0,066
500	0,189	0,066	0,184
1000	0,161	0,129	0,109
2000	0,264	0,194	0,174
4000	0,262	0,201	0,230
NRC	0,20	0,12	0,13

Como puede observarse, para tamaños de partículas inferiores a los 4,5 mm prácticamente no existe diferencia en el α de los materiales, siendo en cualquier caso los coeficientes de absorción acústica obtenidos muy bajos incluso en las muestras con mayor tamaño de partícula.

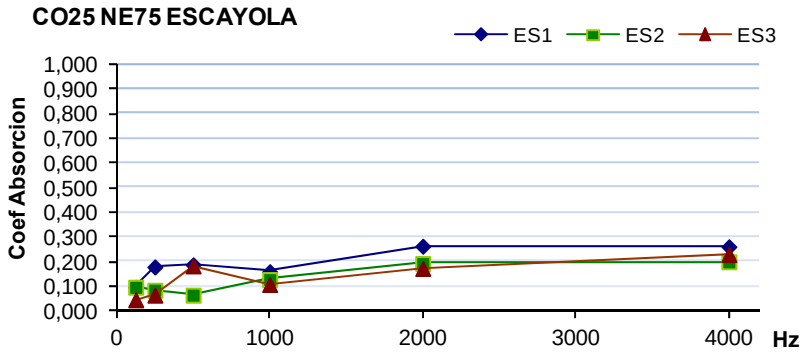


Figura 67. NRC CO25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA

En la gráfica anterior se observan curvas de los coeficientes de absorción acústica prácticamente planas en todo el rango de frecuencias caracterizado. La muestra con un mayor tamaño de partícula presenta un comportamiento ligeramente mejor que el resto como consecuencia, previsiblemente, de la porosidad intergranular, aunque de escasa relevancia.

50% NEUMÁTICO + 50% CORCHO (CO50+NE50)

Los datos obtenidos en la caracterización acústica se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 82. NRC CO50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**CO50 NE50 ES1**	**CO50 NE50 ES2**	**CO50 NE50 ES3**
125	0,073	0,057	0,059
250	0,159	0,118	0,134
500	0,275	0,118	0,142
1000	0,160	0,124	0,136
2000	0,242	0,173	0,123
4000	0,203	0,156	0,115
NRC	0,21	0,13	0,13

Al igual que ocurría en la dosificación de materias primas del apartado anterior, los valores son en general muy bajos y similares en los tamaños de partícula inferiores a 4,5 mm.

Se deduce, por tanto, que la escayola contribuye de forma negativa a la disipación de energía al taponar tanto los poros intergranulares como los poros de los materiales, especialmente los existentes en las muestras de menor tamaño de partícula.

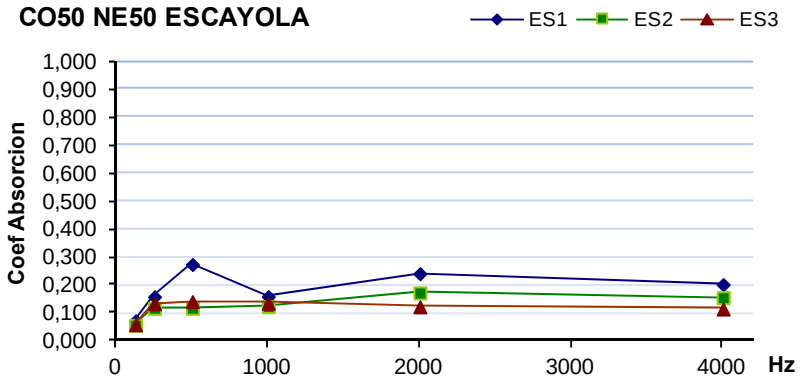


Figura 68. NRC CO50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA

La gráfica mantiene la tónica de las anteriores para estos materiales (corcho y neumático), con curvas de absorción acústica sensiblemente planas.

Existe un comportamiento ligeramente mejor de las fracciones granulométricas de mayor tamaño que, consecuentemente, tienen menos cantidad de aglomerante por lo que se ciegan menos cantidad de poros.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

Las mezclas de neumático y corcho en las proporciones indicadas arrojan los siguientes resultados en la caracterización acústica:

Tabla 83. NRC CO75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA

	α		
Hz	**CO75 NE25 ES1**	**CO75 NE25 ES2**	**CO75 NE25 ES3**
125	0,053	0,078	0,069
250	0,087	0,112	0,118
500	0,159	0,111	0,160
1000	0,133	0,138	0,133
2000	0,185	0,167	0,156
4000	0,183	0,134	0,169
NRC	0,14	0,13	0,14

De forma similar a los datos de las muestras anteriores, los valores de los NRC obtenidos son prácticamente iguales en las diferentes fracciones granulométricas empleadas en la elaboración de las muestras. Los valores de α, en general, son muy bajos por lo que puede concluirse que la escayola anula los diferentes mecanismos de absorción acústica, tanto los relativos a la porosidad interpartícula como los debidos a la porosidad de cada material.

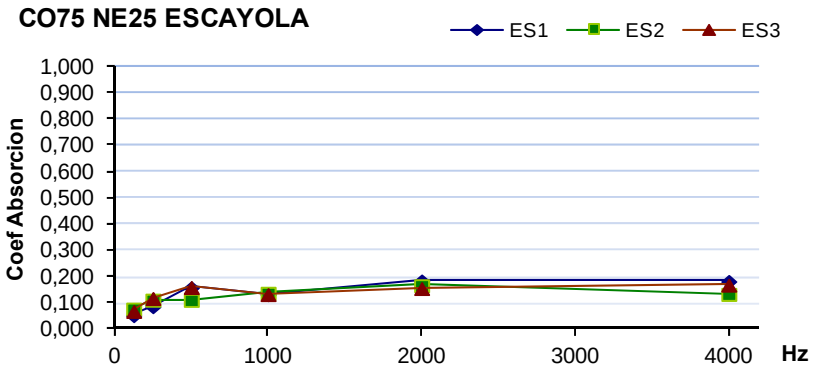


Figura 69. NRC CO75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA

La figura muestra tres gráficas de absorción prácticamente planas en todo el espectro de frecuencias empleados en la caracterización acústica. La causa se debe a la escasa aportación que hacen los materiales como consecuencia del tipo de aglomerante utilizado.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS AGLOMERADOS CON ESCAYOLA

Los resultados obtenidos en los apartados anteriores se resumen en la tabla 84.

Tabla 84. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con ESCAYOLA

	α								
Hz	**CO100 ES1**	**CO100 ES2**	**CO100 ES3**	**CO75 KE25 ES1**	**CO75 KE25 ES2**	**CO75 KE25 ES3**	**CO50 KE50 ES1**	**CO50 KE50 ES2**	**CO50 KE50 ES3**
125	0,076	0,06	0,094	0,233	0,292	0,133	0,255	0,263	0,227
250	0,161	0,15	0,200	0,316	0,349	0,177	0,300	0,294	0,274
500	0,161	0,14	0,333	0,236	0,331	0,169	0,308	0,235	0,254
1000	0,171	0,14	0,160	0,234	0,298	0,173	0,350	0,233	0,210
2000	0,217	0,16	0,162	0,198	0,205	0,183	0,358	0,233	0,123
4000	0,199	0,18	0,179	0,202	0,193	0,159	0,401	0,257	0,115
NRC	**0,18**	**0,15**	**0,21**	**0,25**	**0,30**	**0,18**	**0,33**	**0,25**	**0,22**

	α								
Hz	**CO25 KE75 ES1**	**CO25 KE75 ES2**	**CO25 KE75 ES3**	**KE100 ES1**	**KE100 ES2**	**KE100 ES3**	**KE75 NE25 ES1**	**KE75 NE25 ES2**	**KE75 NE25 ES3**
125	0,302	0,125	0,198	0,329	0,424	0,201	0,318	0,292	0,133
250	0,678	0,249	0,343	0,346	0,414	0,259	0,540	0,349	0,177
500	0,485	0,229	0,224	0,403	0,485	0,334	0,496	0,331	0,169
1000	0,539	0,177	0,285	0,484	0,434	0,403	0,515	0,298	0,173
2000	0,494	0,259	0,299	0,576	0,346	0,468	0,359	0,205	0,183
4000	0,516	0,393	0,336	0,600	0,335	0,515	0,433	0,193	0,159
NRC	**0,55**	**0,23**	**0,29**	**0,45**	**0,42**	**0,37**	**0,48**	**0,30**	**0,18**

	α								
Hz	**KE50 NE50 ES1**	**KE50 NE50 ES2**	**KE50 NE50 ES3**	**KE25 NE75 ES1**	**KE25 NE75 ES2**	**KE25 NE75 ES3**	**NE100 ES1**	**NE100 ES2**	**NE100 ES3**
125	0,249	0,272	0,283	0,271	0,162	0,082	0,060	0,051	0,042
250	0,256	0,231	0,240	0,350	0,252	0,155	0,136	0,108	0,091
500	0,305	0,225	0,193	0,286	0,210	0,254	0,238	0,533	0,218
1000	0,306	0,209	0,212	0,333	0,223	0,178	0,136	0,132	0,110
2000	0,281	0,257	0,300	0,436	0,348	0,293	0,183	0,135	0,165
4000	0,313	0,345	0,448	0,583	0,434	0,324	0,200	0,156	0,188
NRC	**0,29**	**0,23**	**0,24**	**0,35**	**0,26**	**0,22**	**0,17**	**0,23**	**0,15**

	α								
Hz	**CO75 NE25 ES1**	**CO75 NE25 ES2**	**CO75 NE25 ES3**	**CO50 NE50 ES1**	**CO50 NE50 ES2**	**CO50 NE50 ES3**	**CO25 NE75 ES1**	**CO25 NE75 ES2**	**CO25 NE75 ES3**
125	0,053	0,078	0,069	0,073	0,057	0,059	0,098	0,098	0,047
250	0,087	0,112	0,118	0,159	0,118	0,134	0,180	0,086	0,066
500	0,159	0,111	0,160	0,275	0,118	0,142	0,189	0,066	0,184
1000	0,133	0,138	0,133	0,160	0,124	0,136	0,161	0,129	0,109
2000	0,185	0,167	0,156	0,242	0,173	0,123	0,264	0,194	0,174
4000	0,183	0,134	0,169	0,203	0,156	0,115	0,262	0,201	0,230
NRC	**0,14**	**0,13**	**0,14**	**0,21**	**0,13**	**0,13**	**0,20**	**0,12**	**0,13**

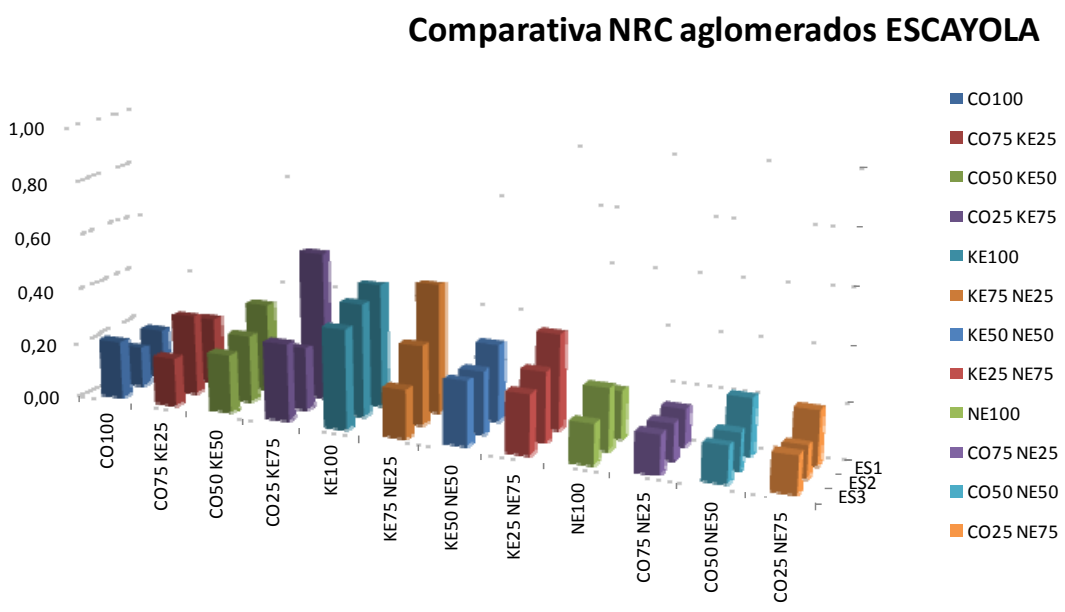


Figura 70. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con ESCAYOLA

De los resultados expuestos en la tabla y gráfica anterior se deduce que:

- El empleo de la escayola como ligante reduce considerablemente los NRC obtenidos en relación al uso de otro tipo de ligantes. Esta reducción es consecuencia del relleno de la porosidad interpartícula y, parcialmente, de la propia porosidad de los materiales de partida empleados.

- Los mejores resultados se producen en general para las muestras con contenido en kenaf; no en vano este es el material que presenta mayor porosidad según el estudio textural.

- En general se observa una fuerte dependencia del coeficiente de absorción acústica con el tamaño de partícula siendo más elevados los niveles de NRC para las muestras ES1. El motivo es doble: por un lado, las muestras con mayor tamaño de partícula permiten tener una porosidad intergranular más importante; y por otro lado, estas muestras contienen una menor cantidad de material ligante que, para el caso que nos ocupa, incide negativamente en el

taponamiento de la estructura porosa del material. Este hecho justificaría el buen comportamiento de las muestras con kenaf en su composición, especialmente en las probetas con un mayor tamaño de partícula.

- La escayola puede emplearse como material para mejorar la absorción acústica de recintos con el empleo de material aglomerado adecuado (fibra de kenaf y neumático fundamentalmente). Este material se clasifica como clase A1 según su reacción al fuego establecida en el Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego (modificado por el Real Decreto 110/2008, de 1 de febrero). La caracterización de este tipo de materiales en función de su comportamiento al fuego es una cuestión a tener en cuenta y susceptible de ser desarrollada en futuros trabajos de investigación.

03.04.02.03. MUESTRAS AGLOMERADAS CON FETADIT

100% CORCHO (CO100)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica mediante tubo de impedancia para la muestra de corcho aglomerada con fetadit es la que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 85. NRC CO100 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**CO100 FE1**	**CO100 FE2**	**CO100 FE3**
125	0,075	0,082	0,089
250	0,260	0,247	0,215
500	0,852	0,860	0,846
1000	0,477	0,544	0,493
2000	0,474	0,626	0,634
4000	0,551	0,695	0,688
NRC	0,52	0,57	0,55

Tal y como se puede observar, los valores de los NRC son muy superiores a los obtenidos con otros aglomerantes. La mayor absorción de energía acústica se produce para la muestra con un tamaño de partícula intermedio (comprendida entre los 2,0 y 4,5 mm) lo que hace suponer que con este tipo de aglomerante se

ponen en acción los dos mecanismos de disipación de energía. Por un lado, el relativo a la porosidad intergranular y, por otro, el relativo a la porosidad del propio material según caracterización textural realizada. No obstante lo anterior, las diferencias entre los tres NRC obtenidas son de escasa importancia.

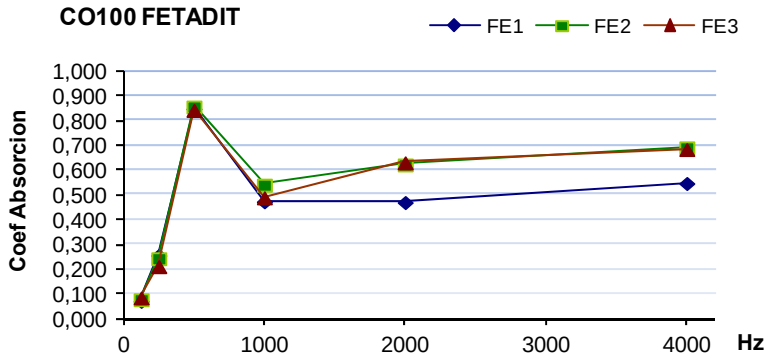


Figura 71. NRC CO100 aglomerado con FETADIT

En la gráfica se muestra un pico en el coeficiente de absorción acústica a bajas frecuencias (500 Hz) que se da en todas las muestras caracterizadas prácticamente de igual magnitud. Las muestras con un menor tamaño de partícula presentan un mejor comportamiento a altas frecuencias, como consecuencia de la mayor superficie de corcho en contacto con la onda incidente. El mecanismo de absorción en este caso está vinculado a las propiedades texturales de este material, en especial al volumen de macroporos y mesoporos, presentes en la peculiar estructura de este material.

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

Los resultados de los NRC son:

Tabla 86. NRC CO75-KE25 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**CO75 KE25 FE1**	**CO75 KE25 FE2**	**CO75 KE25 FE3**
125	0,147	0,130	0,235
250	0,444	0,449	0,591
500	0,821	0,789	0,579
1000	0,549	0,553	0,526
2000	0,567	0,529	0,492
4000	0,640	0,525	0,566
NRC	0,60	0,58	0,55

Tal y como puede observarse, y en comparación con los anteriores resultados, la adición de una pequeña cantidad de fibra de kenaf a la muestra de corcho mejora notablemente su comportamiento acústico. Esta mejora se da prácticamente para todas las granulometrías, especialmente para las mayores.

El kenaf contribuye no solo al mantenimiento de la estructura porosa integranular en la muestra, sino que además incrementa la absorción acústica gracias a su estructura microporosa y mesoporosa. El kenaf cuenta con un mayor volumen total de poros que el corcho según el estudio textural, lo que se traduce en una mejora de los coeficientes de absorción acústica en todo el espectro de frecuencias y en toda la gama de granulometrías empleadas.

La mejora es más nítida a priori en las muestras con un mayor tamaño de partícula (a partir de 4,5 mm) aunque se puede definir como generalizada. Los datos anteriores se representan en la siguiente gráfica:

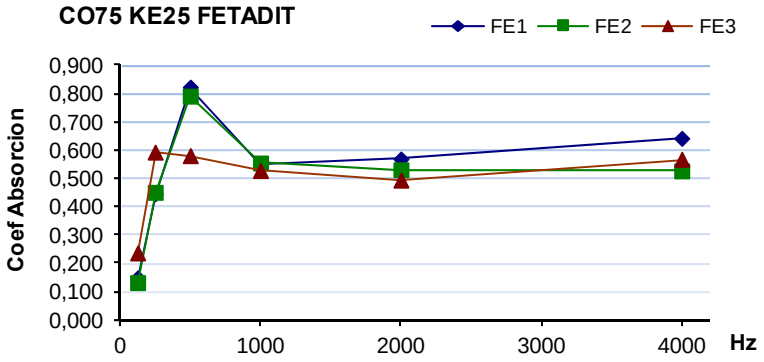


Figura 72. NRC CO75-KE25 aglomerado con FETADIT

De nuevo se mantiene un pico de absorción a bajas frecuencias cuya causa se debe, presumiblemente, a mecanismos de absorción a través de la estructura porosa intergranular. Prueba de ello es que este pico de absorción es más intenso en aquellas granulometrías superiores a los 2,0 mm. En segundo lugar, en la gráfica se puede observar cómo existe un crecimiento generalizado en las absorciones a altas frecuencias en todas las muestras por igual, como

consecuencia del empleo del kenaf en sustitución del corcho por su mayor porosidad.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de este material aglomerado se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 87. NRC CO50-KE50 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**CO50 KE50 FE1**	**CO50 KE50 FE2**	**CO50 KE50 FE3**
125	0,247	0,155	0,166
250	0,446	0,589	0,590
500	0,498	0,721	0,682
1000	0,532	0,597	0,593
2000	0,567	0,643	0,629
4000	0,720	0,765	0,729
NRC	0,51	0,64	0,62

Tal y como puede observarse, el aumento de la cantidad de kenaf en la muestra disminuye la absorción para aquellas muestras de mayor tamaño cuyo mecanismo de absorción de energía está basado fundamentalmente en los poros intergranulares. Por otro lado, el NRC aumenta en las muestras con un tamaño de partícula inferior, en las cuales existe una mayor proporción de superficie de kenaf y, por lo tanto, este material es capaz de hacer valer su mayor porosidad frente a la intergranular.

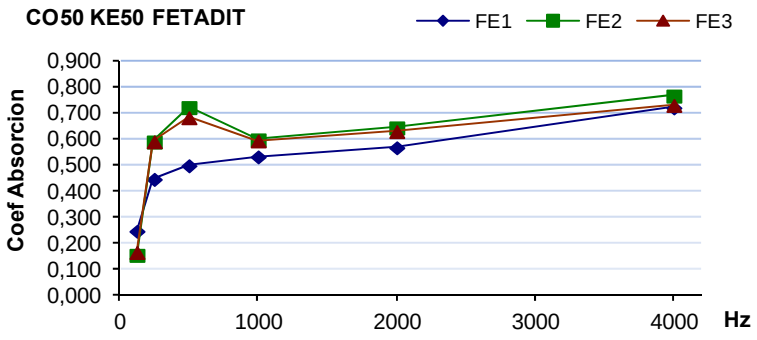


Figura 73. NRC CO50-KE50 aglomerado con FETADIT

En la gráfica se muestra cómo la absorción a bajas frecuencias desciende, especialmente en la muestra con un mayor tamaño de partícula mientras que en general, la absorción acústica en todas las muestras alcanza elevados valores en el rango de las altas frecuencias.

25% CORCHO + 75% KENAF (CO25+KE75)

Los resultados obtenidos son:

Tabla 88. NRC CO25-KE75 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**CO25 KE75 FE1**	**CO25 KE75 FE2**	**CO25 KE75 FE3**
125	0,278	0,252	0,203
250	0,644	0,690	0,678
500	0,553	0,550	0,605
1000	0,588	0,599	0,582
2000	0,683	0,652	0,600
4000	0,711	0,718	0,698
NRC	0,62	0,62	0,62

En la tabla anterior llama la atención la coincidencia en el NRC de las tres series granulométricas y cantidad de aglomerante utilizado presentando gráficas prácticamente idénticas tal y como se muestra en la siguiente figura.

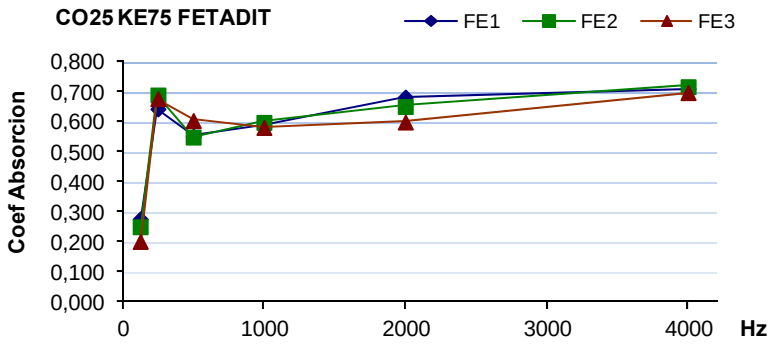


Figura 74. NRC CO25-KE75 aglomerado con FETADIT

Una mayor cantidad de kenaf en relación a las muestras anteriores conlleva en general, una reducción moderada de la porosidad interpartícula para este tipo de

aglomerante lo que implica una leve reducción en los rangos de bajas frecuencias. Sin embargo, el kenaf, dada su estructura micro y mesoporosa permite obtener unos muy buenos resultados en el rango de las bajas frecuencias.

100% KENAF (KE100)

Los resultados obtenidos para la muestra de referencia son los que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 89. NRC KE100 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**KE100 FE1**	**KE100 FE2**	**KE100 FE3**
125	0,429	0,587	0,329
250	0,557	0,660	0,591
500	0,676	0,531	0,672
1000	0,709	0,648	0,659
2000	0,817	0,689	0,696
4000	0,899	0,751	0,809
NRC	0,69	0,63	0,65

En la tabla anterior se exponen los valores de los NRC obtenidos para esta muestra, siendo los más elevados los correspondientes a la muestra con un mayor tamaño de partícula. El kenaf presenta una importante estructura microporosa y el fetadit no colmata dichos poros, motivo por el cual se obtienen elevados coeficientes de absorción acústica especialmente en el rango de las altas frecuencias.

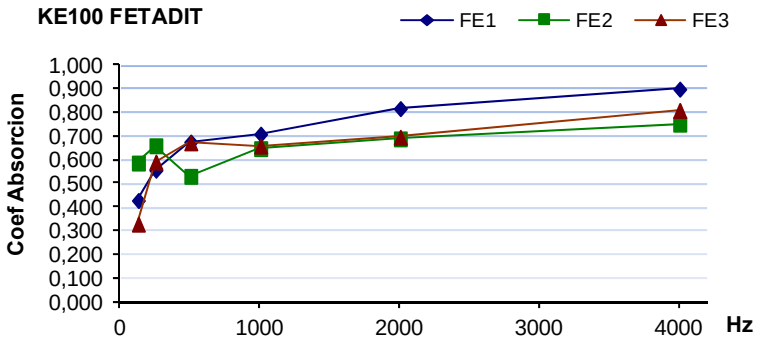


Figura 75. NRC KE100 aglomerado con FETADIT

En la figura anterior se observa como la disipación de la energía acústica es adecuada en el rango de las bajas frecuencias. Sin embargo, es en las altas frecuencias donde el kenaf proporciona los mayores valores siendo este aspecto el que contribuye a obtener uno de los mayores NRC de las muestras caracterizadas hasta ahora, especialmente en aquellas con un mayor tamaño de partícula.

75% KENAF + 25% NEUMÁTICO (KE75+NE25)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica son los siguientes:

Tabla 90. NRC KE75-NE25 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**KE75 NE25 FE1**	**KE75 NE25 FE2**	**KE75 NE25 FE3**
125	0,158	0,189	0,201
250	0,596	0,678	0,577
500	0,765	0,736	0,770
1000	0,706	0,659	0,632
2000	0,927	0,701	0,626
4000	0,940	0,765	0,700
NRC	0,75	0,69	0,65

La adición de una pequeña cantidad de neumático a la muestra de kenaf mejora considerablemente el NRC de la muestra, especialmente en aquellas con un mayor tamaño de partícula, donde uno de los mecanismos de absorción principales se debe a la formación de poros intergranulares.

No en vano el neumático, por su escasa porosidad analizada en el estudio textural, basa su mecanismo de disipación de energía acústica en la formación de poros con el resto de las partículas aglomeradas. En el caso que nos ocupa la mejora tiene, por lo tanto, una fuerte dependencia con el tamaño de partícula.

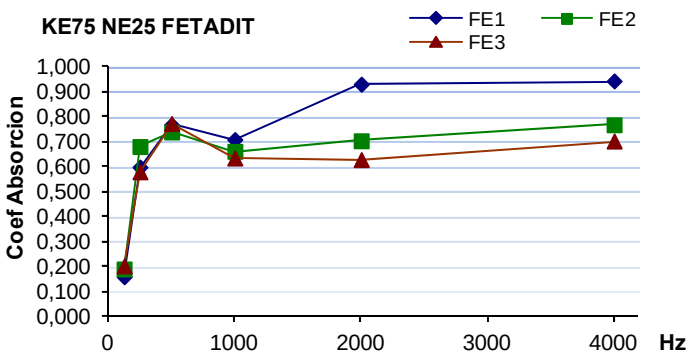


Figura 75. NRC KE75-NE25 aglomerado con FETADIT

En la gráfica anterior se observan los coeficientes de absorción acústica en los diferentes rangos de frecuencia. Aunque, como consecuencia de la adición del neumático, a bajas frecuencias la muestra presenta un buen comportamiento, mucho mejor que la fibra de kenaf sola, es sin embargo en el rango de las altas frecuencias donde las probetas alcanzan sus valores más elevados, especialmente en la muestra con un mayor tamaño de partícula y, por tanto, menor cantidad de aglomerante.

50% KENAF + 50% NEUMÁTICO (KE50+NE50)

Los resultados de la caracterización acústica de las muestras aglomeradas con fetadit compuestas por kenaf y neumático al 50% se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 91. NRC KE50-NE50 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**KE50 NE50 FE1**	**KE50 NE50 FE2**	**KE50 NE50 FE3**
125	0,131	0,167	0,172
250	0,500	0,599	0,536
500	0,770	0,707	0,759
1000	0,610	0,639	0,656
2000	0,696	0,679	0,722
4000	0,781	0,735	0,776
NRC	0,64	0,66	0,67

Tal y como puede observarse, la adición de una mayor cantidad de neumático disminuye levemente los valores de NRC en todas las probetas. Los resultados de las tres muestras, en cualquier caso, son prácticamente coincidentes.

La reducción de material poroso absorbente como es el kenaf se compensa parcialmente con la mejora de la porosidad intergranular que ofrece el neumático.

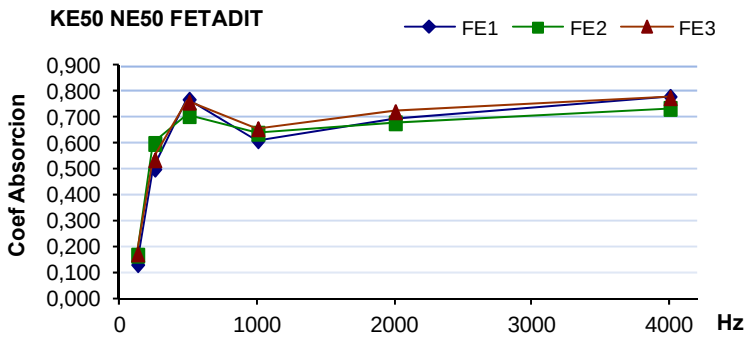


Figura 77. NRC KE50-NE50 aglomerado con FETADIT

En la gráfica anterior llama la atención la coincidencia entre las tres gráficas en las que se observa una gran similitud en la curva con independencia de la granulometría. Al igual que en las muestras preparadas con otros aglomerantes, la tendencia al añadir una mayor cantidad de neumático en la composición es un incremento de la absorción en el rango de las bajas frecuencias.

La absorción a altas frecuencias desciende levemente como consecuencia de la sustitución de kenaf por neumático debido a la que éstos son totalmente opuestos en lo relativo a su porosidad intrínseca.

25% KENAF + 75% NEUMÁTICO (KE25+NE75)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de este material son los que se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 92. NRC KE25-NE75 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**KE25 NE75 FE1**	**KE25 NE75 FE2**	**KE25 NE75 FE3**
125	0,085	0,098	0,083
250	0,294	0,315	0,276
500	0,912	0,916	0,899
1000	0,656	0,636	0,608
2000	0,758	0,877	0,687
4000	0,800	0,830	0,794
NRC	0,66	0,69	0,62

El mayor NRC se obtiene para la muestra con un tamaño intermedio de partícula (entre 2,0 y 4,5 mm) lo que hace prever, al igual que ocurriera con otros aglomerantes, que tanto los mecanismos relativos a la porosidad interpartícula como los relativos a la porosidad del propio material (en este caso el kenaf, dado que la porosidad del neumático es prácticamente despreciable) entran en juego.

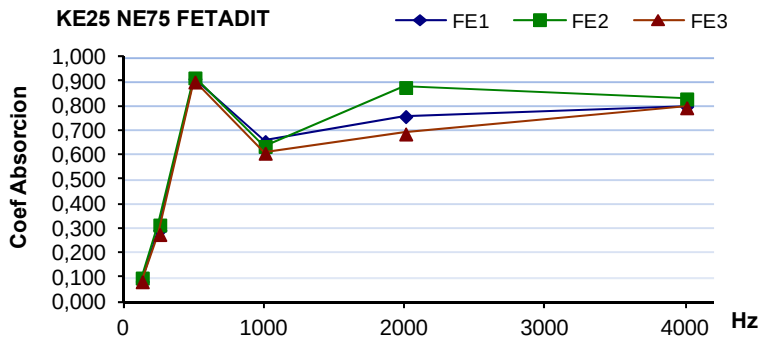


Figura 78. NRC K25-NE75 aglomerado con FETADIT

En la gráfica anterior se constata la correspondencia a bajas frecuencias de las curvas de absorción acústica de las muestras caracterizadas, con independencia del tamaño de partícula. A medias y altas frecuencias la granulometría y cantidad de aglomerante marcan leves diferencias entre las diferentes muestras ensayadas.

100% NEUMÁTICO (NE100)

Los resultados obtenidos para la muestra de neumático aglomerada con fetadit son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 93. NRC NE100 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**NE100 FE1**	**NE100 FE2**	**NE100 FE3**
125	0,072	0,063	0,057
250	0,134	0,124	0,119
500	0,472	0,447	0,467
1000	0,721	0,724	0,598
2000	0,771	0,690	0,765
4000	0,845	0,852	0,657
NRC	0,52	0,50	0,49

Tal y como puede observarse, existe una notable disminución de los valores de los NRC en las distintas muestras al eliminar la fibra de kenaf de su composición. No en vano el neumático es el material de partida con menor porosidad tal y como demuestra el estudio textural realizado en apartados anteriores. Otra característica que podemos destacar de los resultados obtenidos es la correspondencia entre los valores de los coeficientes de absorción acústica con independencia del tamaño de partícula de la muestra, siendo en los tres casos muy similares.

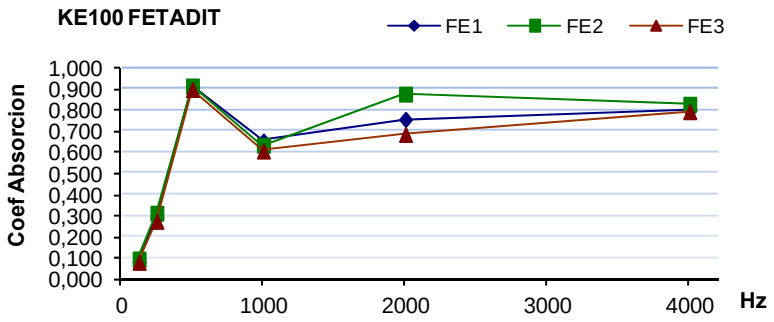


Figura 79. NRC NE100 aglomerado con FETADIT

En la gráfica anterior se constata nuevamente la correspondencia a baja frecuencias de la absorción acústica de este material, existiendo leves diferencias en el rango de las altas frecuencias.

75% NEUMÁTICO + 25% CORCHO (CO25+NE75)

Los resultados obtenidos para la muestra de referencia se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 94. NRC CO25-NE75 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**CO25 NE75 FE1**	**CO25 NE75 FE2**	**CO25 NE75 FE3**
125	0,278	0,252	0,203
250	0,644	0,690	0,678
500	0,553	0,550	0,605
1000	0,588	0,599	0,582
2000	0,683	0,652	0,600
4000	0,711	0,718	0,698
NRC	0,62	0,62	0,62

Observamos nuevamente la marcada coincidencia a entre los valores de NRC obtenidos, con independencia de que empleemos diferentes fracciones granulométricas en la elaboración de las muestras y, consecuentemente variemos el volumen de aglomerante utilizado.

