

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TEXTIL Y PAPELERA



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOI

**INVESTIGACIÓN CON FIBRA RECICLADA
DE NEUMÁTICO (F.R.N.) PARA
APLICACIONES ACÚSTICAS**

TESIS DOCTORAL

Autor:

Manuel Zamorano Canto

Directores de Tesis:

Dr. Antonio Nadal Gisbert (U.P.V.)

Dr. Jorge Gabriel Segura Alcaraz (U.P.V.)

Dr. José Crespo Amorós (U.P.V.)

A Lola

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a los directores de la tesis, su alto grado de implicación en la tarea de llevar a buen término esta empresa y la ayuda prestada en todo momento.

Al titular del departamento de estadística, Pau Miró, por su inestimable aportación al desarrollo de este trabajo.

A los compañeros del departamento Textil, por su colaboración incondicional ante cualquier solicitud planteada.

Al compañero Julio Sanz por la ayuda prestada en la edición del documento.

RESUMEN

En este trabajo estudiamos el comportamiento como absorbentes acústicos de diferentes clases de fibras textiles, provenientes de métodos de extracción y separación en el reciclado de neumáticos fuera de uso, en adelante (fluff).

El trabajo es un punto de partida en el estudio de este tipo de materiales para su uso en aplicaciones de acústica arquitectónica.

Mediante diseño de experimentos, se estudia la influencia de las condiciones de conformación: presión, tiempo, temperatura, masa de fluff. Aplicando unas variables en los parámetros de conformado, variación de temperatura, variación de tiempo de exposición, variación de la masa de fluff, y variación del factor de conformación a fin de estudiar la relación de estos parámetros y las propiedades intrínsecas acústicas: coeficiente de absorción acústica, porosidad, tortuosidad, permeabilidad al flujo de aire. Consiguiendo las condiciones más optimas, para la posterior conformación de un panel que obtenga las mejores cualidades absorbentes del sonido, en el mayor rango de frecuencias.

El proceso de conformado, se ha llevado a cabo mediante un molde ortoédrico, compuesto por el seno, cubierto por una tapadera tipo pistón descendente en el cual, se han dispuesto homogéneamente una determinada masa de fibras, el molde ha sido situado en una prensa con platos calefactores. Comprimiendo las fibras mediante el descenso del pistón hasta el nivel establecido, aplicándoles energía calorífica, hasta obtener la temperatura indicada en cada muestra, permaneciendo en estas condiciones durante un tiempo determinado.

ABSTRACT

The behaviour of different types of textile fibres, obtained from extraction and separation methods in the recycling processes of ELT (End of life tyres) (from now on “fluff”), as acoustic absorbent material has been studied in this research work.

This work is a starting point for the study of the use of this type of materials in architectural acoustics applications.

Experimental design was used to study the relevance of the forming conditions: pressure, time and temperature variables. The adjustment of the manufacturing variables: different temperature range, curing time, fluff mass variation, and compaction factor were studied in order to investigate the relation of these parameters to the acoustic intrinsic properties: acoustic absorption Coefficient, porosity, tortuosity and air flow permeability. The objective was to achieve the best conditions in the production of panels with the best sound absorbent qualities within the widest frequencies rank.

The production process was carried out by using an octahedral mould, made up of the enclosed body covered by a piston-like lid with downward-upward trajectory. Inside the mould a specific mass of fibres was homogeneously displayed, and then it was placed in a press with heated plates, using the piston to compress the fibres until the established level of pressure. Panels were obtained by applying the precise heating energy in order to reach the required temperature for each particular sample and remaining in these conditions during the fixed time.

RESUM

En aquest treball estudiem el comportament com a absorbents acústics de diferents classes de fibres tèxtils provinents de mètodes d'extracció i separació en el reciclat de pneumàtics fora d'ús, d'ara endavant (fluff).

El treball és un punt de partida en l'estudi d'aquest tipus de materials per al seu ús en aplicacions d'acústica arquitectònica.

Mitjançant disseny d'experiments s'estudia la influència de les condicions de conformació: pressió, temps, temperatura, aplicant unes variables en els paràmetres de conformat, variació de temperatura, variació de temps d'exposició, variació de la massa de fluff, i variació del factor de conformació a fi d'estudiar la relació d'aquests paràmetres i les propietats intrínseques acústiques coeficient d'absorció acústica, porositat, tortuositat, permeabilitat al flux d'aire, aconseguint les condicions més òptimes per a la posterior conformació d'un panell que obtinga les millors qualitats absorbents del so, en el major rang de freqüències.

El procés de conformat s'ha dut a terme mitjançant un motle ortoedre, compost pel si cobert per una tapadora tipus pistó descendent en el qual s'han disposat homogèniament una determinada massa de fibres, el motle ha sigut situat en una premsa amb plats calefactors, comprimint les fibres mitjançant el descens del pistó fins al nivell establert, aplicant-los energia calorífica fins a obtenir la temperatura indicada en cada mostra romanent en aquestes condicions durant un temps determinat.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. Antecedentes	21
1.1.1. El neumático y su constitución	22
1.1.2. La problemática medioambiental.....	30
1.1.2.1. Políticas gubernamentales.....	30
1.1.2.2. Responsabilidad del productor.....	31
1.1.2.3. Tasas gubernamentales.....	31
1.1.2.4. Libre mercado	31
1.1.2.5. Planificación en materia de residuos	32
1.1.2.6. Costes reciclaje.....	34
1.1.2.7. Reutilización de materiales	35
1.1.2.8. La recuperación de energía	36
1.1.2.9. Problemática actual	37
1.1.2.10. Datos internacionales de la recuperación de NFUs.....	43
1.1.2.11. Estándares para mejorar la calidad de los productos derivados de NFUs.....	43
1.1.2.12. Discusión	44
1.1.2.13. Conclusiones	44
1.1.3. Tecnología textil	45
1.1.4. No tejidos o aglomerados.....	45
1.1.5. El proceso de termocompresión.....	46
1.1.5.1. Sistemas de aplicación del calor.....	47
1.1.6. Fundamentos acústicos.....	48
1.1.6.1. Modelización matemática.....	48
1.1.6.2. Caracterización acústica	54
1.1.6.3. Medida de la porosidad.....	55
1.1.6.4. Medida de la tortuosidad.....	55
1.1.6.5. Medida de la resistividad al flujo de aire.	57
1.1.6.6. Permeabilidad al aire	58
1.1.7. Diseño de experimentos.....	59
1.1.7.1. Historia del diseño estadístico	59
1.1.7.2. Introducción al diseño de experimentos.....	60
1.1.7.3. Partes del diseño de experimentos.....	61
1.1.7.4. Diseño factorial	62
1.1.7.5. Anova en diseños 2k.....	63
1.1.7.6. Diagrama de Pareto.....	64
1.1.7.7. Modelos para los datos	64
1.1.7.8. Optimización de un proceso.....	65
1.1.8. Búsqueda bibliográfica	65
1.1.8.1. Fuentes de información consultadas.....	65
1.1.8.2. Fuentes de búsqueda utilizadas.	66
1.1.8.3. Discusión	69
1.1.8.4. Conclusión	69
1.1.9. Estado del arte	69

1.1.10. Objetivos.....	73
1.1.10.1. Caracterización morfológica.....	74
1.1.10.2. Caracterización composicional	74
1.1.10.3. Búsqueda de experiencias previas.	75
1.1.10.4. Estudio de la influencia de las variables presión, masa, temperatura y tiempo.	75
1.1.10.5. Estudio de la influencia del espesor de las muestras.	75
1.2. Conclusiones.	76
2. EXPERIMENTAL.....	77
2.1. Planificación del diseño de experimentos	79
2.2. Materiales	81
2.2.1. Materiales obtenidos del reciclado de neumáticos fuera de uso	82
2.3. Equipos y procedimientos.....	82
2.3.1. Caracterización visual de fibras.....	82
2.3.1.1. Preparación de las fibras	82
2.3.1.2. Caracterización longitudinal de las fibras.....	83
2.3.1.3. Caracterización seccional de las fibras.....	84
2.3.1.4. Caracterización composicional	86
2.3.2. Control del peso de las muestras	87
2.3.3. Configuración de las placas	88
2.3.4. Realización de las muestras.....	90
2.3.5. Determinación del coeficiente de absorción.....	90
2.3.6. Determinación de la porosidad.....	92
2.3.7. Determinación de la Tortuosidad.....	93
2.3.8. Determinación de la permeabilidad.....	95
2.4. Resultados y discusión.	96
2.4.1. Diseño de experimentos.....	96
2.4.1.1. Discusión	104
2.4.1.2. Conclusiones	104
2.4.2. Resultados de la caracterización física de las fibras.....	105
2.4.2.1. Distribución longitudinal	105
2.4.2.2. Discusión longitudes de fibra	106
2.4.2.3. Distribución seccional	106
2.4.2.4. Discusión diámetros.....	107
2.4.3. Resultados de la caracterización composicional de las fibras.....	108
2.4.3.1. Discusión composición fibras.....	109
2.4.3.2. Conclusión	110
2.4.4. Coeficiente de absorción acústica, porosidad, tortuosidad, permeabilidad.	110
2.4.4.1. Monocapa, Fibra N° 1	111
2.4.4.2. Coeficiente de absorción acústica	111
2.4.4.3. Porosidad.....	112
2.4.4.4. Tortuosidad	113
2.4.4.5. Permeabilidad al flujo de aire.....	114
2.4.4.6. Parámetros acústicos muestra N°8.....	115

2.4.4.7.	Monocapa, fibra N° 2	115
2.4.4.8.	Coeficiente de absorción acústica	115
2.4.4.9.	Porosidad.....	117
2.4.4.10.	Tortuosidad	118
2.4.4.11.	Permeabilidad al flujo de aire.....	119
2.4.4.12.	Parámetros acústicos muestra N°14.....	120
2.4.4.13.	Monocapa, fibra N° 3	120
2.4.4.14.	Coeficiente de absorción acústica	120
2.4.4.15.	Porosidad.....	122
2.4.4.16.	Tortuosidad	122
2.4.4.17.	Permeabilidad al flujo de aire.....	123
2.4.4.18.	Parámetros acústicos, muestra N° 35.....	124
2.4.4.19.	Discusión coeficiente de absorción monocapa	124
2.4.5.	Bicapa, fibra N° 1 y N° 2	125
2.4.5.1.	Coeficiente de absorción acústica	126
2.4.5.2.	Parámetros acústicos.....	127
2.4.5.3.	Fibra N°1 y N° 3	127
2.4.5.4.	Coeficiente de absorción acústica	128
2.4.5.5.	Parámetros acústicos.....	129
2.4.5.6.	Fibra 3 y 2	129
2.4.5.7.	Coeficiente de absorción acústica	130
2.4.5.8.	Parámetros acústicos.....	131
2.4.5.9.	Discusión coeficiente de absorción bicapa	131
2.4.6.	Tricapa, fibra 1, 3, 2.....	132
2.4.6.1.	Parámetros acústicos.....	132
2.4.6.2.	Coeficiente de absorción acústica	133
2.4.6.3.	Fibra 2, 3,1	134
2.4.6.4.	Discusión coeficiente de absorción tricapa	135
2.4.7.	Muestras compuestas por mezclas de fibras, fibra 1 y 2	135
2.4.7.1.	Coeficiente de absorción acústica	136
2.4.7.2.	Discusión coeficiente de absorción mezclas de fibras, fibra 1, 2.	137
2.4.8.	Muestras compuestas por mezclas de fibras, fibra 1, 3, 2.	137
2.4.8.1.	Coeficiente de absorción acústica	137
2.4.8.2.	Discusión coeficiente de absorción, mezclas de fibras, fibra 1, 3, 2.	138
2.4.9.	Comparativa entre conformado con bicapa y mezcla aleatoria.	138
2.4.10.	Comparativa entre conformado con tricapa y mezcla aleatoria.....	139
2.4.11.	Mejor resultado.....	140
2.4.12.	Comparativa con la lana mineral.....	140
2.4.13.	Conclusiones.....	141
2.4.13.1.	Bicapa	142
2.4.13.2.	Muestras tricapa 1.3.2.....	143
2.4.13.3.	Muestra 2, 3, 1	144
2.4.13.4.	Comparativa capas y mezclas 1/2 y 1+2	144
2.4.13.5.	Comparativa capas y mezclas 1/3/2 y 1+3+2	145
2.4.13.6.	Fibras estándar Justificación final.	145

3. CONCLUSIONES FINALES..... 147

3.1.	Introducción	149
3.2.	Experimental	151
3.3.	Nuevas líneas de investigación	156
4.	REFERENCIAS	157
5.	ANEXOS	165
	ANEXO I	167
	ANEXO II	199
1.	ÍNDICE DE TABLAS	203
2.	ÍNDICE DE FIGURAS.....	207
3.	ÍNDICE DE ECUACIONES	211
4.	GLOSARIO DE TÉRMINOS EMPLEADOS.....	213

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La recuperación y reciclado de neumáticos, es un campo de investigación, que en la actualidad presenta un gran interés. La acumulación de este residuo, procedente de un producto perecedero, genera una serie de problemas que van desde el simple impacto visual, hasta la propagación de plagas biológicas (mosquitos). La solución a estos problemas, junto a la presión ejercida desde el punto de vista legislativo (obligación de gestionar los residuos), se plantea en la actualidad desde varios campos.

La recuperación energética, la incorporación a asfaltos y cementos, son tres de las posibilidades donde más se trabaja, ya que son sectores de gran consumo y no requieren un tratamiento complejo del residuo. Dentro del campo de los materiales plásticos, su incorporación en la fabricación de planchas de caucho (junto a material virgen) o modificador de materiales termoestables, es otra de las vías apuntadas.

En la actualidad, también se desarrollan materiales cuyo componente estructural es mayoritariamente la fibra textil, procedente de los neumáticos triturados, utilizándose como elementos arquitectónicos concretamente para aislante acústico. Es precisamente dentro de este campo, donde se desarrolla este trabajo, mediante la recuperación mecánica y su uso como elemento estructural, permitiría obtener productos de más valor añadido, con un reciclado más rentable, reintroduciendo el material en sectores como la construcción y obras públicas, de gran consumo de materias primas.

El producto de partida es la fibra textil, proveniente de la trituración de neumáticos fuera de uso, suministrado por la empresa INDUSTRIAS DEL NEUMÁTICO S.A.U Ctra. Aspe-Novelda, 3803680 ASPE (Alicante) España y la empresa RECIPNEU Parque Industrial de Sines - Apartado 26 7521-901 Sines – Portugal. Durante el proceso de trituración del neumático, se obtienen tres productos básicos:

1. Acero (latonado) (proveniente del talón del neumático y del cinturón) [1].
2. Rayón, fibra de vidrio, poliéster y poliamidas aromáticas [1]
3. Caucho natural (NR), Caucho butílico (IIR), Caucho butílico halogenado (BIIR, CIIR, XIIR), Caucho butadieno estireno (SBR), Caucho de polibutadieno (BR), Caucho etileno propileno (EPDM) (provenientes de diferentes partes del neumático) [1].