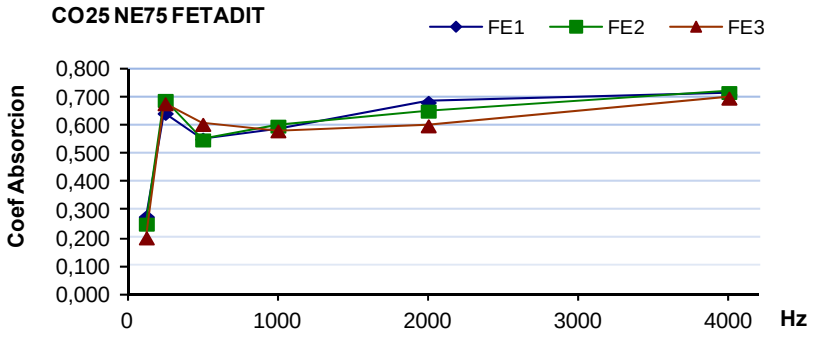


Figura 80. NRC CO25-NE75 aglomerado con FETADIT

En la gráfica anterior se observa el pico característico tanto en las muestras de corcho como en las muestras de neumático en el rango de las bajas frecuencias debidos, previsiblemente, a la porosidad interpartícula. Otra característica a tener en cuenta de la anterior representación es la concordancia entre los coeficientes de absorción acústica obtenidos en todo el espectro de frecuencias analizado.

50% NEUMÁTICO + 50% CORCHO (CO50+NE50)

La caracterización acústica del material arroja los siguientes datos que se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 95. NRC CO50-NE50 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**CO50 NE50 FE1**	**CO50 NE50 FE2**	**CO50 NE50 FE3**
125	0,083	0,074	0,078
250	0,208	0,165	0,193
500	0,785	0,647	0,760
1000	0,618	0,635	0,550
2000	0,833	0,762	0,701
4000	0,751	0,629	0,721
NRC	0,61	0,55	0,55

La sustitución parcial de neumático por corcho empeora levemente el comportamiento acústico del material para las muestras con un menor tamaño de partícula.

La explicación a este hecho, a pesar de haber sustituido un material poco o nada poroso como es el neumático por un material con una estructura mesoporosa y macroporosa a tener en cuenta, la podemos encontrar en el aglomerante. Es posible el taponamiento de parte de la estructura porosa de este material en las muestras con una mayor cantidad de fetadit que impida obtener la mejora en el comportamiento que cabría esperar. Por contra, el neumático en todas las muestras caracterizadas ha tenido un comportamiento especialmente relevante; en particular a bajas frencuencias, como consecuencia de la formación de poros intergranulares de especial eficacia en la disipación de energía acústica en el seno de la muestra.

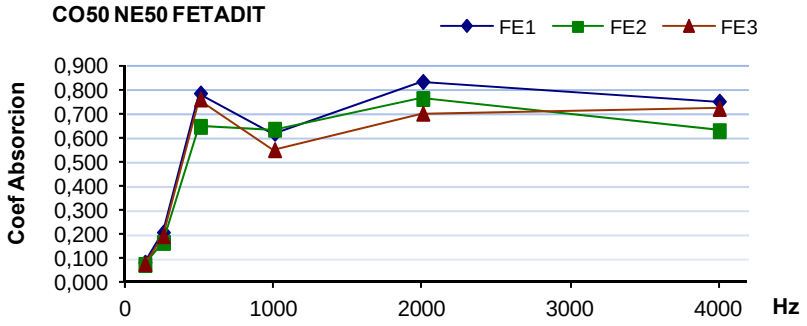


Figura 81. NRC NE50-CO50 aglomerado con FETADIT

Con independencia de lo anterior, en la figura se constata la correspondencia en términos generales entre las distintas muestras al igual que ocurre con otros aglomerantes. El pico en el coeficiente de absorción a bajas frecuencias va en aumento conforme elevamos la cantidad de corcho en la composición de la mezcla aglomerada.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de la muestra de referencia son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 96. NRC CO75-NE25 aglomerado con FETADIT

	α		
Hz	**CO75 NE25 FE1**	**CO75 NE25 FE2**	**CO75 NE25 FE3**
125	0,091	0,080	0,086
250	0,267	0,248	0,216
500	0,868	0,815	0,811
1000	0,496	0,483	0,523
2000	0,609	0,484	0,580
4000	0,614	0,565	0,614
NRC	0,56	0,51	0,53

Al igual que en las muestras anteriores, existe una gran similitud en los NRC obtenidos en las diferentes muestras con independencia del tipo de granulometría y cantidad de ligante. Existe, no obstante, un leve aumento en aquella que cuenta con un mayor tamaño de partícula y, por tanto, menor

cantidad de ligante que pueda taponar la estructura macroporosa y mesoporosa del corcho, principal componente del material aglomerado.

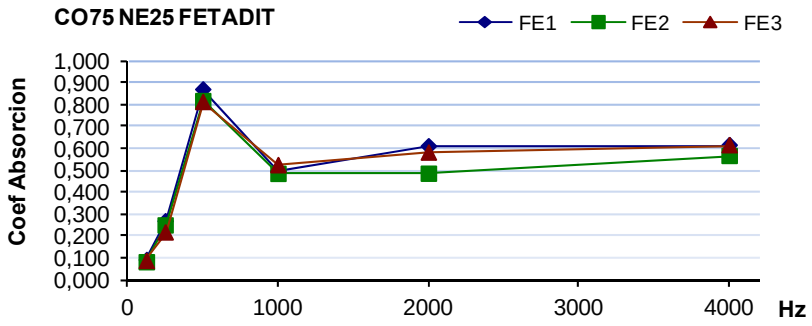


Figura 82. NRC CO75-NE25 aglomerado con FETADIT

Al reducir la cantidad de neumático en la mezcla aglomerada observamos cómo la representación de los coeficientes de absorción acústica de los materiales caracterizados en función de la frecuencia se asimila mucho más a la del corcho. Esta curva característica presenta un pico de absorción importante en el rango de las bajas frecuencias (500 Hz) debido, presumiblemente, tanto a la porosidad interpartícula como a la estructura macroporosa característica de este material.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS AGLOMERADOS CON FETADIT

Los resultados anteriores se resumen en las tablas y gráficas que se exponen a continuación:

Tabla 97. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con FETADIT

	α								
Hz	**CO100 FE1**	**CO100 FE2**	**CO100 FE3**	**CO75 KE25 FE1**	**CO75 KE25 FE2**	**CO75 KE25 FE3**	**CO50 KE50 FE1**	**CO50 KE50 FE2**	**CO50 KE50 FE3**
125	0,075	0,082	0,089	0,147	0,130	0,235	0,247	0,155	0,166
250	0,260	0,247	0,215	0,444	0,449	0,591	0,446	0,589	0,590
500	0,852	0,860	0,846	0,821	0,789	0,579	0,498	0,721	0,682
1000	0,477	0,544	0,493	0,549	0,553	0,526	0,532	0,597	0,593
2000	0,474	0,626	0,634	0,567	0,529	0,492	0,567	0,643	0,629
4000	0,551	0,695	0,688	0,640	0,525	0,566	0,720	0,765	0,729
NRC	**0,52**	**0,57**	**0,55**	**0,60**	**0,58**	**0,55**	**0,51**	**0,64**	**0,62**

	α								
Hz	**CO25 KE75 FE1**	**CO25 KE75 FE2**	**CO25 KE75 FE3**	**KE100 FE1**	**KE100 FE2**	**KE100 FE3**	**KE75 NE25 FE1**	**KE75 NE25 FE2**	**KE75 NE25 FE3**
125	0,278	0,252	0,203	0,429	0,587	0,329	0,158	0,189	0,201
250	0,644	0,690	0,678	0,557	0,660	0,591	0,596	0,678	0,577
500	0,553	0,550	0,605	0,676	0,531	0,672	0,765	0,736	0,770
1000	0,588	0,599	0,582	0,709	0,648	0,659	0,706	0,659	0,632
2000	0,683	0,652	0,600	0,817	0,689	0,696	0,927	0,701	0,626
4000	0,711	0,718	0,698	0,899	0,751	0,809	0,940	0,765	0,700
NRC	**0,62**	**0,62**	**0,62**	**0,69**	**0,63**	**0,65**	**0,75**	**0,69**	**0,65**

	α								
Hz	**KE50 NE50 FE1**	**KE50 NE50 FE2**	**KE50 NE50 FE3**	**KE25 NE75 FE1**	**KE25 NE75 FE2**	**KE25 NE75 FE3**	**NE100 FE1**	**NE100 FE2**	**NE100 FE3**
125	0,131	0,167	0,172	0,085	0,098	0,083	0,072	0,063	0,057
250	0,500	0,599	0,536	0,294	0,315	0,276	0,134	0,124	0,119
500	0,770	0,707	0,759	0,912	0,916	0,899	0,472	0,447	0,467
1000	0,610	0,639	0,656	0,656	0,636	0,608	0,721	0,724	0,598
2000	0,696	0,679	0,722	0,758	0,877	0,687	0,771	0,690	0,765
4000	0,781	0,735	0,776	0,800	0,830	0,794	0,845	0,852	0,657
NRC	**0,64**	**0,66**	**0,67**	**0,66**	**0,69**	**0,62**	**0,52**	**0,50**	**0,49**

	α								
Hz	**CO75 NE25 FE1**	**CO75 NE25 FE2**	**CO75 NE25 FE3**	**CO50 NE50 FE1**	**CO50 NE50 FE2**	**CO50 NE50 FE3**	**CO25 NE75 FE1**	**CO25 NE75 FE2**	**CO25 NE75 FE3**
125	0,091	0,080	0,086	0,083	0,074	0,078	0,278	0,252	0,203
250	0,267	0,248	0,216	0,208	0,165	0,193	0,644	0,690	0,678
500	0,868	0,815	0,811	0,785	0,647	0,760	0,553	0,550	0,605
1000	0,496	0,483	0,523	0,618	0,635	0,550	0,588	0,599	0,582
2000	0,609	0,484	0,580	0,833	0,762	0,701	0,683	0,652	0,600
4000	0,614	0,565	0,614	0,751	0,629	0,721	0,711	0,718	0,698
NRC	**0,56**	**0,51**	**0,53**	**0,61**	**0,55**	**0,55**	**0,62**	**0,62**	**0,62**

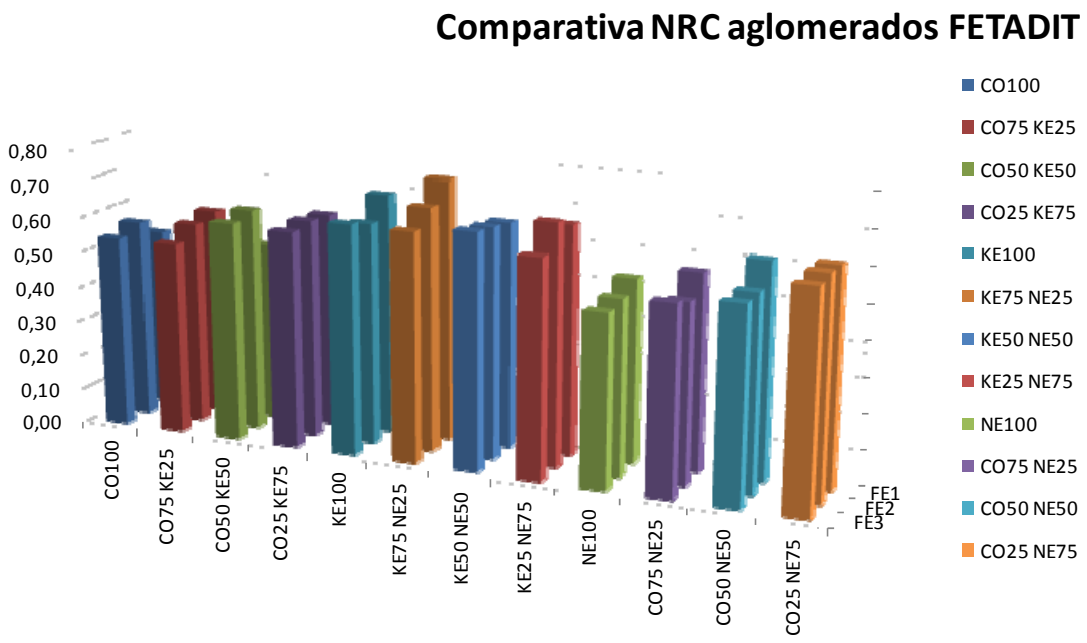


Figura 83. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con FETADIT

A la vista de los datos obtenidos en los apartados anteriores se puede considerar que:

- El fetadit como material aglomerante permite obtener mayores índices NRC alcanzando en el rango de las altas frecuencias valores de coeficientes de absorción acústica muy cercanos a la unidad para algunos de los materiales empleados.

- Como consecuencia de lo anterior, este material ligante tiene un mejor comportamiento en relación a la porosidad de los materiales utilizados en la elaboración de los conglomerados frente a otros ligantes analizados. El fetadit en general tiene una mayor compatibilidad tanto con la estructura porosa interpartícula de los materiales aglomerados como la porosidad propia de cada material caracterizada en el estudio textural.

- Al igual que ocurre con ligantes anteriores, los mayores valores de NRC se obtienen para aquellas muestras que contienen kenaf en su composición,

especialmente por la contribución que este material realiza a la absorción acústica a altas frecuencias.

03.04.02.04. MUESTRAS AGLOMERADAS CON GOMA-LACA

100% CORCHO (CO100)

Los resultados de la caracterización acústica del corcho aglomerado con goma-laca son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 98. NRC CO100 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**CO100 GL1**	**CO100 GL2**	**CO100 GL3**
125	0,101	0,079	0,071
250	0,355	0,322	0,284
500	0,633	0,696	0,793
1000	0,403	0,368	0,381
2000	0,522	0,442	0,467
4000	0,515	0,425	0,504
NRC	0,48	0,46	0,48

Como podemos observar, existe concordancia entre los valores obtenidos en las diferentes muestras, con independencia del tamaño de partícula y tipo de aglomerante utilizado. Esta similitud es total entre dos muestras de características antagónicas como son la GL1 y GL3, existiendo una despreciable diferencia con la que contiene las partículas de tamaño comprendido entre los 2,0 y 4,5 mm.

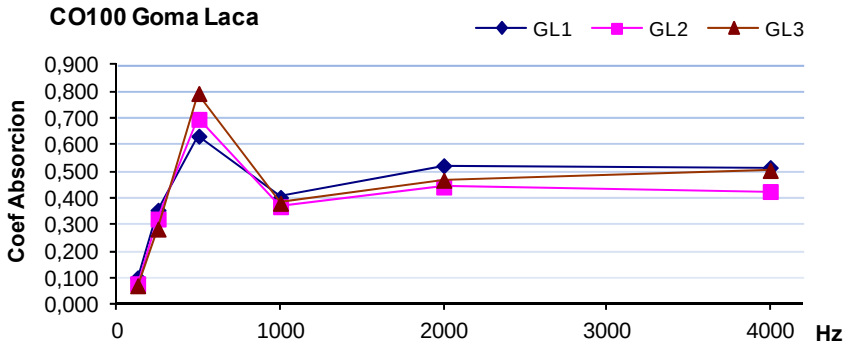


Figura 84. NRC CO100 aglomerado con GOMA-LACA

Gráficamente se constata igualmente la correlación entre los resultados, presentando las tres muestras ensayadas curvas similares de absorción acústica en el espectro de frecuencias analizado. A priori, este hecho puede sugerir que el mecanismo de disipación de energía no depende del tamaño de partícula sino que es inherente al material, a su porosidad característica con un importante de volumen de mesoporos y macroporos, si bien cabe la posibilidad de que se den los dos mecanismos y que prácticamente sus efectos se contrapongan para las muestras opuestas.

Se observa de nuevo la existencia de un pico de absorción acústica similar al recogido en la muestra con otros ligantes para este mismo material en el rango de las frecuencias bajas (en torno a 500 Hz).

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

Los valores de NRC obtenidos para la muestra objeto de caracterización se adjuntan en la siguiente tabla:

Tabla 99. NRC CO75-KE25 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**CO75 KE25 GL1**	**CO75 KE25 GL2**	**CO75 KE25 GL3**
125	0,124	0,126	0,185
250	0,559	0,577	0,430
500	0,568	0,532	0,561
1000	0,413	0,450	0,410
2000	0,395	0,431	0,346
4000	0,549	0,478	0,413
NRC	0,48	0,50	0,44

La adición de kenaf a la muestra mantiene e incluso mejora levemente los valores NRC globales de la muestra para aquellas con un tamaño de partícula superior a 2,0 mm (las denominadas GL1 y GL2), experimentando un leve descenso para aquella con tamaño de partícula inferior. El desarrollo microporoso del kenaf tal vez pueda ser taponado por el ligante, lo que justificaría el leve descenso frente al corcho que cuenta con una estructura porosa de mayor tamaño aunque no volumen.

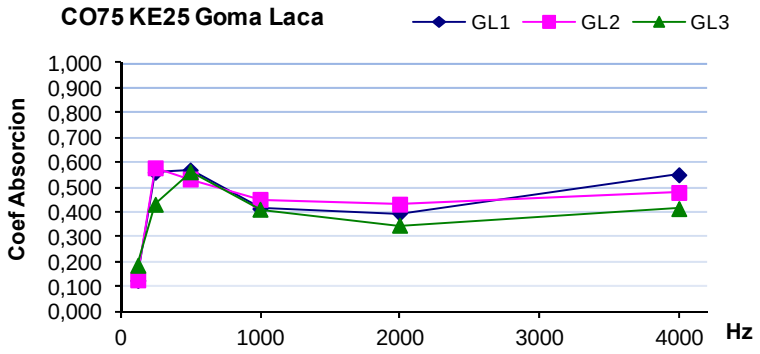


Figura 85. NRC CO75-KE25 aglomerado con GOMA-LACA

Gráficamente se aprecia como la adición de kenaf supone una ligera disminución generalizada de la absorción acústica en el rango de las bajas frecuencias, que se compensa con una subida también discreta en el rango de las altas frecuencias gracias a la elevada porosidad de este material.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Los resultados de la caracterización acústica se indican en la siguiente tabla:

Tabla 100. NRC CO50-KE50 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**CO50 KE50 GL1**	**CO50 KE50 GL2**	**CO50 KE50 GL3**
125	0,202	0,193	0,188
250	0,732	0,665	0,738
500	0,513	0,536	0,581
1000	0,462	0,505	0,513
2000	0,452	0,616	0,486
4000	0,534	0,775	0,559
NRC	0,54	0,58	0,58

Al igual que sucede con otros materiales ligantes, la adición de una mayor cantidad de kenaf mejora de forma notable la absorción acústica de la muestra como consecuencia del incremento de la disipación de la energía acústica en el rango de las altas frecuencias. Esta mejora es mucho más manifiesta en las probetas con un menor tamaño de partícula (inferiores a 4,5 mm), previsiblemente como consecuencia de la existencia de una mayor superficie de

este material que contribuiría a la absorción, sin perjuicio del bloqueo puntual que pueda hacer el material ligante de los microporos característicos de este material fibroso.

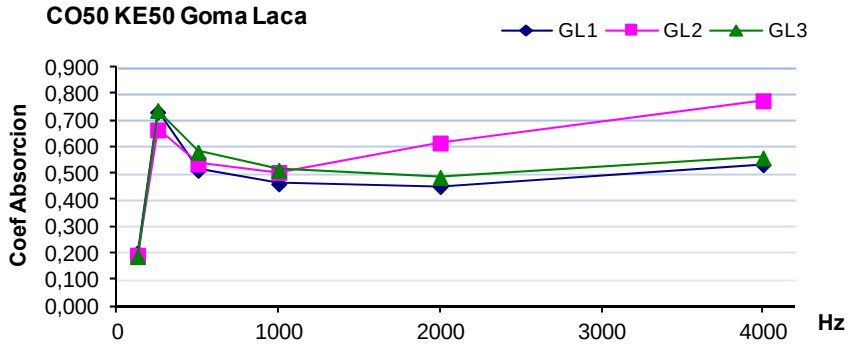


Figura 86. NRC CO50-KE50 aglomerado con GOMA-LACA

La gráfica anterior corrobora la hipótesis de que la adición de kenaf mejora la absorción acústica en el rango de las altas frecuencias y en general suaviza la curva de absorción. El pico de absorción característico del corcho para este y otros materiales ligantes se suaviza quedando una curva más plana.

25% CORCHO + 75% KENAF (CO25+KE75)

Los resultados de α y NRC para la muestra de referencia obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 101. NRC CO25-KE75 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**CO25 KE75 GL1**	**CO25 KE75 GL2**	**CO25 KE75 GL3**
125	0,298	0,419	0,372
250	0,780	0,442	0,458
500	0,503	0,473	0,534
1000	0,586	0,470	0,515
2000	0,580	0,439	0,511
4000	0,599	0,583	0,638
NRC	0,61	0,46	0,50

La adición de una mayor cantidad de kenaf, lejos de mejorar la absorción acústica del material, en general la empeora salvo para las muestras con un

mayor tamaño de partícula y consecuentemente menor volumen de aglomerante. Este hecho puede estar relacionado con la posibilidad de que un exceso de kenaf en partículas de menor tamaño pero con un mayor volumen de aglomerante pueda no contribuir de forma adecuada al mecanismo de absorción acústica del material como consecuencia de un bloqueo de sus meso y, por tanto, microporos por el material ligante. De esta forma se justificaría el decaimiento de la absorción de energía respecto de las muestras anteriores dado que la porosidad interpartícula propiciada por el corcho cada vez es menor al ir sustituyendo éste.

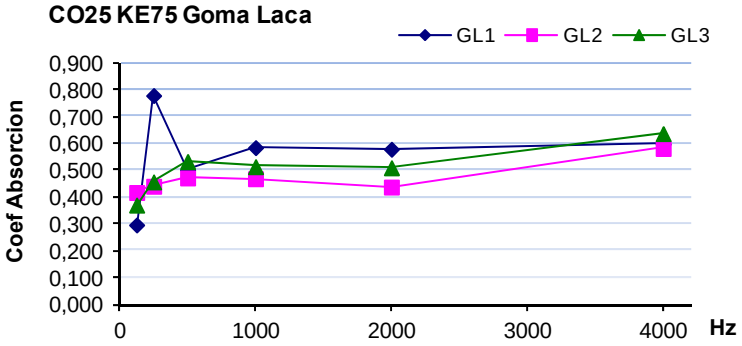


Figura 87. NRC CO25-KE75 aglomerado con GOMA-LACA

En la gráfica se observa, en correspondencia con los resultados obtenidos para esta misma combinación de materiales con otros ligantes, cómo la curva de absorción se hace cada vez más plana, eliminándose casi por completo el pico de absorción a bajas frecuencias e incrementándose poco a poco la absorción acústica en el rango de las medias y altas frecuencias.

100% KENAF (KE100)

Lo resultados obtenidos para la muestra de kenaf aglomera con goma-laca son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 102. NRC KE100 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**KE100 GL1**	**KE100 GL2**	**KE100 GL3**
125	0,475	0,336	0,449
250	0,416	0,840	0,447
500	0,572	0,572	0,495
1000	0,476	0,531	0,546
2000	0,467	0,449	0,579
4000	0,546	0,556	0,731
NRC	0,48	0,60	0,52

Al igual que ocurriera en la muestra anterior el kenaf no mejora sustancialmente los NRC en relación a su mezcla con corcho. El motivo de esta falta de mejora en comparación con los resultados obtenidos, por ejemplo, con el fetadit debemos buscarlos en el material ligante tal y como se ha justificado anteriormente. Existen poros del kenaf que son tapados por este material que impide que la muestra obtenga resultados mayores, en especial en el rango de las altas frecuencias, donde la fibra de kenaf se vuelve más absorbente.

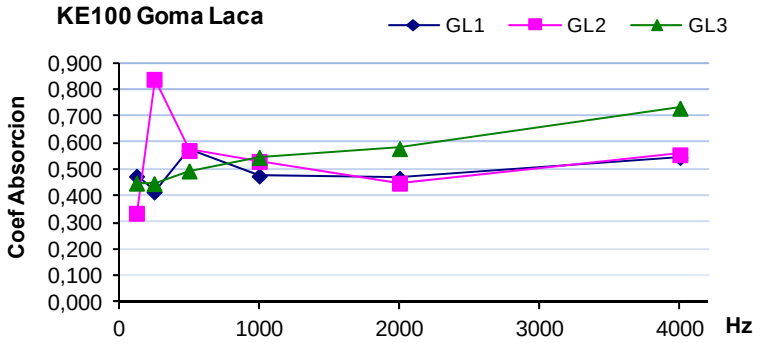


Figura 88. NRC KE100 aglomerado con GOMA-LACA

La figura anterior, salvo por el pico a bajas frecuencias de la muestra GL2, presenta un trazado muy similar al existente con otros aglomerantes. Se caracteriza por una discreta absorción en el rango de las bajas frecuencias y algo mayores en la esfera de las medias y altas frecuencias. Nótese de que, a pesar de existir un presunto taponamiento de los poros del material, la muestra con un menor tamaño de partícula es la que presenta un mayor coeficiente de absorción acústica en el rango de las altas frecuencias.

75% KENAF + 25% NEUMÁTICO (KE75+NE25)

La adición de neumático a la muestra de kenaf propiciará la aparición de nuevo de poros intergranulares, base del mecanismo de absorción acústica de este material cuya caracterización textural identifica como extremadamente poco poroso. Los resultados de la caracterización acústica de este material aglomerado se resume en la siguiente tabla:

Tabla 103. NRC KE75-NE25 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**KE75 NE25 GL1**	**KE75 NE25 GL2**	**KE75 NE25 GL3**
125	0,352	0,336	0,289
250	0,687	0,666	0,529
500	0,435	0,570	0,595
1000	0,570	0,536	0,562
2000	0,667	0,533	0,567
4000	0,786	0,653	0,652
NRC	0,59	0,58	0,56

A pesar de la leve diferencia en los valores NRC de la tabla, éstos muestran una dependencia con el tamaño de partícula. Al introducir neumático en la composición, las muestras con un mayor tamaño de partícula presentan en general, un mejor (aunque discreto), coeficiente de absorción acústica. La causa la encontramos en la activación del mecanismo de absorción acústica del neumático, basado en la porosidad intergranular, que se suma a la buenas prestaciones con las que cuenta el kenaf en el rango de las altas frecuencias.

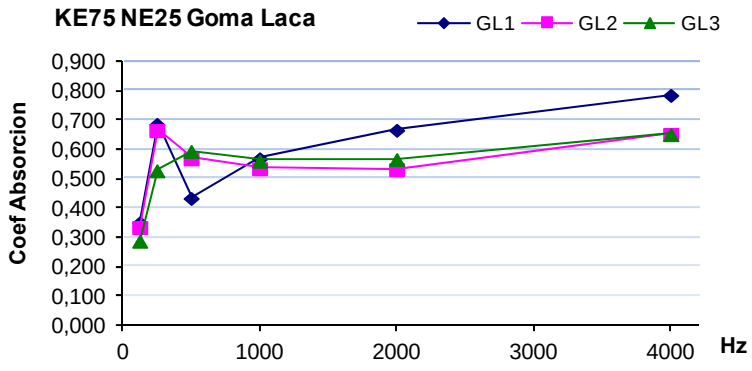


Figura 89. NRC KE75-NE25 aglomerado con GOMA-LACA

En la figura anterior se constata la mejora introducida a bajas frecuencias por el neumático como consecuencia de la activación de la porosidad intergranular. Se conserva además (e incluso aumenta) para la muestra GL1 (donde existe menos cantidad de ligante que pueda ocluir los poros del kenaf) esta absorción, en el rango de las medias y altas frecuencias.

50% KENAF + 50% NEUMÁTICO (KE50+NE50)

Los valores obtenidos en la caracterización acústica de las muestras se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 104. NRC KE50-NE50 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**KE50 NE50 GL1**	**KE50 NE50 GL2**	**KE50 NE50 GL3**
125	0,175	0,122	0,152
250	0,533	0,524	0,510
500	0,739	0,847	0,767
1000	0,654	0,608	0,570
2000	0,825	0,667	0,624
4000	0,886	0,794	0,734
NRC	0,69	0,66	0,62

Al igual que en el caso anterior, se observa un aumento en los NRC obtenidos como consecuencia de la activación de los dos mecanismos de absorción acústica, tanto el debido a la porosidad intergranular del neumático como la porosidad característica del kenaf.

Prevalece el primero de los mecanismos, dado que existe una fuerte dependencia del tamaño de partícula como consecuencia presumiblemente de que parte de la porosidad del kenaf es anulada por el material ligante utilizado.

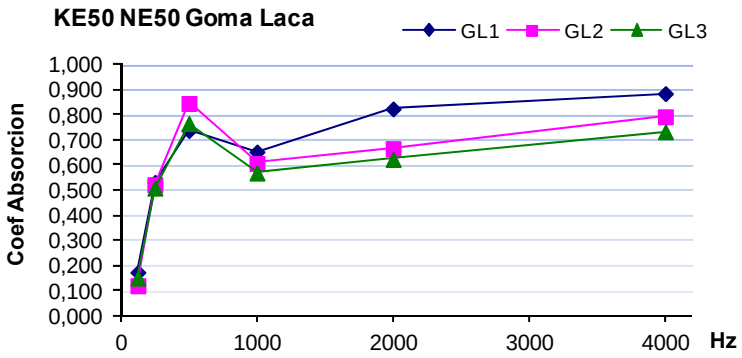


Figura 90. NRC KE50-NE50 aglomerado con GOMA-LACA

La gráfica muestra una curva característica de este tipo de materiales en los que, a bajas frecuencias, existe un pico de absorción como consecuencia de la porosidad intergranular mientras que el kenaf permite elevar los coeficientes de absorción en el rango de las altas frecuencias.

25% KENAF + 75% NEUMÁTICO (KE25+NE75)

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 105. NRC KE25-NE75 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**KE25 NE75 GL1**	**KE25 NE75 GL2**	**KE25 NE75 GL3**
125	0,109	0,137	0,121
250	0,410	0,409	0,300
500	0,881	0,916	0,929
1000	0,616	0,583	0,638
2000	0,948	0,721	0,686
4000	0,897	0,838	0,793
NRC	0,71	0,66	0,64

Al igual que en las dos muestras anteriores, se incrementa la absorción acústica y se corrobora el hecho de que, para estos dos materiales y con este ligante, el mecanismo más importante de disipación de energía acústica es el debido a la porosidad intergranular y no a la de los materiales de partida. Prueba de ello es que los NRC siguen en aumento al continuar con la sustitución de kenaf por

neumático, contando también con una importante contribución del material fibroso especialmente importante en el rango de las altas frecuencias.

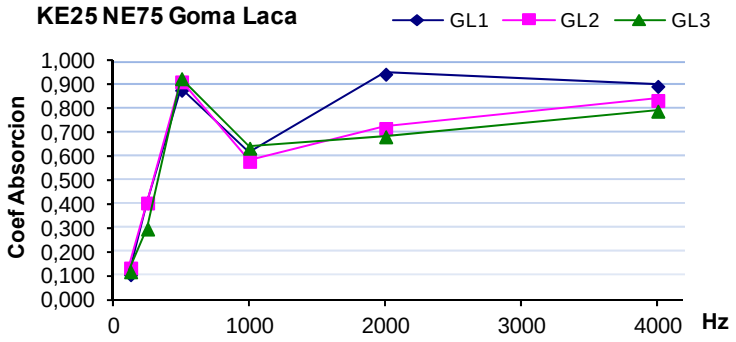


Figura 91. NRC K25-NE75 aglomerado con GOMA-LACA

La anterior gráfica muestra de nuevo el comportamiento típico de esta mezcla de materiales con un pico a bajas frecuencias y una absorción elevada en el rango de las altas frecuencias.

100% NEUMÁTICO (NE100)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de las muestras de neumático aglomeradas con goma-laca son los que se exponen la siguiente tabla:

Tabla 106. NRC NE100 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**NE100 GL1**	**NE100 GL2**	**NE100 GL3**
125	0,092	0,082	0,080
250	0,154	0,140	0,143
500	0,583	0,539	0,597
1000	0,721	0,608	0,689
2000	0,573	0,861	0,571
4000	0,815	0,842	0,843
NRC	0,51	0,54	0,50

Como era de prever, al eliminar la contribución del kenaf (el material más poroso de los empleados en la elaboración de las diferentes probetas), el NRC debía resentirse tal y como muestran los resultados obtenidos. Sin embargo no existe

una dependencia pronunciada con el tamaño de partícula como podría esperarse a consecuencia de la presencia de un pico inesperado para la muestra GL2 en el rango de las frecuencias medias.

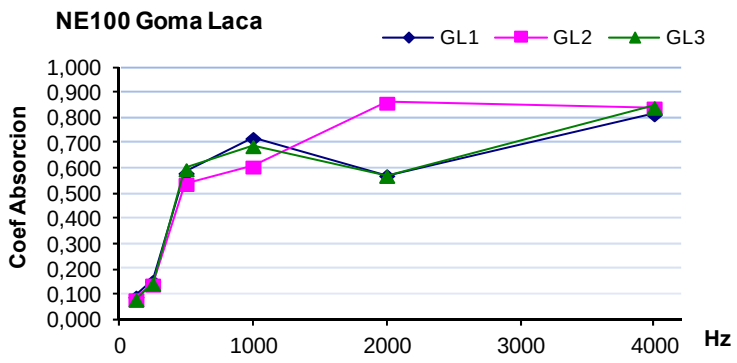


Figura 92. NRC NE100 aglomerado con GOMA-LACA

En general, existe una correspondencia entre las diferentes muestras a excepción de la muestra de tamaño medio de partícula (entre 2,0 y 4,5 mm). Este hecho tal vez se deba a la formación de alguna estructura porosa no detectable durante el procesado, dado que la única variable ante la ausencia de porosidad de este material debe ser la relativa al tamaño de partícula y la formación de poros intergranulares.

75% NEUMÁTICO + 25% CORCHO (CO25+NE75)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 107. NRC CO25-NE75 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**CO25 NE75 GL1**	**CO25 NE75 GL2**	**CO25 NE75 GL3**
125	0,097	0,080	0,082
250	0,176	0,166	0,160
500	0,695	0,706	0,657
1000	0,593	0,550	0,556
2000	0,802	0,721	0,651
4000	0,742	0,732	0,653
NRC	0,57	0,54	0,51

La introducción de corcho en la mezcla mejora las prestaciones en cuanto a absorción acústica del neumático. Recordemos que el corcho, en su caracterización textural, presentaba una importante estructura de mesoporos y macroporos, que en combinación con la porosidad interpartícula del neumático consigue mejorar la prestaciones del material aglomerado frente al neumático por separado.

Al igual que ocurría con el kenaf, para este material el mecanismo de disipación de energía o presión sonora a través de los poros intergranulares es más relevante que la absorción realizada por los poros del corcho. Por este motivo, los valores de absorción acústica presentan una clara dependencia en relación al tamaño de partícula.