Además, encontramos otra serie de productos, como polvo de carbono, caolín, diferentes tipos de aceites minerales, resinas, ácido esteárico, azufre, óxido de zinc, resorcina, etc..., que se emplean como aditivos para modificar las propiedades, tanto de transformación, como las propiedades finales deseadas en cada una de las partes del neumático.

Una vez se ha triturado el neumático, los otros productos fruto del triturado de neumático son: acero latonado y una mezcla de fibrillas (fibras pequeñas), ambos más o menos, contaminados con material elastomérico. La tesis presentada, pretende la reutilización de las fibras recicladas.

1.1.1.El neumático y su constitución

El neumático es de por sí un residuo complejo. La Figura 1.1 muestra un esquema simplificado de un neumático. La tabla 1.1 y la Tabla 1.2. nos proporcionan las composiciones medias de diferentes tipos de neumáticos [2].

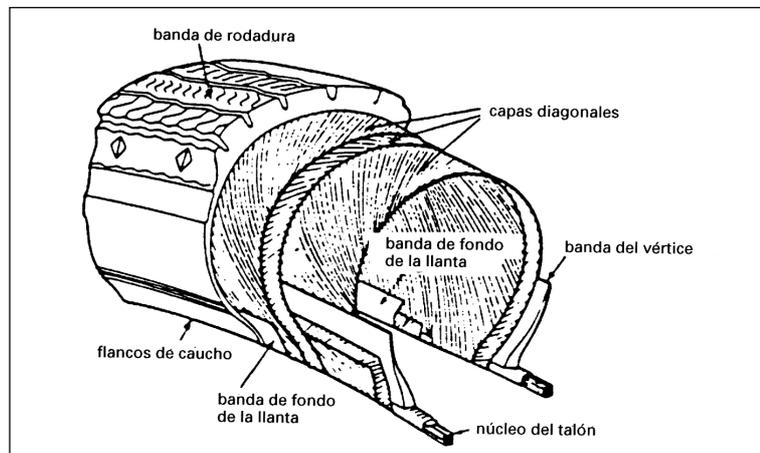


Figura 1. 1. Esquema simplificado de neumático

Tabla 1. 1. Composición de un neumático

Componente	Automoviles	Camiones
	% peso	%peso
Peso medio en Kilogramos	7-8	16-60
Carbono	70-75	68-72
Hidrógeno	6-7	5-6
Azufre	1-2	1-2
Inertes	3-4	2-3
Hierro	10-12	20-22

Tabla 1. 2. Constitución de un neumático

Material	Automóviles	Camiones
	% peso	% peso
Hidrocarburo	48,0	45,0
Negro de humo	22	22
Acero	15	25
Textil	5	--
Oxido de Zinc	1,2	2,1
Azufre	1,0	1,0
Varios	8,0	6,0

El neumático usado medio, de un coche o de un camión ligero, pesa aproximadamente 9,5 Kg. Los industriales y de grandes camiones pueden pesar desde 16 Kg hasta más de 100 Kg. Desde 1983 todos los neumáticos para coches y camiones ligeros son del tipo radiales con cinturón de acero.

El 85 % de todos los neumáticos usados, proceden de coches y camionetas, y un 14 % de camiones pesados. El 1 % restante proviene de motocicletas, aviones, etc. [3].

Los constituyentes principales de los neumáticos son:

- Polímeros.
- Negro de carbono.
- Ablandadores.

Los ablandadores, están compuestos principalmente por aceites de hidrocarburos aromáticos, que junto con los polímeros, dan al neumático un valor calorífico relativamente alto.

En la Figura 1.2 se muestra la composición de una cubierta típica y en la Figura 1.3 se compara la composición de los neumáticos, con la de los residuos sólidos urbanos [3].

Esencialmente, una rueda neumática, consiste en un volumen tórico de aire a sobrepresión, que es el que absorbe las irregularidades del pavimento, contribuyendo así, junto con la suspensión, al confort de los ocupantes del vehículo

Este volumen de aire, anteriormente estaba encerrado en una cámara de goma, asimismo tórica, que se montaba sobre una llanta metálica solidaria del eje de la rueda, actualmente se ha integrado la cámara en la cubierta.

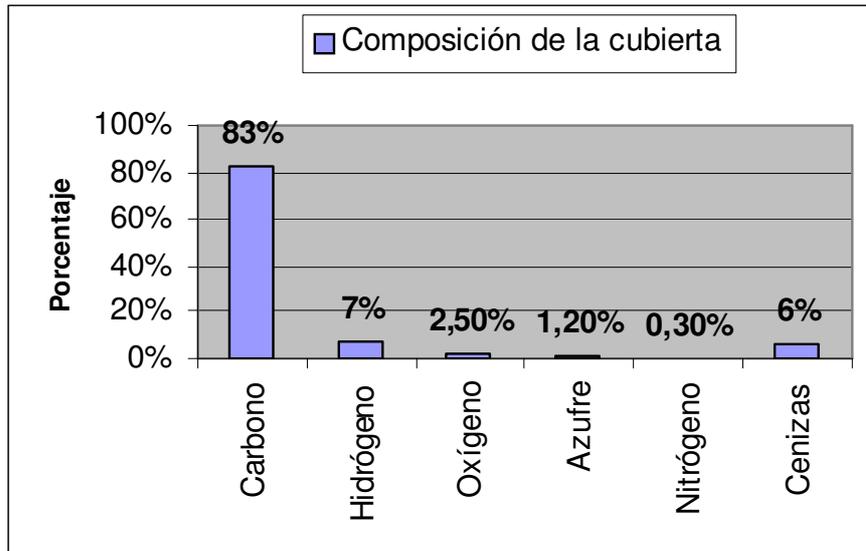


Figura 1. 2. Composición en % de una cubierta de neumático.

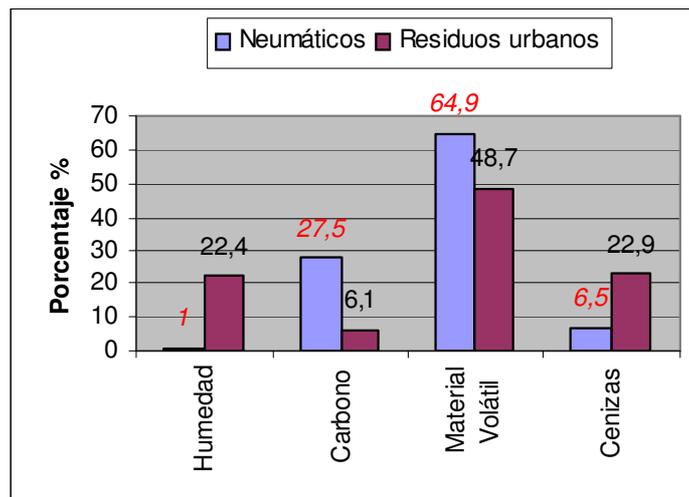


Figura 1. 3. Composición en % de una cubierta de neumático y de R.S.U.

En las zonas sin contacto con la llanta, de la cubierta, pueden diferenciarse cuatro partes principales:

- La carcasa
- La banda de rodadura (rodamiento en algunos textos)
- Los flancos
- Los talones.

En la figura 1.4 aparece un esquema de un neumático y sus diferentes zonas.

La carcasa, es una estructura textil poco extensible, cuya misión es impedir la expansión de la cámara bajo la sobrepresión del aire y proporcionar así, una estabilidad

dimensional al conjunto. La banda de rodadura (rodamiento), es la parte externa circunferencial de la cubierta, sobre la carcasa, evita la fricción de esta sobre el pavimento. Es el elemento, que gracias al elevado coeficiente de fricción de la goma sobre el pavimento, transmite el par de tracción que hace avanzar al vehículo y el par de frenado que lo detiene. Tiene una elevada resistencia a la abrasión, para reducir al mínimo el desgaste por fricción.

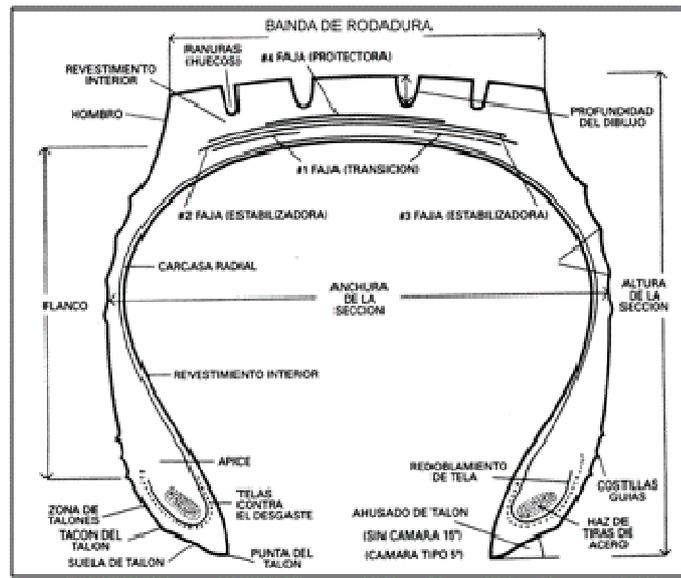


Figura 1. 4. Sección de un neumático representando sus diferentes partes

Los flancos o costados de la cubierta, tienen por misión proteger a la carcasa de los efectos de la intemperie y contra eventuales laceraciones mecánicas, que podrían producirse, por ejemplo, por rozamiento contra los bordillos de aceras, así como servir de unión, entre la banda de rodadura y los talones.

Los talones, son los elementos rígidos de la cubierta, que se adaptan a las pestañas de la llanta e impiden que la cubierta pueda ser desalojada de esta, como consecuencia de las deformaciones originadas durante el funcionamiento del neumático.

En las cubiertas sin cámara, lo que en realidad se hace es integrar la cámara a la propia cubierta, de manera que la capa interna de esta, esté constituida por una lámina de 1,5-2,5 mm de espesor, de un material poco permeable al aire. Para el forro interior de la cubierta sin cámara, se emplea Caucho butílico halogenado, con las mismas características de impermeabilidad y resistencia al envejecimiento que el Caucho butílico.

Según la estructura de la carcasa, se distinguen dos grandes grupos de cubiertas:

-Cubiertas diagonales (Figura 1.5) [1].

-Cubiertas radiales (Figura 1.6) [1].

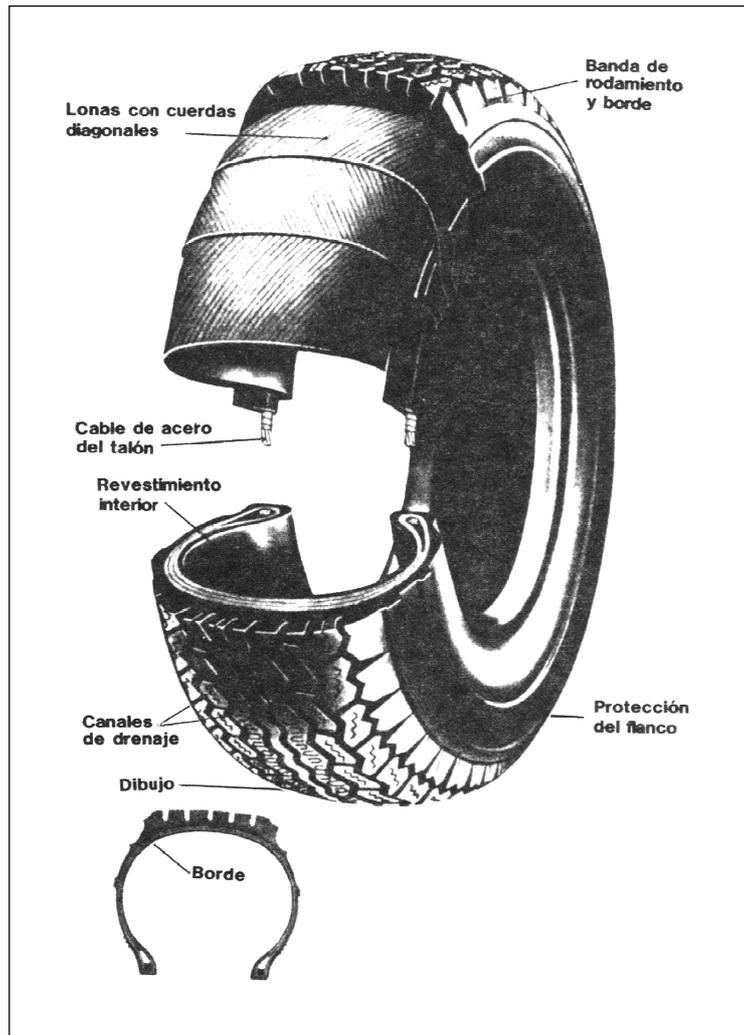


Figura 1. 5. Cubierta diagonal

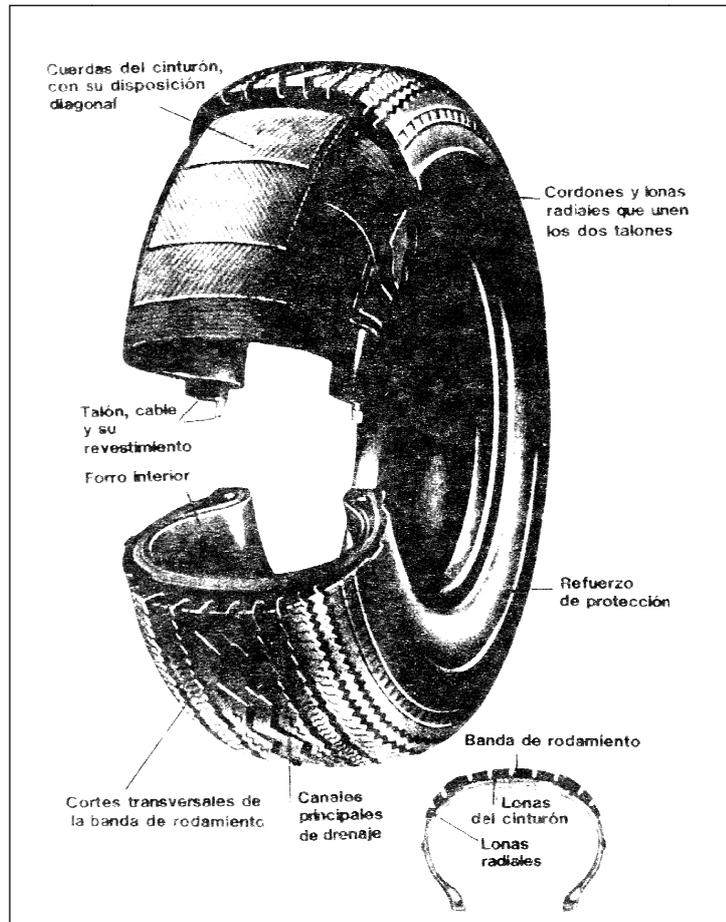


Figura 1. 6. Cubierta radial

En las cubiertas diagonales, la carcasa está formada de varias capas, llamadas generalmente telas o lonas, cuyos hilos discurren oblicuamente desde un talón al opuesto, siendo la inclinación de los hilos de cada capa con respecto a la línea central circunferencial, exactamente la contraria de la inclinación de los hilos de las capas adyacentes. Las cubiertas radiales tienen un número menor de telas, cuyos hilos discurren radialmente de talón a talón. En ambos casos, las telas se pliegan sobre sí mismas en la zona del talón, después de haber dado la vuelta alrededor de los aros metálicos de este, al objeto de obtener una fijación de las telas al conjunto de las cubiertas. Además, las cubiertas radiales tienen un cinturón dispuesto debajo de la banda de rodamiento, cuyos hilos van en sentido casi circunferencial, con un ángulo muy agudo respecto a la línea central, y que es opuesto en las sucesivas capas que constituyen el cinturón.

El elemento fundamental de la carcasa, cualquiera que sea el tipo de cubierta, es el cord. Es una disposición de hilos paralelos entre sí, con un acabado superficial de engomado, con el objeto de impedir rozamientos entre ellos, durante el funcionamiento de la cubierta, produciendo una erosión por frote que conduciría a su rotura.

A la hora de la fabricación del cord, en el momento actual todavía se utiliza algo de Rayón y en medida cada vez mayor Poliésteres, empleándose Poliamidas (Nylon) en casos especiales, tales como neumáticos de alta velocidad.

Para asegurar una adherencia adecuada, entre el material textil y la goma, es preciso un tratamiento de aquel con un adhesivo goma-tejido apropiado, se utiliza un recubrimiento por inmersión en un baño acuoso, constituido por una mezcla de resorcina, un donador formaldehído y un látex de butadieno/estireno/vinilpiridina, seguido de un tratamiento térmico de secado y precondensación de los componentes del adhesivo.

A la banda de rodamiento (rodadura) se le exigen dos características principales, elevada resistencia a la abrasión y buen agarre sobre los pavimentos, tanto secos como húmedos. Como además, es la zona de mayor espesor de la cubierta, la generación de calor de las gomas que la constituyen, impone ciertas condiciones a la hora de su formulación. La Tabla 1.3 presenta algunos ejemplos de formulaciones típicas [1].

Tabla 1. 3. Composición de bandas de rodamientos de neumáticos

	Turismo		Camión	
	A	B	C	D
	Radial	Diagonal	Radial	Diagonal
Caucho natural, SMR 5	--	--	--	50
Caucho natural, SMR GP	--	--	--	50
SBR 1712	82,5	82,5	138	--
BR 1252	55	55	--	--
Negro de carbono ISAF-HS, N-234	70	--	--	--
Negro de carbono ISAF-HM, N-220	--	--	70	55
Negro de carbono HAF-HS, N-339	--	70	--	--
Aceite mineral altamente aromático	4	4	6	10
Ácido esteárico	2	2	2	2
2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinoleína polimerizada	2	2	--	--
Producto de codensación acetona-difenilamina	--	--	1	1
N-(1,3-dimetil-butil)-N'-fenil-p-diamina	1	1	2	2
Cera parafínica	3	3	2	2
Óxido de Zinc	3	3	4	3
N-ciclohexil-2-benzotiacil-sulfenamida	1	1	--	--
N-oxidietilen-2-benzotiacil-sulfenamida	--	--	0,8	0,7
Azufre	1,75	1,5	2	1,8

Los flancos, han de tener una gran flexibilidad y una excelente resistencia a la fatiga y al ozono. Se fabrican generalmente a base de combinaciones NR/SBR adecuadamente protegidas con antiozonantes, que simultáneamente aumentan la resistencia a la fatiga o de combinaciones ternarias o cuaternarias con inclusión de EPDM y/o cauchos butílicos halogenados. La tabla 1.4 representa un ejemplo de composición de un flanco [1].

Tabla 1. 4. Composición de flancos de neumáticos

	Turismo			Camión
	Diagonal	Radial	Radial	radial
Caucho natural, SMR 5	--	50	50	65
Caucho natural, SMR GP	--	--	--	35
SBR 1712	82,5	--	35	--
BR 1252	40	50	--	--
XIIR	--	--	35	--
EPDM	--	--	15	--
Negro de carbono HAF-HS, N-330	--	50	--	--
Negro de carbono FEF-HS, N-550	--	--	--	50
Negro de carbono GPF-HS, N-660	70	--	60	--
Aceite mineral nafténico	--	10	20	--
2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinoleína polimerizada	2	2	1	1
N-(1,3-dimetil-butil)-N'-fenil-p-diamina	2	2	2	2,5
Cera	3	3	--	2
Ácido esteárico	2	2	2	2
Óxido de Zinc	3	2	5	3
Óxido de Magnesio	--	--	0,25	--
Acelerante	1,75	1,5	0,5	1,8
Disulfuro de alcoholifenol	--	--	0,5	--

Cada talón, consta de un aro metálico, constituido por un conjunto de alambres de acero latonado (para promover la unión goma-metal) dispuestos en una configuración cuadrada o rectangular, ver Figura 1.7. Los alambres, calentados por efecto Joule, se recubren con una mezcla de caucho y seguidamente se arrollan para formar el aro que inmediatamente después, se venda en espiral con tiras cortadas de un tejido cuadrado engomado, como la anchura del aro suele ser mayor que el espesor del flanco, para obtener una variación gradual del espesor, se dispone sobre el aro una tira extruida de una mezcla llamada relleno del talón. Ha de ser una mezcla bastante rígida, al objeto de que las flexiones de los flancos no se produzcan en el talón, ya que ello podría acelerar el desgaste por rozamiento contra el borde de la llanta. Suele emplearse una mezcla con una proporción alta de Caucho natural, al menos un 75%, y con una dosis alta de negros de carbono reforzantes, bien solos o en combinación con resinas fenólicas o carga de fibras cortas, ver Tabla 1.5 donde se representa una de estas fórmulas [1].

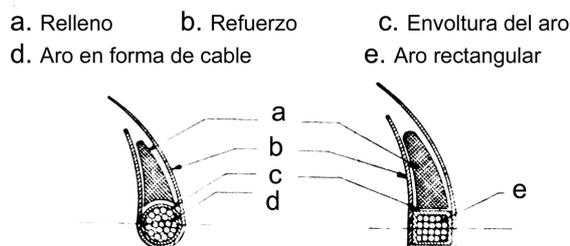


Figura 1. 7. Talón

Tabla 1. 5. Composición de relleno de talón

Caucho natural, SMR GP	80
SBR 1500	20
Negro de carbono HAF-HS, N-339	70
Resina fenol-formaldehido	10
Aceite aromático	10
Aceite de resina colofonia	5
Antioxidante 2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinoleína polimerizada	2
Ácido esteárico	2
Óxido de Zinc	5
Acelerante N-ciclohexil-2-benzotiacil-sulfenamida	1
Azufre	2,5

Finalmente, el conjunto del aro y relleno se recubre con una tira del llamado protector, ya que una de sus misiones es proteger de los efectos del rozamiento contra la llanta. Puede ser una tira de un tejido cuadrado, generalmente de Nylon, engomado, o una tira de mezcla calandrada que normalmente está vulcanizada, al menos parcialmente y que se adhiere al conjunto mediante adhesivos de disolución, o en algunos casos mezcla de tejido y mezcla calandrada. En las cubiertas grandes, en especial en las diagonales, puede ser necesario, disponer entre la base de la banda de rodamiento y la carcasa una goma/tejido, el llamado cojín, que haga más gradual la diferencia de rigidez y de dureza de ambos elementos de la cubierta.

Por último, para la fabricación de cubiertas radiales, es preciso confeccionar el cinturón. Las primeras cubiertas radiales que aparecieron en el mercado, tenían el cinturón de cables de acero latonado, posteriormente otros fabricantes, construyeron cubiertas radiales con un cinturón de cord de Rayón, y estos dos materiales son los que siguen en uso en Europa. Con frecuencia, se usa una combinación de ambos materiales. En Estados Unidos, se emplean también las fibras de vidrio y en menor medida las poliamidas aromáticas.

1.1.2. La problemática medioambiental

1.1.2.1. Políticas gubernamentales

Diferentes países y organizaciones internacionales, [4] han creado una legislación al respecto, [5] evaluando los daños medioambientales, el coste

económico y las alternativas de reciclaje, [6] para conseguir un desarrollo sostenible en el ámbito del aprovechamiento de materiales y energía[7].

En Europa, coexisten 3 modelos de gestión para los neumáticos usados: responsabilidad de productor regulada por decreto (el más extendido), libre mercado y sistema de tasas gubernamentales.

1.1.2.2. Responsabilidad del productor

En el modelo de responsabilidad del productor, la ley atribuye al productor (fabricante o importador), la responsabilidad de organizar y gestionar los residuos. Normalmente, esta responsabilidad se transmite a una entidad gestora en su nombre y se financia mediante una contribución que generalmente es trasladada al mercado de manera visible en la factura.

1.1.2.3. Tasas gubernamentales

El modelo de tasas gubernamentales, es un sistema intermedio, en el que el estado organiza la gestión de los residuos y la financia mediante el cobro de unas tasas a los productores, quienes finalmente las transmiten al consumidor final.

1.1.2.4. Libre mercado

En el modelo de libre mercado, la legislación fija unos objetivos pero no una responsabilidad. De esta manera, los agentes que operan en el mercado se organizan de manera libre y actúan en cumplimiento de la legislación.

En la actual Estrategia Comunitaria de gestión de residuos, resolución del Consejo de 24 de febrero de 1997, se contempla la prioridad, recogida en la "Estrategia Temática de Prevención y Reciclaje de Residuos" en la conveniencia de elaborar Planes de residuos. En la Ley 10/1998, de Residuos, artículos 5 y 6, se establece la obligación de revisarlos cada 4 años, con posibilidad de estructurarlos a través convenios de colaboración entre la Administración General del estado y las comunidades autónomas, también las entidades locales, tienen posibilidades de acuerdo con las competencias municipales, otorgadas por la legislación vigente de elaborar Planes de Gestión de residuos urbanos. Según la directiva marco europea de residuos (directiva 2006/12/CE) se deriva la obligación

de los Estados miembros de dotarse de estos instrumentos jurídicos y de planificación donde en los planes nacionales, deben figurar entre otros objetivos, la reducción, la reutilización, el reciclaje, la eliminación y los medios para conseguirlos: procedimiento de revisión y financiación

La Directiva sobre vertederos (1991/31/CE) prohibió el vertido de gran parte de neumáticos fuera de uso (NFUs) desde el año 2006, constituyendo el residuo más restringido para su vertido ya que en ningún otro residuo, se ha aplicado en Europa, una restricción similar.

Durante la planificación para la implementación de la Directiva, la industria del neumático, inició un programa estratégico basado en la responsabilidad del productor que fue difundida entre los miembros de ETRMA (European Tyre & Rubbert Manufacturer's Association). Esto condujo a la creación gradual de la gerencia nacional de NFU, respaldado por una adecuada ley de las empresas, actualmente existen 19 países con un modelo de responsabilidad del productor y 14 con un modelo de libre mercado, con la creación por los fabricantes de neumáticos de un colectivo de empresas de gestión de NFUs, lo que significa que la utilización del modelo de responsabilidad del productor representa aproximadamente 65% de UE (datos de 2012).

En España, el 5 de octubre de 2001 se aprobó el I Plan Nacional de Neumáticos fuera de uso. En estos planes se preveían inversiones en la mejora de la gestión, creación de infraestructuras y confección de inventarios.

El ministerio del medio ambiente, estando finalizados los periodos de vigencia de anteriores planes de residuos, promovió con fecha de 6 de septiembre de 2007, el PNIR Plan Nacional Integrado de Residuos (2008-2015), emitiendo la documentación inicial como era preceptivo, por el artículo 19 de la ley 9/2006 de 28 de Abril a partir del 2008) y se creó el informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA). Para evaluar los efectos en el medio ambiente de determinados planes y programas.)

1.1.2.5. Planificación en materia de residuos

En la Tabla (1.6) aparecen, los programas específicos para Neumáticos fuera de uso (NFU), en el Plan Director Territorial de RU y en su Plan de Gestión de RP.

Tabla 1. 6. Programas específicos para Neumáticos fuera de uso

ANDALUCIA	Apartado 9.3.7. Neumáticos; Residuos específicos; Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos
ARAGON (La valorización y la eliminación son servicio público)	Plan de gestión integral de residuos de Aragón 2009-20015 1. Minimización 2. Reutilización 3. Valorización material de todos los NFU generados en Aragón en una planta del servicio público (concesión) 4. Impulso empleo polvo de caucho en obra pública
ASTURIAS	Plan Básico de Gestión de Residuos en Asturias. Apartado 2.2.3
BALEARES	Plan Director Sectorial para la Gestión de los RCD, voluminosos y NFU de la isla de Mallorca (aprobado el 8-4-2002) Aprobado por el Consell Insular de Mallorca el 22 de abril de 2002 (BOIB nº 59, de 16/05/2002), corregido por el Consell de Mallorca el 29 de julio de 2002 (BOIB nº 96, de 10/08/2002)
CANARIAS	No hay plan específico
CANTABRIA	No hay plan específico
C.A.CASTILLA LA MANCHA	Plan de Gestión de RU de CLM. Programa de Residuos Urbanos Especiales (RUE). Subprograma de Neumáticos al final de su Vida Útil
C.A.CASTILLA LEON	No hay plan específico
CATALUÑA	Programa de Gestión de los Residuos Industriales de Cataluña (PROGRIC). NFU según objetivos anteriores descritos dentro del marco general de residuos industriales, y en base a la normativa vigente
C. VALENCIANA	Decreto 7/1/2003 Aprueba el Reglamento de producción, posesión y gestión de los neumáticos fuera de uso en la Comunidad Valenciana.
C.A. EXTREMADURA	No hay plan específico
C.A. GALICIA	No hay plan específico
C. MADRID	No hay plan específico

C.A. R. MURCIA	No hay plan específico
C.A. NAVARRA	No hay plan específico
C.A. PAÍS VASCO	No hay plan específico
C.A. LA RIOJA	No hay plan específico
C.A. CEUTA	No hay plan específico
C.A. MELILLA	No hay plan específico

1.1.2.6. Costes reciclaje

La recogida y el tratamiento de neumáticos fuera de uso, cuesta todavía anualmente unos 600 millones de euros, un coste adicional que se paga en su mayor parte por los consumidores.