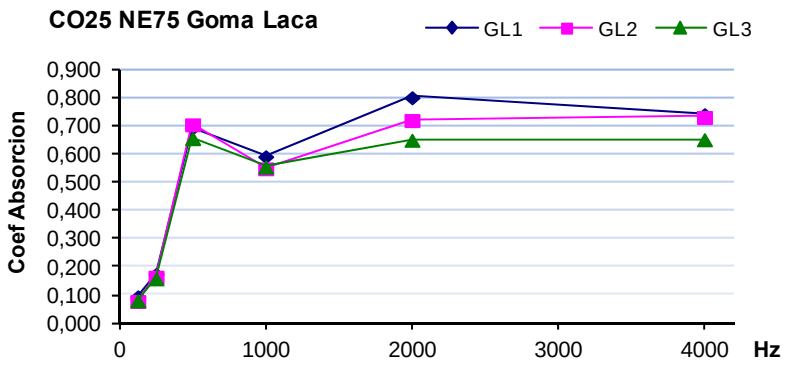


Figura 93. NRC NE75-CO25 aglomerado con GOMA-LACA

En la gráfica anterior se muestran las curvas de absorción acústica en el intervalo de frecuencias utilizado, en el que se constata la existencia de una correspondencia en el rango de las bajas frecuencias. A medias y altas frecuencias la porosidad intergranular es la que marca las diferencias entre las diferentes muestras caracterizadas.

50% NEUMÁTICO + 50% CORCHO (CO50+NE50)

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 108. NRC CO50-NE50 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**CO50 NE50 GL1**	**CO50 NE50 GL2**	**CO50 NE50 GL3**
125	0,076	0,074	0,079
250	0,188	0,207	0,175
500	0,798	0,827	0,731
1000	0,480	0,492	0,576
2000	0,606	0,571	0,734
4000	0,637	0,678	0,679
NRC	0,52	0,52	0,55

Tal y como podemos observar, en general descienden levemente los NRC para las muestras con mayor tamaño de partícula. La causa, presumiblemente, radica en la menor incidencia que tiene el tamaño de partícula en el mecanismo de disipación de energía frente a la porosidad del material, que se manifiesta más cuanto mayor es la superficie del material de partida, es decir, en las probetas fabricadas con partículas de menor tamaño.

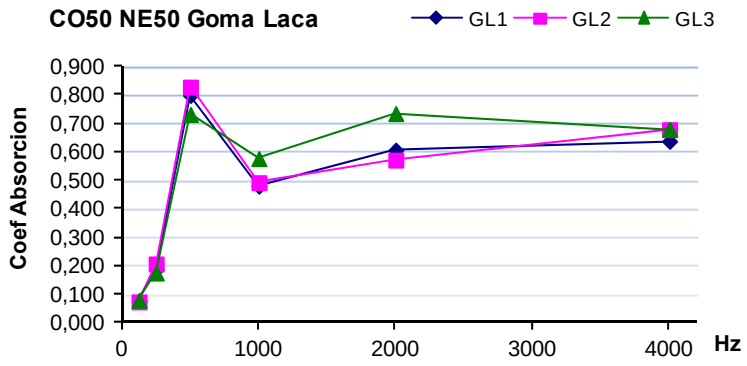


Figura 94. NRC NE50-CO50 aglomerado con GOMA-LACA

En la gráfica se observa una curva típica de la presencia de corcho en la que existe un pico de absorción a bajas frecuencias (500 Hz) y un coeficiente de absorción acústica moderado a medias y altas frecuencias. Tal y como se ha indicado anteriormente, la porosidad del corcho contribuye en el rango de las medias y altas frecuencias a aumentar el NRC total del material, especialmente en las muestras con un menor tamaño de partícula.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

El resultado de la caracterización acústica de las muestras de neumático y corcho indicadas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 109. NRC CO75-NE25 aglomerado con GOMA-LACA

	α		
Hz	**CO75 NE25 GL1**	**CO75 NE25 GL2**	**CO75 NE25 GL3**
125	0,066	0,073	0,127
250	0,390	0,408	0,360
500	0,793	0,706	0,545
1000	0,430	0,480	0,409
2000	0,426	0,634	0,448
4000	0,460	0,690	0,459
NRC	0,51	0,56	0,44

En la tabla anterior se observa cómo descienden con respecto a la anterior los valores obtenidos de NRC, especialmente en las muestras de menor tamaño de partícula que en la anterior serie eran presumiblemente las causantes de la mejora. Este efecto puede estar relacionado con la importancia de la porosidad intergranular que aporta el neumático que no se ve compensada con el incremento de la porosidad que aporta el corcho. No obstante lo anterior, también es posible el taponamiento por parte del material ligante de parte de los mesoporos.

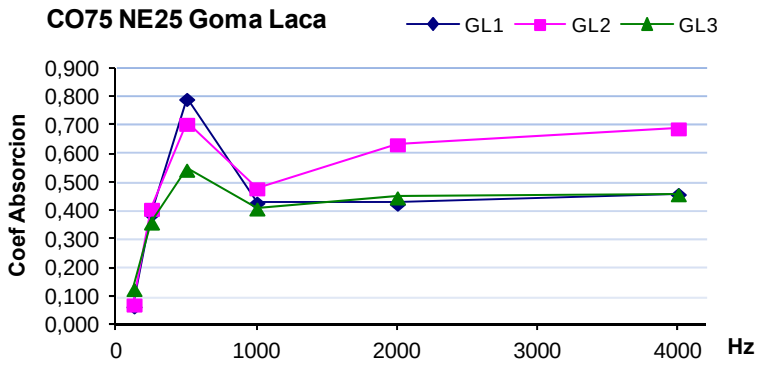


Figura 95. NRC NE25-CO75 aglomerado con GOMA-LACA

En la gráfica anterior se constata la similitud que existe entre estas curvas y la del corcho solo. Existe un pico en el rango de las bajas frecuencias y una

absorción acústica más discreta en el rango de las medias y altas frecuencias, con leves distorsiones como consecuencia de la porosidad interpartícula que aporta el 25% de neumático empleado en la fabricación de la probeta.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS AGLOMERADOS CON GOMA-LACA

Los resultados obtenidos y analizados en los apartados precedentes se resumen en las siguientes tablas y gráficas:

Tabla 110. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con GOMA-LACA

	α								
Hz	**CO100 GL1**	**CO100 GL2**	**CO100 GL3**	**CO75 KE25 GL1**	**CO75 KE25 GL2**	**CO75 KE25 GL3**	**CO50 KE50 GL1**	**CO50 KE50 GL2**	**CO50 KE50 GL3**
125	0,101	0,079	0,071	0,124	0,126	0,185	0,202	0,193	0,188
250	0,355	0,322	0,284	0,559	0,577	0,430	0,732	0,665	0,738
500	0,633	0,696	0,793	0,568	0,532	0,561	0,513	0,536	0,581
1000	0,403	0,368	0,381	0,413	0,450	0,410	0,462	0,505	0,513
2000	0,522	0,442	0,467	0,395	0,431	0,346	0,452	0,616	0,486
4000	0,515	0,425	0,504	0,549	0,478	0,413	0,534	0,775	0,559
NRC	**0,48**	**0,46**	**0,48**	**0,48**	**0,50**	**0,44**	**0,54**	**0,58**	**0,58**

	α								
Hz	**CO25 KE75 GL1**	**CO25 KE75 GL2**	**CO25 KE75 GL3**	**KE100 GL1**	**KE100 GL2**	**KE100 GL3**	**KE75 NE25 GL1**	**KE75 NE25 GL2**	**KE75 NE25 GL3**
125	0,298	0,419	0,372	0,475	0,336	0,449	0,352	0,336	0,289
250	0,780	0,442	0,458	0,416	0,840	0,447	0,687	0,666	0,529
500	0,503	0,473	0,534	0,572	0,572	0,495	0,435	0,570	0,595
1000	0,586	0,470	0,515	0,476	0,531	0,546	0,570	0,536	0,562
2000	0,580	0,439	0,511	0,467	0,449	0,579	0,667	0,533	0,567
4000	0,599	0,583	0,638	0,546	0,556	0,731	0,786	0,653	0,652
NRC	**0,61**	**0,46**	**0,50**	**0,48**	**0,60**	**0,52**	**0,59**	**0,58**	**0,56**

	α								
Hz	**KE50 NE50 GL1**	**KE50 NE50 GL2**	**KE50 NE50 GL3**	**KE25 NE75 GL1**	**KE25 NE75 GL2**	**KE25 NE75 GL3**	**NE100 GL1**	**NE100 GL2**	**NE100 GL3**
125	0,175	0,122	0,152	0,109	0,137	0,121	0,092	0,082	0,080
250	0,533	0,524	0,510	0,410	0,409	0,300	0,154	0,140	0,143
500	0,739	0,847	0,767	0,881	0,916	0,929	0,583	0,539	0,597
1000	0,654	0,608	0,570	0,616	0,583	0,638	0,721	0,608	0,689
2000	0,825	0,667	0,624	0,948	0,721	0,686	0,573	0,861	0,571
4000	0,886	0,794	0,734	0,897	0,838	0,793	0,815	0,842	0,843
NRC	**0,69**	**0,66**	**0,62**	**0,71**	**0,66**	**0,64**	**0,51**	**0,54**	**0,50**

	α								
Hz	**CO25 NE75 GL1**	**CO25 NE75 GL2**	**CO25 NE75 GL3**	**CO50 NE50 GL1**	**CO50 NE50 GL2**	**CO50 NE50 GL3**	**CO75 NE25 GL1**	**CO75 NE25 GL2**	**CO75 NE25 GL3**
125	0,097	0,080	0,082	0,076	0,074	0,079	0,066	0,073	0,127
250	0,176	0,166	0,160	0,188	0,207	0,175	0,390	0,408	0,360
500	0,695	0,706	0,657	0,798	0,827	0,731	0,793	0,706	0,545
1000	0,593	0,550	0,556	0,480	0,492	0,576	0,430	0,480	0,409
2000	0,802	0,721	0,651	0,606	0,571	0,734	0,426	0,634	0,448
4000	0,742	0,732	0,653	0,637	0,678	0,679	0,460	0,690	0,459
NRC	**0,57**	**0,54**	**0,51**	**0,52**	**0,52**	**0,55**	**0,51**	**0,56**	**0,44**

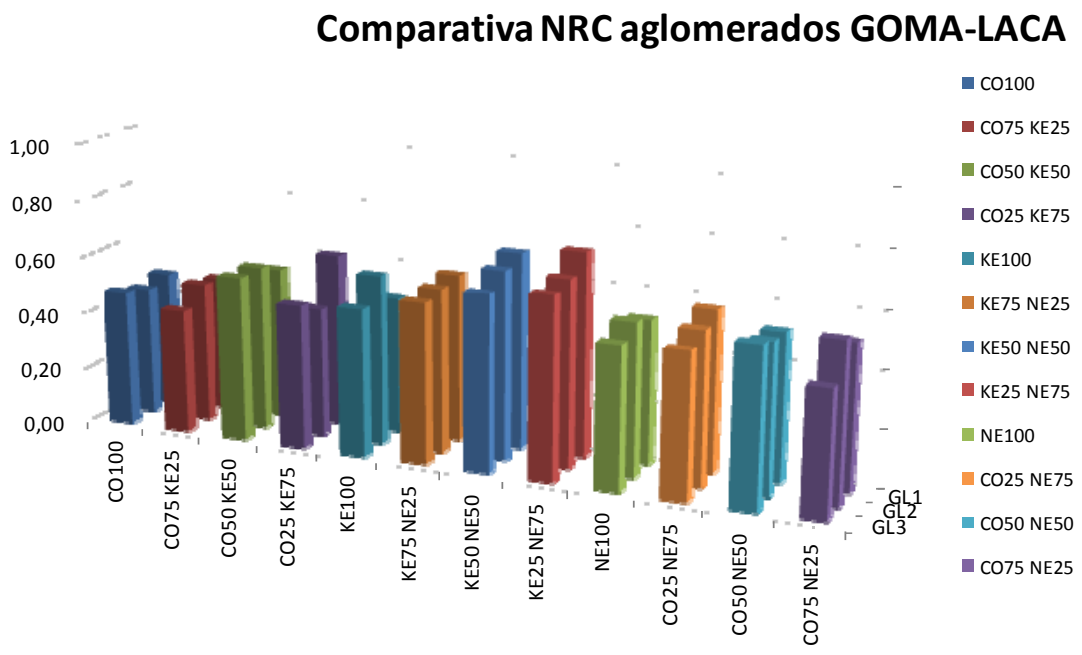


Figura 96. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con GOMA-LACA

De los resultados anteriores se pueden extraer la siguientes conclusiones:

- Los mayores NRC se obtienen, al igual que con otros aglomerantes, para las mezclas de kenaf y neumático. En estas muestras entran en juego diferentes mecanismos de absorción acústica, tanto el relativo a la porosidad intergranular del neumático como el aprovechamiento de la porosidad del kenaf.

- No existe una tendencia clara en la influencia del tamaño de partícula, a excepción de las mezclas formadas por neumático y kenaf, en las que el mayor tamaño de partícula permitía obtener una mejor disipación de la energía obteniendo los valores más elevados de NRC para las muestras GL1.

- En general, el kenaf mejora el coeficiente de absorción acústica en el rango de las altas frecuencias mientras que corcho y neumático tienen curvas características con picos de absorción en el rango de las bajas frecuencias.

- Puntualmente se deduce que la goma-laca tapona parte de la porosidad de los materiales de partida, en particular el kenaf, con un importante volumen de microporos.

03.04.02.05. MUESTRAS AGLOMERADAS CON LIGNINA-ÁLCALI

Cabe señalar que gran parte de las muestras elaboradas con este conglomerante no adquirían la resistencia mecánica suficiente para garantizar una mínima estabilidad dimensional en el ensayo motivo, por el cual no se ha procedido a la caracterización acústica de la totalidad de las combinaciones posibles. A continuación se exponen los resultados obtenidos en aquellas muestras que conservaban una mínima consistencia tras su desmoldeo.

100% CORCHO (CO100)

Las muestras de corcho aglomeradas con lignina-alcali en la caracterización acústica aportaron los siguientes resultados:

Tabla 111. NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

	α		
Hz	**CO100 LGA1**	**CO100 LGA2**	**CO100 LGA3**
125	0,06	0,07	0,06
250	0,11	0,18	0,19
500	0,34	0,86	0,81
1000	0,81	0,45	0,49
2000	0,63	0,58	0,63
4000	0,67	0,59	0,65
NRC	0,47	0,52	0,53

Tal y como puede observarse los valores NRC crecen de forma inversamente proporcional a como lo hace el tamaño de partícula. Este hecho hace prever que el principal mecanismo de disipación de energía en estas muestras está relacionado con la porosidad del propio material de partida, el corcho, con una cierta contribución de volumen de mesoporos y macroporos.

En la siguiente gráfica, al igual que ocurre con otros aglomerantes se observa la curva característica del corcho con un pico notable en el rango de las bajas frecuencias y un discreto resultado en los coeficientes de absorción acústica en el rango de las altas frecuencias.

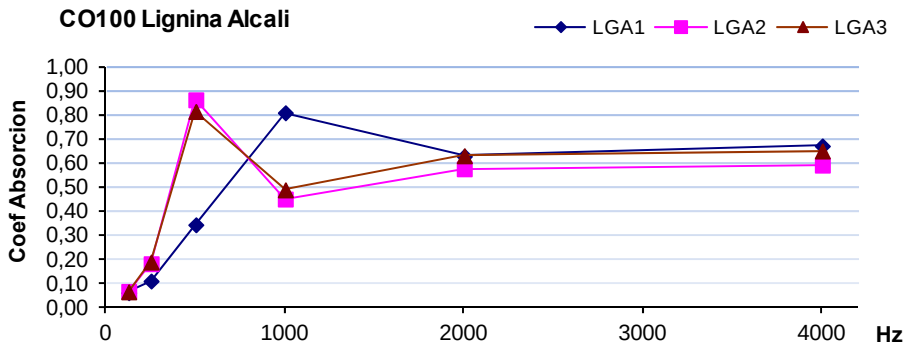


Figura 97. NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

Los resultados obtenidos para la muestra de referencia son:

Tabla 112. NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

	α		
Hz	**CO75 KE25 LGA1**	**CO75 KE25 LGA2**	**CO75 KE25 LGA3**
125	0,10	0,10	0,10
250	0,33	0,35	0,39
500	0,95	0,95	0,92
1000	0,54	0,59	0,57
2000	0,56	0,55	0,50
4000	0,61	0,54	0,47
NRC	0,59	0,61	0,60

En los resultados obtenidos llama la atención la similitud en los NRC para las distintas muestras, así como que, en general, todas ganan considerablemente en absorción acústica (con independencia del tamaño de partícula) con la adición de fibra de kenaf. La causa de ello puede atribuirse al material ligante, ya que el kenaf añadido, con una incipiente microporosidad a la vista de la caracterización textural, aumenta más eficazmente la absorción acústica en las muestras con un tamaño de partícula mayor. La causa tal vez estribe en que la lignina-álcali tapone parcialmente los microporos de este material en las muestras LGA3.

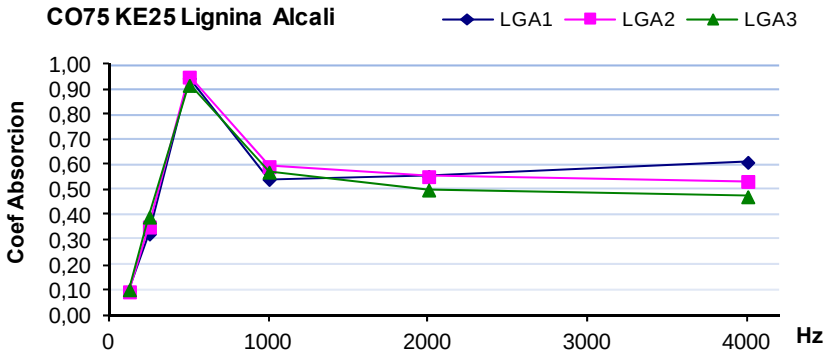


Figura 98. NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

El resultado, como puede observarse, son curvas de absorción prácticamente coincidentes para los distintos tamaños de partícula, con el pico característico del corcho en el rango de las bajas frecuencias (500 Hz) y el leve aumento a altas frecuencias como consecuencia de la adición de kenaf. Nótese como la muestra LGA3, en el rango de las altas frecuencias, cuenta con un valor levemente inferior al LGA2 y LGA1, lo que corroboraría la hipótesis de que parte de los microporos en esta muestra son taponados por el material aglutinante.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 113. NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

	α		
Hz	**CO50 KE50 LGA1**	**CO50 KE50 LGA2**	**CO50 KE50 LGA3**
125	0,28	0,23	0,25
250	0,54	0,56	0,63
500	0,65	0,74	0,61
1000	0,63	0,55	0,56
2000	0,84	0,52	0,56
4000	0,82	0,58	0,64
NRC	0,66	0,59	0,59

Tal y como podemos observar, la adición de una mayor cantidad de kenaf permite un aumento mayor en los NRC obtenidos al igual que ocurría con otros aglomerantes. Este aumento es más acusado, si cabe, en aquel que cuenta con un mayor tamaño de partícula, presumiblemente por la misma causa que se indicó en el caso anterior. La lignina-álcali es susceptible de anular parte de la estructura microporosa del kenaf, motivo por el cual la absorción acústica no crece en mayor medida en las muestras con un menor tamaño de partícula y mayor volumen de aglomerante frente a aquellas con un menor volumen de éste.

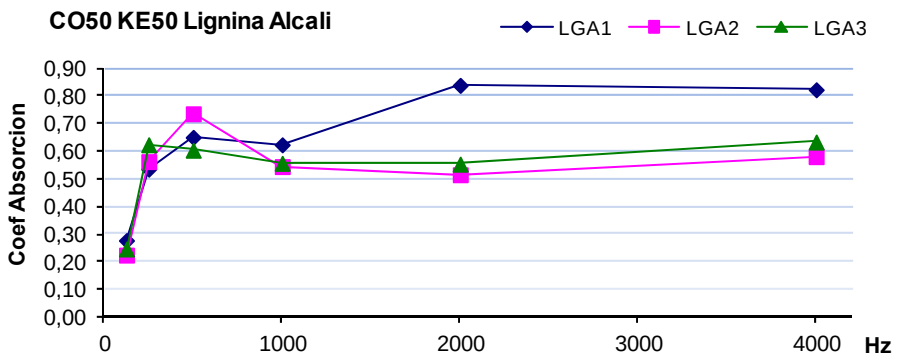


Figura 99. NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

En la gráfica anterior se observa otro efecto característico que sucede con la adición de kenaf y es la bajada del pico de absorción en el rango de las bajas frecuencias y el aumento considerable de los coeficientes de absorción acústica en el rango de las altas frecuencias.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

Los valores obtenidos en la caracterización acústica de esta serie de material aglomerado se resume en la siguiente tabla:

Tabla 114. NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

	α		
Hz	**CO75 NE25 LGA1**	**CO75 NE25 LGA2**	**CO75 NE25 LGA3**
125	0,07	0,07	0,06
250	0,19	0,16	0,15
500	0,87	0,77	0,65
1000	0,45	0,52	0,55
2000	0,57	0,61	0,64
4000	0,61	0,55	0,63
NRC	0,52	0,52	0,50

En la tabla anterior podemos observar una correspondencia entre los NRC obtenidos, con independencia del tamaño de partícula. No obstante, la contribución del neumático en una proporción de un 25% deja notar su efecto al obtener mayores valores de coeficientes de absorción acústica en aquellas muestras con un tamaño de partícula mayor, frente a las de tamaño más pequeño como consecuencia de la porosidad intergranular.

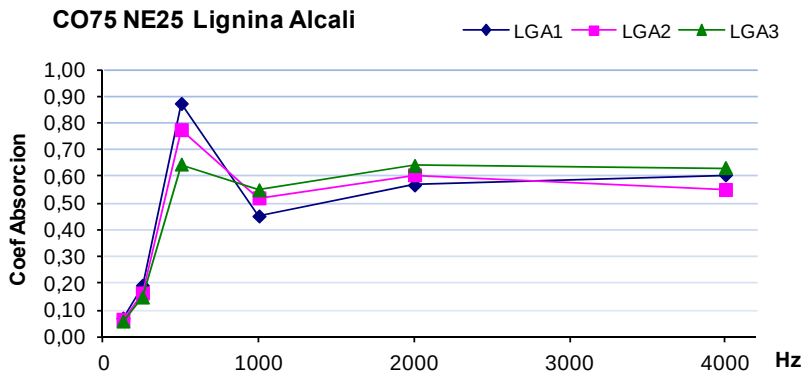


Figura 100. NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI

La curva representativa de los coeficientes de absorción acústica en el espectro de frecuencias utilizados se asemeja mucho a la del corcho. No en vano es el material que más volumen presenta en este aglomerado. Un pico en el rango de las bajas frecuencias y frecuencias medias y altas de discreto valor son sus

señas de identidad. En el rango de las bajas frecuencias, la porosidad intergranular que aporta el neumático hace que la muestra LGA1 obtenga mejores resultados que aquellas con un menor tamaño de partícula.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS AGLOMERADOS CON LIGNINA-ÁLCALI

A continuación se exponen los resultados obtenidos y analizados en los apartados anteriores:

Tabla 115. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-ÁLCALI

	α					
Hz	**CO100 LGA1**	**CO100 LGA2**	**CO100 LGA3**	**CO75 KE25 LGA1**	**CO75 KE25 LGA2**	**CO75 KE25 LGA3**
125	0,06	0,07	0,06	0,10	0,10	0,10
250	0,11	0,18	0,19	0,33	0,35	0,39
500	0,34	0,86	0,81	0,95	0,95	0,92
1000	0,81	0,45	0,49	0,54	0,59	0,57
2000	0,63	0,58	0,63	0,56	0,55	0,50
4000	0,67	0,59	0,65	0,61	0,54	0,47
NRC	**0,47**	**0,52**	**0,53**	**0,59**	**0,61**	**0,60**

	α					
Hz	**CO50 KE50 LGA1**	**CO50 KE50 LGA2**	**CO50 KE50 LGA3**	**CO75 NE25 LGA1**	**CO75 NE25 LGA2**	**CO75 NE25 LGA3**
125	0,28	0,23	0,25	0,07	0,07	0,06
250	0,54	0,56	0,63	0,19	0,16	0,15
500	0,65	0,74	0,61	0,87	0,77	0,65
1000	0,63	0,55	0,56	0,45	0,52	0,55
2000	0,84	0,52	0,56	0,57	0,61	0,64
4000	0,82	0,58	0,64	0,61	0,55	0,63
NRC	**0,66**	**0,59**	**0,59**	**0,52**	**0,52**	**0,50**

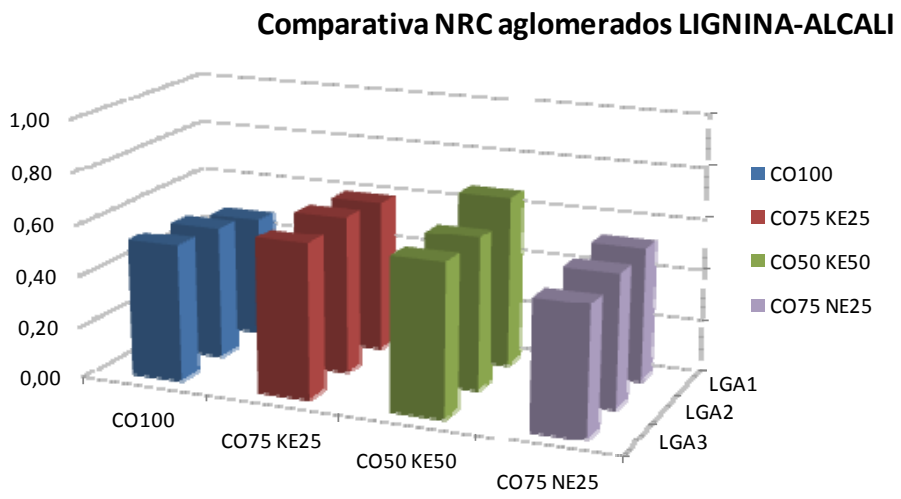


Figura 101. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-ÁLCALI

De los resultados anteriores podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La lignina-álcali únicamente ha funcionado como material ligante con una cierta estabilidad mecánica para aquellas muestras que contenían una cantidad de corcho en general superior al 50%. No se puede caracterizar acústicamente el resto de materiales por lo que se descarta este material como ligante para estos otros materiales aglomerados.

- En general la lignina-álcali ofrece, para las muestras ensayadas, mejores resultados que otros ligantes, lo que hace suponer que este material cubre en menor medida los poros de los materiales porosos, en particular del kenaf.

- Al igual que sucede en las series anteriores, se obtienen mayores coeficientes de absorción acústica cuanto mayor es la cantidad de kenaf empleada en la mezcla aglomerada.

03.04.02.06. MUESTRAS AGLOMERADAS CON LIGNINA SULFONADA

Al igual que en el caso del apartado anterior, la lignina-sulfonada no ha sido capaz de conferir a las muestras la suficiente rigidez y resistencia para poder llevar a cabo la caracterización acústica de la mayoría de las probetas. La excepción la encontramos en las muestras con un determinado contenido en corcho, en general también superior al 50%, que son las que se muestran a continuación.

100% CORCHO (CO100)

Tabla 116. NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

	α		
Hz	**CO100 LGS1**	**CO100 LGS2**	**CO100 LGS3**
125	0,07	0,07	0,07
250	0,20	0,20	0,20
500	0,83	0,88	0,83
1000	0,53	0,52	0,53
2000	0,65	0,75	0,67
4000	0,61	0,69	0,66
NRC	0,55	0,59	0,56

En la tabla anterior se observan valores prácticamente coincidentes en las tres series caracterizadas si bien la muestra con un tamaño intermedio de partícula (LGS2, con un volumen intermedio de aglomerante y tamaño de partícula comprendido entre los 2,0 y 4,5 mm) presenta un mayor valor en los coeficientes de absorción acústica en todo el espectro de frecuencias caracterizado.

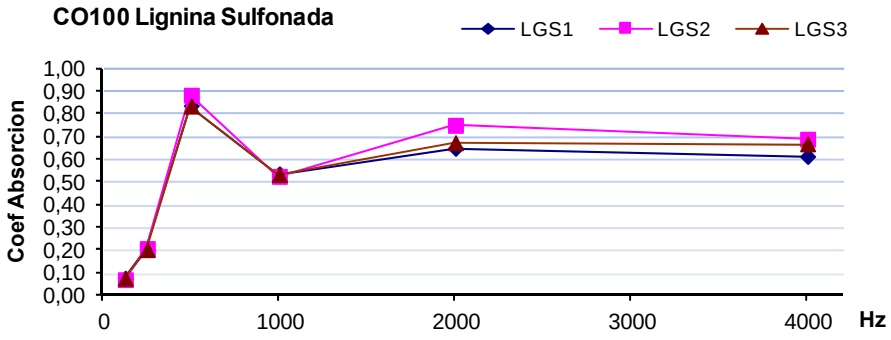


Figura 102. NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

La gráfica muestra una curva de absorción similar a la obtenida para este mismo material con otros materiales ligantes, caracterizada por un pico en el rango de las bajas frecuencias (500 Hz) y una discreta absorción en el rango de las medias y altas frecuencias. El motivo por el cual la muestra LGS2 presenta un comportamiento ligeramente mejor que el resto de muestras puede deberse (al igual que ocurre en la lignina álcali) a que se produzca un taponamiento de los mesoporos del corcho que contribuyen a la absorción en el rango de las altas frecuencias.

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 117. NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

	α		
Hz	**CO75 KE25 LGS1**	**CO75 KE25 LGS2**	**CO75 KE25 LGS3**
125	0,12	0,14	0,13
250	0,34	0,47	0,39
500	0,90	0,83	0,83
1000	0,53	0,57	0,51
2000	0,56	0,61	0,60
4000	0,64	0,64	0,66
NRC	0,58	0,62	0,58

Al igual que ocurre con el resto de ligantes, la adición de kenaf a la muestra mejora de forma notable la absorción acústica, especialmente en el rango de las frecuencias altas, lo que contribuye a tener unos mayores valores de los NRC.

Para el caso que nos ocupa, el mayor NRC se obtiene para la muestra LGS2, lo que implica que la lignina-sulfonada, al igual que la lignina-álcali, reduce la eficacia absorbente del kenaf en aquellas muestras de menor tamaño de partícula.

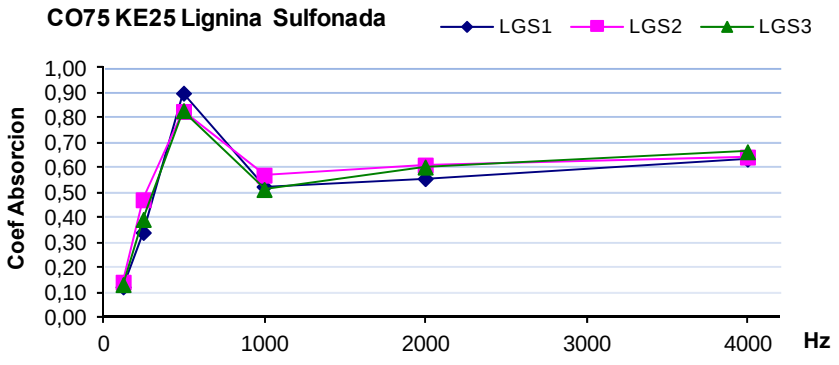


Figura 103. NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

En la gráfica anterior podemos observar el crecimiento de la absorción acústica en el rango de las altas frecuencias como consecuencia de la adición de kenaf.

De igual modo, se observa la correspondencia entre las tres gráficas con independencia de la granulometría, lo que da a entender que parte de la estructura porosa que anula el material ligante del kenaf añadido compensa la porosidad intergranular que aporta el corcho.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de la serie de muestras compuestas por la misma cantidad de corcho y kenaf aglomeradas con lignina sulfonada se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 118. NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

	α		
Hz	**CO50 KE50 LGS1**	**CO50 KE50 LGS2**	**CO50 KE50 LGS3**
125	0,22	0,21	0,20
250	0,55	0,53	0,62
500	0,64	0,75	0,65
1000	0,64	0,54	0,56
2000	0,90	0,52	0,57
4000	0,86	0,58	0,65
NRC	0,68	0,58	0,60

En la tabla anterior, al igual que sucedía para la misma composición con la lignina-álcali, se produce un notable incremento en los NRC para todas las muestras caracterizadas. Este incremento es más acusado, si cabe, para aquellas con un mayor tamaño de partícula y, por tanto, un menor volumen de aglomerante.

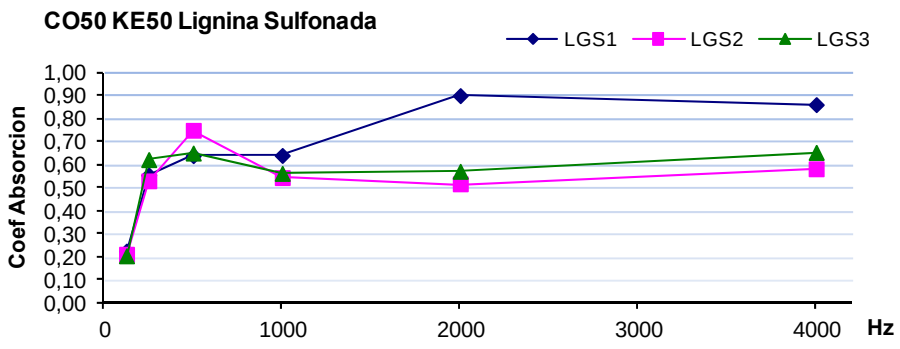


Figura 104. NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

Como era de esperar a la vista del análisis de esta misma muestra con otros ligantes, la adición de una mayor cantidad de kenaf a la mezcla con corcho implica un descenso en la absorción acústica en el rango de las frecuencias bajas y un notable incremento de la misma en el rango de medias frecuencias. La justificación del por qué el mayor aumento se produce en las muestras de mayor tamaño la debemos asimilar a la analizada para el ligante anterior, esto es, parte del kenaf aportado, especialmente en tamaños medios y pequeños de partículas, contribuye en menor medida debido a la mayor cantidad de ligante que necesitamos añadir al material aglomerado ya que éste anula parte de la microporosidad característica del kenaf.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

En la siguiente tabla se indican los valores obtenidos en la caracterización acústica de las muestras:

Tabla 119. NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

	α		
Hz	**CO75 NE25 LGS1**	**CO75 NE25 LGS2**	**CO75 NE25 LGS3**
125	0,07	0,07	0,07
250	0,22	0,18	0,18
500	0,88	0,79	0,74
1000	0,58	0,62	0,61
2000	0,73	0,82	0,82
4000	0,73	0,77	0,68
NRC	0,60	0,60	0,58

Tal y como puede observarse en la anterior tabla, los valores son prácticamente coincidentes con independencia de la granulometría empleada. Este hecho hace suponer que se activan los dos mecanismos de absorción acústica, por un lado el propiciado por el neumático relativo a la porosidad intergranular, más acusado en las muestras con un mayor tamaño de partícula, y por otro el relativo a la absorción acústica del material de partida, en este caso el corcho, debido a su volumen de mesoporos y macroporos.

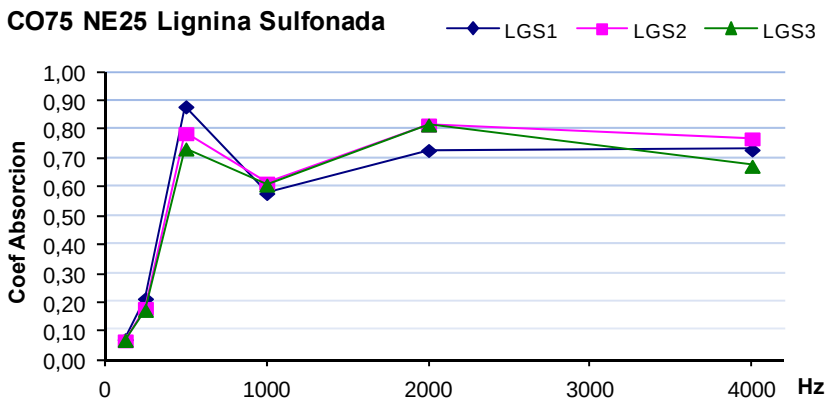


Figura 105. NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA

En la gráfica anterior se observa la correspondencia entre las tres muestras, si bien existe una mayor disipación de energía en el rango de las bajas frecuencias, más acusado en las muestras de mayor tamaño (debido a la porosidad intergranular). Las muestra con una fracción granulométrica más pequeña cuentan con una mayor absorción acústica en el rango de las frecuencias altas. Nótese cómo la muestra LGS3, a altas frecuencias, tiene una

leve caída frente a la LGS2, previsiblemente como consecuencia del taponamiento de parte de la estructura porosa del corcho por el material ligante.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS AGLOMERADOS CON LIGNINA-SULFONADA

Los resultados anteriores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 120. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-SULFONADA

	α					
Hz	**CO100 LGS1**	**CO100 LGS2**	**CO100 LGS3**	**CO75 KE25 LGS1**	**CO75 KE25 LGS2**	**CO75 KE25 LGS3**
125	0,07	0,07	0,07	0,12	0,14	0,13
250	0,20	0,20	0,20	0,34	0,47	0,39
500	0,83	0,88	0,83	0,90	0,83	0,83
1000	0,53	0,52	0,53	0,53	0,57	0,51
2000	0,65	0,75	0,67	0,56	0,61	0,60
4000	0,61	0,69	0,66	0,64	0,64	0,66
NRC	**0,55**	**0,59**	**0,56**	**0,58**	**0,62**	**0,58**

	α					
Hz	**CO50 KE50 LGS1**	**CO50 KE50 LGS2**	**CO50 KE50 LGS3**	**CO75 NE25 LGS1**	**CO75 NE25 LGS2**	**CO75 NE25 LGS3**
125	0,22	0,21	0,20	0,07	0,07	0,07
250	0,55	0,53	0,62	0,22	0,18	0,18
500	0,64	0,75	0,65	0,88	0,79	0,74
1000	0,64	0,54	0,56	0,58	0,62	0,61
2000	0,90	0,52	0,57	0,73	0,82	0,82
4000	0,86	0,58	0,65	0,73	0,77	0,68
NRC	**0,68**	**0,58**	**0,60**	**0,60**	**0,60**	**0,58**

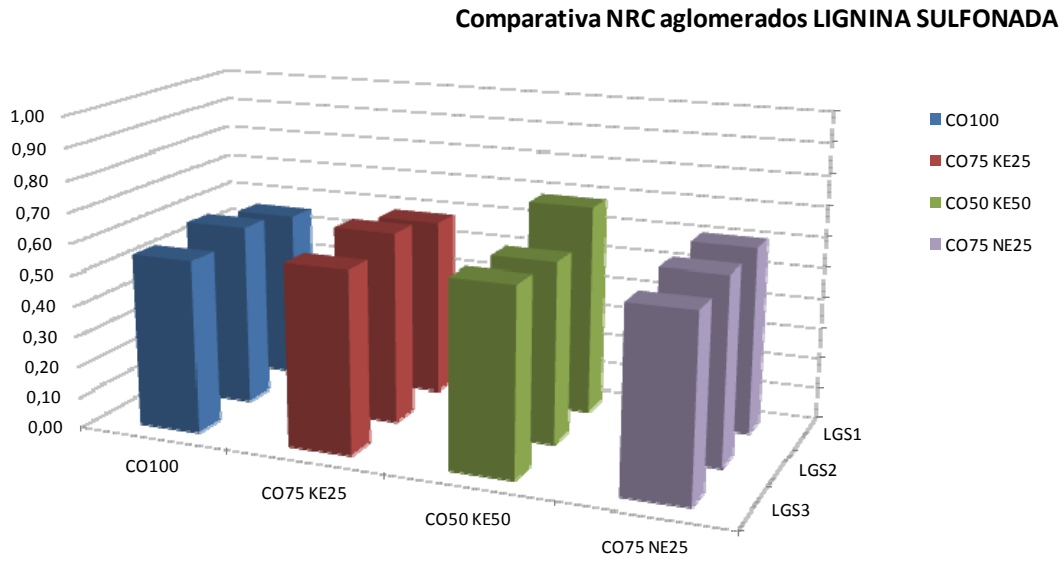


Figura 106. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-SULFONADA

De los resultados anteriores podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La lignina-sulfonada, al igual que ocurría con la lignina-álcali, como material ligante únicamente ha funcionado con una cierta estabilidad mecánica para aquellas muestras que contenían una cantidad de corcho en general superior al 50%. No se puede caracterizar acústicamente el resto de materiales, por lo que se descarta este material como ligante para estos otros materiales aglomerados.

- La lignina-sulfonada obtiene para las muestras ensayadas, en general, mejores resultados que otros ligantes, incluso que la lignina-álcali en determinados casos, lo que hace suponer que este material cubre en menor medida los poros de los materiales porosos, en particular del kenaf.

- Al igual que sucede en las series anteriores, se obtienen mayores coeficientes de absorción acústica cuanto mayor es la cantidad de kenaf empleada en la mezcla aglomerada.

03.04.02.07. MUESTRAS AGLOMERADAS CON POLIURETANO

100% CORCHO (CO100)

Los resultados obtenido en la caracterización acústica de la muestra se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 121. NRC CO100 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**CO100 PO1**	**CO100 PO2**	**CO100 PO3**
125	0,044	0,090	0,083
250	0,296	0,283	0,261
500	0,866	0,846	0,849
1000	0,526	0,552	0,490
2000	0,817	0,864	0,705
4000	0,770	0,802	0,716
NRC	0,63	0,64	0,58

Lo primero que llama la atención son los resultados, ya que con este material ligante se obtienen para las mismas muestras unos valores notablemente superiores de los NRC. A la vista de los resultados, el tamaño de partícula juega un papel importante por cuanto, en general, las muestras con tamaños de partícula más grandes presentan un mejor comportamiento que las más pequeñas, si bien la diferencia no es demasiado acusada.

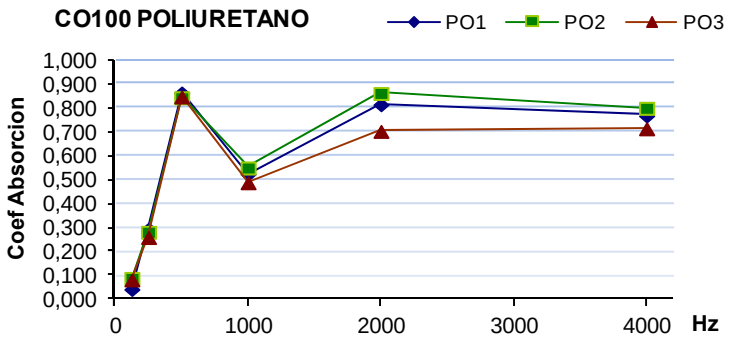


Figura 107. NRC CO100 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica anterior se repite el esquema observado para este material con otros ligantes, esto es, un pico del coeficiente de absorción acústica en el rango de las frecuencias bajas (a 500 Hz aproximadamente) con una relajación en el tramo de las frecuencias medias. Sorprende, sin embargo, el buen resultado obtenido para el corcho también en el rango de las frecuencias altas. Este hecho se debe presumiblemente a que el poliuretano no ha taponado la estructura porosa del corcho (mesoporos y macroporos) como lo hacían otros ligantes, lo que justificaría el notable incremento en el NRC global del material.

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de este material se resume en la siguiente tabla:

Tabla 122. NRC CO75-KE25 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**CO75 KE25 PO1**	**CO75 KE25 PO2**	**CO75 KE25 PO3**
125	0,111	0,161	0,113
250	0,475	0,442	0,365
500	0,677	0,699	0,819
1000	0,482	0,514	0,515
2000	0,529	0,596	0,576
4000	0,552	0,632	0,604
NRC	0,54	0,56	0,57

En este caso también, lo primero que sorprende es el resultado, por la bajada en la absorción acústica generalizada en todas las muestras si bien es más acusada en aquellas con un mayor tamaño de partícula ya que en la muestra PO3 prácticamente se mantiene. Con otros ligantes, la adición de kenaf se traducía en una rápida mejora de sus prestaciones, incluso con una pequeña cantidad. En este caso no ocurre. La razón la podemos encontrar en que una componente importante en el corcho es la porosidad intergranular, además de la relativa al material. En la muestra se conserva una dependencia con el tamaño de partícula, de modo que cuanto menor es ésta, mayor es el NRC obtenido, lo que corrobora que el poliuretano causa un menor efecto adverso en la oclusión de los poros de cada material. Sin embargo, la porosidad intergranular se ve afectada al introducir kenaf, proceso éste que se ha podido observar a lo largo

de las muestras caracterizadas, lo que justificaría la reducción de los niveles globales de NRC.

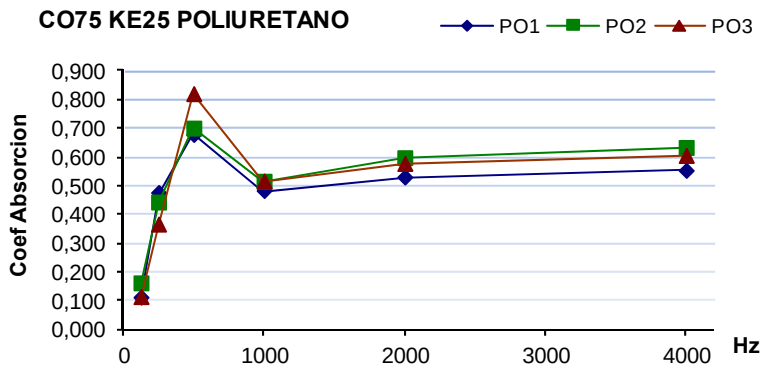


Figura 108. NRC CO75-KE25 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica anterior se observa una leve reducción de la curva de absorción acústica tanto en el pico de absorción característico del corcho a bajas frecuencias como en el rango de las altas frecuencias como consecuencia del proceso indicado en el párrafo anterior.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 123. NRC CO50-KE50 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**CO50 KE50 PO1**	**CO50 KE50 PO2**	**CO50 KE50 PO3**
125	0,266	0,239	0,192
250	0,426	0,426	0,630
500	0,558	0,559	0,538
1000	0,593	0,575	0,519
2000	0,562	0,592	0,567
4000	0,658	0,686	0,627
NRC	0,53	0,54	0,56

Se aprecia poca variación en relación a los resultados obtenidos en el apartado anterior, al menos en los resultados globales, de lo que se deduce que, a priori, los mecanismos de disipación de energía acústica son los mismos.

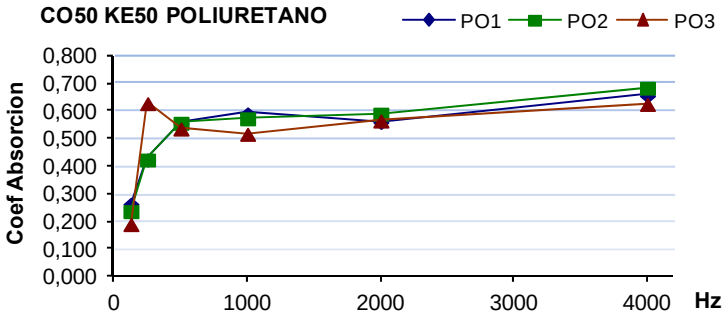


Figura 109. NRC CO50-KE50 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica se observa como la curva poco a poco adopta el trazado característico del kenaf, mucho más plano y con valores más discretos en el campo de las bajas frecuencias y con una subida progresiva en los coeficientes de absorción acústica en el rango de las altas y medias frecuencias.

25% CORCHO + 75% KENAF (CO25+KE75)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de esta serie de materiales son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 124. NRC CO25-KE75 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**CO25 KE75 PO1**	**CO25 KE75 PO2**	**CO25 KE75 PO3**
125	0,273	0,029	0,255
250	0,704	0,451	0,675
500	0,617	0,561	0,529
1000	0,604	0,628	0,590
2000	0,534	0,631	0,637
4000	0,631	0,711	0,729
NRC	0,61	0,57	0,61

Al igual que ocurre en las muestras anteriores, con este tipo de aglomerante no existe un incremento notable en la absorción acústica con la adición de kenaf (al menos con corcho), manteniéndose prácticamente constantes los valores. La

dependencia con la granulometría tampoco es acusada, máxime cuando los valores más elevados se obtienen precisamente en las muestras con tamaño de partícula mayor y menor. Este hecho nos da a entender que se activan los dos mecanismos de absorción acústica (el debido a la porosidad intergranular y el debido a la porosidad del propio material), si bien se deduce que uno anula al otro y que parte de la porosidad, aunque menos que con otros ligantes, es susceptible de ser anulada por el poliuretano.

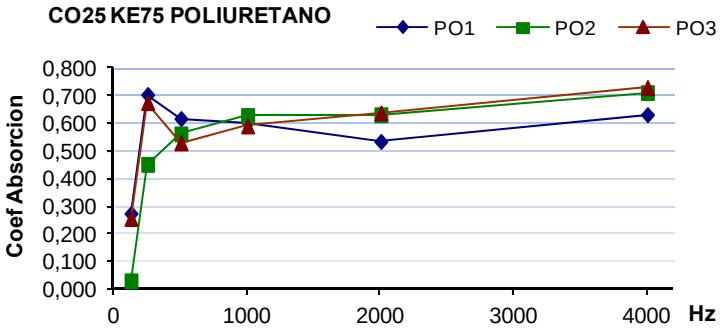


Figura 110. NRC CO25-KE75 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica de nuevo se observa cómo, al contar la muestra con una mayor cantidad de kenaf, poco a poco se suaviza el pico de absorción de las bajas frecuencias y se incrementa el coeficiente de absorción acústica en el rango de las altas frecuencias, especialmente en aquellas muestras con un menor tamaño de partícula.

100% KENAF (KE100)

Los resultados son:

Tabla 125. NRC KE100 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**KE100 PO1**	**KE100 PO2**	**KE100 PO3**
125	0,367	0,355	0,410
250	0,669	0,689	0,472
500	0,524	0,480	0,470
1000	0,648	0,607	0,598
2000	0,724	0,667	0,651
4000	0,803	0,762	0,731
NRC	**0,64**	**0,61**	**0,55**

La tabla anterior muestra cómo se obtienen mayores valores NRC para las muestras con un mayor tamaño de partícula. Este hecho, que ya se daba en algunos aglomerantes como el fetadit, puede estar relacionado con el bloqueo de parte de su estructura microporosa por el material ligante, lo que justificaría que cuanto mayor cantidad de poliuretano empleamos en la muestra mayor número de poros se ocluyen y por tanto menores valores del coeficiente de absorción acústica se obtienen.

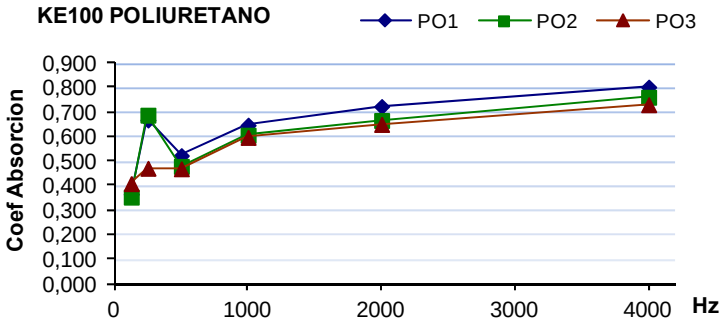


Figura 111. NRC KE100 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica se muestra una curva característica del kenaf, en la que las mayores absorciones se localizan en el rango de las altas frecuencias mientras que a bajas frecuencias la absorción acústica de este material es mucho más discreta.

75% KENAF + 25% NEUMÁTICO (KE75+NE25)

Los valores obtenidos en la caracterización acústica para la serie del material aglomerado de referencia se indica en la siguiente tabla:

Tabla 126. NRC KE75-NE25 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**KE75 NE25 PO1**	**KE75 NE25 PO2**	**KE75 NE25 PO3**
125	0,311	0,307	0,327
250	0,681	0,643	0,561
500	0,613	0,680	0,476
1000	0,706	0,714	0,609
2000	0,770	0,808	0,705
4000	0,807	0,888	0,714
NRC	0,69	0,71	0,59

La introducción de neumático mejora considerablemente el NRC en todas las muestras caracterizada. El neumático, como sabemos, basa su mecanismo de absorción acústica a la porosidad intergranular por cuanto éste no cuenta con una superficie porosa a tener en cuenta tal y como se deduce de la caracterización textural realizada. Este mecanismo depende fuertemente del tamaño de partícula por cuanto los poros serán mayores cuanto mayor sea el tamaño de las partículas del material aglomerado. Por otro lado el kenaf es el más poroso de los precursores empleados en este estudio, lo que contribuirá a la absorción acústica especialmente en el rango de las altas frecuencias.

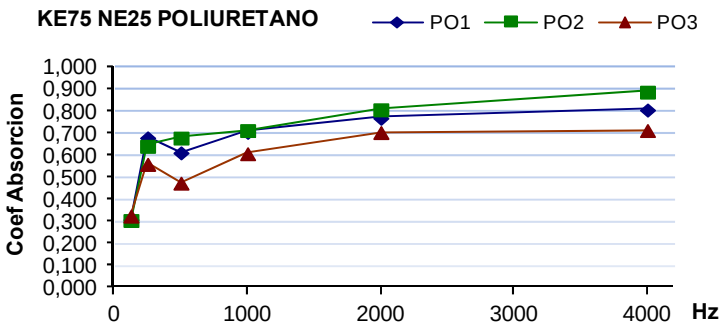


Figura 112. NRC KE75-NE25 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica anterior se observa cómo se mantiene en general una curva de absorción relativamente plana, sin valores elevados en el rango de las bajas frecuencias, pero con valores más significativos del coeficiente de absorción acústica en el rango de las altas frecuencias. El kenaf, que contribuye en un 75% a la dosificación de este aglomerado, cuenta como hemos visto con ese espectro característico de absorción. Nótese que la muestra con un tamaño de partícula

menor es la que peor comportamiento tiene en lo relativo a la disipación de energía en todo el rango de frecuencias caracterizado, lo que presumiblemente se deba a un taponamiento parcial de la estructura porosa de este material por parte del poliuretano.

50% KENAF + 50% NEUMÁTICO (KE50+NE50)

Los resultados de la caracterización acústica de la muestra son los que se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 127. NRC KE50-NE50 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**KE50 NE50 PO1**	**KE50 NE50 PO2**	**KE50 NE50 PO3**
125	0,113	0,129	0,190
250	0,498	0,507	0,523
500	0,792	0,792	0,659
1000	0,609	0,609	0,587
2000	0,702	0,717	0,648
4000	0,755	0,768	0,715
NRC	0,65	0,66	0,60

En los resultados, como en el caso anterior, se mantiene la tónica de un mayor valor de NRC para aquellas granulometrías de mayor tamaño frente a las que cuentan con un menor tamaño de partícula. Este hecho hace pensar que el mecanismo de disipación de energía acústica debido a la formación de poros intergranulares (que introduce fundamentalmente el neumático) es de mayor magnitud a la absorción del kenaf como material absorbente.

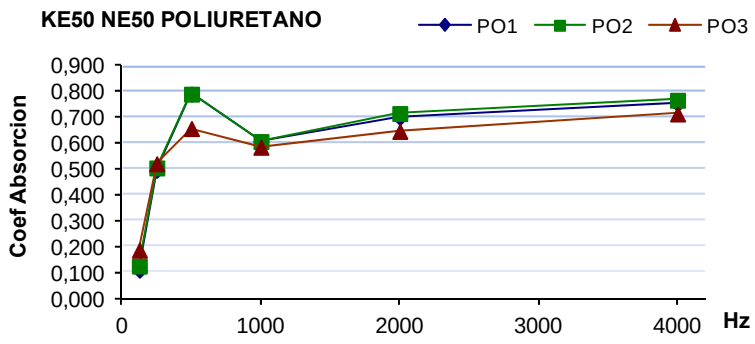


Figura 113. NRC KE50-NE50 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica se muestra cómo, con la introducción del neumático, poco a poco vuelve a aparecer el pico de absorción en el rango de las bajas frecuencias característico de la porosidad interpartícula. Se mantienen, además, unos niveles adecuados de absorción a altas frecuencias cuyo principal responsable es el kenaf.

En general, se puede observar cómo la muestra con un menor tamaño de partícula cuenta con una menor absorción acústica en todo el espectro de frecuencias caracterizado.

25% KENAF + 75% NEUMÁTICO (KE25+NE75)

Los valores obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 128. NRC KE25-NE75 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**KE25 NE75 PO1**	**KE25 NE75 PO2**	**KE25 NE75 PO3**
125	0,070	0,067	0,066
250	0,283	0,254	0,236
500	0,875	0,862	0,827
1000	0,639	0,659	0,627
2000	0,777	0,855	0,755
4000	0,768	0,769	0,688
NRC	0,64	0,66	0,61

En la tabla se observa poca variación en relación a los resultados anteriores en lo relativo a los niveles totales de NRC de las muestras caracterizadas. Ello corrobora la hipótesis de los mecanismos de absorción mediante la formación de poros intergranulares indicada anteriormente.

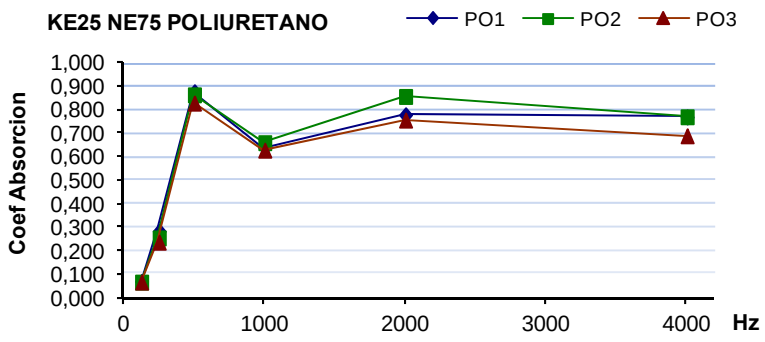


Figura 114. NRC KE25-NE75 aglomerado con POLIURETANO

La principal diferencia la encontramos, precisamente, en la representación de las curvas de absorción acústica de los diferentes materiales. Conforme aumentamos la cantidad de neumático, cada vez se marca con más claridad el pico de absorción a bajas frecuencias debido a la porosidad intergranular, manteniéndose unos valores más discretos aunque aún elevados en el rango de las altas frecuencias como consecuencia de la contribución del kenaf.

100% NEUMÁTICO (NE100)

Los resultados obtenidos para la muestra de neumático aglomerada con poliuretano en la caracterización acústica son:

Tabla 129. NRC NE100 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**NE100 PO1**	**NE100 PO2**	**NE100 PO3**
125	0,063	0,064	0,064
250	0,121	0,114	0,114
500	0,452	0,422	0,433
1000	0,750	0,730	0,690
2000	0,643	0,600	0,456
4000	0,925	0,915	0,844
NRC	0,49	0,47	0,42

Como puede observarse, al eliminar una pequeña cantidad de kenaf (25%), la caída en los NRC de las muestras caracterizadas es abrumadora. El neumático,

como sabemos, debe su absorción acústica a la formación de poros intergranulares, dado que se trata de un material poco poroso. Al eliminar el kenaf (el material de partida más poroso de los tres utilizados en la elaboración de aglomerados), se pasa a contar con un único mecanismo de disipación de energía acústica, lo que se traduce en una caída de los coeficientes de absorción.

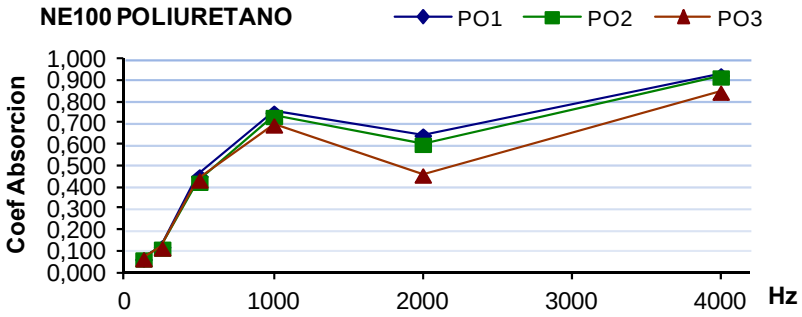


Figura 115. NRC NE100 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica anterior se observa una caída generalizada de los coeficientes de absorción acústica en todos los rangos de las frecuencias caracterizadas.

Tal y como podemos observar, en general, los mejores resultados en todas las frecuencias se dan para las muestras con un tamaño de partícula mayor susceptible de formar una mayor cantidad de poros intergranulares al permitir una peor compactación, lo que se traduce en unos mayores coeficientes de absorción acústica.

75% NEUMÁTICO + 25% CORCHO (CO25+NE75)

La caracterización acústica de la muestra de referencia arroja los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 130. NRC CO25-NE75 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**CO25 NE75 PO1**	**CO25 NE75 PO2**	**CO25 NE75 PO3**
125	0,052	0,050	0,054
250	0,155	0,138	0,148
500	0,620	0,563	0,623
1000	0,650	0,653	0,571
2000	0,844	0,776	0,799
4000	0,765	0,765	0,575
NRC	0,57	0,53	0,54

La adición de corcho a la muestra de neumático incrementa los NRC en todas las muestras caracterizadas.

Se observa que se mantiene en cierta forma el mecanismo de absorción, al existir una dependencia con el tamaño de partícula debido a que el neumático sigue siendo el material predominante.

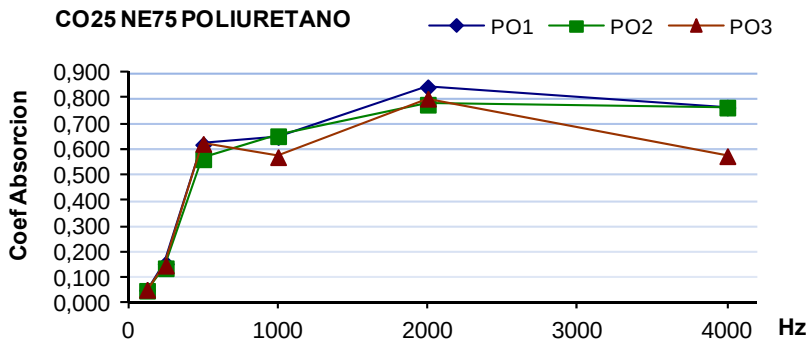


Figura 116. NRC CO25-NE75 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica se puede observar como, en general, la adición de corcho mejora de forma considerable la absorción acústica en el rango de las medias y altas frecuencias debido a la porosidad que presenta este material con una estructura mesoporosa y macroporosa según se deduce de la caracterización textural.

50% NEUMÁTICO + 50% CORCHO (CO50+NE50)

Los resultados de la caracterización acústica son los siguientes:

Tabla 131. NRC CO50-NE50 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**CO50 NE50 PO1**	**CO50 NE50 PO2**	**CO50 NE50 PO3**
125	0,063	0,059	0,059
250	0,152	0,168	0,164
500	0,628	0,689	0,681
1000	0,608	0,554	0,574
2000	0,789	0,624	0,745
4000	0,678	0,600	0,684
NRC	0,54	0,51	0,54

La introducción de una mayor cantidad de corcho en sustitución de neumático no aporta mejoras, sino más bien lo contrario. Disminuye levemente el NCR para la muestra con mayor tamaño de partícula debido a que el mecanismo de disipación de energía del neumático mediante la formación de poros intergranulares es menor, sin que se vea compensada por la estructura porosa del corcho.

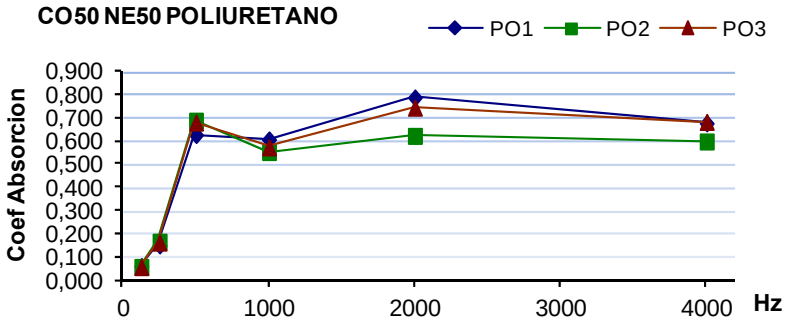


Figura 116. NRC CO50-NE50 aglomerado con POLIURETANO

En la gráfica se muestra cómo, poco a poco, al añadir una mayor cantidad de corcho se comienza a marcar el pico de absorción acústica en el rango de las bajas frecuencias y disminuyen levemente en el rango de las medias.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 132. NRC CO75-NE25 aglomerado con POLIURETANO

	α		
Hz	**CO75 NE25 PO1**	**CO75 NE25 PO2**	**CO75 NE25 PO3**
125	0,071	0,085	0,078
250	0,202	0,256	0,224
500	0,792	0,796	0,827
1000	0,548	0,521	0,498
2000	0,687	0,762	0,761
4000	0,652	0,716	0,696
NRC	0,56	0,58	0,58

En la tabla se muestran cómo los NRC suben conforme añadimos una mayor cantidad de corcho, siendo prácticamente iguales los valores en función del tipo de granulometría empleada en la muestra (y también por tanto el tipo de material). Este hecho puede implicar que sendos mecanismos (porosidad intergranular y porosidad del material de partida) se compensen recíprocamente.

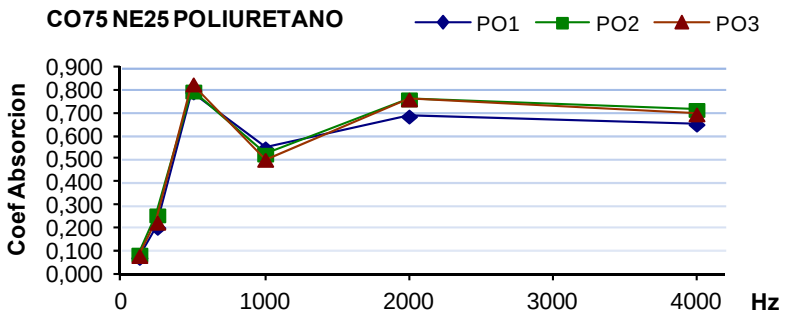


Figura 118. NRC CO75-NE25 aglomerado con POLIURETANO

La curva de absorción cada vez se asimila más a la del corcho con un marcado pico en el rango de las bajas frecuencias y moderados valores a altas frecuencias.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS AGLOMERADOS CON POLIURETANO

En resumen los resultados obtenidos y analizados en los apartados anteriores son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 133. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con POLIURETANO

	α								
Hz	**CO100 PO1**	**CO100 PO2**	**CO100 PO3**	**CO75 KE25 PO1**	**CO75 KE25 PO2**	**CO75 KE25 PO3**	**CO50 KE50 PO1**	**CO50 KE50 PO2**	**CO50 KE50 PO3**
125	0,044	0,090	0,083	0,111	0,161	0,113	0,266	0,239	0,192
250	0,296	0,283	0,261	0,475	0,442	0,365	0,426	0,426	0,630
500	0,866	0,846	0,849	0,677	0,699	0,819	0,558	0,559	0,538
1000	0,526	0,552	0,490	0,482	0,514	0,515	0,593	0,575	0,519
2000	0,817	0,864	0,705	0,529	0,596	0,576	0,562	0,592	0,567
4000	0,770	0,802	0,716	0,552	0,632	0,604	0,658	0,686	0,627
NRC	**0,63**	**0,64**	**0,58**	**0,54**	**0,56**	**0,57**	**0,53**	**0,54**	**0,56**

	α								
Hz	**CO25 KE75 PO1**	**CO25 KE75 PO2**	**CO25 KE75 PO3**	**KE100 PO1**	**KE100 PO2**	**KE100 PO3**	**KE75 NE25 PO1**	**KE75 NE25 PO2**	**KE75 NE25 PO3**
125	0,273	0,029	0,255	0,367	0,355	0,410	0,311	0,307	0,327
250	0,704	0,451	0,675	0,669	0,689	0,472	0,681	0,643	0,561
500	0,617	0,561	0,529	0,524	0,480	0,470	0,613	0,680	0,476
1000	0,604	0,628	0,590	0,648	0,607	0,598	0,706	0,714	0,609
2000	0,534	0,631	0,637	0,724	0,667	0,651	0,770	0,808	0,705
4000	0,631	0,711	0,729	0,803	0,762	0,731	0,807	0,888	0,714
NRC	**0,61**	**0,57**	**0,61**	**0,64**	**0,61**	**0,55**	**0,69**	**0,71**	**0,59**

	α								
Hz	**KE50 NE50 PO1**	**KE50 NE50 PO2**	**KE50 NE50 PO3**	**KE25 NE75 PO1**	**KE25 NE75 PO2**	**KE25 NE75 PO3**	**NE100 PO1**	**NE100 PO2**	**NE100 PO3**
125	0,113	0,129	0,190	0,070	0,067	0,066	0,063	0,064	0,064
250	0,498	0,507	0,523	0,283	0,254	0,236	0,121	0,114	0,114
500	0,792	0,792	0,659	0,875	0,862	0,827	0,452	0,422	0,433
1000	0,609	0,609	0,587	0,639	0,659	0,627	0,750	0,730	0,690
2000	0,702	0,717	0,648	0,777	0,855	0,755	0,643	0,600	0,456
4000	0,755	0,768	0,715	0,768	0,769	0,688	0,925	0,915	0,844
NRC	**0,65**	**0,66**	**0,60**	**0,64**	**0,66**	**0,61**	**0,49**	**0,47**	**0,42**

	α								
Hz	**CO75 NE25 PO1**	**CO75 NE25 PO2**	**CO75 NE25 PO3**	**CO50 NE50 PO1**	**CO50 NE50 PO2**	**CO50 NE50 PO3**	**CO25 NE75 PO1**	**CO25 NE75 PO2**	**CO25 NE75 PO3**
125	0,071	0,085	0,078	0,063	0,059	0,059	0,052	0,050	0,054
250	0,202	0,256	0,224	0,152	0,168	0,164	0,155	0,138	0,148
500	0,792	0,796	0,827	0,628	0,689	0,681	0,620	0,563	0,623
1000	0,548	0,521	0,498	0,608	0,554	0,574	0,650	0,653	0,571
2000	0,687	0,762	0,761	0,789	0,624	0,745	0,844	0,776	0,799
4000	0,652	0,716	0,696	0,678	0,600	0,684	0,765	0,765	0,575
NRC	**0,56**	**0,58**	**0,58**	**0,54**	**0,51**	**0,54**	**0,57**	**0,53**	**0,54**

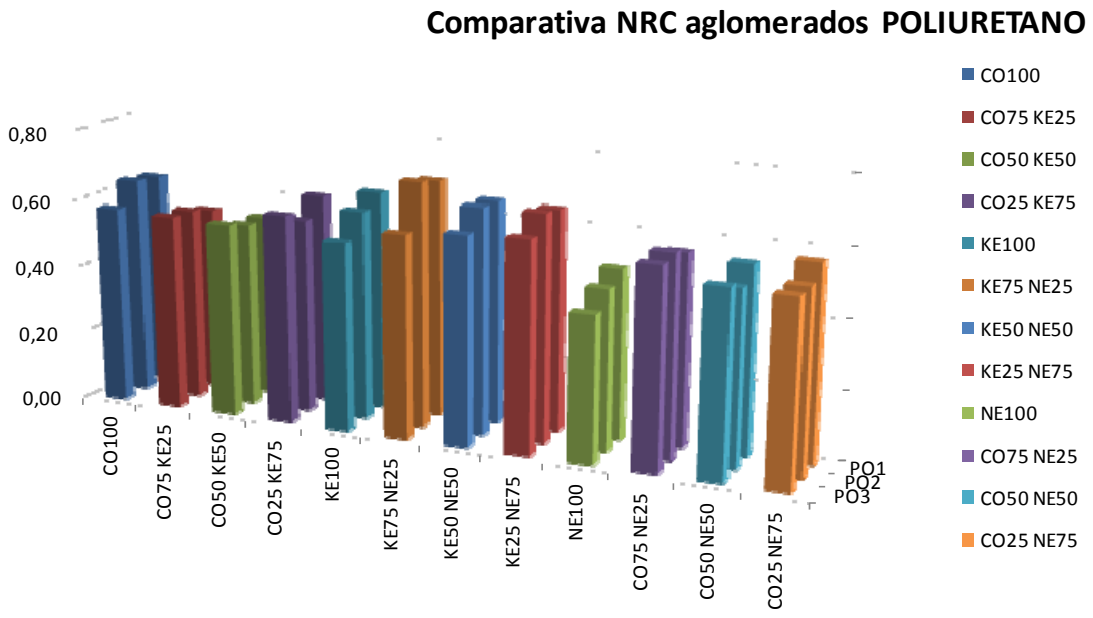


Figura 119. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con POLIURETANO

De los resultados anteriores podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Al igual que sucede con otros ligantes, los mayores valores de NRC se obtienen para las mezclas de kenaf y neumático, como consecuencia de la combinación de las propiedades porosas del primero frente a la formación de porosidad intergranular del segundo.