Convertir los NFUs en un verdadero recurso, generaría un valor adicional potencial anual de al menos 1 bn € sobre la próxima década, pero el mayor obstáculo es la persistencia de la calificación de los productos derivados de neumáticos desgastados como residuos, bajo la Directiva de residuos 2008/98/CE de la UE.

Granulados, polvo y virutas de NFUs, pueden ser utilizados en un número muy amplio de aplicaciones, desde caminos, parques infantiles, para la industria automovilística, etc.

En 2012 aproximadamente, 1,1 millones de toneladas de caucho NFU, eran empleados de esta manera, Figura 1.8, pero el verdadero desafío es convertir más de 650.000 toneladas de NFU granulados, polvo y virutas en un verdadero recurso.

El establecimiento de criterios de la finalidad de los residuos, mejoraría el estado de la fiabilidad y compatibilidad de granulado/polvo y virutas, como materias primas secundarias de alta calidad, reforzaría su garantía de calidad, y fortalecería la confianza del consumidor en el producto.

En 2012, un poco más de 3,4 millones de toneladas de neumáticos usados fueron gestionados con viabilidad ambiental y económica en Europa, Tabla 1.7 (EU 27, Noruega, Suiza y Turquía) esto es aproximadamente el 95% de NFUs tratados, por delante de otros como el papel 71% y plásticos 62%

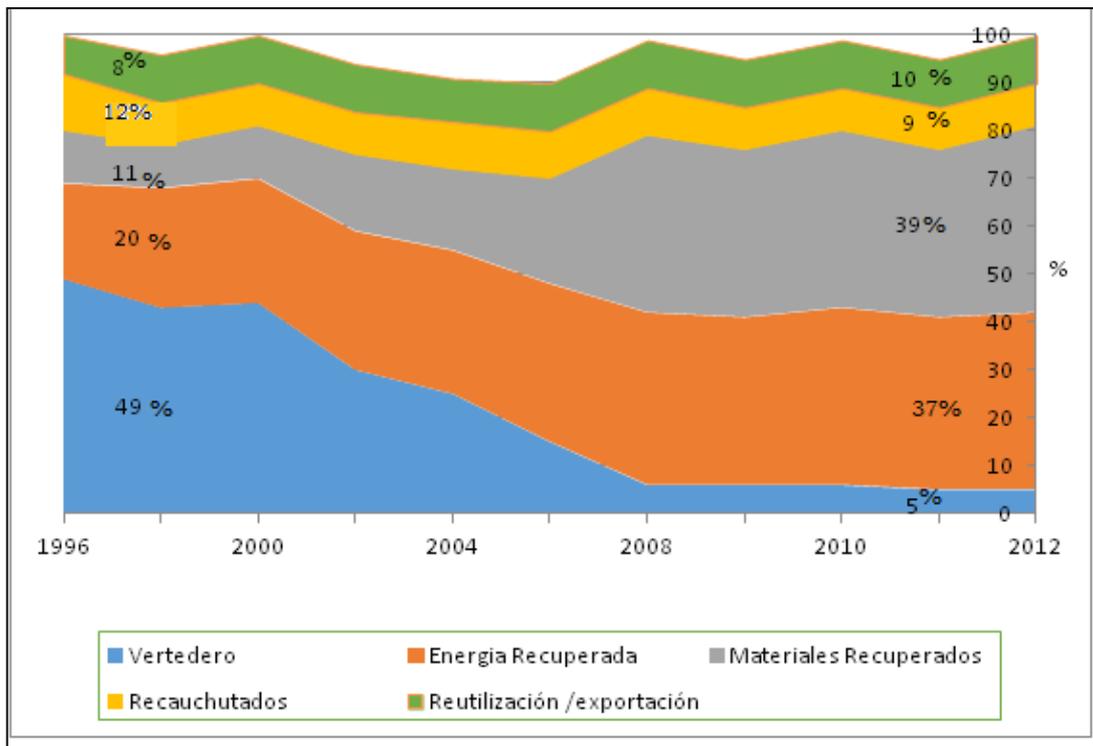


Figura 1. 8. Evolución del tratamiento de nfus

1.1.2.7. Reutilización de materiales

- Recauchutado y exportación

La reutilización de neumáticos usados (segunda mano, carcassas para recauchutar, neumáticos) Tabla 1.8, disminuyeron un 1% en el 2012 alcanzando 653.000 toneladas, debido al retroceso del 2% en carcassas para recauchutar y el 1% en neumáticos de 2ª mano.

- Recuperación de material

En la recuperación del material, 1,34 millones de toneladas, el reciclaje de caucho NFU granulados y polvo, era la ruta principal de recuperación (83%), seguido por el uso de NFU en aplicaciones de ingeniería civil y obras públicas (12%), como defensas del muelle y esteras de voladura (< 2%), por pirolisis (2,5%) y como sustituto del carbón en molinos de acero y fundiciones (<1%).

Las estadísticas preliminares para el 2014, basado en datos del 2013 ELTcos, muestran una disminución de 11% de recuperación de material desde 2012.

El mercado más importante, dentro del material de recuperación, reciclados de caucho, granulados y polvo con un (82%), sigue siendo el uso de NFU en aplicaciones de ingeniería civil en 2013 (11%)

El volumen de NFUs destinados a granulación, sigue cayendo (-10%) en comparación con el año anterior, debido al descenso de la demanda de sus principales aplicaciones.

En cuanto al granulado de caucho de NFU, los datos disponibles son interesantes y demuestran el cambio experimentado por los mercados. El césped Sintético, que hace unos años representaba aproximadamente el 50%, ahora representa sólo el 26%. Esta caída fue compensada por un aumento en las exportaciones (21% vs. 7% en 2010) y en objetos moldeados, deporte y parques infantiles (22% y 20% respectivamente, vs. 17% y 15% en 2010). Otra tendencia significativa es la aplicación al asfaltado de carreteras y caminos (de 7% en el 2010 al 1% en 2013) a pesar de las muchas ventajas aportadas por el caucho en estas aplicaciones.

1.1.2.8. La recuperación de energía

De los 1,26 millones de toneladas de NFU, la industria del cemento seguía siendo el principal usuario de NFU troceados o neumáticos enteros. Las tendencias preliminares del 2013, nos muestran un (12%) anual de incremento en NFUs utilizados en la industria del cemento, las cantidades utilizadas para la generación de electricidad cayó en un (5%)

El uso de NFU en la industria del cemento, se define como coproceso por el que los NFUs son en parte reciclados en el molino (sustitución de materias primas como hierro, sílice y zinc) y en parte se utiliza para sustituir el combustible convencional.

Una investigación realizada por Ecopneus (la principal Sociedad Italiana, constituida para la detección, la recogida, el tratamiento y el destino final del NFU, muestra que el uso del NFU en hornos de cemento y el uso para fines de recuperación de material, van casi a la par con respecto a los beneficios ambientales que generan: cada tonelada de NFU, enviada a la recuperación de material, evita una emisión de gases de 1,96 Tn de CO₂, cuando es utilizada como combustible en los hornos de cemento y 0,13 Tn de CO₂ cuando se utiliza para producción de electricidad. Esto corrobora los resultados anteriores de Aliapur (2010) y fomenta el uso de una batería de tecnologías de recuperación, con el fin de cumplir con los Objetivos regulatorios NFU.

1.1.2.9. Problemática actual

La reducción de las inversiones públicas en nuevas infraestructuras (Polideportivos, mantenimiento de carreteras de construcción, etc.) debido a la recesión económica, han contribuido a una situación de disminución en la demanda de NFU granulado en los mercados UE.

La creación de mercados de materias primas secundarias (reciclados) se basa en la contratación pública, entre otros. Deben promoverse más activamente por los gobiernos, como se menciona en la circular de economía (COM (2014)938). Es una condición previa para el reciclaje, la existencia de un mercado para materiales y productos finales reciclados. Hay una necesidad, de que las políticas nacionales, se impliquen más activamente en el apoyo y desarrollo de los mercados de productos derivados del NFU.

El tratamiento en el 2014, ejecutado por las diferentes empresas de gestión de NFU Europeas, aparecen en la Tabla 1.9, agrupadas en ETRMA-European Tyre & Rubbert Manufacturer's Association [8]

Tabla 1. 7. Rutas de recuperación europeas 2012

	Ingeniería Civil	Material reciclado				total
	Ingeniería civil obra pública y relleno	Granulación	Acerías y fundiciones	Reutilización para otros fines	Pirolisis	
ES-Signus	115	7512	0	32	0	75444
EE Eesti,Rehviliit (2012)	68	2535	0	703	3947	
NO-NDR	2246	8518	0	2472	0	10990
POL-OUO	0	18342	0	3752	0	22094
GR-Ecoelastika	0	16472	0	0	0	16472
ROM-Eco Anvelope	0	2038	0	64	0	2102
TR-Lasder	0	67066	0	0	9000	76066
FR-Aliapur	5441	75613	3203	98	0	78914
FI-Suomen Rengaskyerratys	33600	4102	0	4111	0	8213
BE-Recytyre	0	43658	1002	0	0	44660
NL-Recybem	615	31610	0	0	0	31610
PT-Valorpneu	358	38408	0	0	0	38408
SE-SDAB	19700	7700	2800	8300	0	18800
IT-Ecopneus	2105	84767	0	0	1707	86474

Tabla 1. 8. Recuperación de productos en Europa

	KTn (2013)	Aplicación	Ejemplos	%
Recuperación de materiales	582	Ingeniería civil	Bases para carreteras y ferrocarriles. Estabilizadores de terraplenes. Material de drenaje. Barreras anti erosión.	11%
		Aplicación en productos	Suelos (patios, campos de deportes) y adoquines Materiales, aislantes para el techo. Ruedas para carritos. Usado como sustituto del carbón en fundiciones de acero. Defensas en los muelles	89%
Recuperación de energía	634	Plantas de Energía incineración con otros residuos	Centrales eléctricas incinerados con otros residuos	14%
		Hornos de cemento	Hornos de cemento	86%

Tabla 1. 9. Distribución europea de aplicaciones de productos

	Recuperación de materiales	Recuperación de Energía			Total Tratamiento NFU
	Reciclaje +Ingeniería civil	Hornos de cemento	Centrales de calefacción Urbana	Total	
ES-Signus	75559	66502	2488	68990	144549
EE Eesti,Rehviliit (2012)	7254	0	0	0	7254
NO-NDR*	13236	18046	0	18046	48894
POL-OUO	22094	60856	1002	61858	100815
GR-Ecoelastika	16472	15993	0	15993	32465
ROM-Eco Anvelope	2102	31189	0	31189	33291
TR-Lasder	76066	30165	0	30165	106231
FR-Aliapur	84355	156725	8112	164837	249192
FI-Suomen Rengaskyerratys	41813				
BE-Recytyre	44660	9895	0	9895	54555
NL-Recybem	32225	5336	0	5336	37561
PT-Valorpneu	38766	20225	6694	26919	65685
SE-SDAB	38500	19800	19500	39300	77800
IT-Ecopneus	88579	105000	48360	153360	241939

1.1.2.10. Datos internacionales de la recuperación de NFUs

A nivel mundial, también han aumentado significativamente las tasas de recuperación para NFUs, Figura 1.9 pero las tasas de recuperación en la UE (sobre el 90% desde 2007) siguen siendo superiores, y hacen de Europa una de las regiones más avanzadas del mundo en el tratamiento de NFU.

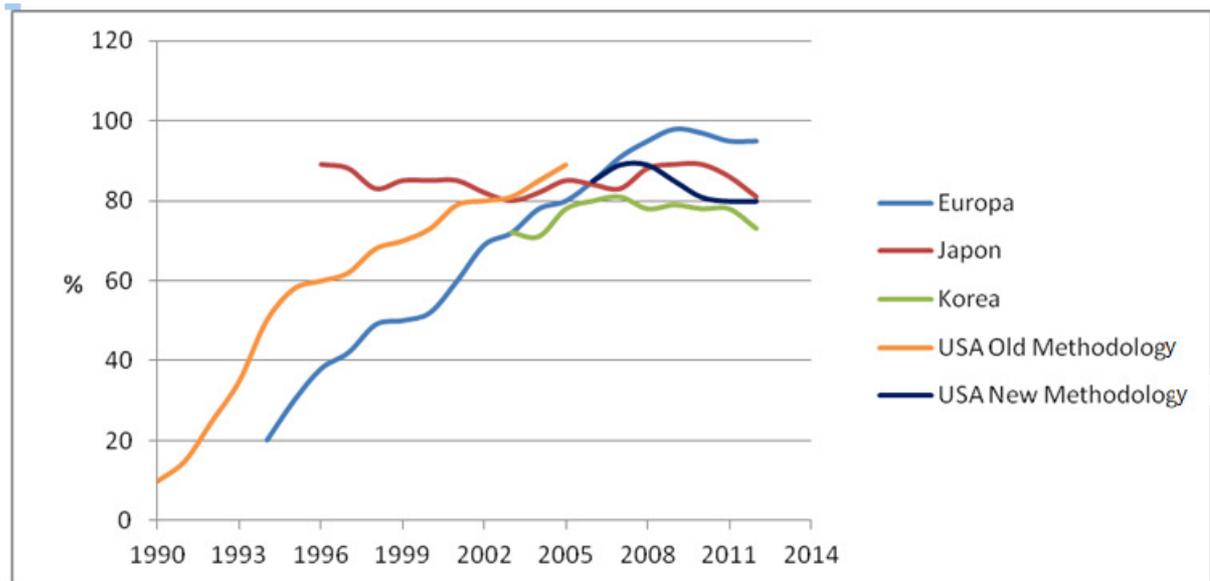


Figura 1. 9. Datos internacionales de recuperación de NFUs

1.1.2.11. Estándares para mejorar la calidad de los productos derivados de NFUs

El desarrollo de estándares de calidad, para materiales derivados NFU nivel CEN (TC366), junto con el alto rendimiento alcanzado en el reciclaje y recuperación de NFU en toda Europa, es un gran paso hacia la obtención de un estatuto de residuos de productos derivados del NFU. Además, el desarrollo de estándares de la UE, contribuye a un aumento significativo en el nivel de calidad de productos derivados del neumático al abrir el mercado a nuevas aplicaciones, promoviendo intercambios de tecnología y el acceso a conocimientos e innovación y protección del medio ambiente.

A raíz de los progresos logrados en 2011 (establecimiento de la nueva TC366 CEN) y el 2012 con un plan de negocios y el objetivo de la validación y la conversión del

CEN TS14243 en un estándar de la Unión Europea, se hicieron avances importantes en los cuatro grupos creados WGs.

En el WG1, CEN TS14243 fue dividido en 4 partes (aspectos generales, granulados y polvo, trozos, tiras y virutas, alambres de acero y fibras textiles) y se avanzó en validar cada elemento de la norma.