- El poliuretano potencia la absorción acústica de los aglomerados que contienen corcho, por lo que presumiblemente este ligante produce un menor efecto negativo en el bloqueo de los mesoporos y macroporos que caracterizan texturalmente a este material.

- En general, menores adiciones de material ligante (muestra con denominación PO1) proporcionan una mayor absorción acústica que aquellos con un mayor volumen del mismo, por lo que las fracciones granulométricas mayores contribuyen a la absorción acústica en mayor medida.

03.04.02.08. MUESTRAS AGLOMERADAS CON TEROKAL

100% CORCHO (CO100)

El resultado de la caracterización acústica del corcho aglomerado con terokal se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 134. NRC CO100 aglomerado con TEROKAL

	α		
Hz	**CO100 TE1**	**CO100 TE2**	**CO100 TE3**
125	0,082	0,077	0,071
250	0,218	0,205	0,201
500	0,818	0,794	0,79
1000	0,504	0,458	0,438
2000	0,649	0,569	0,527
4000	0,678	0,663	0,559
NRC	0,55	0,51	0,49

Como puede observarse, se obtiene un NRC elevado (si bien no supera el obtenido con el poliuretano). El NRC decrece con el tamaño de partícula, de lo que se deduce que el mecanismo de absorción tendrá en cuenta la porosidad intergranular, más elevada en las muestras con un tamaño de partícula superior a los 4,5 mm, sin perjuicio de un posible bloqueo de poros por el ligante.

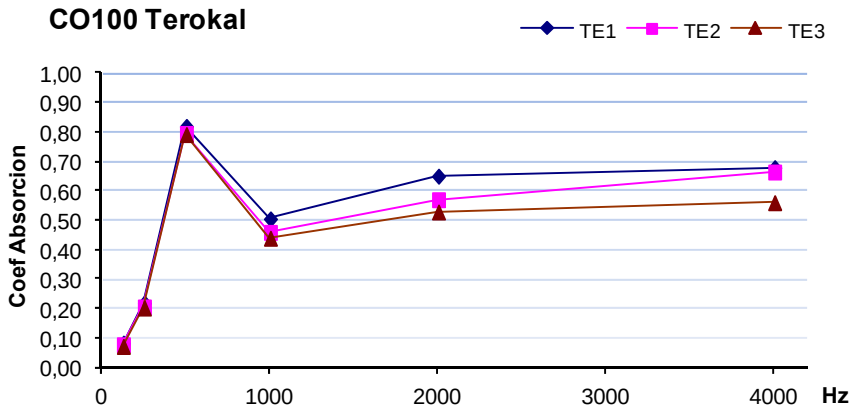


Figura 120. NRC CO100 aglomerado con TEROKAL

La representación gráfica de los coeficientes de absorción acústica muestra un trazado con un pico de absorción acústica en el rango de las bajas frecuencias y, en general, unas absorciones más discretas a altas y medias frecuencias. Nótese cómo el tamaño de partícula juega un papel importante en el tramo de las altas frecuencias, de lo que se deduce que el material ligante presumiblemente pueda ocluir un volumen determinado de los mesoporos del corcho.

75% CORCHO + 25% KENAF (CO75+KE25)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica son:

Tabla 135. NRC CO75-KE25 aglomerado con TEROKAL

	α		
Hz	**CO75 KE25 TE1**	**CO75 KE25 TE2**	**CO75 KE25 TE3**
125	0,122	0,168	0,111
250	0,408	0,391	0,438
500	0,766	0,667	0,724
1000	0,515	0,526	0,493
2000	0,599	0,633	0,603
4000	0,666	0,61	0,671
NRC	0,57	0,55	0,56

Observamos que la adición de kenaf, incluso en pequeñas proporciones (un 25%), mejora notablemente el NRC del material, especialmente en las muestras con un menor tamaño de partícula. La causa la encontramos en la mejora que, en general, el kenaf produce en el rango de las altas frecuencias dado que éste (tal y como vimos en el estudio textural de los materiales de partida) es el material con un mayor volumen de poros.

Apenas existen diferencias en función del tamaño de partícula y ello es debido a que el mecanismo de absorción como consecuencia de la porosidad intergranular se compensa con el aumento de la superficie de material con una mayor porosidad intrínseca.

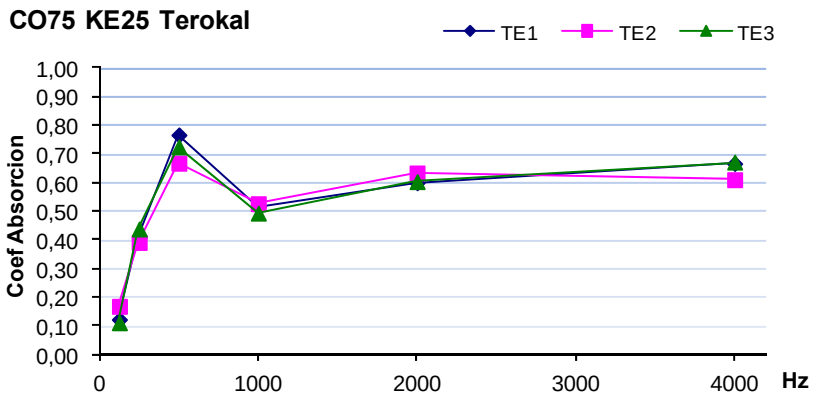


Figura 121. NRC CO75-KE25 aglomerado con TEROKAL

En la gráfica se constata la correspondencia entre las tres curvas con independencia del material empleado, así como el leve ascenso de la absorción acústica en el rango de las altas frecuencias. Por otro lado, se sigue manteniendo el pico a bajas frecuencias característico del corcho.

50% CORCHO + 50% KENAF (CO50+KE50)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de este material se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 136. NRC CO50-KE50 aglomerado con TEROKAL

	α		
Hz	**CO50 KE50 TE1**	**CO50 KE50 TE2**	**CO50 KE50 TE3**
125	0,23	0,279	0,283
250	0,492	0,449	0,536
500	0,595	0,487	0,53
1000	0,64	0,505	0,558
2000	0,734	0,542	0,609
4000	0,737	0,603	0,685
NRC	0,62	0,50	0,56

Apenas se produce una mejora en los NRC obtenidos, a excepción de la muestra con un mayor tamaño de partícula y consecuentemente un menor volumen de aglomerante. En cualquier caso, las diferencias no son sustanciales

con respecto al caso anterior. Se penaliza de alguna manera las granulometrías intermedias, presumiblemente debido a que el efecto aditivo de los dos mecanismos de disipación de energía para este intervalo granulométrico tenga un carácter adverso.

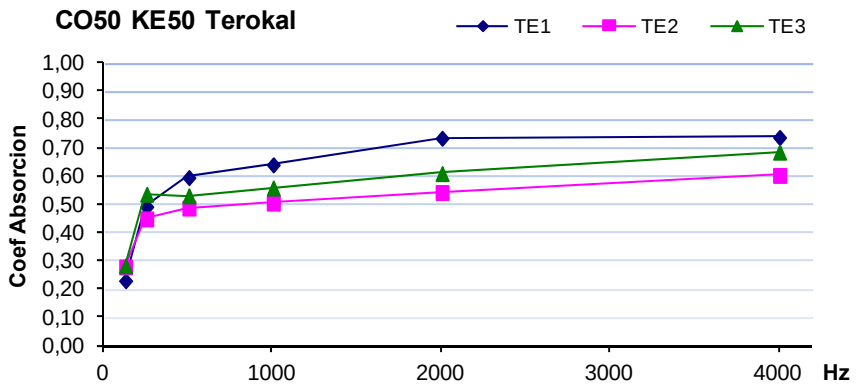


Figura 122. NRC CO50-KE50 aglomerado con TEROKAL

La curva de absorción de los diferentes materiales se asemeja a la del kenaf, en el que desaparece prácticamente el pico de absorción de las bajas frecuencias característico del corcho y se incrementan de forma notable los coeficientes de absorción acústica en el rango de las altas frecuencias.

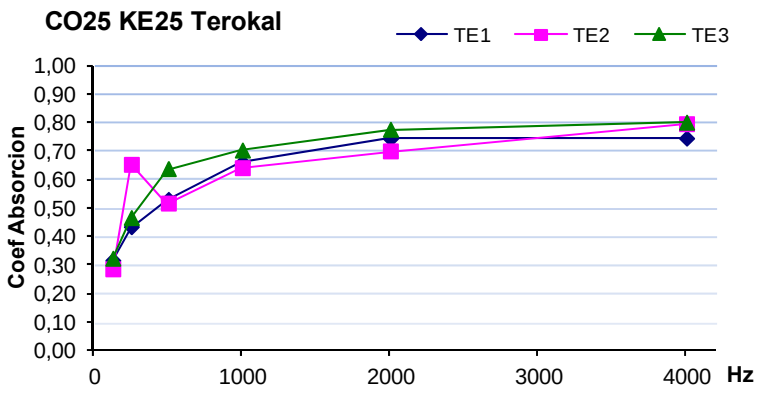
25% CORCHO + 75% KENAF (CO25+KE75)

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 137. NRC CO25-KE75 aglomerado con TEROKAL

	α		
HZ	**CO25 KE75 TE1**	**CO25 KE75 TE2**	**CO25 KE75 TE3**
125	0,314	0,284	0,321
250	0,432	0,651	0,464
500	0,528	0,515	0,636
1000	0,658	0,639	0,701
2000	0,742	0,698	0,774
4000	0,743	0,794	0,799
NRC	0,59	0,63	0,64

Al sustituir, paulatinamente, el corcho de la composición por kenaf el mecanismo de disipación de energía acústica como consecuencia de la formación de poros intergranulares pierde progresivamente eficacia. Por este motivo la muestra TE1 presenta en este caso un leve empeoramiento del NRC en relación con los resultados de las muestras anteriores.



123. NRC CO25-KE75 aglomerado con TEROKAL

La curva presenta un trazado muy similar al característico del kenaf, con valores discretos en el rango de las bajas frecuencias y más elevados en las frecuencias a partir de los 2000 Hz.

100% KENAF (KE100)

Los resultados de la caracterización acústica del kenaf aglomerado con terokal se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 138. NRC KE100 aglomerado con TEROKAL

	α		
HZ	**KE100 TE1**	**KE100 TE2**	**KE100 TE3**
125	0,42	0,458	0,343
250	0,558	0,513	0,536
500	0,443	0,418	0,437
1000	0,563	0,517	0,549
2000	0,621	0,626	0,586
4000	0,675	0,722	0,66
NRC	0,55	0,52	0,53

Apenas existen diferencias entre las tres muestra caracterizadas. La TE1 es levemente superior previsiblemente porque parte de los microporos del kenaf sean bloqueados por el terokal, motivo por el cual el NRC no crece conforme aumentamos la superficie porosa de este material al reducir el tamaño de partícula.

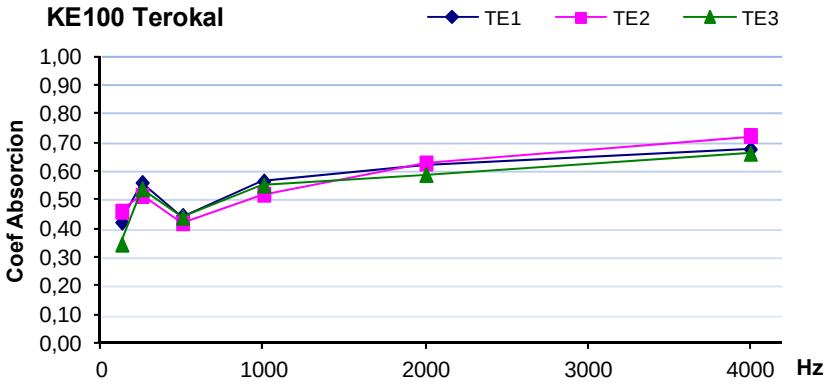


Figura 124. NRC KE100 aglomerado con TEROKAL

La curva de los coeficientes de absorción acústica es característica del kenaf (tal y como hemos observado en el resto de ligantes), con valores bastante discretos en el rango de las bajas frecuencias y más elevados a altas frecuencias.

75% KENAF + 25% NEUMÁTICO (KE75+NE25)

Los resultados de la caracterización acústica de esta serie se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 139. NRC KE75-NE25 aglomerado con TEROKAL

	α		
HZ	**KE75 NE25 TE1**	**KE75 NE25 TE2**	**KE75 NE25 TE3**
125	0,213	0,361	0,463
250	0,65	0,58	0,45
500	0,727	0,455	0,402
1000	0,624	0,542	0,518
2000	0,628	0,574	0,641
4000	0,714	0,686	0,733
NRC	0,66	0,54	0,50

La introducción de neumático (aunque sea en pequeñas proporciones) aumenta la porosidad intergranular. Ésta aumenta cuanto mayor es el tamaño de partícula, motivo por el cual en las muestras TE1 obtenemos unos mayores valores de NRC. No obstante lo anterior, el kenaf consigue una buena absorción en el rango de las altas frecuencias en la medida que el terokal no bloquea sus microporos, motivo por el cual esta combinación de materiales es la que suele presentar mejores resultados en general para todos los materiales ligantes.

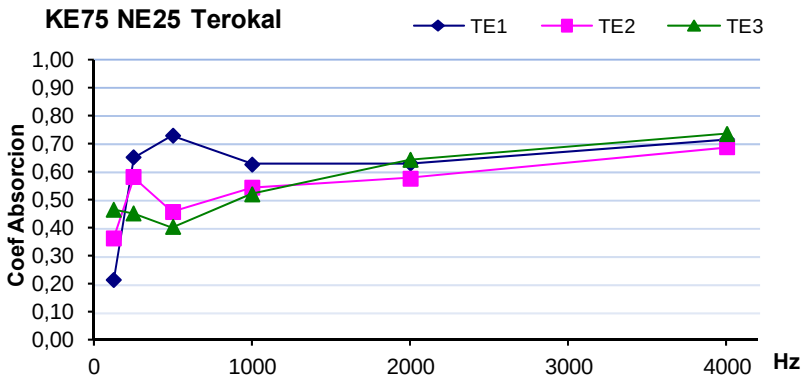


Figura 125. NRC KE75-NE25 aglomerado con TEROKAL

En la gráfica anterior se observa cómo mejoran las absorciones en el rango de las bajas frecuencias con la introducción de las partículas de neumático y la formación de poros intergranulares, mientras que el kenaf es el responsable de mantener un adecuado coeficiente de absorción acústica a altas frecuencias.

50% KENAF + 50% NEUMÁTICO (KE50+NE50)

Tabla 140. NRC KE50-NE50 aglomerado con TEROKAL

	α		
Hz	**KE50 NE50 TE1**	**KE50 NE50 TE2**	**KE50 NE50 TE3**
125	0,155	0,16	0,153
250	0,534	0,539	0,526
500	0,798	0,801	0,817
1000	0,626	0,642	0,649
2000	0,693	0,724	0,696
4000	0,741	0,791	0,742
NRC	0,66	0,68	0,67

Tal y como ocurre con el resto de ligantes, en esta proporción (en general) es donde se obtienen los mayores valores de NRC debido a que en ella confluye de forma inequívoca los dos mecanismos de absorción de forma más evidente. Ello se debe a que el neumático no tiene absorción (según el estudio textural) y el kenaf tiene, en general, un mal comportamiento en el rango de las bajas frecuencias.

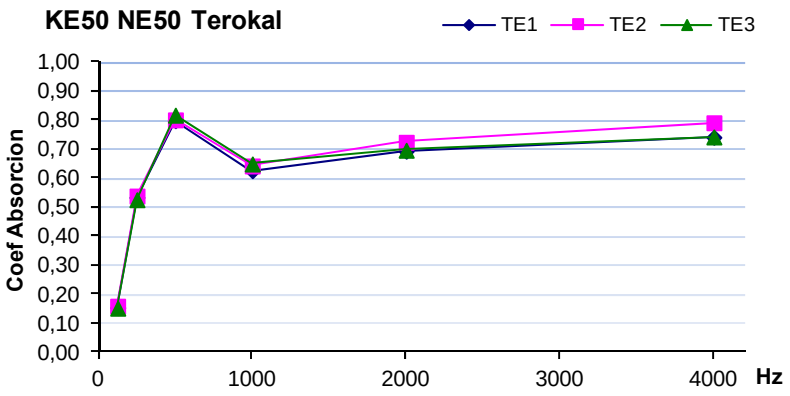


Figura 126. NRC KE50-NE50 aglomerado con TEROKAL

Se observa una curva característica de este material, en la que el neumático es el responsable del pico de absorción acústica a los 500 Hz mientras que la absorción en el rango de las altas frecuencias es debida a la porosidad del kenaf. Existe, en todo caso, una correspondencia en la curva de absorción acústica entre las diferentes granulometrías caracterizadas, tal y como podemos observar en la anterior figura.

25% KENAF + 75% NEUMÁTICO (KE25+NE75)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de esta serie son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 141. NRC KE25-NE75 aglomerado con TEROKAL

	α		
Hz	**KE25 NE75 TE1**	**KE25 NE75 TE2**	**KE25 NE75 TE3**
125	0,105	0,084	0,087
250	0,367	0,281	0,307
500	0,801	0,867	0,885
1000	0,614	0,61	0,593
2000	0,808	0,776	0,795
4000	0,815	0,821	0,724
NRC	0,65	0,63	0,65

A pesar de la mínima presencia de neumático en la composición de este aglomerado, los valores de NRC son bastante elevados en relación a los obtenidos con otras mezclas de materiales. En general se obtienen coeficientes de absorción acústica bastante similares con independencia de la granulometría utilizada.

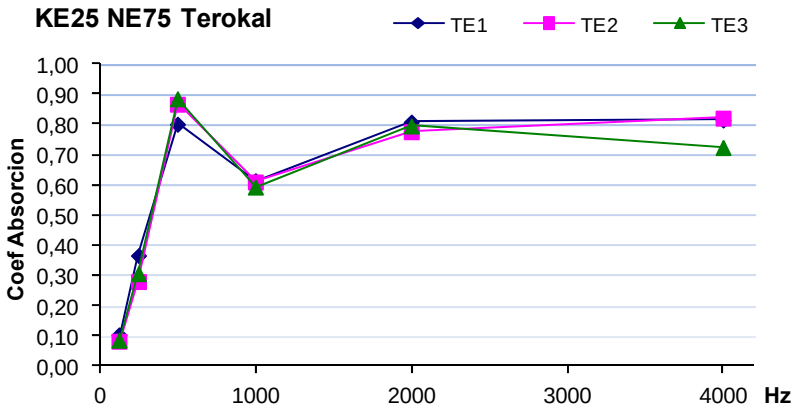


Figura 127. NRC KE25-NE75 aglomerado con TEROKAL

En la gráfica anterior se observa la presencia de un pico de absorción similar al obtenido en el corcho, característico del neumático, en torno a las bajas y medias frecuencias y unos coeficientes de absorción discretos en el rango de las altas frecuencias como consecuencia de la sustitución de kenaf por neumático.

100% NEUMÁTICO (NE100)

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 142. NRC NE100 aglomerado con TEROKAL

	α		
Hz	**NE100 TE1**	**NE100 TE2**	**NE100 TE3**
125	0,069	0,064	0,065
250	0,132	0,127	0,131
500	0,499	0,508	0,543
1000	0,714	0,738	0,712
2000	0,681	0,599	0,593
4000	0,838	0,895	0,92
NRC	0,51	0,49	0,49

Al eliminar el kenaf y confiar la absorción exclusivamente al neumático, NRC caen considerablemente. Hemos de recordar que el neumático es el material menos poroso de los caracterizados texturalmente, por lo que la absorción la debe a la formación de poros intergranulares entre las partículas. Prueba de ello es el hecho de que aunque leve, existe una ligera tendencia a un mejor comportamiento de las muestras con un mayor tamaño de partícula y, por lo tanto, una mayor porosidad intergranular.

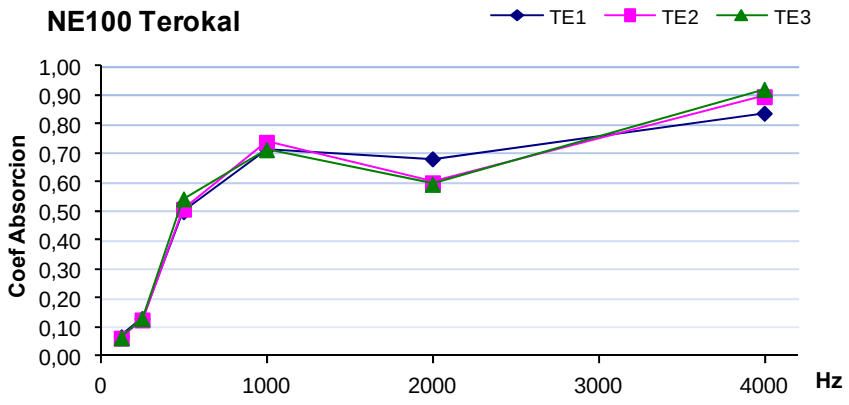


Figura 128. NRC NE100 aglomerado con TEROKAL

La curva presenta cómo el neumático cuenta con un comportamiento aceptable en las bajas frecuencias, si bien decae levemente en las medias. Existe, como puede apreciarse, una correspondencia entre las diferentes granulometrías aunque hay que destacar un comportamiento ligeramente mejor de la TE1 con un mayor tamaño de partícula.

75% NEUMÁTICO + 25% CORCHO (CO25+NE75)

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 143. NRC CO25-NE75 aglomerado con TEROKAL

	α		
HZ	**CO25 NE75 TE1**	**CO25 NE75 TE2**	**CO25 NE75 TE3**
125	0,07	0,068	0,074
250	0,166	0,155	0,184
500	0,687	0,64	0,768
1000	0,666	0,688	0,639
2000	0,739	0,729	0,766
4000	0,822	0,859	0,84
NRC	0,56	0,55	0,59

La adición de corcho a la muestra aglomerada con neumático mejora considerablemente los NRC de este último en todos los tamaños de partícula, si bien en mayor medida para aquellas de menor tamaño.

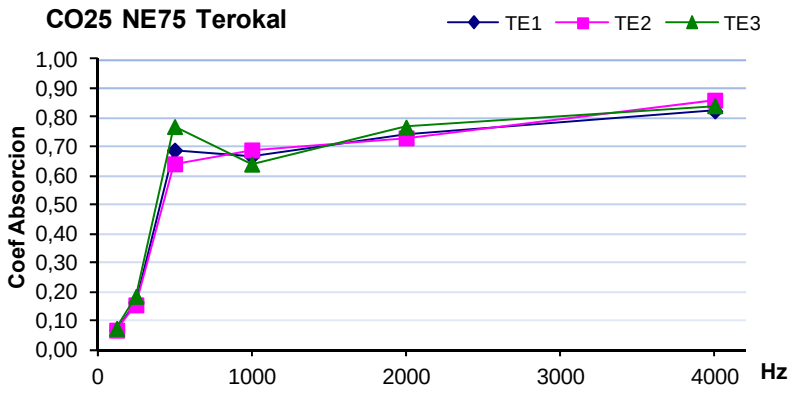


Figura 129. NRC CO25-NE75 aglomerado con TEROKAL

En la gráfica anterior se observa cómo el corcho mejora la absorción a bajas frecuencias e incluso a altas frecuencias. Existe una concordancia entre la curva de absorción de todas las muestras, si bien la relativa a la probeta con un menor tamaño de partícula es levemente mejor. El trazado de la gráfica comienza a insinuar levemente el trazado tipo del corcho, a pesar de la escasa cantidad añadida.

50% NEUMÁTICO + 50% CORCHO (CO50+NE50)

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica son los siguientes:

Tabla 144. NRC NE50-CO50 aglomerado con TEROKAL

	α		
HZ	**CO50 NE50 TE1**	**CO50 NE50 TE2**	**CO50 NE50 TE3**
125	0,075	0,077	0,072
250	0,191	0,205	0,2
500	0,744	0,787	0,784
1000	0,61	0,577	0,567
2000	0,805	0,776	0,822
4000	0,699	0,681	0,737
NRC	0,59	0,59	0,59

El corcho sigue contribuyendo a una mejora en la disipación de energía, especialmente en las muestras con un mayor tamaño de partícula. No existe diferencia aparente entre el tipo de muestra en el NRC global obtenido, por lo que se deduce que en estas muestras coexisten los dos mecanismos principales de absorción, el debido a la porosidad intergranular del neumático y la absorción del propio corcho dada su peculiar estructura y porosidad en el rango de los mesoporos y macroporos.

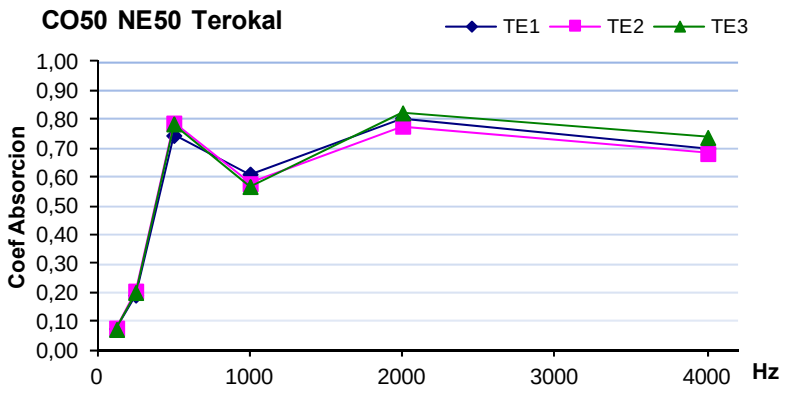


Figura 130 NRC CO50-NE50 aglomerado con TEROKAL

La gráfica anterior se insinúa cada vez más característica del corcho, con el pico en el rango de las bajas frecuencias. Existe un leve decaimiento en el rango de

las altas frecuencias posiblemente como consecuencia de un bloqueo de los mesoporos del corcho.

25% NEUMÁTICO + 75% CORCHO (CO75+NE25)

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 145. NRC NE25-CO75 aglomerado con TEROKAL

	α		
HZ	**CO75 NE25 TE1**	**CO75 NE25 TE2**	**CO75 NE25 TE3**
125	0,087	0,086	0,084
250	0,245	0,259	0,252
500	0,844	0,837	0,839
1000	0,55	0,525	0,536
2000	0,729	0,769	0,777
4000	0,69	0,726	0,703
NRC	0,59	0,60	0,60

Poca variación se aprecia en los NRC de esta combinación de materiales con respecto a los de la dosificación anterior, lo que hace prever que los mecanismos de disipación de energía son los mismos en ambos.

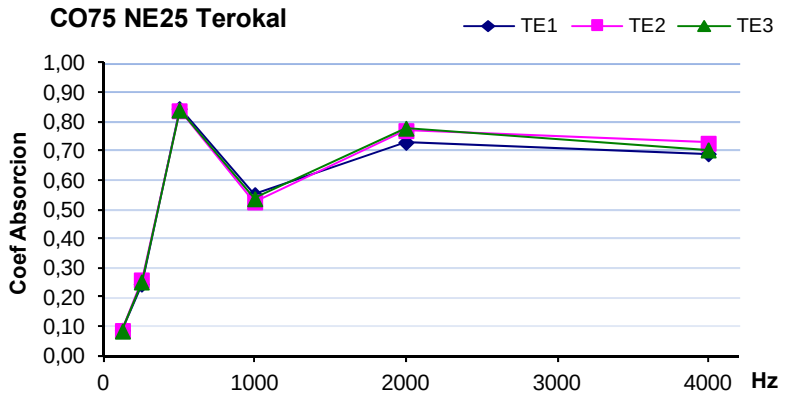


Figura 131. NRC CO75-NE25 aglomerado con TEROKAL

Sin diferencias relevantes en función del tamaño de partícula, las tres gráficas se caracterizan por un trazado muy próximo al del corcho puro con un pico a los 500 Hz y una moderada absorción en el rango de las frecuencias altas.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS AGLOMERADOS CON TEROKAL

Los resultados obtenidos y analizados con detalle en los anteriores apartados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 146. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con TEROKAL

	α								
Hz	**CO100 TE1**	**CO100 TE2**	**CO100 TE3**	**CO75 KE25 TE1**	**CO75 KE25 TE2**	**CO75 KE25 TE3**	**CO50 KE50 TE1**	**CO50 KE50 TE2**	**CO50 KE50 TE3**
125	0,082	0,077	0,071	0,122	0,168	0,111	0,23	0,279	0,283
250	0,218	0,205	0,201	0,408	0,391	0,438	0,492	0,449	0,536
500	0,818	0,794	0,79	0,766	0,667	0,724	0,595	0,487	0,53
1000	0,504	0,458	0,438	0,515	0,526	0,493	0,64	0,505	0,558
2000	0,649	0,569	0,527	0,599	0,633	0,603	0,734	0,542	0,609
4000	0,678	0,663	0,559	0,666	0,61	0,671	0,737	0,603	0,685
NRC	**0,55**	**0,51**	**0,49**	**0,57**	**0,55**	**0,56**	**0,62**	**0,50**	**0,56**

	α								
Hz	**CO25 KE75 TE1**	**CO25 KE75 TE2**	**CO25 KE75 TE3**	**KE100 TE1**	**KE100 TE2**	**KE100 TE3**	**KE75 NE25 TE1**	**KE75 NE25 TE2**	**KE75 NE25 TE3**
125	0,314	0,284	0,321	0,42	0,458	0,343	0,213	0,361	0,463
250	0,432	0,651	0,464	0,558	0,513	0,536	0,65	0,58	0,45
500	0,528	0,515	0,636	0,443	0,418	0,437	0,727	0,455	0,402
1000	0,658	0,639	0,701	0,563	0,517	0,549	0,624	0,542	0,518
2000	0,742	0,698	0,774	0,621	0,626	0,586	0,628	0,574	0,641
4000	0,743	0,794	0,799	0,675	0,722	0,66	0,714	0,686	0,733
NRC	**0,59**	**0,63**	**0,64**	**0,55**	**0,52**	**0,53**	**0,66**	**0,54**	**0,50**

	α								
Hz	**KE50 NE50 TE1**	**KE50 NE50 TE2**	**KE50 NE50 TE3**	**KE25 NE75 TE1**	**KE25 NE75 TE2**	**KE25 NE75 TE3**	**NE100 TE1**	**NE100 TE2**	**NE100 TE3**
125	0,155	0,16	0,153	0,105	0,084	0,087	0,069	0,064	0,065
250	0,534	0,539	0,526	0,367	0,281	0,307	0,132	0,127	0,131
500	0,798	0,801	0,817	0,801	0,867	0,885	0,499	0,508	0,543
1000	0,626	0,642	0,649	0,614	0,61	0,593	0,714	0,738	0,712
2000	0,693	0,724	0,696	0,808	0,776	0,795	0,681	0,599	0,593
4000	0,741	0,791	0,742	0,815	0,821	0,724	0,838	0,895	0,92
NRC	**0,66**	**0,68**	**0,67**	**0,65**	**0,63**	**0,65**	**0,51**	**0,49**	**0,49**

	α								
Hz	**CO25 NE75 TE1**	**CO25 NE75 TE2**	**CO25 NE75 TE3**	**CO50 NE50 TE1**	**CO50 NE50 TE2**	**CO50 NE50 TE3**	**CO75 NE25 TE1**	**CO75 NE25 TE2**	**CO75 NE25 TE3**
125	0,07	0,068	0,074	0,075	0,077	0,072	0,087	0,086	0,084
250	0,166	0,155	0,184	0,191	0,205	0,2	0,245	0,259	0,252
500	0,687	0,64	0,768	0,744	0,787	0,784	0,844	0,837	0,839
1000	0,666	0,688	0,639	0,61	0,577	0,567	0,55	0,525	0,536
2000	0,739	0,729	0,766	0,805	0,776	0,822	0,729	0,769	0,777
4000	0,822	0,859	0,84	0,699	0,681	0,737	0,69	0,726	0,703
NRC	**0,56**	**0,55**	**0,59**	**0,59**	**0,59**	**0,59**	**0,59**	**0,60**	**0,60**

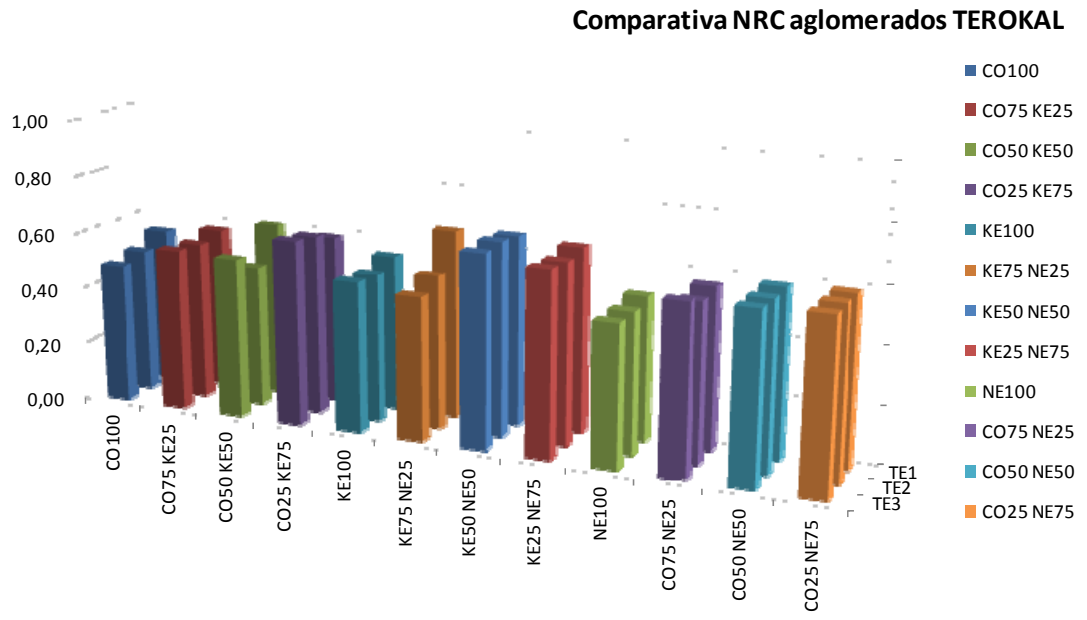


Figura 132. Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con TEROKAL

A la vista de los datos anteriores se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- Al igual que sucede con todos ligantes, los mayores NRC se obtienen para las mezclas realizadas a base de neumático y kenaf, si bien los valores obtenidos son levemente inferiores a los alcanzados con otros aglutinantes.

- Mención aparte merece el indicar el buen comportamiento que se obtiene en cuanto a la disipación de energía las mezclas elaboradas con corcho y

neumático con este ligante. A pesar de no llegar a los valores de NRC de las anteriores, su valores son de los más elevados de los obtenidos a lo largo de todos los ensayos.

- No existe una tendencia clara acera de qué volúmenes son aquellos con los que se obtienen mejore los resultados de reducción acústica ya que en general aparecen los dos mecanismos de disipación de energía acústica predominando uno u otro según el tipo y proporción de los materiales.

03.05. EJEMPLO DE APLICACIÓN

03.05.01. PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN

Para la realización de la simulación lo que realizamos en primer lugar es validar el modelo geométrico en tres dimensiones. Para ello el programa de simulación cuenta con una serie de funciones que nos facilitan la detección de errores en el modelado como por ejemplo superficies superpuestas, duplicadas,…

Una vez corregidos los errores presentes en el modelo geométrico de la sala procederemos a asignar los materiales a cada una de las superficies que componen el recinto. Habrá que definir los coeficientes de absorción acústica de cada material para cada una de las frecuencias (bandas de octava). Nos apoyamos en librerías de materiales tales como la propia del software utilizado, otras como la de Harris Handbook of Acoustical Measurements and noise control [9], o el Taschenbuch der Technischen Akustic [10] nos pueden servir como referencia para caracterizar los materiales de nuestra sala.

El coeficiente de dispersión (scattering coefficent) caracteriza la dispersión propia del material, así como la debida a la geometría de la superficie a la que se le asigna dicho material. Aunque solo se define un valor de este parámetro para todas las bandas de frecuencia, en bajas frecuencias la dispersión está dominada por el fenómeno de la difracción debido al tamaño limitado de las superficies, mientras que en altas frecuencias el efecto dominante son las irregularidades de las superficies. Puede tomar valores comprendidos entre 0,00 y 1,00 y entre -1,00 y 0,00. En nuestros modelos de simulación nos encontramos dentro de los valores recomendables por el propio programa asignando:

- A las superficies rugosas, con mucha dispersión: 0,70
- A las superficies lisas y grandes, con poca dispersión: 0,10

Para poder obtener un completo análisis de nuestra sala definiremos dos fuentes que se encontrarán en el mismo punto (en el centro del escenario a una altura aproximada de 1,50 m simulando a un orador). Es muy importante desde el punto de vista del acondicionamiento, tal y como hemos visto en apartados anteriores, el uso al que se

va a destinar la sala, sobre todo a la hora de determinar si los parámetros de calidad acústica de una sala son los adecuados o no. En nuestro caso, vamos a considerar que el uso primordial es la palabra, es decir, un lugar en el que fundamentalmente la voz humana será la fuente de sonido. Con este objeto definiremos las siguientes fuentes:

- Fuente omnidireccional: es una fuente que tiene un diagrama de radiación uniforme en todas las direcciones. Esta fuente nos servirá para calcular la mayoría de los parámetros importantes de calidad de la sala.
- *Tlkraise*: se utiliza para simular las fuentes naturales, como la voz humana. A través de esta fuente obtendremos parámetros de calidad tales como la inteligibilidad de la palabra o índice RASTI que definimos anteriormente.

Definiremos una serie de receptores en la sala con el fin de que en estos puntos obtengamos los resultados del cálculo. Dado que, en ambos casos, la sala es simétrica vamos a centrarnos únicamente en la mitad de la audiencia con el fin de simplificar los procesos de cálculo y poder extrapolarlos al resto de la sala.

Una vez creadas las fuentes y los receptores necesarios para la simulación solo queda revisar una serie de parámetros referentes a las opciones de cálculo que influyen en los resultados finales. De estos parámetros cabe señalar el número de rayos que emplearemos en la simulación (por defecto se emplearán 1000 rayos). Si aumentamos este número el tiempo de cálculo será mayor, pero obtendremos resultados más fiables. Para el caso de nuestra sala, dado que no contamos con superficies con fuertes efectos desacopladores o áreas de absorción no uniformemente distribuidas nos limitaremos a mantener los valores establecidos por defecto.

Otro parámetro que podemos modificar es el método de dispersión (*scattering method*). Elegimos la opción *Lambert* de las dos posibles (*Lambert* / Ninguno) con el fin de que se tengan en cuenta los coeficientes de dispersión introducidos durante la asignación de materiales a las distintas superficies. La asignación de esta opción implica que si el coeficiente de dispersión es de 0,10, cuando un rayo choca con esta superficie, el 90% de la energía será reflejada y el 10% dispersada según la distribución de Lambert, es decir, para cualquier dirección la energía es proporcional a $cos\theta$ o proyección de área de la superficie. Si escogiéramos no aplicar ningún método de dispersión, el nuevo rayo seguirá una dirección especular.

Con el fin de poder analizar la existencia de problemas de eco aumentamos la variable Orden de Transición (*Transition order*) al valor 5, de tal forma que se aumentan el número de reflexiones de mayor orden visualizables en el reflectograma.

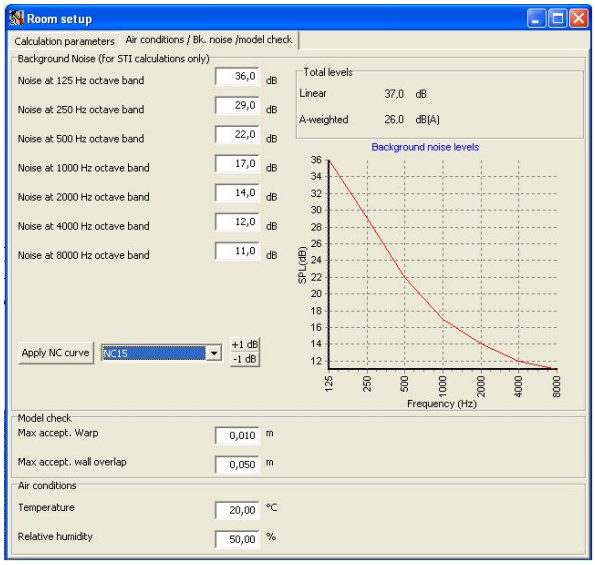


Figura 133. Consideración de curvas NC

En otra ventana adicional se definen las características del medio en el que se propaga el sonido, esto es, la temperatura y la humedad relativa del aire y los niveles del ruido de fondo. Para la corrección del ruido de fondo se emplean las curvas NC (similares a las curvas de ponderación) desarrolladas por Kosten y Van Os.

El sistema NC ha tenido mucha aceptación entre los fabricantes y proyectistas y es normalmente el método de valoración del ruido en los sistemas de aire acondicionado. Otro tipo de curvas son las NR. Para nuestro trabajo emplearemos una curva de corrección NC15 como la que se expone en la anterior figura 133.

Las condiciones del aire influyen en la velocidad de propagación del sonido y en la atenuación que sufre durante su transmisión. Los niveles de ruido de fondo se detallan para todas las bandas de frecuencia en decibelios.

Por último, y antes de proceder al cálculo, definiremos una rejilla en las superficies que forman la zona de audiencia. En esta rejilla podremos obtener un mapa de color en función de la cuadrícula que dibujemos (que en nuestro caso será de 1,00 m x 1,00 m a una altura de unos 0,90 m del suelo). Hemos de señalar la escala de color del mapa con el fin de poder representar en qué zona de la audiencia contamos con menos niveles de recepción del sonido.

El objeto del siguiente apartado es mostrar cuál hubiese sido el comportamiento de este auditorio real desde un punto de vista acústico en el caso de que se hubiesen utilizado los materiales inicialmente proyectados. Así como el comportamiento de la sala tras la sustitución en determinados puntos tras el estudio del comportamiento de la sala por alguno de los materiales fabricados a partir de residuos de corcho, kenaf y neumático descritos anteriormente. Para ello se describirán los materiales que componían la solución inicial y se procederá al estudio del comportamiento de la sala con esos materiales. Posteriormente se introducirán correcciones y modificaciones de materiales en diferentes áreas con el fin de comprobar el resultado obtenido.

03.05.01.01. CASO I - MATERIALES INICIALES

La peculiaridad más importante de la sala es su configuración geométrica, que consta, por necesidades de diseño del edificio, de dos paredes completamente paralelas dispuestas lateralmente en la zona de audiencia. Esta configuración condicionará, sin lugar a duda, la elección de los materiales ya que, aunque favorezca una serie de parámetros como la eficiencia lateral, puede conducir a la aparición de fenómenos nada deseables como son los ecos.

En rojo: situación de las fuentes emisoras

En azul: situación de los receptores

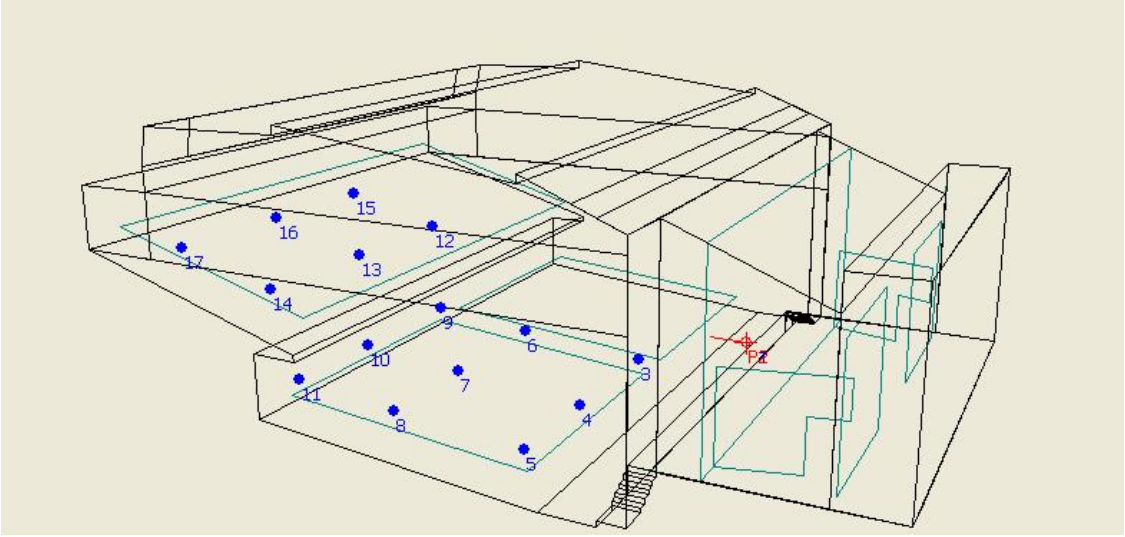


Figura 134. Configuración inicial de auditorio FEVAL

Las características más singulares de diseño de este recinto son, en primer lugar, el diseño de un techo equipotencial reflector que permitirá favorecer reflexiones del

sonido a la zona de audiencia más alejada compensando de esta forma el decaimiento de la energía del sonido directo a esta área. Por otro lado, contamos con una doble área de audiencia, una situada a un nivel levemente inferior a la escena y un anfiteatro que se eleva a una cota superior con una disposición inclinada respecto a la horizontal para favorecer tanto las visuales como la mejora de los parámetros los acústicos. Singular es como se ha indicado anteriormente, la disposición de las dos paredes laterales, que condicionará de forma notable la elección de los materiales de la sala. Por último, y dado que se trata de un auditorio vinculado a las exposiciones de la Institución Ferial, su uso principal será la palabra limitándose el volumen de la zona de escena y eliminando a los efectos de cálculo parte del área posterior que quedará oculta tras la cortina que se disponga en los congresos. Esta área, que es susceptible de ser utilizada en caso de que el uso que se quiera dar sea para música, debe ser objeto de un estudio independiente, para lo cual se verán modificados los parámetros acústicos (distintas limitaciones) así como el propio volumen de la sala.

Los techos se dividen en dos tramos. Por un lado, se resuelve el primero de los mismos con placas de yeso laminado, que conformarían el tramo inicial del techo de la sala, compuesto por tres grandes planos o plafones, y la caja que aloja la puerta del fondo de escenario, quedando suspendidas a través de una estructura metálica. Por ejemplo, si se elige PLADUR-N de 13 mm, con una modulación (M) de la estructura secundaría (T-47) de 600 mm, la separación de la estructura primaria será de 1,00 m, y la separación entre cuelgues será de 3,30 m. Estos cuelgues estarán constituidos por unas varillas roscadas que irán a enlazarse, a través de unos conectores de goma tipo Akustik o similar, lo cual permitirá graduar la altura del enlace, con las placas alveolares de cubierta.

Al quedar flotantes, los grandes planos o plafones actúan como resonadores de membrana absorbiendo, debido a su tamaño, frecuencias muy bajas. A ello contribuye la cámara de aire que queda encima de ellos. Para que cada uno de los planos absorba un rango de frecuencias distinto es necesario que varíe su espesor, o bien densificar la estructura metálica, existente en su cara posterior, según los requerimientos (más en el plano más alejado del escenario y menos en el más cercano). El coeficiente de absorción de esta solución a las diferentes frecuencias es el siguiente:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,29	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,09

El segundo tramo de falso techo cuenta con un mayor espesor de la placa y con una estructura más rígida (varillas más próximas entre si en la fijación). Por ejemplo, si se elige PLADUR-N de 19 mm, con una modulación (M) de la estructura secundaría (T-47) de 600 mm, la separación de la estructura primaria será de 0,90 m, y la separación entre cuelgues será de 3,15 m. Estos cuelgues estarán constituidos por unas varillas roscadas que irán a enlazarse, a través de unos conectores de goma tipo Akustik o similar. El coeficiente de absorción acústica obtenido en este segundo apartado según documentación de fabricante sería el señalado en la siguiente tabla.

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,18	0,18	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Nótese cómo, al contar con una estructura más rígida, disminuye levemente la absorción, especialmente a bajas frecuencias frente a la solución proyectada anterior.

Sobre el escenario se simulará con un solado de madera que se colocará clavado sobre rastreles de madera de pino, nivelados sobre la solera de hormigón gracias al empleo de cuñas. Para garantizar una superficie de suelo lo suficientemente elástica, el espaciado entre rastreles se determinará en función del uso y la carga prevista, no siendo inferior a 500 mm entre centros de rastrel. Para asegurar la amortiguación del ruido de pisadas, además de servir como barrera antihumedad, se colocará el rastrelado sobre una lámina de polietileno reticulado de 5 mm de espesor (ethafoam o similar). Esta configuración de suelo ofrece desde el punto de vista acústico dos efectos contrapuestos: por una parte, el suelo actúa como amplificador de los instrumentos que están en contacto directo con el mismo, y además genera una vibración estructural que facilita la comunicación entre los músicos, y por otra parte, absorbe sonido aéreo de baja frecuencia, ya que actúa como un resonador de membrana. El coeficiente de absorción acústica de este tipo de revestimiento según bibliografía y adoptado para la simulación es el siguiente:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07

El suelo en el resto de las áreas se ha simulado con un pavimento de linóleo (ARTOLEUM “graphic” ref. 5312 – www.artoleum.com -), pegado sin cámara de aire a una capa de pasta niveladora extendida sobre el suelo y/o peldañeado de obra. Este tipo de revestimiento ofrece los siguientes valores de absorción acústica según los datos suministrados por el fabricante:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05

La zona de audiencia se simula con una butaca modular tapizada plegable “Figueras” modelo 5036-T, con asiento y respaldo de espuma de poliuretano moldeada y estructura interior metálica. El asiento lleva unos orificios en la parte inferior que permiten una adecuada absorción acústica cuando el asiento está levantado y sin uso. Se adopta no obstante el valor del comportamiento con la zona de audiencia ocupada según los valores que determina el propio fabricante:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,50	0,50	0,65	0,75	0,79	0,81	0,73	0,73

Nótese como éste es el material con mayor coeficiente de absorción acústica promedio de los empleados, especialmente a altas frecuencias como consecuencia de la textura y propiedades del material textil que le sirve de revestimiento.

Las paredes se proyectan en esta simulación inicial con un contrachapado de madera de 10 mm de espesor, ignifugado, chapado en madera noble. Los paneles de madera se colocarán sobre un panel semirrígido de lana de roca de 40 kg/m^3 de densidad. Este tipo de revestimiento, muy reflexivo, ofrece el siguiente cuadro de coeficientes de absorción acústica:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01

Por último, ocupando toda la embocadura del escenario, se plantea una cortina de terciopelo de gramaje superior a 550 g/m^2 fruncidas al 200 %. Esta cortina solo

aparecerá cuando se utilice la sala para congresos o conferencias, que es la simulación que nos ocupa ya que será el uso habitual, sin perjuicio de poder hacer un nuevo diseño y dimensionado de la sala para el uso de música. El coeficiente de absorción acústica de este revestimiento es el siguiente:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,50	0,50	0,15	0,35	0,74	0,60	1,00	1,00

Nótese que, al igual que las butacas, este revestimiento cuenta con un elevado coeficiente de absorción acústica especialmente a altas frecuencias.

03.05.01.02. CASO II - INCORPORACIÓN DE **KE50-NE50** COLA

En esta segunda opción se sustituyen parte de los materiales empleados en las paredes laterales del recinto por el material compuesto elaborado a partir de compuestos reciclados y ensayado en laboratorio según se ha descrito en apartados anteriores compuesto por una mezcla al 50% de fibra de kenaf y un 50% de neumático molido aglomerados con cola. Se elige esta mezcla por ser la que mayor coeficiente de absorción acústica presenta, utilizando como material ligante la cola con el objeto de obtener resultados de cómo este material puede influir a la hora de ser empleado como revestimiento en el interior de una sala.

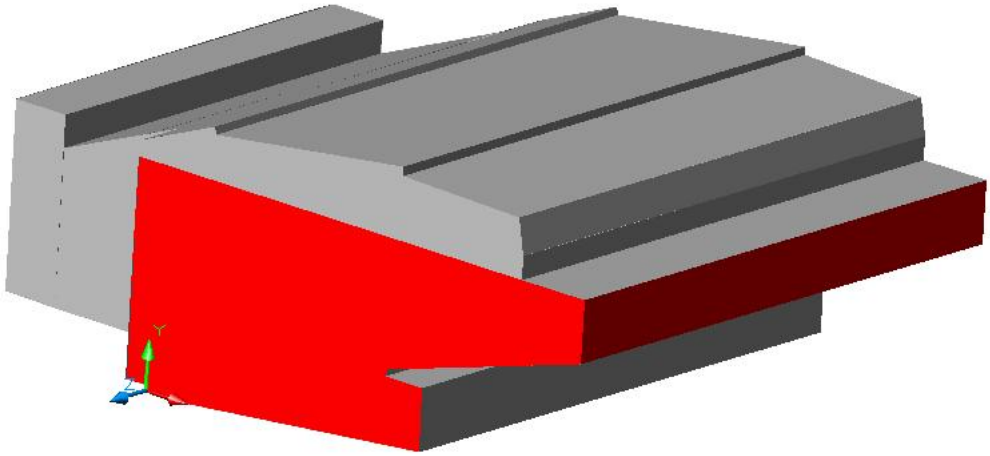


Figura 135. Paramentos modificados en opción II y III

Los revestimientos de las paredes que se señalan en rojo en la figura anterior son los que se han sustituido por la mezcla de material compuesto por 50% de fibra de kenaf y un 50% de neumático molido aglomerados con cola, sustituyendo al contrachapado de madera inicialmente proyectado de 10 mm de espesor, ignifugado, chapado en madera noble. Tal y como se mostró en los resultados obtenidos mediante tubo de impedancia de esta mezcla de materiales reciclados son los siguientes:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,12	0,12	0,40	0,62	0,46	0,42	0,53	0,53

Los resultados obtenidos ofrecen valores muy interesantes tanto a altas como a bajas frecuencias que sin lugar a dudas tendrá una importante incidencia en la obtención de los resultados globales de la sala.

03.05.01.03. CASO III - INCORPORACIÓN DE **KE75-NE25** FETADIT

Se procede en esta tercera simulación a la sustitución de los mismos paramentos que en el caso anterior por un material compuesto por 75% de fibra de kenaf y un 25% de neumático molido aglomerados con fetadit. La elección de este material obedece a que ha sido el que mejor resultado promedio ha obtenido de todos los ensayados con diferentes mezclas de componentes así como diferentes tipos de ligantes. Sin perjuicio de la posibilidad de modificación de la textura o geometría del material, esta mezcla de materiales reciclados aporta el mayor coeficiente de absorción acústica de los obtenidos respecto de las muestras ensayadas.

Tal y como puede apreciarse en las tablas anteriores, los valores de los coeficientes de absorción acústica para las diferentes frecuencias son los siguientes:

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,158	0,158	0,596	0,765	0,706	0,927	0,940	0,940

Cabe señalar que este valor está muy próximo al obtenido con otros ligantes como poliuretano para la misma dosificación de materiales reciclados, por lo que la incidencia de un tipo u otro de ligante para una misma dosificación es mínima. Para la introducción de estos materiales en el software de simulación hemos procedido a crearlos con los datos obtenidos en laboratorio.

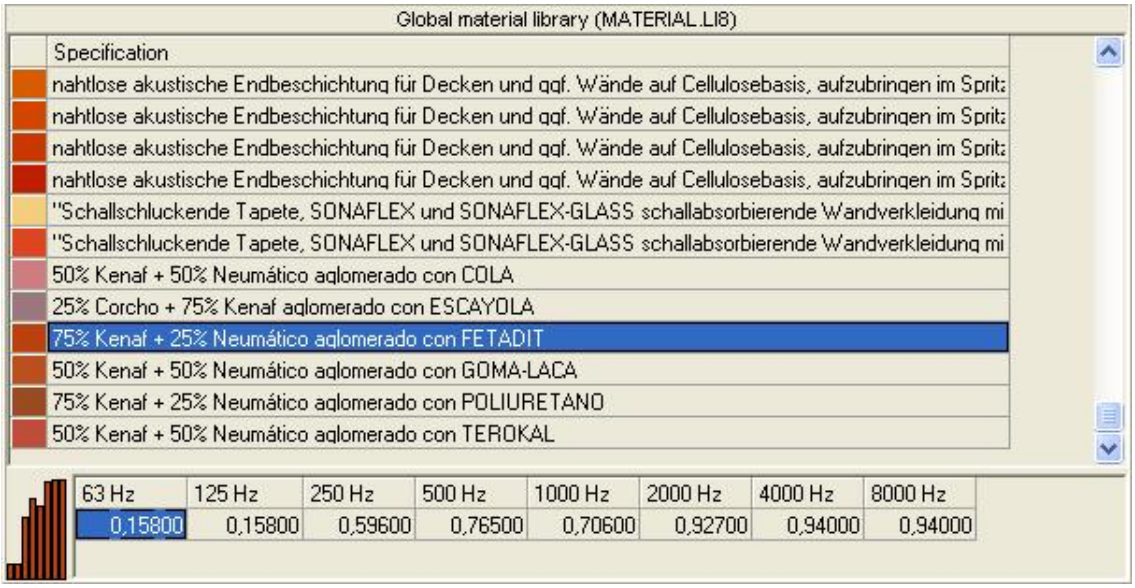


Figura 136. Asignación de materiales elaborados

03.05.02. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

03.05.02.01. OPCIÓN I – MATERIALES INICIALES

A. RESULTADOS EN RESPUESTA MÚLTIPLE

Los parámetros que obtenemos en este punto utilizando la opción de respuesta múltiple son, entre otros, los siguientes:

TIEMPO DE REVERBERACIÓN: Los tiempos de reverberación obtenidos con las expresiones de Sabine [11,12] y Eyring [13], presuponen condiciones de campo sonoro difuso, es decir, que todas las superficies tienen las mismas propiedades de absorción. El tiempo de reverberación calculado según Arau [14,15] considera las variaciones de absorción en todas las direcciones y coincide con el valor de Eyring cuando todos los coeficientes de absorción en las tres direcciones son iguales en promedio. Pero estos datos son solo estimaciones que sirven para darnos una idea de la magnitud del tiempo de reverberación. Los valores más fiables para determinar el tiempo de reverberación son los obtenidos como T_{30} y T_{20}. Puesto que no se dispone en este software de un rango dinámico de 60 dB, que es lo que se precisaría para calcular el tiempo de reverberación (RT), lo que se hace es medir los tiempos para una caída de 20 y 30 dB y luego estimar RT suponiendo que la pendiente no varía. En nuestro caso

y para esta opción I, partiendo de los valores de T_{30} obtenemos un valor de RT_{mid} (medido) de **1,51 s**. De este valor obtendremos otros parámetros como son la calidez y el brillo según las definiciones y expresiones indicadas en apartados anteriores.

EARLY DECAY TIME (EDT): es un parámetro muy relacionado con el tiempo de reverberación, pues ambos permiten determinar el grado de viveza de la sala. Pero mientras que el RT analiza la reverberación, el EDT se centra en las primeras reflexiones. Se calcula como el tiempo que tarda en caer la energía sonora 10 dB multiplicado por seis. Dado que varía con la frecuencia, se estima partiendo de las curvas de energía halladas para las ocho bandas de frecuencia. Para comprobar que es correcto su valor, deberemos observar en primer lugar que no es nulo y en segundo lugar que es mayor que T_{30}. Para nuestra simulación obtenemos valores no nulos superiores a los obtenidos en el apartado anterior, con EDT_{mid} de **1,09 s**.

CLARIDAD MUSICAL (C_{80}): Está relacionada también con las primeras reflexiones y mide la relación entre la energía recibida dentro del los primeros 80 ms y la que llega después. En nuestro caso obtenemos unos valores de C_{80} de **4,70 dB**.

DEFINICIÓN (D_{50}): Este parámetro también estudia el comportamiento de las primeras reflexiones y se utiliza para evaluar la inteligibilidad y sonoridad de la sala. Se calcula como la relación entre la energía que llega al receptor en los primeros 50 ms y la energía total recibida. Para nuestra simulación obtenemos en esta primera opción los resultados de D_{50} de **0,60** (adimensional).

EFICIENCIA LATERAL (LF_{80}): Es la fracción entre la energía recibida lateralmente, excluyendo el sonido directo, y la energía total recibida, dentro de los primeros 80 ms. Por tanto, también se centra en analizar el comportamiento de las primeras reflexiones. Cuanto mayor sea su valor, más grande nos parecerá la fuente de la que proviene el sonido. Se expresa en porcentaje y para nuestra simulación hemos obtenido unos resultados de LF_{80} del **23,00 %.**

INDICE DE TRANSMISIÓN DEL HABLA (STI): tal y como se ha indicado, para poder medir este parámetro utilizaremos la fuente sonora *tlkraise* y no la omnidireccional que es la que hemos utilizado para la medición de todos los parámetros anteriores. Este índice se calcula mediante su versión simplificada o RASTI. Permite cuantificar la

inteligibilidad de la palabra en el interior de un recinto. Su valor está comprendido entre 0 y 1. Para nuestro modelo obtenemos un valor de STI de **0,60** (adimensional), por lo que, en virtud de la escala vista en el apartado de métodos experimentales, obtenemos un valor entre aceptable y bueno, lo cual es significativo para nuestra sala, donde este parámetro es de vital importancia por dedicarse a la fuente hablada.

De forma resumida podemos agrupar todos los valores anteriores así como otros que se deducen de los mismos (como por ejemplo el brillo y la calidez) para esta opción de simulación en la siguiente tabla:

Tabla 147. Valores obtenidos en respuesta múltiple OPCIÓN I

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000		
SIMULACIÓN OPCIÓN I - MATERIALES INICIALES								
T30(s)	1,75	1,59	1,46	1,56	1,52	1,26	RTmid	1,51
							BR	1,11
							Br	0,92
EDT (s)	1,39	1,23	1,06	1,11	1,16	0,97	EDT_{mid}	1,09
C80(dB)	3,6	4,3	4,7	4,3	5,1	5,7	C80 "music average"	4,70
D50	0,57	0,6	0,61	0,59	0,65	0,67	D50	0,60
LF	0,232	0,223	0,227	0,23	0,183	0,185	LF_{E4}	0,23
G							G_{mid}	0,00
							STI	0,60

B. RESULTADOS EN RESPUESTA PUNTUAL

Dentro de cada punto de los once receptores previstos hemos establecido un trabajo (*job*) con la fuente onmidireccional que nos da una serie de resultados. De estos resultados lo más interesante que podemos destacar son los reflectogramas o ecogramas (reflectogram). Los reflectogramas muestran las reflexiones tempranas que llegan al receptor seleccionado, respecto al tiempo de llegada, el ángulo acimut y el ángulo de elevación.

Esta información permite investigar problemas de eco, seleccionando un grupo de reflexiones sospechosas para visualizarlas más detalladamente y comprobar su procedencia. La comprobación de la existencia de posibles ecos en el receptor se realiza observando si a más de 0,05 segundos existen reflexiones cuya magnitud sea similar a la del sonido directo percibido por el oyente comparando los Niveles de Presión Sonora (SPL). En nuestra opción comprobamos que en prácticamente todos los receptores elegidos al azar tales como el 6, 11 ó 17 , existen reflexiones cercanas

y posteriores a los 0,05 segundos con niveles muy importantes respecto de los del sonido directo que contribuyen a la aparición de estos fenómenos de ecos.

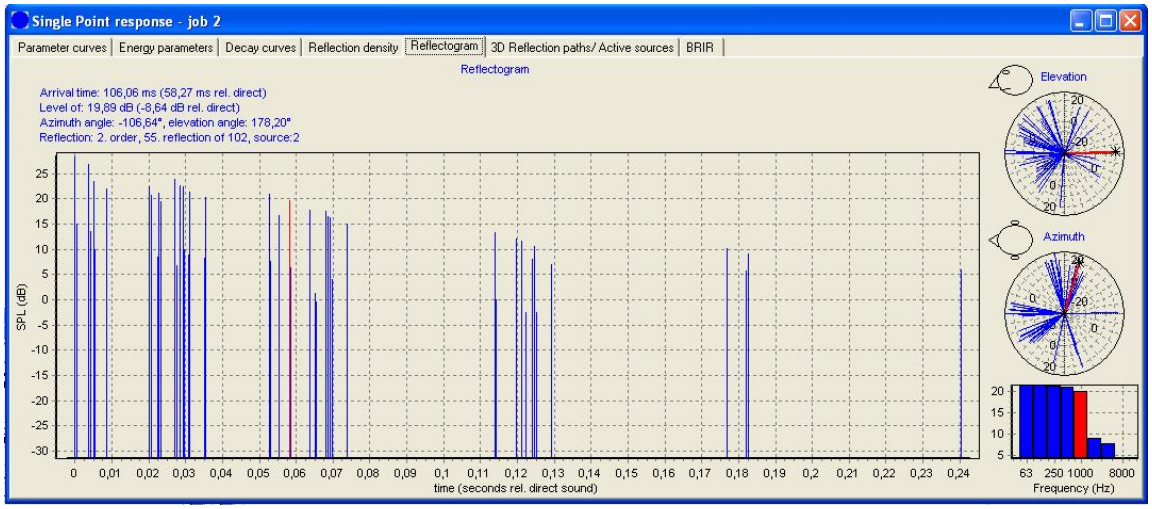


Figura 137. Reflectograma de Punto 11 en Opción I

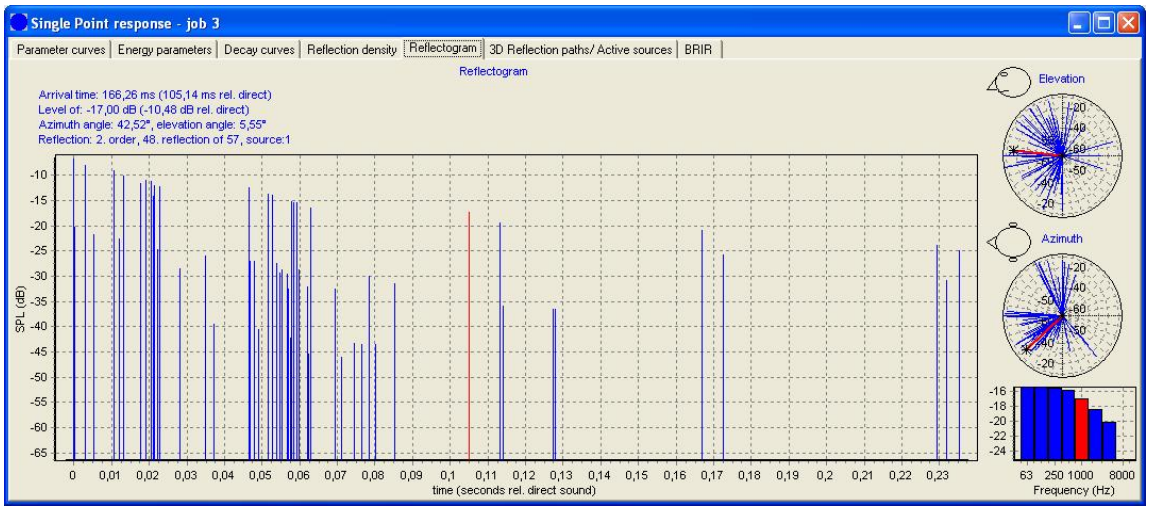


Figura 138. Reflectograma de Punto 17 en Opción I

La simulación nos permite, incluso, comprobar cuál es el recorrido del rayo que provoca la posibilidad de aparición de ecos con el fin de que podamos corregirlo. Las opciones son varias; está claro que el diseño de la sala no favorece la aparición de ecos en los receptores debido a que la existencia de dos paredes perfectamente paralelas en los laterales de la sala provocan el fenómeno que se observa en la figura por el cual las ondas sonoras rebotan continuamente de un paramento a otro especialmente cuando éstos son reflexivos, provocando lo que se denominan “ecos flotantes”.