En WG2 (propiedades físicas de materiales) y WG3 (composición química de los neumáticos NFU) se revisan los diversos métodos de prueba en ambos campos y propone la adaptación de algunos de los métodos existentes para el control de los materiales convencionales de caucho.

Los trabajos de revisión, están actualizados En WG4, al fin de establecer un marco común de referencia, para definir qué neumáticos pueden ser reciclados.

Por último, se han logrado avances en CEN TC217 WG10 "Aspectos ambientales de las superficies deportivas" que tiene un estándar aprobado para el control de lixiviados de campos de césped sintético.[9]

En Europa, en el 2014, el tratamiento ejecutado por las diferentes empresas de gestión NFUs, ascendió a 1.200.231 Tn. y en España a 144.549 Tn de las cuales la recuperación de fibras textiles, representa un 5% del peso, tenemos para hallarles nuevas aplicaciones 60.000 Tn de fibras textiles a nivel europeo y 7.227 Tn en nuestro país.

1.1.2.12. Discusión

- Neumáticos

La problemática medioambiental que generan los NFUs es clara el volumen de recuperación en España es de 144.549 Tn.

- Fibras

Las fibras recuperadas, constituían el 5% 7.227 Tn

1.1.2.13. Conclusiones

- Neumáticos

La legislación para la recuperación, el reciclaje y reutilización, se ha ido incrementando en Europa en general y en nuestro país en particular, siguiendo la tendencia marcada por EE UU (Ley Nº114 de 30 de Julio de 2014) ley Para el uso de materiales reciclados en infraestructura pública. En la Comunidad Valenciana además de considerar la legislación autonómica sobre este aspecto, aprueba el Reglamento de producción, posesión y gestión de los neumáticos fuera de uso con el Decreto 7/1/2003.

Estas cifras, se establecen sobre el NFU recuperado que no es el 100% de los neumáticos fuera de uso, aunque según el informe del 2014 de Signus Ecovalor los neumáticos recogidos fueron 175.242 Tn de los cuales se reutilizaron 23.464 Tn y 151.824 Tn fueron a otros usos: granulación, construcción de parques y carreteras.

- Fibras.

El peso de la fibra a recuperar es sustancialmente importante. Como dato el residuo fibroso se emplea para valorización energética, debido a su alto valor energético. En la legislación analizada, la valorización energética del NFU, está considerada para el NFU en general, pero no existe un apartado específico, para la reutilización y o valoración de diferentes tipos de este residuo específicamente.

1.1.3.Tecnología textil

1.1.4.No tejidos o aglomerados

Son estructuras elaboradas a base de fibras aglomeradas y prensadas entre sí, para su fabricación no es necesario formar una calada para el ligado de los filamentos sino que las fibras textiles, se vuelcan en una bandeja de manera aleatoria sin que predomine ninguna dirección y se enlazan unas con otras, por medios mecánicos.

La estructura textil de una tela no tejida, se logra uniendo o entrelazando las fibras con métodos mecánicos, químicos o térmicos, [10] utilizando disolventes o combinando los métodos anteriores, se trata de un textil con poca resistencia a no ser que se aumente la densidad o se refuerce con un forro.

Además de los condicionantes meramente estéticos, la industria textil, ofrece a arquitectos y diseñadores de interiores, opciones ornamentales que aportan nuevas características de comportamiento.

En multitud de salas públicas, se requiere una absorción acústica que disminuya la intensidad y la reflexión de las ondas sonoras; la cantidad de absorción y reflexión requerida, depende del uso final del hábitat por ejemplo, espacios diseñados para oratorios, músicos o actividades corales, requieren diferentes grados de absorción y reflexión del sonido, aulas y salas de juzgados, deben ser diseñados para una claridad óptima en la audición de la palabra, o de la música en las salas de conciertos, en las oficinas, los ruidos de ordenadores, impresoras, máquinas fotocopadoras, etc., deben ser disminuidos.

Un tejido directamente adherido a una pared puede absorber del 0 al 20 % del sonido; tejidos más pesados (como una moqueta) son más absorbentes (del 30 al 65 %). El espesor, la densidad y la «transparencia acústica» (posibilidad de paso del sonido a través del tejido) son los tres parámetros, que determinan las propiedades acústicas de un tejido como aislante del sonido. Estructuras del tipo nido de abeja, de 12 cm de altura, a base de telas no tejidas de 90 % de fibra acrílica y 10 % de poliamida, de 320 g/m² o estructuras con diferentes capas de telas no tejidas superpuestas con una exterior de tejido de fibra acrílica, presentan una buena capacidad de absorción.

Los no-tejidos, son una lámina o red de fibras y filamentos artificiales o naturales, (excluyendo al papel) que no se ha tejido y conforman un velo o napa de fibras flexibles y porosas, sin trama como el fieltro, donde las fibras están adheridas entre sí usando alguno de los siguientes métodos:

- Agregando un adhesivo.
- Fusionando las fibras con calor.
- Fusionando las fibras, disolviendo y resolidificando su superficie.
- Creando «marañas» o «mechones» con las fibras.
- Usando puntadas para mantener las fibras en su lugar.

1.1.5. El proceso de termocompresión

En la compactación, se obtiene la forma deseada de la pieza con dimensiones muy aproximadas, por medio de una compresión de la fibra que rellena el molde, que es el negativo de la pieza a obtener. En la compactación se distinguen tres fases: El llenado, la compresión y la expulsión. En la fase de llenado, el molde se llena con la fibra que se ha mezclado previamente. La cantidad de fibra se determina por el volumen

requerido, Vm. En la segunda fase, la fase de compresión, la presión se ejerce con prensas mecánicas o hidráulicas, la expulsión es la última etapa y puede realizarse manualmente o mediante medios automatizados. La dimensión de la pieza en el plano viene fijada por las dimensiones del molde, mientras que la dimensión en altura, viene correlacionada con la presión total de compactación aplicada.

La Sinterización, la fase de sinterización consiste en el tratamiento isotérmico de la pieza durante el tiempo de operación, habitualmente inferior a la de fusión de sus partículas e inferior al cambio alotrópico si lo tuviera.

Por medio de la sinterización, la pieza se transforma en una pieza, con la resistencia necesaria para ser aplicada con fines industriales.

En los métodos continuos de termo fusión y calandrado de fibras, los principales sistemas son: la unión con resina y la unión de fibras termo plásticas. En la primera de ellos, la resina se pulveriza o se aplica en forma de espuma, directamente sobre el retículo de fibras que va saliendo de la máquina formadora; a continuación se saca el retículo y se polimeriza mediante el calor.

En la adhesión termoplástica, se mezcla con la fibra de base, una fibra termoplástica con menor punto de fusión, formando un retículo, el cual se prensa entre rodillos calientes que adhieren las fibras termoplásticas a las fibras de base. [11]

1.1.5.1. Sistemas de aplicación del calor

La consolidación por termofusión, se puede realizar por acción del aire caliente, calor y presión (termo solado por calandra).

En la consolidación por aire caliente en el termo ligado, la temperatura y la velocidad de paso, se adaptan al tipo de fibra termo sensible, para que el calentamiento sea uniforme y rápido en todo el espesor de la napa.

- La napa
- Aire caliente
- Quemadores
- Toberas
- Distribución de aire caliente sobre la superficie de la napa.

Para la tecnología del termo solado por calandra, se han desarrollado calandras de hasta 10 metros de ancho que pueden tratar velos a velocidades de hasta 200m/min.

1.1.6. Fundamentos acústicos

1.1.6.1. Modelización matemática

Delany y Bazley [12] (1970) proponen, uno de los modelos más citados en la absorción acústica de los materiales fibrosos, Ecuaciones (1.1) y (1.2) representa los valores de la impedancia característica y de la constante de propagación, relacionando la frecuencia (f) y la resistencia específica al flujo (σ) con la determinación de la impedancia característica compleja (Z) y la constante de propagación compleja (Γ).

$$Z = \rho_0 c_0 \left[1 + 0,0571 \left(\frac{\rho_0}{\sigma} \right)^{-0,754} - j0,087 \left(\frac{\rho_0}{\sigma} \right)^{-0,732} \right] \quad (1.1)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[1 + 0,0978 \left(\frac{\rho_0}{\sigma} \right)^{-0,700} - j0,189 \left(\frac{\rho_0}{\sigma} \right)^{-0,595} \right] \quad (1.2)$$

Donde:

C_0 velocidad del sonido en el aire.

ρ_0 densidad del aire.

f frecuencia.

σ resistencia específica al flujo por unidad de espesor y depende principalmente, de la densidad del material y del diámetro de la fibra.

Allard et al.1992 [13] proponen nuevas expresiones que pueden sustituir a las de Delany y Bazley. Predicen resultados similares en el rango de validez de estas ecuaciones, además son validos en bajas frecuencias, allí donde las ecuaciones de Delany y Bazley no proporcionan buenos resultados.

La resolución de estas nuevas expresiones, tienen su origen en la dependencia de la frecuencia y su relación con la viscosidad en los materiales porosos, propuestos por Johnson et al.1987 [14] generando una transposición, para determinar el modulo de la masa de aire.

En el modelo utilizado, el diámetro de las fibras y la densidad del material, son los factores que determinan la propagación del sonido en materiales fibrosos.

La constante de propagación, es igual a la atenuación más la constante de fase. Donde (ξ) es la atenuación y (β) es la constante de fase, (M) el modulo de la masa de aire y la impedancia característica (W) es igual a la impedancia característica real (W_a) menos la impedancia característica compleja a incidencia normal, Ecuaciones (1.3a y 1.3b)

$$W = [\rho M]^{1/2} = W_a - Z \quad (1.3 a)$$

$$\Gamma = i2\pi f \left[\frac{\rho_0}{M} \right]^{1/2} = \xi + \beta \quad (1.3 b)$$

N.Voronina (1994) [15], determina un modelo, que depende de ciertos parámetros estructurales para materiales fibrosos, con diferentes densidades y tamaños de fibra, comparando los resultados obtenidos mediante el modelo, con numerosas medidas, posteriormente, este modelo es mejorado por N.Voronina (1996) [16] para poder tener en cuenta a los materiales porosos con esqueleto flexible.

Es conocido, que el coeficiente de absorción del sonido de un material fibroso puede ser determinado por parámetros acústicos adimensionales, como características de la impedancia W , Ecuación (1.4) y a propagación constante (γ) ($1/m$) en sus formas complejas: $W=W_a - Z$ $\gamma=\xi + i\beta$ Ecuación (1.5) donde (W_a) y (Z) la parte real y imaginaria de (W), (esqueletos rígidos) para estos parámetros acústicos [15] están definidos por dos ecuaciones:

$$W = W_a - (a - \Psi) Z - 1 + \Psi - \Psi \quad (1.4)$$

$$\gamma = \xi + i\beta = K \frac{2+Q}{1+Q} + iK(1 + \Psi) \quad (1.5)$$

Donde ($K = 2\pi f/c_0$) es el numero de onda ($1/m$); (c_0) es la velocidad del sonido en el aire (m/s) (f) es la frecuencia y (Ψ) es la característica estructural, introducida como un parámetro acústico, para la estimación cuantitativa de la energía perdida, en el medio fibroso

Se ha obtenido una relación empírica simple, Ecuación (1.6) entre el valor (Ψ) y los parámetros físicos, que caracterizan la macro estructura de un material fibroso.

$$\Psi = \frac{(1-H)(1+q_0)}{Hd} \sqrt{\frac{8\mu}{\kappa\rho c_0}} \quad (1.6)$$

Diámetro de la fibra (d) (\emptyset) es la porosidad del material fibroso y (q_0) es el factor definido por la ecuación empírica. Ecuación (1.7)

$$-(1 + 2 \times 10^4 (1 - H)^2)^{-1} \quad (1.7)$$

Donde ($\mu = 1.85 \times 10^{-5}$) es el coeficiente dinámico de la viscosidad (Pa/s); (ρ_0) es la densidad del aire (kg/m^3); (d) es el diámetro de la fibra; (H) es la porosidad del material fibroso y (q_0) es el factor definido por la ecuación empírica.

Para materiales porosos homogéneos puede ser determinado por:

$$\emptyset = \frac{1 - \rho - m}{\rho - f} \quad (1.8)$$

Donde (ρ_m) es la densidad de la masa del material (kg/m^3) y (ρ_f) es la densidad de las fibras (kg/m^3).

Así, si la porosidad y el diámetro de las fibras son conocidos, las características estructurales y los parámetros acústicos, se pueden obtener (W) y (γ) de acuerdo con las Ecuaciones (1.4, 1.5, 1.6) se demuestra que las Ecuaciones (1.4, 1.5) son bastante exactas, para materiales con un grosor de fibras sobre ($Kd \times 10^4 > 0.5$) (para estructuras rígidas a semirrígidas) sin embargo, la ecuación (1.6) es válida para materiales con fibras delgadas, esto ha llevado a tener en cuenta la influencia de la estructura flexible.

Ahora es necesario, considerar el papel de la estructura flexible y explorar el rango de aplicaciones de este modelo, para materiales de fibras súper delgadas.

Las propiedades acústicas, de los materiales de fibras superfina con un diámetro menor de (2×10^{-6}) han sido demostradas experimentalmente. Se ha visto, que la parte imaginaria de la característica compleja de la impedancia (Z) y el coeficiente de atenuación (ξ) decrece, mientras la fase constante (β) se incrementa, en bajas frecuencias y rangos intermedios, comparado con el comportamiento predicho por la Ecuación (1.4, 1.5)

Si el diámetro de las fibras disminuye de 10^{-5} a 10^{-6} m, los parámetros (Z) y (ξ) también disminuyen para factores de entre 2.5 y 4 y entre 1.4 y 2.4 respectivamente.

Con respecto a lo anteriormente descrito, es posible hacer unas correcciones a los modelos presentados anteriormente de las particularidades de los materiales con fibras súper finas, incluyendo coeficientes adicionales (U) y (X) por lo tanto las ecuaciones (1.4, 1.5) pueden ser escritas como:

$$\mathbf{W} = \mathbf{W} - (\mathbf{a}-) \mathbf{Z} = \mathbf{1} + \Psi - \Psi \mathbf{U} \quad (1.9)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\beta} = \mathbf{K} \Psi \frac{1+(1+\Psi)(1+\mathbf{B})\mathbf{F}}{1+\Psi} + \mathbf{K}(\mathbf{1} + \Psi(\mathbf{1} + \mathbf{X})) \quad (1.10)$$

Los coeficientes (U) y (X) son menores que uno para materiales de fibras súper finas, pero cuando el diámetro de las fibras se incrementa, se aproximan a uno y cero respectivamente. Entonces el modelo es similar al anterior.