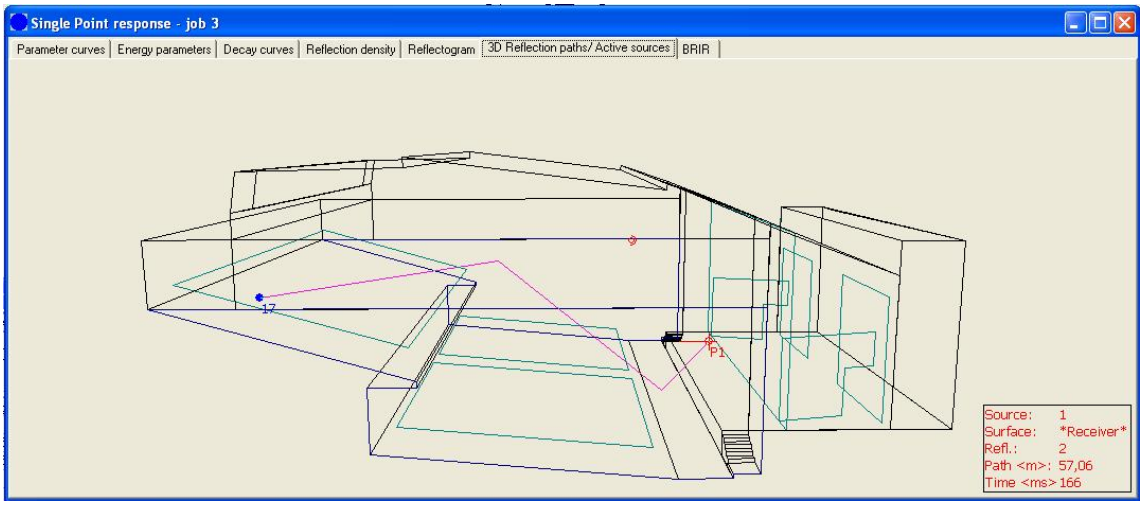


Figura 139. Recorrido del rayo que previsiblemente provoque eco en el Punto 17 en Opción I

C. RESULTADOS RESPUESTA EN REJILLA

Es un mapa de color en el que se plasman los parámetros acústicos para una cuadrícula (que en nuestro caso, recordemos, hemos definido en la superficie de audiencia de dimensiones 1,00 x 1,00 m a una distancia de unos 0,90 m del suelo). Al finalizar los cálculos contamos con mapas de color de todos los parámetros acústicos (STI, EDT, T_{30}, C_{80}, D_{50}, etc). La visualización se puede realizar con todas las frecuencias para cada parámetro a la vez o, si preferimos con más detalle, podemos escoger un parámetro y una frecuencia.

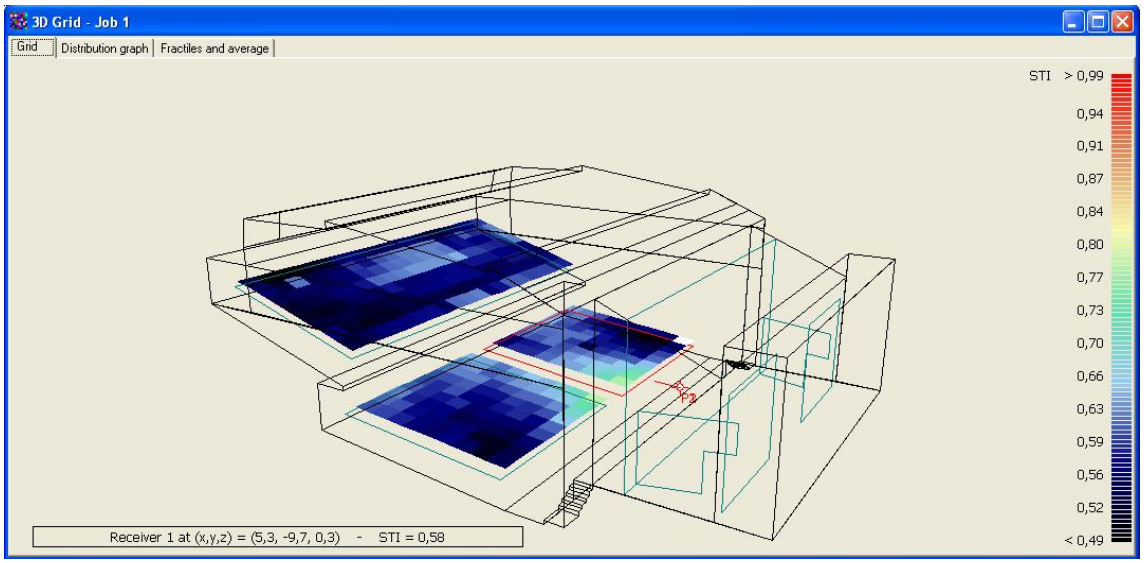


Figura 140. Visualización de rejilla de parámetro STI en Opción I.

Hemos seleccionado dentro de los distintos parámetros el STI (Índice de Transmisión del Habla) para comparar cuál es la respuesta en cada una de las opciones de sala de forma visual. Como puede observarse en la figura, los colores claros corresponden a valores mayores de STI frente a los colores oscuros, contando con valores inferiores de inteligibilidad en la zona lateral especialmente en el anfiteatro superior con un promedio en general aceptable (recordemos que obtuvimos un valor promedio de STI de 0,60).

03.05.02.02. OPCIÓN II – **KE50-NE50** AGLOMERADO CON COLA

A. RESULTADOS EN RESPUESTA MÚLTIPLE

TIEMPO DE REVERBERACIÓN: En este segundo caso, al introducir una importante superficie con un coeficiente de absorción elevado (promedio de 0,42 según los resultados experimentales en el tubo de impedancia) se modifica sustancialmente este parámetro que depende intrínsecamente del coeficiente de absorción y de la superficie de los materiales del revestimiento de la sala. Partiendo de los valores de T_{30} obtenemos un valor de RT_{mid} (medido) de **0,89 s**.

EARLY DECAY TIME (EDT): Al introducir una importante superficie de absorción “apagamos la sala” y reducimos su grado de viveza, aunque mejoraremos la inteligibilidad. Para nuestra simulación obtenemos valores no nulos superiores a los obtenidos en el apartado anterior, con EDT_{mid} de **0,77 s**.

CLARIDAD MUSICAL (C_{80}): Se obtiene un valor importante debido a que se minora la energía total (denominador) al introducir una importante superficie de absorción. En nuestro caso obtenemos unos valores de C_{80} de **6,70 dB**.

DEFINICIÓN (D_{50}): Nuevamente, dado que este parámetro se calcula dividiendo por la energía total recibida, al minorarla por introducir una mayor superficie absorbente mejoramos este parámetro de calidad. Para nuestra simulación obtenemos los resultados de D_{50} de **0,70** (adimensional).

EFICIENCIA LATERAL (LF_{80}): Es la fracción entre la energía recibida lateralmente, por lo que al introducir un elevado coeficiente de absorción en los paramentos laterales este parámetro será uno de los sacrificados. Para nuestra simulación hemos obtenido unos resultados de LF_{80} del **19,00 %.**

INDICE DE TRANSMISIÓN DEL HABLA (STI): Para nuestro modelo obtenemos un valor de STI de **0,64** (adimensional), mejorando notablemente el resultado obtenido en el apartado anterior, lo cual es significativo para nuestra sala donde este parámetro es de vital importancia por dedicarse a la fuente hablada.

De forma resumida podemos agrupar todos los valores anteriores para esta opción de simulación en la siguiente tabla:

Tabla 148. Valores obtenidos en respuesta múltiple OPCIÓN II

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000		
SIMULACIÓN OPCIÓN II - 50% KENAF + 50% NEUMÁTICO AGLOMERADO CON COLA								
T30(s)	1,58	1,17	0,86	0,92	0,87	0,76	RTmid	0,89
							BR	1,54
							Br	0,92
EDT (s)	1,35	0,99	0,74	0,8	0,8	0,68	EDT_{mid}	0,77
C80(dB)	3,8	5,4	7,1	6,3	6,7	7,5	C80 "music average"	6,70
D50	0,57	0,65	0,72	0,68	0,72	0,74	D50	0,70
LF	0,224	0,19	0,16	0,182	0,162	0,156	LF_{E4}	0,19
G							G_{mid}	0,00
							STI	0,64

B. RESULTADOS EN RESPUESTA PUNTUAL

Al introducir superficie absorbente en los paramentos laterales se reduce considerablemente el efecto de los “ecos flotantes” que aparecieron en la anterior simulación. No obstante lo anterior, aún se mantienen ciertos niveles de energía susceptibles de provocar efectos sonoros indeseables, como son los ecos. En los siguientes ecogramas, referentes a los puntos 6 y 11, se observa cómo se han reducido los niveles de energía de las reflexiones cercanas y posteriores a los 0,05 segundos minorando la aparición de estos fenómenos de ecos.

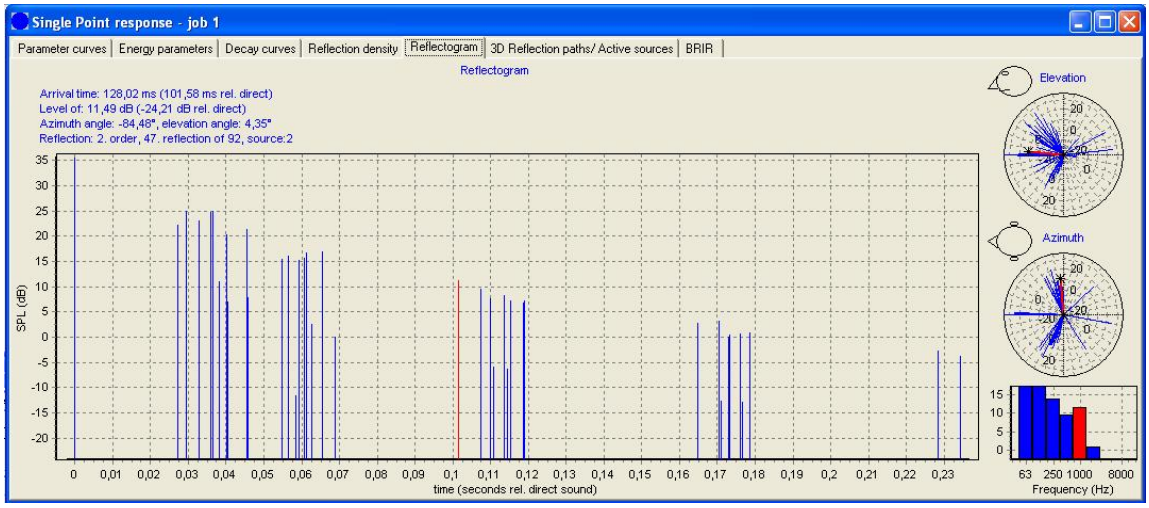


Figura 141. Reflectograma de Punto 6 en Opción II

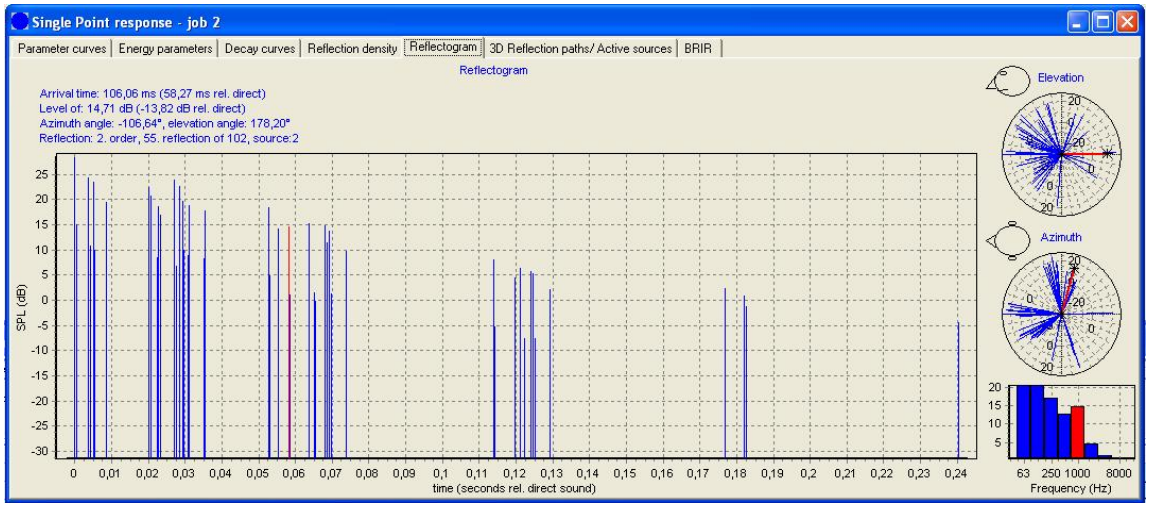


Figura 142. Reflectograma de Punto 11 en Opción II

Aunque de menor intensidad, tal y como pueden observarse en los ecogramas anteriores, sigue persistiendo el fenómeno de los “ecos flotantes” como consecuencia del diseño de la sala tal y como se puede observar en la siguiente figura.

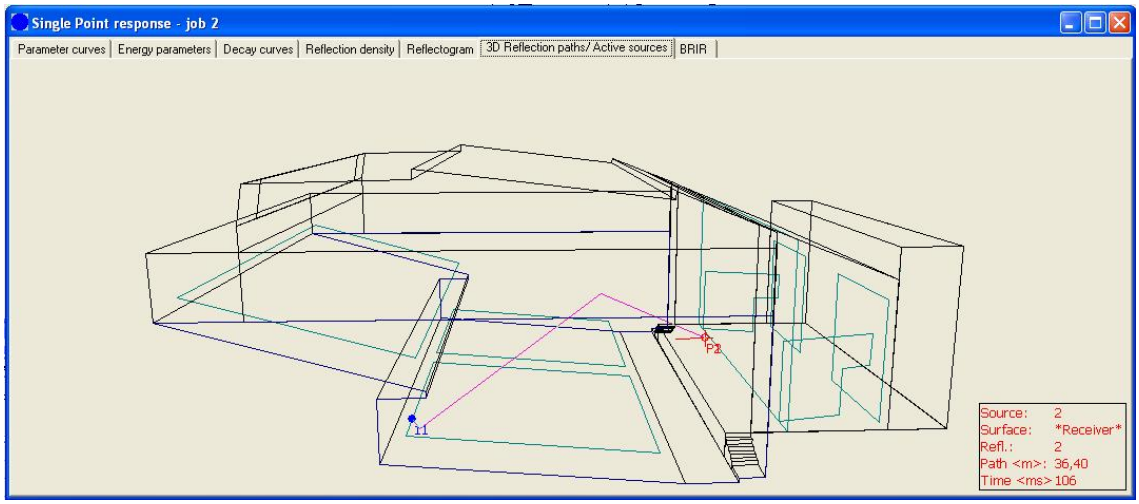


Figura 143. Recorrido del rayo que previsiblemente provoque eco en el Punto 17 en Opción II

C. RESULTADOS RESPUESTA EN REJILLA

Al objeto de seguir con el mismo elemento de comparación que la simulación anterior se expone el resultado del índice de inteligibilidad o RASTI (STI) en la siguiente figura.

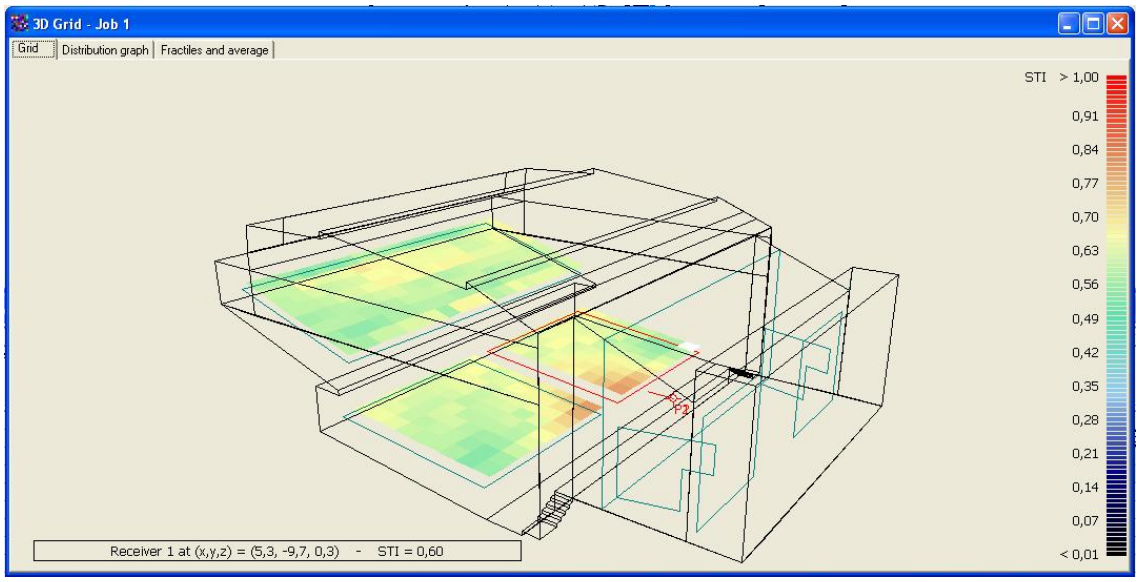


Figura 144. Visualización de rejilla de parámetro STI en Opción II.

Como puede observarse en la figura, los colores claros corresponden a valores mayores de STI frente a los colores oscuros (simulación anterior), obteniendo un promedio de STI de 0,64, muy aceptable para el uso al que se destinará el edificio de referencia.

03.05.02.03. OPCIÓN III – KE25-NE25 AGLOMERADO CON FETADIT

A. RESULTADOS EN RESPUESTA MÚLTIPLE

TIEMPO DE REVERBERACIÓN: En este tercer y último caso, se introduce una importante superficie con un coeficiente de absorción muy elevado (promedio de 0,682 según los resultados experimentales en el tubo de impedancia). Ello se traduce en una excesiva disminución del parámetro del tiempo de reverberación, bajando de los límites establecidos dentro de los parámetros de calidad de la sala. A partir de los valores de T_{30} se obtiene un valor de RT_{mid} (medido) de **0,81 s**.

EARLY DECAY TIME (EDT): Reducimos la viveza de la sala y la “apagamos” aún más al aumentar el coeficiente de absorción de gran parte de la superficie. Para nuestra simulación obtenemos valores no nulos superiores a los obtenidos en el apartado anterior, con EDT_{mid} de **0,68 s**.

CLARIDAD MUSICAL (C_{80}): Igualmente aumenta respecto de la inicial teniendo unos valores muy aceptables de C_{80} de **7,87 dB**.

DEFINICIÓN (D_{50}): Al igual que el caso anterior aumenta respecto de la inicial teniendo unos valores muy aceptables de D_{50} de **0,75** (adimensional).

EFICIENCIA LATERAL (LF_{80}): Empeora notablemente, alejándonos aún más de los parámetros de calidad obteniendo un resultado de LF_{80} del **16,00 %.**

INDICE DE TRANSMISIÓN DEL HABLA (STI): Para nuestro modelo obtenemos el mejor de los valores con un STI de **0,66** (adimensional).

De forma resumida, podemos agrupar todos los valores anteriores para esta opción de simulación en la siguiente tabla:

Tabla 149. Valores obtenidos en respuesta múltiple OPCIÓN III

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000		
SIMULACIÓN OPCIÓN III - 25% KENAF + 75% NEUMÁTICO AGLOMERADO CON FETADIT								
T30(s)	1,54	1,1	0,87	0,74	0,73	0,63	RTmid	0,81
							BR	1,64
							Br	0,84
EDT (s)	1,31	0,87	0,68	0,68	0,66	0,59	EDT_{mid}	0,68
C80(dB)	4,1	6,4	7,6	7,4	8,6	9,3	C80 "music average"	7,87
D50	0,59	0,7	0,75	0,74	0,79	0,8	D50	0,75
LF	0,22	0,158	0,125	0,134	0,12	0,123	LF_{E4}	0,16
G							G_{mid}	0,00
							STI	0,66

B. RESULTADOS EN RESPUESTA PUNTUAL

En este último caso se minora aún más la energía que incide en las paredes laterales causantes de los descritos “ecos flotantes”, por lo que los efectos de éstos disminuyen considerablemente, eliminando casi toda posibilidad de la aparición de este fenómeno.

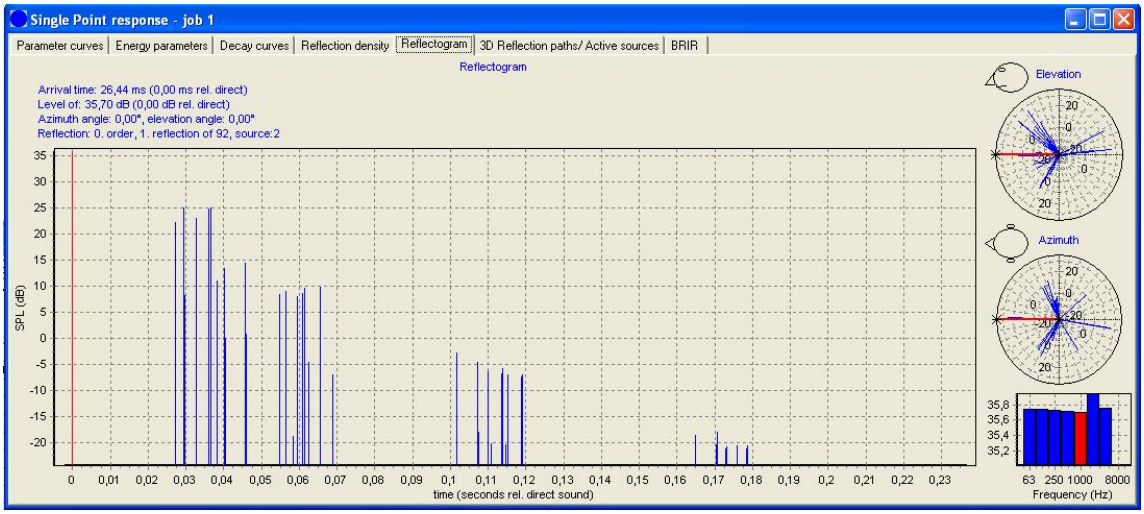


Figura 145. Reflectograma de Punto 6 en Opción III

En el reflectograma anterior se puede observar cómo los niveles de presión acústica susceptibles de producir ecos indeseables al espectador bajan considerablemente al aumentar la absorción acústica de la sala, localizándose las primeras reflexiones a una distancia del sonido directo suficiente para que no se produzca este indeseable fenómeno.

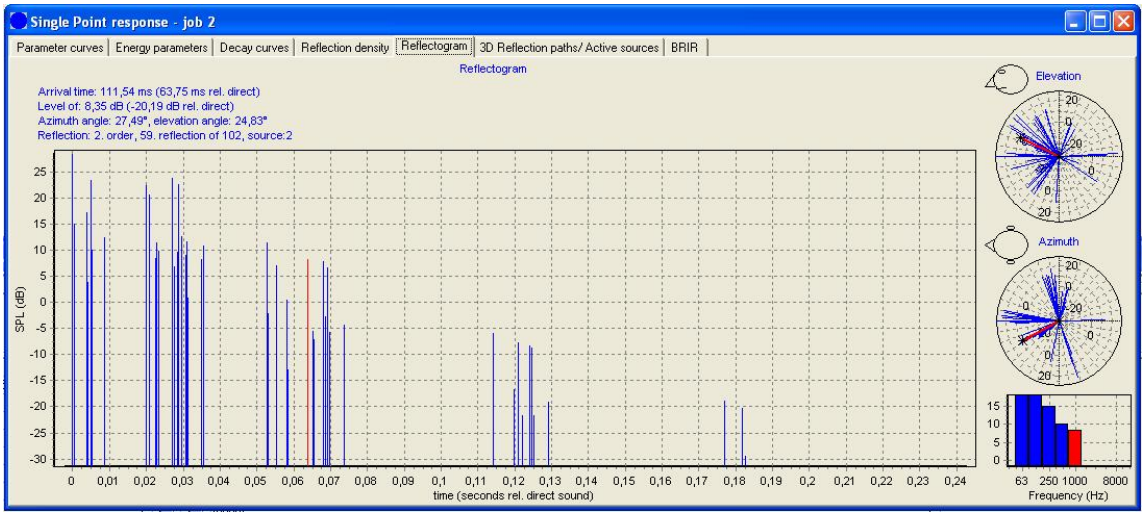


Figura 146. Reflectograma de Punto 11 en Opción III

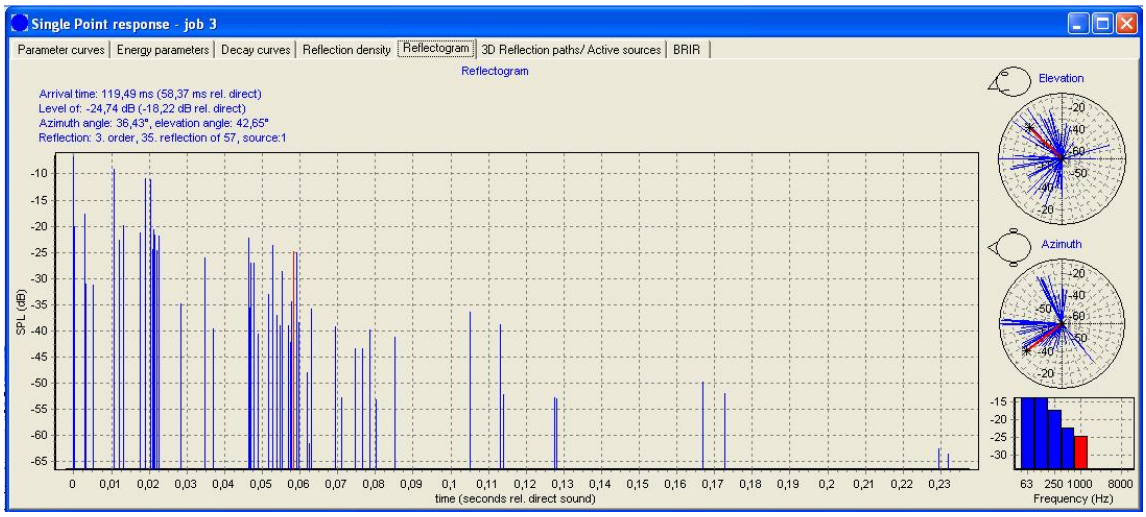


Figura 147. Reflectograma de Punto 17 en Opción III

C. RESULTADOS RESPUESTA EN REJILLA

Al igual que ocurriera en el caso anterior, los colores claros corresponden a valores mayores de STI frente a los colores oscuros), obteniendo un promedio de STI de 0,66, muy aceptable para el uso al que se destinará el edificio de referencia.

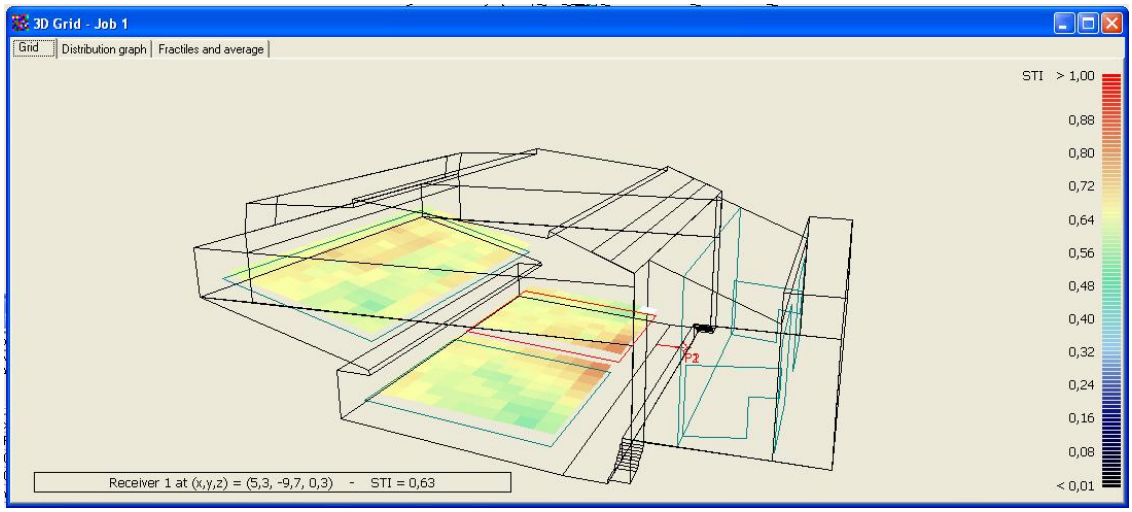


Figura 148. Visualización de rejilla de parámetro STI en Opción III.

03.05.02.04. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS Y FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Si exponemos de forma conjunta los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones, observamos que, a medida que aumentamos el coeficiente de absorción acústica de los materiales de los paramentos laterales causantes del "eco flotante", se modifican sustancialmente los parámetros acústicos de la sala. Si comparamos con los tramos de valores óptimos para un uso destinado a la palabra, el resultado es el que se ofrece en la siguiente tabla:

Palabra		***Simulaciones FEVAL***		
		I	***II***	***III***
Tiempo de reverberación	$0,88 < RT_{mid} < 1,34$ s	**1,51**	0,89	**0,81**
Calidez	$0,9 < BR < 1,3$	1,11	**1,54**	**1,64**
Brillo	$Br > 0,8$	0,92	0,92	0,84
EDT	$0,6 \times RT_{mid} < EDT_{mid} < 0,75 \times RT_{mid}$	1,09	**0,77**	**0,68**
Claridad	$C_{80} > 6$ dB	**4,70**	6,70	7,87
Definición	$D > 0,6$	**0,60**	0,70	0,75
Eficiencia lateral	$LF > 20$ %	23,00%	**19,00%**	16,00%
Inteligibilidad	$STI > 0,6$	**0,60**	0,64	0,66

Tabla 150. Resumen de los resultados

Tal y como puede observarse, el tiempo de reverberación decae considerablemente de la solución inicial a la última de las simulaciones, obteniendo un valor adecuado para una mezcla de 50% kenaf + 50% neumático aglomerado con cola. Tanto la

calidez como el brillo dependen del parámetro anterior. Es por ello que este factor se penaliza para aquellas salas más apagadas como consecuencia de la introducción de materiales más absorbentes que limitan el peligro de ecos como consecuencia del diseño de la sala.

El EDT se reduce conforme aumentamos la absorción de los materiales de la sala como consecuencia de la pérdida de energía que llega a los oyentes al aumentar los materiales con coeficientes de absorción elevados.

El resto de parámetros, salvo la eficiencia lateral por el hecho de haber actuado en concreto sobre los materiales de los paramentos laterales para evitar los ecos existentes, adquieren valores óptimos frente a la solución principal, destacando sin lugar a duda la inteligibilidad de la palabra y la definición, que adoptan valores muy buenos para el uso que se persigue en el supuesto simulado.

En resumen, la disposición de los materiales ensayados contribuye al aumento de la inteligibilidad de la palabra, la definición y la claridad. El tiempo de reverberación depende intrínsecamente del coeficiente de absorción de los materiales utilizados en los revestimientos de la sala, por lo que la absorción de éstos debe estar supeditada al uso que se pretenda realizar. Un aumento en exceso del coeficiente de absorción de la sala puede dar lugar a una disminución considerable, por debajo de los parámetros de calidad del tiempo de reverberación y con ello no cumplir los parámetros de brillo y calidez.

Pero para valorar adecuadamente los resultados de la simulación necesitamos conocer la evaluación del factor de mérito global de la sala, que tal y como se ha definido en apartados anteriores se obtiene realizando la media aritmética de todos los factores de mérito que se hayan escogido en cada caso para evaluar la sala.

Esta valoración la podemos realizar de dos formas. La primera de ellas es simplista, y nos indica qué porcentaje de los parámetros de calidad se cumplen en la sala que estamos estudiando.

Tabla 151. Factor de Mérito Global simplificado.

Palabra		***Simulaciones FEVAL***		
		I	***II***	***III***
Tiempo de reverberación	*0,88 < RT_{mid} < 1,34 s*	**0,00**	1,00	**0,00**
Calidez	*0,9 < BR < 1,3*	1,00	**0,00**	**0,00**
Brillo	*Br > 0,8*	1,00	1,00	1,00
EDT	*0,6 x RT_{mid} < EDT_{mid} < 0,75 x RT_{mid}*	1,00	**0,00**	**0,00**
Claridad	*C_{80} > 6 dB*	**0,00**	1,00	1,00
Definición	*D > 0,6*	**0,00**	1,00	1,00
Eficiencia lateral	*LF > 20 %*	1,00	**0,00**	1,00
Inteligibilidad	*STI > 0,6*	**0,00**	1,00	1,00
Reflexiones y ecos		**0,00**	0,40	1,00
	TOTAL FM = Σ FM / n	0,444	0,600	0,667

No obstante Arau H. [14] indica que debemos comparar el valor de FM_{GLOBAL} en relación a los $FM_{mínimos}$ que se hayan obtenido con alguno de los criterios considerados.

Tabla 152. Factor de Mérito Global Detallado

Palabra		***Simulaciones FEVAL***			***Desviaciones***		
		I	***II***	***III***	***I***	***II***	***III***
Tiempo de reverberación	*0,88 < RT_{mid} < 1,34 s*	**1,51**	0,89	**0,81**	**0,17**	0,00	**0,07**
Calidez	*0,9 < BR < 1,3*	1,11	**1,54**	**1,64**	0,00	**0,24**	**0,34**
Brillo	*Br > 0,8*	0,92	0,92	0,84	0,00	0,00	0,00
EDT	*0,6 x RT_{mid} < EDT_{mid} < 0,75 x RT_{mid}*	1,09	**0,77**	**0,68**	0,00	**0,10**	**0,07**
Claridad	*C_{80} > 6 dB*	**4,70**	6,70	7,87	**1,30**	0,00	0,00
Definición	*D > 0,6*	**0,60**	0,70	0,75	**0,00**	0,00	0,00
Eficiencia lateral	*LF > 20 %*	23,00%	**19,00%**	16,00%	0,00	**1,00**	0,00
Inteligibilidad	*STI > 0,6*	**0,60**	0,64	0,66	**0,00**	0,00	0,00
Medida del Factor de Mérito Total en comparación con los $Fm_{minimos}$					1,470	1,343	0,483

Tal y como puede observarse, de forma detallada la propuesta que mejor resultado obtiene es la realizada con materiales en las paredes compuesto por un 75% de kenaf y un 25% de neumático aglomerado con fetadit dado que es la que presenta una menor desviación de los parámetros medidos en la simulación de la sala, a pesar de que de forma simplificada aparentemente la mezcla compuesta por 50% kenaf y 50% de neumático aglomerado con cola es la que mejor resultado global obtendría.