Castagnede B. (2.000) et al.[17] partiendo del trabajo de J.F. Allard et al.[18] estudian el efecto de la compresión en un material fibroso donde disminuye la porosidad del mismo modo, las características dimensionales y el incremento de la tortuosidad y la resistencia. En este estudio se intenta cuantificar las variaciones, de una compresión axial sobre una superficie, sollicitación a la compresión y determinación de la influencia de estas variaciones, en la impedancia acústica y en el coeficiente de absorción. La parte que excede a la unidad, es simplemente multiplicada por el factor de la tasa de compresión Ecuación (1.11)

$$\mathbf{T}^n = \mathbf{1} - \mathbf{n}(\mathbf{1} - \mathbf{T}^0) \quad (1.11)$$

Donde (T) es la tortuosidad (n) es la proporción de espesores (h_0/h). La dificultad de demostrar rigurosamente esta relación, se atenúa por la existencia de una ecuación análoga para la porosidad, que fácilmente podría ser derivado con algunos cálculos elementales.

$$\varnothing^{(n)} = \mathbf{1} - \mathbf{n}(\mathbf{1} - \varnothing^{(0)}) \quad (1.12)$$

Además, también se pueden derivar las siguientes relaciones para las longitudes y la resistividad.

$$\Lambda'_{(n)} = \frac{\Lambda'_{(0)}}{\sqrt{n}} + \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \mathbf{1} \right); \quad \Lambda_{(n)} = \frac{\Lambda_{(0)}}{\sqrt{n}} + \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \mathbf{1} \right);$$

$$\hat{S}_{(n)} = \mathbf{n} \hat{S}_{(0)} \quad (1.13)$$

Donde (d) representa el diámetro representativo de las fibras. El resultado de la longitud térmica característica (Λ) puede ser aproximado a alguna configuración

geométrica simplificada de distribución de las fibras. La formula incluye la resistividad (σ) obtenida del resultado de la compresión ($n = h_0/h$) al que le hemos dado arbitrariamente un valor de $n=2$

Garai y Pompoli (2005) [19] desarrollan a partir de las ecuaciones de Delany y Bazley un modelo aplicado a fibras de poliéster con diámetros medios aproximadamente de $33 \mu\text{m}$, prediciendo en este tipo de material, la resistencia al flujo, impedancia acústica y coeficiente de absorción.

Bies y Hansen (1980) [20] presentan un modelo simple, que permite el cálculo de los valores de la resistencia al flujo de aire, partiendo de los valores de la densidad de la masa (kg/m^3) del material fibroso y el diámetro de las fibras.

$$\sigma d^2 \rho_m^{-k_1} = k_2 \quad (1.14)$$

Siendo (σ) la resistencia al flujo de aire (Pa s/m^2); (ρ_m) la densidad de la masa (kg/m^3) y (d) el diámetro medio de las fibras (m), $K_1 = 1.53$ y $K_2 = 3.18 \cdot 10^{-9}$ para la fibra de vidrio. Bies y Hansen exponen, que la relación cuadrática sobre el diámetro de la fibra, ha quedado verificada experimentalmente, en la Ecuación (1.14) se parte de la base de diámetros uniformes de fibra ($<15 \mu\text{m}$) y un contenido insignificante de ligante.

Desafortunadamente, la aplicación del modelo de Bies y Hansen con material de fibras de poliéster, adolecen de poca exactitud comparados con los valores de la resistividad al flujo de aire, obtenidos con las medidas experimentales, probablemente es debido al hecho de que los diámetros de las fibras de poliéster, tienen un amplio rango de valores, el rango estudiado es de 18 a $48 \mu\text{m}$ y el valor medio es de $33 \mu\text{m}$, la longitud media de las fibras es de 55mm .

Entonces el modelo de Bies-Hansen, puede ser modificado como:

$$\sigma = G\rho - m^j \quad (1.15)$$

Donde $G = K_2(d)^{-2}$ y $J = K_1$. G y J son parámetros independientes.

La idea de relacionar la resistencia al flujo de aire y la densidad de masa con el propósito de tener un control rápido sobre el sonido, no es nuevo en la literatura técnica existente y podemos remontarnos al trabajo original de Delany y Bazley.

Se decidió, buscar la optimización de los valores de (σ) y (ρ) para las fibras de poliéster por ajuste de mínimos cuadrados, los valores de resistividad al flujo de aire han sido calculados, con la Ecuación (1.15). Los resultados son: $\sigma = 25.989$ y $\rho = 1.404$ comparando los resultados de los parámetros (σ) y (ρ) de la Ecuación (1.14) con la Ecuación (1.15) de Bies-Hansen, con un diámetro medio de fibra de $33 \mu\text{m}$.

La muestra con densidad de 110 kg/m^3 , no fue considerada como la más ajustada al proceso porque no tenía la homogeneidad de otras, ofrecía valores de densidad con un rango entre 12 a 60 kg/m^3

La Ecuación (1.15) con los valores de m y n constituye un modelo simple para los materiales de fibra de poliéster y se ha llamado el modelo de la nueva resistividad (NMR), puede predecir con bastante exactitud la resistividad al flujo de aire de los materiales de fibra de poliéster en función de la densidad de masa

En el nuevo modelo de la resistividad (NMR) se puede calcular la resistencia al flujo en función de la densidad aparente Ecuación (1.15).

En el nuevo modelo para la impedancia acústica, se puede predecir, el cálculo de la incidencia normal del coeficiente de absorción acústica, derivada del modelo de Delany-Bazley[12]

$$W_a = \rho_0 c_0 \left[1 + c_1 \left(\frac{\rho_0}{\sigma} \right)^{-c_2} \right] \quad (1.16)$$

$$Z = \rho_0 c_0 \left[c_3 \left(\frac{\rho_0}{\sigma} \right)^{-c_4} \right] \quad (1.17)$$

$$\Gamma = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[c_5 \left(\frac{\rho_0}{\sigma} \right)^{-c_6} \right] \quad (1.18)$$

$$\Gamma = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + c_7 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-c_8} \right] \quad (1.19)$$

Donde (W_a) y (Z) son la parte real e imaginaria de la impedancia (W); (Ω) y (Γ) la parte real e imaginaria de la constante de propagación (γ); (ρ_0) es la densidad del aire ; (f) es la frecuencia y(σ) la resistencia al flujo de aire.

El coeficiente de absorción acústica a incidencia normal (α) para una capa de fibras con un determinado espesor (l) sobre un soporte rígido, se puede obtener usando las Ecuaciones (1.20) y (1.21)

$$W_l = (W_a + Z_l)[\coth(\Omega + \Gamma)l] = W_{al} + Z_{l1} \quad (1.20)$$

$$\alpha_n = \frac{4W_{al}\rho_0 c_0}{|W_l|^2 + 2\rho_0 c_0 W_{al} + (\rho_0 c_0)^2} \quad (1.21)$$

Constituye un modelo simple para los materiales de fibra de poliéster, se ha llamado, el nuevo modelo de impedancia (NMI) se ha definido permitiendo, que con ocho coeficientes(C_1, \dots, C_8) en las Ecuaciones (1.16)-(1.19) puede variar y buscar por mínimos cuadrados, los valores óptimos que mejor se ajustan al coeficiente de absorción del sonido, calculado en las Ecuaciones (1.20) y (1.21) con los valores medidos en el tubo de impedancia.

1.1.6.2. Caracterización acústica

Básicamente, hay dos métodos en laboratorio, para medir el coeficiente de absorción acústica de los materiales: el método descrito en la Norma ISO 354:2003, que precisa de una cámara reverberante y el descrito en la Norma ISO 10534-2, que es en el que se utiliza un tubo de impedancia acústica. [18]

Para los ensayos del coeficiente de absorción acústica, se han seguido las recomendaciones de la ISO 10534-2. Hay dos parámetros en la normativa que condicionan el rango de frecuencias de medida: el diámetro del tubo y la distancia entre micrófonos. En este caso el diámetro del tubo es de 40 mm y la separación entre micrófonos es de 30 mm, lo que permite un rango aproximado de medida de entre 400 y 4000 Hz.

El método basado en el tubo de ondas estacionarias, o tubo de impedancia acústica, para medir el coeficiente de absorción en materiales, es una de las técnicas más utilizadas, en la caracterización acústica de materiales porosos y fibrosos.

En general, los materiales porosos y fibrosos, presentan un mecanismo de absorción acústica, basado en la transformación por fricción de la energía de la onda acústica incidente, en calor.

Para comparar las propiedades absorbentes del sonido de estos nuevos materiales multicapa, en función de la frecuencia, se obtiene la curva de absorción acústica. El coeficiente de absorción acústica se determina con la siguiente Ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (1.22)$$

(r) es el coeficiente de reflexión que se determina mediante en la Ecuación:

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \cdot e^{2j \cdot k_0 \cdot x_1} \quad (1.23)$$

Donde: (H_{12}) es la función de transferencia compleja (H_i) es la función de transferencia de la onda incidente (H_r) es la función de transferencia de la onda reflejada (k_0) es el número de onda complejo (x_1) es la distancia desde la muestra hasta el micrófono más alejado.

El coeficiente de reflexión varía entre 0 y 1, en función de si el material se comporta como absorbente o reflectante acústico, respectivamente y se relaciona con la impedancia acústica específica, que es la resistencia que opone el material al paso de las ondas acústicas, mediante la Ecuación:

$$\frac{W}{\rho \cdot c_0} = \frac{W_a}{\rho \cdot c_0} + j \cdot \frac{x}{\rho \cdot c_0} = \frac{(1+r)}{(1-r)} \quad (1.24)$$

En un material perfectamente absorbente acústico, el coeficiente de reflexión es igual a cero, por lo que la impedancia acústica específica es igual a uno ($W=1$). Por otro lado, cuando un material es perfectamente reflectante, la impedancia acústica específica sería infinita ($W=\infty$).

1.1.6.3. Medida de la porosidad

La estructura de los materiales absorbentes porosos de naturaleza fibrosa consiste básicamente en un esqueleto, en nuestro caso flexible. El aire existente en el interior del material poroso-fibroso, es obligado a moverse produciéndose pérdidas de energía por el rozamiento con las fibras del material. Los poros del material, deben estar intercomunicados entre sí. La porosidad de un material (\emptyset) se puede definir, como la relación existente entre el volumen de aire que ocupa, los poros existentes dentro de un material y el volumen total del material poroso, Ecuación (1.25). Si denominamos (V_E) al volumen del esqueleto y (V_A) al volumen de aire dentro del material, podemos definir (V_T) como el volumen total del material poroso.

$$\emptyset = \frac{V_A}{V_T} = \frac{V_A}{V_A + V_E} \quad (1.25)$$

La porosidad de un sistema, puede ser medida por diversos métodos. El más simple es el método directo, en el cual el volumen total del sistema, es medido y posteriormente la muestra es compactada, para remover todo el espacio poroso. Luego la diferencia de estos volúmenes, nos da la porosidad total del sistema.[21, 22]

1.1.6.4. Medida de la tortuosidad

La tortuosidad (T) determina el grado de sinuosidad, que presenta el camino por donde el fluido atraviesa el medio [23]. La tortuosidad, se mide por un medio no acústico estudiado por Brown, [24] según este método podemos obtener la tortuosidad mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{\Sigma_m}{\Sigma_e} \emptyset \quad (1.26)$$

Siendo (\emptyset) la porosidad abierta del material y (Σ_m) y (Σ_e) las resistividades eléctricas medidas para el electrolito con y sin el material poroso, respectivamente.

La medida consiste, en asimilar la conducción eléctrica del material de un electrolito, con el flujo de aire que puede fluir a través del mismo material.

Cuando el flujo de aire atraviesa un material, produce una diferencia de presión a ambos lados, de la muestra (ΔP) al paso de un flujo de aire (F) oponiendo el material una resistencia (σ) Ecuación:

$$\Delta P = \sigma \cdot F \quad (1.27)$$

Análogamente, una diferencia de potencial a ambos lados de la muestra (ΔV), produce una corriente de intensidad (A), resultante de la resistencia (R). Ecuación:

$$\Delta V = R \cdot A \quad (1.28)$$

De las siguientes Ecuaciones (1.29 a) (1.29 b) (1.29 c) con densidad de corriente (i) conductividad (Q) y campo eléctrico (E).

$$i = A/S \quad (1.29 \text{ a})$$

$$Q = \frac{i}{E} \quad (1.29 \text{ b})$$

$$E = \frac{V_B - V_A}{L} \quad (1.29 \text{ c})$$

Llegamos a la expresión de resistencia eléctrica, Ecuación:

$$R = \frac{1}{Q} \cdot \frac{L}{S} = \Sigma \frac{L}{S} \quad (1.30)$$

Siendo (Q) la resistividad eléctrica, que es la inversa de la conductividad. La medida consiste, en asimilar la conducción eléctrica de la mezcla del material con un fluido conductor, con la corriente de aire capaz de fluir a través del mismo material.

En el caso de una corriente de aire atravesando el material, tenemos una diferencia de presión a ambos lados de la muestra, al paso de un flujo de aire ofreciendo el material una resistencia.

Por analogía eléctrica Figura (1.12) una diferencia de tensión a ambos lados de la muestra, produce una corriente, según la resistencia eléctrica

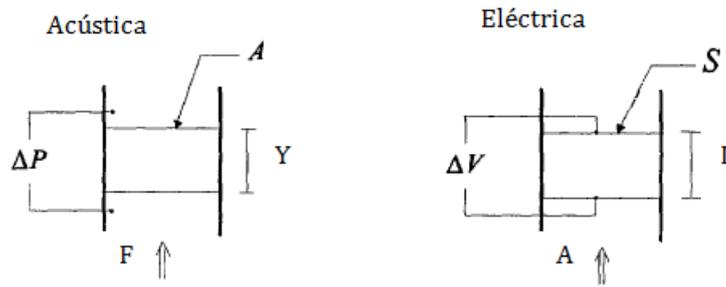


Figura 1. 10. Analogía acústico-eléctrica, para el cálculo de la tortuosidad

Entonces en un campo acústico tenemos:

$$\Delta P = \left(\pi \cdot \frac{Y}{A} \right) \cdot F \quad \text{Siendo} \quad \pi = \frac{\Delta P}{F} \cdot \frac{A}{Y} \quad (1.31)$$

Y en un campo eléctrico:

$$\Delta V = \left(\Sigma \frac{L}{S} \right) \cdot A \quad \text{con} \quad \Sigma = \frac{\Delta V}{A} \cdot \frac{S}{L} \quad (1.32)$$

Evidenciamos, que (Y) y (A) son equivalentes a (L) y (S) respectivamente manteniendo la nomenclatura acústica y eléctrica.

1.1.6.5. Medida de la resistividad al flujo de aire.

La resistividad al flujo de aire, evalúa la oposición que ejerce un material poroso al paso de un flujo de aire a través de él. El termino resistividad parte de la consideración:

- De la resistencia de una muestra al paso de una corriente de aire. Se puede definir, Ecuación(1.33) como la relación entre la caída de presión (ΔP) entre ambos lados y el flujo (F) que la atraviesa [25], siendo la resistencia al flujo de aire (σ) Ecuación:

$$\sigma_F = \frac{\Delta P}{F} \quad (1.33)$$

$$(P_a \cdot m^{-3} \cdot s = kg \cdot m^{-4} \cdot s^{-1})$$

- La resistencia específica (σ) se define, Ecuación (1.34) como la diferencia de presión a ambos lados de la muestra de sección recta ($\$$) y la velocidad del flujo (U) que incide sobre ella.

$$\sigma = \frac{\Delta P}{U} = \frac{\Delta}{F} \cdot \$ = \sigma_F \cdot \$ \quad (1.34)$$

$$(P_a \cdot m^{-1} \cdot s = kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$$

De las dos definiciones anteriores se deduce, la resistividad al flujo de aire ($\$$) y constituye la resistencia específica al flujo de aire (σ) por unidad de espesor (h).

$$\S = \frac{\Delta P}{U} \cdot \frac{1}{h} = \frac{\Delta P}{F} \cdot \frac{\$}{h} \quad (1.35)$$

$$(P_a \cdot m^{-2} \cdot s = kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1})$$

1.1.6.6. Permeabilidad al aire

Es la velocidad del flujo de aire que pasa perpendicularmente a través de la superficie de ensayo de una probeta de material fibroso, con una diferencia de presión definida y durante un tiempo determinado.

Para su resolución,[26] se obtiene la media aritmética de las lecturas individuales y el coeficiente de variación (aproximando al 0,1% más próximo).

Se calcula la permeabilidad al aire \mathbb{F} , expresada en milímetros por segundo, utilizando la Ecuación (1.36).

$$\mathbb{F} = \frac{\varpi}{\mathring{A}} \times 167 \quad (1.36)$$

Siendo:

- ϖ La media aritmética del caudal de flujo de aire, en litros por minuto
- \mathring{A} El área de la muestra ensayada, en centímetros cuadrados
- 167 El factor de conversión desde decímetros cúbicos (o litros) por minuto por centímetro cuadrado a milímetros por segundo.

1.1.7. Diseño de experimentos

1.1.7.1. Historia del diseño estadístico

El desarrollo moderno del diseño experimental estadístico, [27] se puede agrupar en cuatro eras.

La era agrícola empezó entre los años 1920 y primeros de 1930, encabezada por el trabajo de Sir Ronald A. Fisher, en la Estación Agrícola experimental de Rothamsted en Inglaterra, donde Fisher se responsabilizó de las estadísticas y el análisis de datos.

Fisher se percató, de las deficiencias que adolecía la metodología experimental que generaba los datos, que obstaculizaban con frecuencia el análisis de los datos de los sistemas agrícolas.

Interaccionando, con científicos e investigadores de diversos campos, desarrolló la idea precursoras de los tres principios básicos del diseño experimental:

- La aleatorización
- La realización de replicas
- La formación de bloques

De manera sistemática, Fisher utilizando el conocimiento y los principios estadísticos en el diseño de los procesos experimentales, incorporó el concepto de diseño factorial y el análisis de varianza.

La aplicación del diseño estadístico en la industria, se inició en la década de los años treinta, el desarrollo de la metodología de superficies de respuesta (MSR) desarrollado por Box y Wilson, basada en las diferencias ente estos experimentos que se diferenciaban de sus contrapartes agrícolas en 1º lugar, la variable de respuesta puede observarse casi de inmediato y en 2º lugar, se puede obtener inmediatamente información crucial, de un pequeño grupo de muestras, que puede usarse para planear el próximo experimento.

Estas dos características de los experimentos industriales, fueron denominadas por Box, como inmediatez y secuencialidad.

En los 30 años siguientes, la (MSR) y otras técnicas de diseño se generalizaron en la industria química y de proceso, sobre todo en investigación y desarrollo.

En la industria occidental, creció el interés por el mejoramiento de la calidad a finales de la década de los 70, empezando la tercera era del diseño estadístico. Genichi Taguchi con su trabajo, obtuvo un impacto significativo en el aumento del interés y el uso de los experimentos diseñados, Taguchi denominó el diseño paramétrico robusto:

- Hacer procesos insensibles a los factores ambientales o de otra índole, difíciles de controlar.
- Fabricar productos insensibles a la variación transmitida por los componentes.
- Encontrar los niveles de las variables del proceso que obliguen a la media a un valor deseado mientras que al mismo tiempo se reduzca la variabilidad en torno a este valor.

Para fines de la década de los 80, después de las controversias suscitadas entre Taguchi y otros autores, se inicia la cuarta era del diseño estadístico, incluyendo un renovado interés, por parte de investigadores y profesionales en el diseño de experimentos.

1.1.7.2. Introducción al diseño de experimentos.

El Diseño de Experimentos, tiene como objetivo, la obtención eficiente de datos con la mayor eficiencia informativa, aplicando métodos de cálculo estadístico. En cualquier proceso experimental, son varios los factores que pueden afectar a los resultados. Tradicionalmente los efectos de cada factor, se estudian por separado y secuencialmente, teniendo en cuenta, que además de los efectos individuales se producen interacciones entre ellos que afectan al resultado final, es desaconsejable seguir empleando estas técnicas, actualmente es más efectivo, recurrir a las técnicas del Diseño Estadístico de Experimentos, para un estudio simultáneo del efecto de todos los factores de interés.

1.1.7.3. Partes del diseño de experimentos.

Tabla 1. 10. Pautas generales para diseñar un experimento

1.	Identificación y exposición del problema	Planificación previa al experimento	
2.	Elección de los factores los niveles y los rangos		
3.	Selección de la variable de respuesta		
4.	Elección del diseño experimental		
6.	Análisis estadístico de los datos		
7.	Conclusiones y recomendaciones		

1. Identificación y enunciación del problema. Desarrollo de una enunciación clara solicitando aportaciones de todas las áreas involucradas, enumerando los problemas o preguntas específicas que van a abordarse en el experimento, dándole un enfoque de equipo.
2. Elección de los factores los niveles y los rangos. Los factores potenciales del diseño, son los que se quieren hacer variar, cuando el número de factores es amplio, es conveniente elaborar una clasificación adicional de los mismos, clasificándolos como: factores del diseño, factores que se mantienen constantes y factores a los que se permite variar, los factores potenciales del experimento son los que se quieren hacer variar en el experimento, los factores que se mantienen constantes son variables que pueden tener algún efecto sobre la respuesta pero no son de interés para la finalidad del experimento, las unidades experimentales a los que se aplican los factores del diseño no son homogéneos, con frecuencia se ignora esta variabilidad de una unidad a otra y se confía en la aleatorización para compensar cualquier efecto del material o la unidad experimental, muchas veces se supone, que los efectos de los factores que se mantienen constantes y de los efectos a los que se permite variar son relativamente pequeños.
3. Selección de la variable de respuesta. Se deberá tener la certeza, de que esta variable proporciona realmente información útil acerca del proceso. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar o ambos, de la característica medida, será la variable de respuesta, pueden darse respuestas múltiples.
4. Elección del diseño experimental. La elección del diseño, implica la consideración del tamaño de la muestra (número de replicas) la selección de un orden adecuado para los ensayos experimentales y la

determinación de contemplar la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización.

5. Realización del experimento. Asegurarse de que el proceso se esté desarrollando con arreglo a la planificación. Los errores en el procedimiento experimental en este punto, generalmente invalidarían la validez experimental.
6. Análisis estadístico de los datos. Se utilizarán métodos estadísticos como instrumento de análisis de los datos, para asegurar la objetividad de los resultados y las conclusiones, evitando la mera apreciación
7. Conclusiones y recomendaciones. Finalizado el análisis de los datos se deben sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar una línea de acción. La utilidad de los métodos gráficos, son muy útiles para representar los resultados, también deberán realizarse pruebas de confirmación, como validación de las conclusiones del experimento.

1.1.7.4. Diseño factorial

Se usa en experimentos que incluyen varios factores, cuando queremos estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. El más importante es el de k factores, cada uno con sólo dos niveles, que pueden ser cuantitativos o cualitativos. Una réplica completa de este diseño requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se le llama diseño factorial 2^k , este diseño es de particular utilidad en la etapa inicial del trabajo experimental, cuando se estén investigando muchos factores, proporciona el menor número de muestras con las que pueden estudiarse k factores, en un diseño factorial completo, su uso es amplio en los experimentos de tamizado o selección de factores.

Al existir solo dos niveles para cada factor, la respuesta será aproximadamente lineal en el rango elegido para los niveles de los factores.

El primer diseño de la serie 2^k es el que solo tiene dos factores, cada uno se experimenta a dos niveles, a este diseño se le llama diseño factorial 2^2 .

1.1.7.5. Anova en diseños 2k

El análisis de la varianza (ANOVA, Analysis of variance) [28] engloba modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en los cuales la varianza está repartida en ciertos componentes, debido a diferentes variables explicativas.

El análisis de la varianza parte de los conceptos de regresión lineal. Un análisis de la varianza, permite determinar si diferentes tratamientos, muestran diferencias significativas o puede suponerse que sus medidas poblacionales no difieren.

Permite superar las limitaciones de hacer contrastes bilaterales por parejas, que no es el método óptimo para la determinación, si un conjunto de variables con $n > 2$ presentan diferencias entre sí.

Siendo el primer concepto fundamental, que todo valor observado puede expresarse mediante la Ecuación (1.37)

$$y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij} \quad (1.37)$$

Donde:

y_{ij} Valor observado (variable dependiente) valor j-ésimo del tratamiento, i-ésimo

μ Constante que en recta de regresión, equivale a la ordenada en el origen

T_i Variable que varía de tratamiento a tratamiento

ϵ_{ij} Variable aleatoria que añade a la función cierto error, que desvía la puntuación observada de la puntuación pronosticada

En un diseño 2^k con r replicaciones, la variabilidad total de los $rx2^k$ datos, medida por su SC_{total} con $rx2^k - 1$ grados de libertad, puede en principio descomponerse en los siguientes términos en el Anova:

K Efectos simples, cada uno de ellos con $2 - 1 = 1$ g.l.

$\binom{K}{2}$ Interacciones dobles, cada una con $1 \times 1 = 1$ g.l.

$\binom{K}{3}$ Interacciones triples, cada una con $1 \times 1 \times 1 = 1$ g.l.

En la práctica, rara vez se calculan y estudian, las interacciones de orden superior a 2.

En el caso de factores a dos niveles, la suma de cuadrados de un efecto (simple o de interacción) puede obtenerse fácilmente a partir de la Ecuación (1.38)

$$SC_{\text{Efecto}} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de datos}}{4} \text{Efecto}^2 \quad (1.38)$$

Donde cada efecto se obtiene, por la diferencia entre la media de las pruebas asociadas a signos + en la columna del efecto y la media de las pruebas asociadas a signos – en dicha columna.

La suma de cuadrados residual se calcula, por diferencia respecto a la total, al igual que sus grados de libertad.

1.1.7.6. Diagrama de Pareto

El Principio de Pareto, afirma que en todo grupo de elementos o factores que contribuyen a un mismo efecto, unos pocos son responsables de la mayor parte de dicho efecto.

El Análisis de Pareto, es una comparación cuantitativa y ordenada de elementos o factores, según su contribución a un determinado efecto. El objetivo de esta comparación, es clasificar dichos elementos o factores en dos categorías: Las "Pocas Vitales" (los elementos muy importantes en su contribución) y los "Muchos Triviales" (los elementos poco importantes en ella).

Las características principales

- Priorización. Identifica los elementos que más peso o importancia tienen dentro de un grupo
- Unificación de Criterios. Enfoca y dirige el esfuerzo de los componentes del grupo de trabajo, hacia un objetivo prioritario común
- Carácter objetivo. Su utilización fuerza al grupo de trabajo a tomar decisiones basadas en datos y hechos objetivos y no en ideas subjetivas

El Diagrama de Pareto, comunica de forma clara, evidente y de un "vistazo", el resultado del análisis de comparación y priorización.

1.1.7.7. Modelos para los datos

Tanto el modelo de las medias como el de los efectos, son modelos estadísticos lineales, la variable de respuesta es una función lineal de los parámetros del modelo. Aunque ambas formas del modelo son útiles, el modelo de los efectos se encuentra con mayor frecuencia en la literatura del diseño experimental.

El diseño experimental, es un diseño completamente aleatorizado. Los objetivos son: probar las hipótesis apropiadas acerca de las medias de los tratamientos y estimarlas. Para aprobar las hipótesis, se supone que los errores del modelo, son variables aleatorias que siguen una distribución normal e independiente con media cero y varianza σ^2 , se supone que la varianza es constante para todos los niveles. Esto implica que las observaciones son mutuamente independientes.

1.1.7.8. Optimización de un proceso

En un experimento de caracterización, el interés suele centrarse en determinar las variables del proceso que afectan la respuesta. El siguiente paso es la optimización, consiste en determinar la región de los factores importantes, que conduzcan a la mejor respuesta posible, si la respuesta es el rendimiento, se buscaría la región de rendimiento máximo, mientras que si la respuesta es la variabilidad de una dimensión crítica del producto, se buscaría una región de variabilidad mínima.

La metodología de superficies de respuesta o MSR, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas, en los que una respuesta de interés, recibe la influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta.

1.1.8. Búsqueda bibliográfica

Se ha realizado un trabajo de búsqueda, de las publicaciones referentes a la caracterización acústica, de materiales procedentes del residuo de neumáticos fuera de uso (NFU's). A continuación se expone, la metodología de búsqueda desarrollada en este estudio, junto con los resultados obtenidos.

1.1.8.1. Fuentes de información consultadas.

En la actualidad, existen numerosas bases de datos que permiten realizar una búsqueda de forma sencilla. La plataforma utilizada para su localización, es por Internet y en diferentes redes internas de diversas instituciones. Este medio facilita el acceso e implementa facilidades en el tratamiento de la información.

De las diversas bases de datos, destacan por su volumen de datos las bases de datos integradas en los "Citation Index", comprendida en tres series de bases de datos multidisciplinarias, que abarcan todas las ramas de la ciencia, las ciencias sociales, las

humanidades y las artes. En la actualidad, todas las series de los “Citation Index” están integradas dentro de la denominada “Web of Science”. A su vez, esta base de datos esta englobada en una plataforma denominada “Web of Knowledge”, esta plataforma permite la consulta interrelacionada de las siguientes bases de datos:

- “Web of Science”: Base de datos que permite la búsqueda de artículos dispone de un índice de citas desde 1945.
- “Journal Citación Report on the web”: ofrece información de publicaciones, como factor de impacto por año.
- “ISI proceedings”: Base de datos de actas de congresos.
- “Current Contents Connect”: Boletín de sumarios.