03.06. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO III

1. Rosin, P. & Ramler, E. *J. Inst. Fuel*. 29–33 (1933).

2. Shumann, J. *Trans. AIME*. 1189 (Tech. Publ.: 1940).

3. Gregg, S. J. & Sing, K. S. W. *Adsorption, Surface Area and Porosity*. (Academia Press: London, 1982).

4. Brunauer, S., Deming, L. S., Deming., W. E. & Teller, E. *J. Am. Chem. Soc. 62*. 1723 (1940).

5. Horváth G. & Kawazoe, K. Method for the calculation of effective por size distribution in molecular sieve carbon. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 16, 470–475 (1983).

6. Horvath, G. Energetic interactions in phase and molecular level pore characterisation in nano-range. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 141, 295–304 (1998).

7. Evans, R., Marconi, U. M. B. & Tarazona, P. Fluids in narrow pores: Adsorption, capillary condensation, and critical points. *The Journal of Chemical Physics* 84, 2376–2399 (1986).

8. Robert Hooke *Micrographia*. (Council of the ROYAL SOCIETY: London, 1665).

9. Harris, C. M. & Tocci, G. C. Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control, 3rd edition. *The Journal of the Acoustical Society of America* 93, 3532 (1993).

10. Müller, G. & Möser, M. *Taschenbuch der Technischen Akustik*. (Springer: 1994).

11. Sabine, W. C. *Collected papers on acoustics*. (Cambridge: Harvard University Press: 1922).

12. Sabine, W. W. *Architectural acoustics. The American Architect Building News - Vol. 62*. 71–73 (1898).

13. Eyring, C. F. Reverberation time in “dead” rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1, 217–241 (1930).

14. Arau, H. *ABC de la acústica arquitectónica*. (Grupo Editorial CEAC: Barcelona, 1999).

15. Arau, H. An improved reverberation formula. *Acustica* 65, 163 (1988).

CAPÍTULO VI - CONCLUSIÓN

04.01. CONCLUSIÓN 389

04.01. CONCLUSIÓN

En el apartado 01.03. del presente trabajo se exponían una serie de objetivos que se pretendían alcanzar con la realización de todo el proceso experimental descrito. Tras la obtención de todos los resultados y una vez analizados los mismos se pueden establecer las siguientes conclusiones:

a. En la caracterización granulométrica de los materiales de partida el modelo que mejor ajusta los datos experimentales obtenidos es el modelo de Rosin-Ramler. Con el empleo de este modelo podemos obtener las curvas de distribución representativas de cada material. Se ha determinado también cuál es la fracción granulométrica más representativa estando ésta comprendida entre los tamaños de partícula de 2,00 y 4,50 mm.

b. De la caracterización textural realizada se deduce que el kenaf es el material con un mayor volumen de poros, seguido del corcho y por último neumático. Gracias a la porosimetría de mercurio hemos podido constatar que, de los tres materiales, el corcho es el que mayor volumen de macroporos (> 50 nm) tiene. Con la isoterma de adsorción de N_2 a -196ºC se ha demostrado que el kenaf es el material de partida con un mayor volumen tanto de microporos (< 2 nm) como de mesoporos. Por último, en todas las técnicas de caracterización textural se ha constatado la escasa porosidad del neumático.

c. La caracterización textural realizada ha sido corroborada por las microscopías electrónicas de barrido practicadas en los materiales de partida, en los que se observa la porosidad de corcho y kenaf, y la escasa o casi nula del neumático.

d. Se han elaborado muestras aglomeradas con la combinación de neumático, corcho y kenaf como materiales de partida en diferentes proporciones. Para ello se han utilizado diferentes ligantes, cuya cantidad se ha determinado en función del tamaño de partícula de la materia prima y de la resistencia mecánica la cual también se ha ensayado.

e. Sobre las muestras aglomeradas se han practicado microscopías ópticas en las que se observaba la formación de poros intergranulares de mayor

dimensión conforme mayores eran los tamaños de partícula empleados en su elaboración.

f. Se han caracterizado acústicamente todas las muestras aglomeradas conforme a la norma UNE EN-ISO 10534-2. En general, y para todos los materiales ligantes utilizados, los mayores NRC obtenidos corresponden a las mezclas de neumático y kenaf. La causa de estos resultados para esta combinación de materiales se justifica por la conjunción de las propiedades porosas del kenaf combinadas con la formación de porosidad intergranular gracias al neumático.

g. En general se observa el buen comportamiento del kenaf en la absorción acústica en el rango de las medias y altas frecuencias. Este comportamiento solo se ve limitado con el empleo de algunos ligantes que posiblemente ocluyan parte de los microporos característico de este material.

h. En todas las muestras, con diferentes aglomerantes, se observa una curva de coeficientes de absorción del corcho caracterizada por un pico en el rango de las bajas frecuencias, con discretos valores en el rango de las altas y medias frecuencias.

i. El neumático, en general, presenta siempre un mejor comportamiento mezclado con otros materiales que aglomerado solo, debido a la poca porosidad con la que cuenta este material. El mecanismo de disipación de energía acústica de este material tiene su origen en la formación de poros intergranulares.

j. En general, la escayola como material ligante aporta unos valores muy inferiores de los niveles NRC debido a que la estructura rígida que se forma bloquea una gran cantidad de poros, tanto de los materiales de partida como intersticiales entre las diferentes partículas del material aglomerado.

k. El fetadit es uno de los ligantes, junto con el poliuretano, que menor incidencia tienen en la porosidad tanto de los materiales como interpartícula de las muestras aglomeradas. Los resultados obtenidos, en general, son superiores al

del resto de materiales ligantes para una misma combinación de materiales dada.

l. Tanto lignina-sulfonada como lignina-álcali solo funcionan de forma estable con aquellas muestras que contienen una cierta cantidad de corcho en su composición. Se obtienen para dichas muestras, no obstante, valores medios-altos de los NRC en comparación con otros ligantes.

m. La simulación en un caso real realizada con los valores de los NRC obtenidos sugiere que es posible la fabricación y empleo de materiales resultantes de residuos del corcho, neumático y kenaf como elementos de revestimiento y acondicionamiento acústico de salas con el objeto de obtener unos adecuados parámetros acústicos en función del uso al que se destine (la palabra, la música o mixto).

n. El amplio abanico de coeficientes de absorción acústica obtenido para las muestras ensayadas permite obtener una importante variedad de materiales que se adapten a los requerimientos que, en función del diseño de la sala, se requiera. De esta forma, en vez de adaptar la geometría, sería posible fabricar materiales a la carta en función de los parámetros acústicos que se deseen, sin necesidad de la modificación del diseño de la sala.

o. Los materiales obtenidos con mayores coeficientes de absorción acústica contribuyen a mejorar la inteligibilidad de la palabra así como la definición y la claridad. A la vez, estos materiales contribuyen a controlar los valores del tiempo de reveberación, elevados para salas con materiales excesivamente reflexivos (coeficientes de absorción bajos) obteniendo valores más adecuados entre los parámetros de calidad.

p. Como consecuencia de la textura de estos materiales, así como su coeficiente de absorción, es posible tratar fenómenos de ecos en respuesta puntual de una sala gracias a la incorporación de los mismos en zonas puntuales lo cual contribuye a mejorar la calidad acústica de la sala.

ANEXO I - TABLAS

Tablas		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
1	Normativa relacionada con los NFU	01.01.01.
2	Objetivos cuantitativos en % extraídos del PNNFU 2008-2015	01.01.01.
3	Tratamiento de NFU 2010 SIGNUS	01.01.01.
4	Tratamiento de NFU 2010 TNU	01.01.01.
5	Composición media de los neumáticos usados en la UE (en %)	01.01.01.
6	Composición química elemental de un NFU	01.01.01.
7	Resumen de las tecnologías empleadas para la valorización material y energética de los NFU. CIMTAN	01.01.01.
8	Distribución Geográfica del Alcornocal	01.01.02.
9	Distribución Geográfica del Alcornocal por CCAA en España	01.01.02.
10	Serie histórica 2007-2012 de producción industrial de corcho en España	01.01.02.
11	Serie histórica 2006-2002 de producción industrial de corcho en España	01.01.02.
12	Serie histórica 2011-2007 de producción industrial de corcho en España	01.01.02.
13	Serie histórica 2006-2002 de producción industrial de corcho en España	01.01.02.
14	Promedio en miles de € e importancia relativa de producción industrial de corcho en España	01.01.02.
15	Densidad y conductividad térmica a 20-25 °C del aislante de corcho	01.01.02.
16	Propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales	01.01.03.
17	Composición química de las fibras naturales	01.01.03.
18	Producción mundial de kenaf	01.01.03.
19	Comparativa conductividad térmica de materiales aislantes	01.01.03.
20	Rango de frecuencias de interés en edificación	01.02.01.
21	Clases de absorción acústica	01.02.01.
22	Características técnicas COLA BLANCA	02.01.04.02
23	Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción según UNE-EN 13279-1	02.01.05.02
24	Características técnicas ESCAYOLA	02.01.05.02
25	Características técnicas FETADIT	02.01.06.02.
26	Características técnicas GOMA LACA	02.01.07.02.
27	Características técnicas LIGNINAS	02.01.08.02.
28	Características técnicas TEROKAL	02.01.09.02.
29	Características físicas y químicas ADHESIVO POLIURETANO	02.01.10.02
30	Características mecánicas ADHESIVO POLIURETANO	02.01.10.02
31	Métodos de caracterización textural de sólidos porosos	02.02.01.02.
32	Designación de las muestras en función de las proporciones del material de partida	02.02.02.02.
33	Designación y dosificación de los diferentes aglomerantes empleados	02.02.02.02.
34	Dimensiones de los moldes de acero inoxidables empleados en la fabricación de probetas	02.02.02.02
35	Porosidades típicas de algunos materiales	02.02.02.02
36	Coeficiente para el cálculo del factor de corrección viscosa	02.02.03.02.06.
37	Coeficientes para algunos de los distintos modelos matemáticos	02.02.03.03.08.
38	Escala de inteligibilidad según índice de transmisión del habla STI	02.02.04.02.04.
39	Tiempo de reverberación T en salas de concierto según tipo de música	02.02.04.03.

Tablas		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
40	Intervalos óptimos de C80 según uso de la sala	02.02.04.03.
41	Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra NFU	03.01.01.
42	Ajuste modelo RR para muestra NFU	03.01.01.
43	Ajuste modelo GGS para muestra NFU	03.01.01.
44	Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra CORCHO	03.01.02.
45	Ajuste modelo RR para muestra CORCHO	03.01.02.
46	Ajuste modelo GGS para muestra CORCHO	03.01.02.
47	Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra KENAF	03.01.03.
48	Ajuste modelo RR para muestra KENAF	03.01.03.
49	Ajuste modelo GGS para muestra KENAF	03.01.03.
50	Intervalos granulométricos seleccionados	03.01.04.
51	Resultados isotermas de adsorción de N2	03.02.01.
52	Resultados porosimetrias de mercurio	03.02.02.
53	Densidades por desplazamiento de helio y mercurio	03.02.03.
54	Resumen porosidad de de lo diferentes materiales	03.02.04.
55	Porcentaje óptimo de aglomerante COLA para las distintas muestras.	03.03.01.
56	Cantidad de aglomerante utilizado I	03.01.02.
57	Cantidad de aglomerante utilizado II	03.01.02.
58	Condiciones de trabajo de la caracterización acústica	03.04.01.
59	NRC CO100 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
60	NRC CO75-KE25 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
61	NRC CO50-KE50 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
62	NRC CO25-KE75 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
63	NRC KE100 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
64	NRC KE75-NE25 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
65	NRC KE50-NE50 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
66	NRC KE25-NE75 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
67	NRC NE100 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
68	NRC CO25-NE75 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
69	NRC CO50-NE50 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
70	NRC CO75-NE25 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
71	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con COLA	03.04.02.01.
72	NRC CO100 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
73	NRC CO75-KE25 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
74	NRC CO50-KE50 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
75	NRC CO25-KE75 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
76	NRC KE100 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
77	NRC KE75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
78	NRC KE50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
79	NRC KE25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
80	NRC NE100 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
81	NRC CO25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
82	NRC CO50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
83	NRC CO75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
84	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con ESCAYOLA	03.04.02.02.

Tablas		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
85	NRC CO100 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
86	NRC CO75-KE25 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
87	NRC CO50-KE50 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
88	NRC CO25-KE75 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
89	NRC KE100 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
90	NRC KE75-NE25 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
91	NRC KE50-NE50 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
92	NRC K25-NE75 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
93	NRC NE100 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
94	NRC CO25-NE75 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
95	NRC CO50-NE50 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
96	NRC CO75-NE25 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
97	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con FETADIT	03.04.02.03.
98	NRC CO100 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
99	NRC CO75-KE25 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
100	NRC CO50-KE50 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
101	NRC CO25-KE75 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
102	NRC KE100 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
103	NRC KE75-NE25 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
104	NRC KE50-NE50 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
105	NRC K25-NE75 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
106	NRC NE100 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
107	NRC CO25-NE75 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
108	NRC CO50-NE50 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
109	NRC CO75-NE25 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
110	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con GOMA-LACA	03.04.02.04.
111	NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-ALCALI	03.04.02.05.
112	NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-ALCALI	03.04.02.05.
113	NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI	03.04.02.05.
114	NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI	03.04.02.05.
115	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-ÁLCALI	03.04.02.05.
116	NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
117	NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
118	NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
119	NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
120	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
121	NRC CO100 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
122	NRC CO75-KE25 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
123	NRC CO50-KE50 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
124	NRC CO25-KE75 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
125	NRC KE100 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
126	NRC KE75-NE25 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
127	NRC KE50-NE50 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
128	NRC KE25-NE75 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
129	NRC NE100 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.

Tablas		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
130	NRC CO25-NE75 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
131	NRC CO50-NE50 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
132	NRC CO75-NE25 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
133	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con POLIURETANO	03.04.02.07.
134	NRC CO100 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
135	NRC CO75-KE25 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
136	NRC CO50-KE50 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
137	NRC CO25-KE75 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
138	NRC KE100 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
139	NRC KE75-NE25 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
140	NRC KE50-NE50 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
141	NRC KE25-NE75 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
142	NRC NE100 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
143	NRC CO25-NE75 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
144	NRC CO50-NE50 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
145	NRC CO75-NE25 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
146	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con TEROKAL	03.04.02.08.
147	Valores obtenidos en respuesta múltiple OPCIÓN I	03.05.02.01.
148	Valores obtenidos en respuesta múltiple OPCIÓN II	03.05.02.02.
149	Valores obtenidos en respuesta múltiple OPCIÓN III	03.05.02.03.
150	Resumen de los resultados	03.05.02.04.
151	Factor de Mérito Global simplificado	03.05.02.04.
152	Factor de Mérito Global Detallado	03.05.02.04.

ANEXO II - FIGURAS

Figuras		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
1	Valores de diversidad genotípica Quecus (Jimenez 2000)	01.01.02.
2	Gráfica producción en toneladas corcho 1979-2002	01.01.02.
3	Gráfica producción en millones de € corcho 1979-2002	01.01.02.
4	Gráfica producción en toneladas y millones de € corcho 2011-2002	01.01.02.
5	Gráfica rendimiento €/tonelada de corcho	01.01.02.
6	Clasificación de las fibras naturales	01.01.03.
7	Tipos de los principales materiales y sistemas absorbentes	01.02.01.
8	Ejemplo y esquema de resonador tipo Helmholtz	01.02.01.
9	Curvas de referencia según ISO 11654	01.02.01.
10	Clasificación de los yesos según UNE-EN 13279-1	02.01.05.01
11	Configuración grupo URETANO	02.01.10.01.
12	Características de los macroporos, mesoporos y microporos	02.02.01.02.03.
13	Representación esquemática de los seis tipos de isotermas de adsorción.	02.02.01.02.05.01.
14	Montaje Scott para determinación de constante de propagación	02.02.03.02.01.03.
15	Montaje Ingar y Dear para la medida de la resistencia al flujo	02.02.03.02.01.03.
16	Montaje Ren y Jacobsen en tubo de impedancia	02.02.03.02.01.03.
17	Montaje según UNE ISO 10534-2	02.02.03.02.01.04.
18	Ecograma	02.02.04.02.02.
19	Diseño de techo equipotencial	02.02.04.02.02.
20	Comparación EDT y RT	02.02.04.03
21	Representación ITDG en un ecograma	02.02.04.03
22	Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra NFU	03.01.01.
23	Ajuste de los datos experimentales modelo RR para muestra NFU	03.01.01.
24	Ajuste de los datos experimentales modelo GGS para muestra NFU	03.01.01.
25	Función de distribución frente a tamaño de partícula modelo RR para muestra NFU	03.01.01.
26	Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra CORCHO	03.01.02.
27	Ajuste de los datos experimentales modelo RR para muestra CORCHO	03.01.02.
28	Ajuste de los datos experimentales modelo GGS para muestra CORCHO	03.01.02.
29	Función de distribución frente a tamaño de partícula modelo RR para muestra CORCHO	03.01.02.
30	Análisis de la distribución del tamaño de partícula muestra KENAF	03.01.03.
31	Ajuste de los datos experimentales modelo RR para muestra KENAF	03.01.03.
32	Ajuste de los datos experimentales modelo GGS para muestra KENAF	03.01.03.
33	Función de distribución frente a tamaño de partícula modelo RR para muestra KENAF	03.01.03.
34	Función de densidad según el modelo RR para la muestra de NFU	03.01.04.
35	Función de densidad según el modelo RR para la muestra de CORCHO	03.01.04.

Figuras		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
36	Función de densidad según el modelo RR para la muestra de KENAF	03.01.04.
37	Resultados isotermas de adsorción de N2 a -196ºC	03.02.01.
38	Distribución de tamaño de poros por aplicación del método DFT	03.02.01.
39	Resultados porosimetrias de mercurio	03.02.02.
40	Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano de	03.03.01.
41	Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano entre 2-4.5 mm frente al porcentaje de COLA.	03.03.01.
42	Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano de >4.5 mm frente al porcentaje de COLA.	03.03.01.
43	Variación de la resistencia del material con el tamaño de partícula para un porcentaje de poliuretano del 9% y transformado a 100 ºC y presión constante.	03.03.01.
44	Variación de la resistencia a la rotura para un tamaño de grano de 0.25 mm variando el porcentaje de poliuretano prensado a 100º C.	03.03.01.
45	NRC CO100 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
46	NRC CO75-KE25 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
47	NRC CO50-KE50 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
48	NRC CO25-KE75 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
49	NRC KE100 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
50	NRC KE75-NE25 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
51	NRC KE50-NE50 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
52	NRC KE25-NE75 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
53	NRC NE100 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
54	NRC CO25-NE75 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
55	NRC CO50-NE50 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
56	NRC CO75-NE25 aglomerado con COLA	03.04.02.01.
57	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con COLA	03.04.02.01.
58	NRC CO100 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
59	NRC CO75-KE25 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
60	NRC CO50-KE50 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
61	NRC CO25-KE75 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
62	NRC KE100 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
63	NRC KE75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
64	NRC KE50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
65	NRC KE25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
66	NRC NE100 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
67	NRC CO25-NE75 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
68	NRC CO50-NE50 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
69	NRC CO75-NE25 aglomerado con ESCAYOLA	03.04.02.02.
70	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con ESCAYOLA	03.04.02.02.
71	NRC CO100 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
72	NRC CO75-KE25 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
73	NRC CO50-KE50 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
74	NRC CO25-KE75 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
75	NRC KE100 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
76	NRC KE75-NE25 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.

Figuras		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
77	NRC KE50-NE50 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
78	NRC K25-NE75 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
79	NRC NE100 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
80	NRC CO25-NE75 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
81	NRC CO50-NE50 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
82	NRC CO75-NE25 aglomerado con FETADIT	03.04.02.03.
83	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con FETADIT	03.04.02.03.
84	NRC CO100 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
85	NRC CO75-KE25 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
86	NRC CO50-KE50 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
87	NRC CO25-KE75 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
88	NRC KE100 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
89	NRC KE75-NE25 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
90	NRC KE50-NE50 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
91	NRC K25-NE75 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
92	NRC NE100 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
93	NRC CO25-NE75 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
94	NRC CO50-NE50 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
95	NRC CO75-NE25 aglomerado con GOMA-LACA	03.04.02.04.
96	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con GOMA-LACA	03.04.02.04.
97	NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-ALCALI	03.04.02.05.
98	NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-ALCALI	03.04.02.05.
99	NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI	03.04.02.05.
100	NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-ÁLCALI	03.04.02.05.
101	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-ÁLCALI	03.04.02.05.
102	NRC CO100 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
103	NRC CO75-KE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
104	NRC CO50-KE50 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
105	NRC CO75-NE25 aglomerado con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
106	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con LIGNINA-SULFONADA	03.04.02.06.
107	NRC CO100 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
108	NRC CO75-KE25 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
109	NRC CO50-KE50 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
110	NRC CO25-KE75 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
111	NRC KE100 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
112	NRC KE75-NE25 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
113	NRC KE50-NE50 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
114	NRC KE25-NE75 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
115	NRC NE100 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
116	NRC CO25-NE75 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
117	NRC CO50-NE50 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
118	NRC CO75-NE25 aglomerado con POLIURETANO	03.04.02.07.
119	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con POLIURETANO	03.04.02.07.

Figuras		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
120	NRC CO100 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
121	NRC CO75-KE25 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
122	NRC CO50-KE50 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
123	NRC CO25-KE75 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
124	NRC KE100 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
125	NRC KE75-NE25 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
126	NRC KE50-NE50 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
127	NRC KE25-NE75 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
128	NRC NE100 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
129	NRC CO25-NE75 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
130	NRC CO50-NE50 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
131	NRC CO75-NE25 aglomerado con TEROKAL	03.04.02.08.
132	Resumen resultados NRC muestras aglomeradas con TEROKAL	03.04.02.08.
133	Consideración de curvas NC	03.05.01.
134	Configuración inicial de auditorio FEVAL	03.05.01.
135	Paramentos modificados en opción II y III	03.05.01.02.
136	Asignación de materiales elaborados	03.05.01.03.
137	Reflectograma de Punto 11 en Opción I	03.05.02.01.
138	Reflectograma de Punto 17 en Opción I	03.05.02.01.
139	Recorrido del rayo que previsiblemente provoque eco en el Punto 17 en Opción I	03.05.02.01.
140	Visualización de rejilla de parámetro STI en Opción I	03.05.02.01.
141	Reflectograma de Punto 6 en Opción II	03.05.02.02.
142	Reflectograma de Punto 11 en Opción II	03.05.02.02.
143	Recorrido del rayo que previsiblemente provoque eco en el Punto 17 en Opción II	03.05.02.02.
144	Visualización de rejilla de parámetro STI en Opción II	03.05.02.02.
145	Reflectograma de Punto 6 en Opción III	03.05.02.03.
146	Reflectograma de Punto 11 en Opción III	03.05.02.03.
147	Reflectograma de Punto 17 en Opción III	03.05.02.03.
148	Visualización de rejilla de parámetro STI en Opción III.	03.05.02.03.

ANEXO III - FOTOGRAFÍAS

Fotografías		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
1	"Tsunami Negro" – García Gálvez 2011 Fotografía tomada en Seseña (Castilla la Mancha), al fondo urbanización "El Quiñón", próxima a la vía R-4	01.01.01.
2	Pág. 31 publicación "El Corcho, patrimonio cultural y económico de Extremadura	01.01.02.
3	NFU tras molienda	02.01.01.02.
4	Fibra larga de kenaf	02.01.03.02.
5	Fibra corta de kenaf	02.01.03.02.
6	Agitadora CIA RP.08 y tamices conforme a UNE 7.050	02.02.01.01.
7	Microscopio electrónico de barrido	02.02.01.02.01.
8	Picnómetro	02.02.01.02.02.
9	Porosímetro	02.02.01.02.04.
10	Autosorb-1	02.02.01.02.05.
11	Molde para probeta de diámetro 99 mm	02.02.02.02.
12	Molde para probeta de diámetro 29 mm	02.02.02.02.
13	Probetas de 29 y 99 mm de diámetro de Ne50-Co50 aglomerada con poliuretano PO2	02.02.02.02.
14	Microscopio óptico Nikon EPIPHOT 300	02.02.03.01.
15	Hardware Pulse 3560C	02.02.03.04.
16	Pantalla de una aplicación de la plataforma pulse.	02.02.03.04.
17	Tubo de impedancia	02.02.03.04.
18	Muestras y tubo de impedancia utilizado	02.02.03.04.
19	Maqueta auditorio Vitoria	02.02.04.03.01.01.
20	Exterior de nuevo auditorio	02.02.04.05.
21	Muestra de kenaf tras proceso de triturado	03.01.03.
22	Imagen SEM del neumático	03.02.05.
23	Imagen SEM del corcho	03.02.05.
24	Imagen SEM del kenaf	03.02.05.
25	Shimadzu modelo AG-IS	03.03.01.
26	Probeta ensayo a tracción	03.03.01.
27	Aglomerado de neumático < 2,0 mm	03.01.03.
28	Aglomerado de neumático 2,0-4,5 mm	03.01.03.
29	Aglomerado de neumático > 4,5 mm	03.01.03.
30	Aglomerado de corcho < 2,0 mm	03.01.03.
31	Aglomerado de corcho 2,0-4,5 mm	03.01.03.
32	Aglomerado de corcho > 4,5 mm	03.01.03.
33	Aglomerado de kenaf < 2,0 mm	03.01.03.
34	Aglomerado de corcho y neumático 2,0-4,5 mm	03.01.03.
35	Probeta Co50-Ke50 aglomerada con fetadit	03.01.03.
36	Tubo de impedancia y muestras ensayadas I	03.04.01.
37	Tubo de impedancia y muestras ensayadas II	03.04.01.

ANEXO IV - EXPRESIONES

Expresiones		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
1	Frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz	01.02.01.
2	Frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz	01.02.01.
3	La frecuencia de resonancia en la que se produce un máximo de absorción de energía	01.02.01.
4	La frecuencia fundamental de resonancia resonadores de membrana	01.02.01.
5	La función de distribución de RR	02.02.01.01
6	Justificación línea recta de pendiente m si la distribución del tamaño de partícula se ajusta al modelo de RR (representación del logaritmo neperiano de la función de distribución frente al logaritmo neperiano del tamaño de partícula)	02.02.01.01
7	La función de densidad del modelo de RR	02.02.01.01
8	Función de distribución según modelo GGS	02.02.01.01
9	Justificación línea recta de pendiente m si la distribución del tamaño de partícula se ajusta al modelo de GGS (representación del logaritmo neperiano de F frente al logaritmo neperiano del tamaño de partícula)	02.02.01.01
10	La función de densidad del modelo GGS	02.02.01.01
11	La porosidad total (ε) de un sólido	02.02.01.02.03.
12	Volumen total de poros de cualquier sólido	02.02.01.02.03.
13	El volumen total de poros	02.02.01.02.03.
14	Relación entre el radio de poro (supuesto cilíndrico) y la presión	02.02.01.02.04
15	Relación entre el volumen de gas adsorbido con la presión relativa de equilibrio	02.02.01.02.05.02.
16	Superficie aparente o superficie BET (SBET)	02.02.01.02.05.02
17	Ecuación de Dubinin-Radushkevich	02.02.01.02.05.03.
18	Afinidad o el diferencial de energía libre de adsorción	02.02.01.02.05.03.
19	Ecuación de Dubinin-Radushkevich (ecuación de D-R)	02.02.01.02.05.03.
20	Ecuación de Dubinin-Radushkevich (ecuación de D-R) en forma logarítmica	02.02.01.02.05.03.
21	Valor del tamaño medio de los microporos	02.02.01.02.05.03.
22	Área superficial correspondiente a las paredes de los microporos	02.02.01.02.05.03.
23	Distribución de la porosidad del sólido método HK	02.02.01.02.05.05
24	Valor As para cálculo de distribución de la porosidad del sólido método HK	02.02.01.02.05.05
25	Valor Aa para cálculo de distribución de la porosidad del sólido método HK	02.02.01.02.05.05
26	Ecuación de una isoterma de adsorción generalizada (IAG)	02.02.01.02.05.06.
27	Superficie necesaria adhesivo (I)	02.02.02.01.
28	Superficie necesaria adhesivo (II)	02.02.02.01.
29	Impedancia Superficial según Champoux y Stinson	02.02.03.02.01.03.
30	Impedancia de entrada en cavidad posterior Champoux y Stinson	02.02.03.02.01.03.
31	Campo sonoro en tubo modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.
32	Velocidad en tubo modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.
33	Presiones sonoras en micrófonos 1 y 2 modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.

Expresiones		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
34	Factor de reflexión complejo modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.
35	Igualación de velocidades a ambos lados de la muestra modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.
36	Parámetros X e Y en modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.
37	Impedancia al flujo normalizada modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.
38	Impedancia al flujo en función de X, Y y r modelo Ren y Jacobsen	02.02.03.02.01.03.
39	Factor de reflexión complejo a partir de la función de transferencia	02.02.03.02.01.03.
40	Impedancia característica modelo Cummings y Beadle	02.02.03.02.01.03.
41	Constante de propagación modelo Cummings y Beadle	02.02.03.02.01.03.
42	Intervalo de frecuencia UNE-EN ISO 10534-2	02.02.03.02.01.04.
43	Frecuencia de trabajo más alta del tubo	02.02.03.02.01.04.
44	Absorción acústica según UNE-EN ISO 10534-2	02.02.03.02.01.04.
45	Coeficiente de reflexión a incidencia normal UNE-EN ISO 10534-2	02.02.03.02.01.04.
46	Impedancia acústica específica UNE-EN ISO 10534-2	02.02.03.02.01.04.
47	Coeficiente de absorción acústica difuso UNE-EN ISO 10534-2	02.02.03.02.01.04.
48	Coeficiente de absorción acústica α	02.02.03.02.01
49	Resistencia al flujo de aire	02.02.03.02.02.
50	Volumen total de poros interconectados del material	02.02.03.02.03.
51	Porosidad	02.02.03.02.03
52	Tortuosidad para el caso de poros simples con forma cilíndrica y todos ellos alineados en la misma dirección	02.02.03.02.04
53	Tortuosidad para de poros no cilíndricos	02.02.03.02.04
54	La longitud característica viscosa	02.02.03.02.04
55	La longitud característica viscosa para geometrías de poros simples	02.02.03.02.04
56	Longitud característica térmica Λ´	02.02.03.02.04
57	Aproximación longitud característica térmica Λ´	02.02.03.02.04
58	Cálculo del factor de corrección viscosa	02.02.03.02.06.
59	Distribución de tamaño de poro	02.02.03.02.06.
60	Coeficiente para el cálculo del factor de corrección viscosa	02.02.03.02.06.
61	Constante de propagación compleja	02.02.03.02.07.
62	Impedancia característica compleja	02.02.03.02.07.
63	Impedancia característica compleja modelo de Delany-Bazey	02.02.03.03.01.
64	Constante de propagación compleja modelo de Delany-Bazey	02.02.03.03.01.
65	Coeficiente de absorción a incidencia normal modelo de Delany-Bazey	02.02.03.03.01.
66	Ecuación correspondiente para la densidad compleja modelo HAC-W	02.02.03.03.02.
67	Compresibilidad compleja modelo HAC-W	02.02.03.03.02.
68	Impedancia característica compleja modelo Miki	02.02.03.03.03
69	Constante de propagación compleja modelo Miki	02.02.03.03.03
70	Impedancia característica compleja modelo Allard y Champoux	02.02.03.03.04.
71	Constante de propagación compleja modelo Allard y Champoux	02.02.03.03.04.
72	Densidad dinámica modelo Allard y Champoux	02.02.03.03.04.
73	Módulo de compresibilidad efectivo dinámico modelo Allard y Champoux	02.02.03.03.04.
74	Impedancia característica modelo Voronina 1	02.02.03.03.05.
75	Constante de propagación modelo Voronina 1	02.02.03.03.05.
76	Caracteristica estructural modelo Voronina 1	02.02.03.03.05.

Expresiones		
Ref.	**Descripción**	**Localización**
77	Expresión genérica impedancia característica	02.02.03.03.06.
78	Expresión genérica constante de propagación	02.02.03.03.06.
79	Valor R para cálculo de Z modelo Dunn y Davern	02.02.03.03.06.
80	Valor X para cálculo de Z modelo Dunn y Davern	02.02.03.03.06.
81	Valor alfa (parte real) de la constante propagación modelo Dunn y Davern	02.02.03.03.06.
82	Valor beta (parte imaginaria) de la constante propagación modelo Dunn y Davern	02.02.03.03.06.
83	Parte Real de la Impedancia característica	02.02.03.03.07.
84	Parte Imaginaria de la Impedancia característica	02.02.03.03.07.
85	Valor alfa (parte real) de la constante de propagación	02.02.03.03.07.
86	Valor beta (parte imaginaria) de la constante de propagación	02.02.03.03.07.
87	Impedancia característica en modelo integrado Garay y Pompoli	02.02.03.03.07.
88	Coeficiente de absorción acústica en modelo integrado Garay y Pompoli	02.02.03.03.07.
89	Parte Real de la Impedancia característica - expresión genérica	02.02.03.03.08.
90	Parte Imaginaria de la Impedancia característica - expresión genérica	02.02.03.03.08.
91	Valor alfa (parte real) de la constante de propagación genérica	02.02.03.03.08.
92	Valor beta (parte imaginaria) de la constante de propagación genérica	02.02.03.03.08.
93	Frecuencia normalizada para expresiones genéricas	02.02.03.03.08.
94	Tiempo de reverberación Sabine	02.02.04.02.01.
95	Tiempo de reverberacion Eyring	02.02.04.03.
96	Coeficiente de atenuación de energía sonora en el aire (Eyring)	02.02.04.03.
97	Tiempo de reverberación (Eyring para recintos pequeños)	02.02.04.03.
98	Tiempo de reverberación (Millington-Sette)	02.02.04.03.
99	Tiempo de reverberación (Higini Arau)	02.02.04.03.
100	Definición D50	02.02.04.03.
101	Claridad C80 y C50	02.02.04.03.
102	Tiempo Central (Center Time, Ts)	02.02.04.03.
103	Tiempo de Ascenso (Rise Time, Tr)	02.02.04.03.
104	Fracción de Energía Lateral (Lateral Energy Fraction, LEF' y LEF)	02.02.04.03.
105	Fracción de Energía Lateral - Jordan e Hidaka	02.02.04.03.
106	Calidez	02.02.04.03.
107	Brillo	02.02.04.03.
108	Factor de Mérito Global	02.02.04.03.
109	Función de distribución modelo RR para neumático	03.01.04.
110	Función de densidad modelo RR para neumático	03.01.04.
111	Función de distribución modelo RR para corcho	03.01.04.
112	Función de densidad modelo RR para corcho	03.01.04.
113	Función de distribución modelo RR para kenaf	03.01.04.
114	Función de densidad modelo RR para kenaf	03.01.04.