Existen otras bases de datos dedicadas a tema científicos, como “Scifinder Scholar” especializada en temas referentes a la química orgánica e inorgánica. También existe una base de datos bibliográfica denominada “ICYT”, elaborada por el CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) que recoge la literatura científica contenida en publicaciones españolas de ciencia y tecnología. Analiza: revistas, informes, congresos, libros colectivos, etc. Publicados desde 1979 hasta la actualidad. Resalta también, una base de datos de tesis doctorales, denominada “Teseo”, gestionada por el Ministerio de Ciencia Educación y Cultura, donde se recoge y permite recuperar información de las tesis doctorales leídas y consideradas aptas en las Universidades españolas desde 1976.

La plataforma “Web of Knowledge” y concretamente, su base de datos “Web of Science”, es la herramienta fundamental que hemos utilizado, por la enorme cantidad de citas recogidas, para la realización de la búsqueda de artículos relacionados con nuestro trabajo combinando diferentes campos, con el fin de obtener información referente a la caracterización acústica de materiales fibrosos, especialmente de materiales procedentes del residuo de neumáticos fuera de uso (NFU's).

1.1.8.2. Fuentes de búsqueda utilizadas.

Se han realizado diferentes búsquedas, para poder abarcar en gran medida la gran mayoría de trabajos. Se han utilizado diferentes palabras claves de búsqueda. Posteriormente se ha revisado todos los resultados obtenidos, para su clasificación y el posterior estudio pormenorizado, además se ha utilizado el operador booleano “and” que permite acotar la búsqueda, filtrando los resultados obtenidos.

Así como ejemplo, referente a la caracterización acústica, se han utilizado como principales funciones de búsqueda las siguientes palabras claves: “ground tyre rubber

and fiber ” crum rubber and fiber” “fiber”; “recycled fiber”; “fluff”; “impedance tube fiber”; “absortion coefficient and fiber”.

Las búsquedas se han efectuado durante el periodo 2004-2014 y 2015.

Tabla 1.11. Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada “ground tyre rubber and fiber”

Palabras clave	2004-2014	2015
Ground tyre rubber and fiber	26	2
Ground tyre rubber and fiber and acoustics	2	0
Ground tyre rubber and fiber and absorbers	1	0
Ground tyre rubber and fiber and acoustics and absorbers	1	0

Tabla 1.12. Tabla Resultados obtenidos en función de las palabra clave de búsqueda utilizada “crumb rubber and fiber”

Palabras clave	2004-2014	2015
Crumb rubber and fiber	31	2
Crumb rubber and fiber and acoustics	0	0
Crumb rubber and fiber and absorbers	0	0
Crumb rubber and fiber and acoustics and absorbers	0	0

Tabla 1.13. Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada “fiber”

Palabras clave	2004-2014	2015
Fiber and acoustics	1360	70
Fiber and absorbers	789	50
Fiber and acoustics and absorbers	31	1

Tabla 1.14. Tabla Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada recycled “fibers”.

Palabras clave	2004-2014	2015
Recycled fibers and acoustics	36	2
Recycled fibers and absorbers	10	1
Recycled fibers and Crumb rubber	11	2
Recycled fibers and Ground tyre rubber	18	1
Recycled fibers and rubber	86	7
Recycled fibers and acoustics and rubber	0	0
Recycled fibers and absorbers and rubber	1	0

Tabla 1.15. Resultados obtenidos en función de las palabra clave de búsqueda utilizada “fluff”

Palabras clave	2004-2014	2015
Fluff and acoustics	3	0
Fluff and absorbers	2	0
Fluff and fiber	4	0
Fluff and acoustics and fiber	1	0
Fluff and fiber and rubber	1	0

Tabla 1.16. Tabla Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada “impedance tube and fiber

Palabras clave	2004-2014	2015
Impedance tube and fiber	58	3
Impedance tube and fiber and acoustics	16	1
Impedance tube and fiber and absorbers	0	0
Impedance tube and fiber and rubber	2	0

Tabla 1.17. Resultados obtenidos en función de las palabra clave de búsqueda utilizada “absorption coefficient and fiber”.

Palabras clave	2004-2014	2015
Absorption coefficient and fiber	687	34
Absorption coefficient and acoustics and fiber	0	0
Absorption coefficient and absorbers and fiber	53	3
Absorption coefficient and fiber and rubber	14	3
Acoustic absorption coefficient and fiber and rubber wastes tyre	3	0
Acoustic absorption coefficient and fiber and rubber wastes tyre recycled	0	0

Tabla 1.18. Palabras clave que aparecen en más número de publicaciones

Palabras clave	2004-2014	2015
Fibers and acoustics	1360	70
Fibers and absorbers	789	50
Absorption coefficient and fiber	687	34
Recycled fibers and rubber	86	7
Impedance tube and fiber	58	3
Recycled fibers and acoustics	36	4

Tabla 1.19. Palabras clave que aparecen en menos número de publicaciones

Palabras clave	2004-2014	2015
Crum rubber and fiber and absorbers	0	0
Crum rubber and fiber and absorbers and acoustics	0	0
Recycled fibers and acoustics and rubber	0	0
Impedance tube and absorbers and fiber	0	0
Absorption coefficient and acoustics and fiber	0	0
Acoustic absorption coefficient and fiber and rubber wastes tyre recycled	0	0

1.1.8.3. Discusión

Si nos centramos en las palabras, “fiber and acoustics y fibers and absorbers”, el número total de artículos encontrados es de 120, evidentemente amplio debido a la gran cantidad de productos fibrosos analizados y modelizados.

Cuando el campo se restringe a “recycled fibers and acoustics y recycled fibers and absorbers” el número de artículos en el 2015 disminuye a 3, [27-29] pero cuando se introduce la frase “recycled fibers and acoustics and absorber” Tabla (1.14) no encontramos ningún artículo relacionado.

1.1.8.4. Conclusión

En el campo del reciclado de fibras y fluff, las pocas referencias encontradas justifican el proceso innovador que supone nuestra investigación.

1.1.9. Estado del arte

Son numerosos los trabajos y estudios, que buscan una salida a los materiales generados con los NFUs en el campo de la acústica. A.bartl [29] repasa las tecnologías disponibles para el reciclaje de las fibras en los textiles, alfombras, materiales compuestos, especifica la necesidad de caracterizar y procesar adecuadamente las fibras provenientes de los NFUs, como materia prima valiosa y apunta como una posible aplicación, la adición de estas fibras al hormigón como material de refuerzo, aumentando la resistencia a las sollicitudes mecánicas.

F. Asdrúbali, [30] analiza y optimiza el proceso de manufactura de materiales granulados provenientes del reciclaje de los neumáticos, como candidatos a ser utilizados en aislantes del sonido. Investigando la influencia del tamaño de grano la concentración y la densidad, creando un prototipo a gran tamaño que al ser expuesto al sonido en una habitación reverberante (ISO 140-8) obtuvo unos resultados comparables a los materiales existentes en el mercado.

J.Ramis, [31] busca nuevos materiales para ser utilizados en el ámbito de la insonorización en la edificación y presenta un material absorbente basado en fibras vegetales, concretamente el kenaf y propone una modelización empírica basada en el comportamiento absorbente de varias composiciones de este material, en función de las frecuencias.

La caracterización acústica de materiales fibrosos, ha sido ampliamente estudiada [13, 15, 16, 32-43]. Hay que destacar los trabajos de Delany and Bazley, [32] donde se estudian los valores de la impedancia característica y de la constante de propagación en diferentes materiales fibrosos.

Por otro lado Allard et al. [13, 33] Estudian modelos predictivos, para la impedancia superficial a altas y bajas frecuencias, en materiales fibrosos absorbentes acústicamente.

Biot [34, 35] analiza las teorías sobre la propagación de una onda elástica, a bajas y altas frecuencias en medios porosos, conteniendo un fluido compresible, donde la densidad del medio y el fluido son comparables.

Bies, Franken y Hansen [36-38] demuestran que la información obtenida de las medidas de la resistencia al flujo, nos permiten caracterizar el comportamiento acústico de materiales, para su uso como absorbentes acústicos.

El problema de las bajas frecuencias, estudiado por Berhens y Kirby[39, 40] Berhens, [39] presenta un método, para extrapolar una fórmula empírica para un absorbente acústico a bajas frecuencias basado en el método generalizado de Rayleigh. Kirby y Cummings [40] desarrollan, un método de predicción semiempírico para medios fibrosos, que plantea predicciones razonables para las propiedades acústicas a bajas frecuencias y que se ajustan también a las propiedades acústicas a altas frecuencias.

Varonina, [15, 16] plantea un modelo empírico mejorado de propagación acústica en materiales fibrosos, en función de la porosidad y el diámetro de fibra, basado en la teoría de Ryleigh.

Miki, [41] presenta un nuevo modelo de comportamiento acústico, para la impedancia y la constante de propagación, modificando el modelo de Delany y Bazley.

Modelos simplificados de comportamiento acústico dan buenos resultados en muchos casos prácticos.

Alba, Ramis et al. [42] realizan un estudio de los diferentes tipos de modelos simplificados, para diferentes tipos de productos absorbentes acústicos, presentando un nuevo modelo simplificado, que reagrupa a varios de ellos.

Arenas y Crocker, [43] realizan un amplio estudio sobre los diferentes tipos de materiales absorbentes, tanto fibrosos como granulares, analizando la influencia de la morfología en su comportamiento acústico, llegando incluso a analizar este comportamiento en materiales inteligentes.

Las propiedades acústicas y la modelización del comportamiento acústico de diferentes tipos de fibras, se han analizados ampliamente, [19, 31, 44-49] en el trabajo de Ballagh, [44] se analizan las propiedades acústicas de la lana, como posible sustituta a la fibras de vidrio y de roca, se pueden producir foams de resistividades entre 500 y 15000 MKS, analizándose sus aplicaciones como materiales de absorción acústica, en paredes y en conductos,.

Wang and Torng, [45] analizan las características de absorción acústica de fibras de vidrio y roca que son producidas en Taiwán, se realizan medidas de la resistencia al flujo y el coeficiente de absorción acústica, de una gran cantidad de muestras de estos productos, la impedancia característica es estimada adicionalmente mediante el modelo de Allard et al.

Garai y Pompoli, [19] desarrollan un nuevo modelo empírico, para predecir: la resistencia al flujo, la impedancia acústica y el coeficiente de absorción; de muestras hechas con fibras de poliéster, se analizaron 38 muestras, de diferentes espesores y densidades, así como diferentes diámetros de fibra. Los resultados muestran, [48] un buen ajuste con los predichos por el modelo, Kino y Ueno [46, 47] que realizan medidas de las longitudes características de 6 muestras de lana de vidrio y 6 muestras de fibras de poliéster, [46] utilizando las fórmulas de Bies y Allard, se confirma que las longitudes características, pueden ser deducidas a partir del diámetro de las fibras. En cuanto a la fibra de poliéster se propone una nueva relación entre la resistencia al flujo, el diámetro de la fibra y la densidad aparente. Usando los modelos de Bies-Allard y Kino-Allard[47] se calcula: la porosidad, la resistencia al flujo, las longitudes características a partir del diámetro medio de la fibra, la densidad aparente y la densidad del material constitutivo de la fibra, en fibras de vidrio poliéster y melanina.

Alba, Ramis et al.[31, 48] analizan el comportamiento acústico de la fibra de Kenaf [31] y proponen, un nuevo modelo empírico de comportamiento acústico para este material, basado en la impedancia acústica y la constante de propagación,

dependiendo de la resistencia al flujo, el diámetro de la fibra y la densidad. El mismo trabajo se realiza para la fibra de coco [48].

La influencia de la compresión, sobre los productos fibrosos para aislamiento acústico, se analiza en Castagnède et al.[17] donde se analiza la influencia de la compresión sobre propiedades como: la porosidad, la resistividad, la tortuosidad y los factores de forma.

Ya en el campo del uso y caracterización de materiales fibrosos reciclados, cabe destacar [50-53]. Youneung y Changhwang, [50] analizan los coeficientes de absorción acústica para diferentes mezclas de fibras de poliéster reciclado, con el objetivo de reemplazar a materiales convencionales usados como aislantes acústicos.

En el trabajo de Lou et al.[51] se analiza mediante la medición del coeficiente de absorción acústica según la norma ASTM E 1050, el comportamiento acústico de nonwoven, obtenidos con mezclas de fibras de polipropileno y polyester recicladas, analizando también, la influencias en este tipo de mezclas, comprobándose que el coeficiente de absorción acústica se incrementa con el espesor de la muestras y disminuye con la densidad.

Seddeq et al. [52] investigan el coeficiente absorción acústica de varios tipos de materiales reciclados, incluyendo: fibras naturales, sintéticas y de carácter lignocelulósico, comparando los valores obtenidos en diferentes rangos de frecuencias.

Zhixing; Zhigang et al.[53] investigan la posibilidad de emplear fibras de vidrio recicladas provenientes de los circuitos impresos, para su utilización como absorbentes acústicos y térmicos, comparando sus propiedades acústicas con productos comerciales como: perlita, vermiculita y fibra de vidrio comercial.

Dentro del campo del reciclado de la fibra proveniente del reciclado de neumáticos fuera de uso, denominada fluff, encontramos los trabajos [54, 55]. Maderuelo, Nadal et al. [54] presentan los resultados obtenidos en un nuevo material obtenido utilizando fluff. Midiendo la impedancia acústica y el coeficiente de absorción acústica, tanto de muestras elaboradas solo con fibras y de muestras compuestas de fibra y GTR (Ground Tire Rubber) procedente también del triturado de los NFUs (Neumáticos fuera de uso).

Jimenez-Espadafor et al.[56] investigan en su trabajo, las propiedades mecánicas y acústicas de un material compuesto de fluff y adhesivo y analizan también los valores obtenidos del NCR (Noise Reduction Coefficient).

1.1.10. Objetivos

Siendo la problemática medioambiental, una cuestión de vital importancia para la consecución de un desarrollo sostenible, la presencia de la gran cantidad de residuos de neumático existente, plantea una serie de riesgos que van, desde los grandes incendios producidos por la inflamabilidad de estos productos, emisores de grandes cantidades de residuos tóxicos a la atmósfera, ocasionados en los grandes vertederos acumuladores de ingentes cantidades de neumáticos. El embalsado de agua en su interior, es buen caldo de cultivo para propiciar la creación de plagas de mosquitos, así como cobijo para la existencia de roedores, entre otros inconvenientes.

En un principio, nos planteamos buscar un mecanismo de reciclado para el producto, así como el caucho y el acero tenían un uso bastante extendido en carreteras mas silenciosas y en refuerzo para hormigón armado entre otros; a las fibras textiles provenientes del cord de los neumáticos, no se les había dado otra aplicación que no fuera la incineración o su acumulación en vertederos [57].

Gracias a la colaboración de empresas dedicadas al reciclado de los Neumáticos Fuera de Uso (NFUs), que nos han suministrado las fibras provenientes de diferentes métodos de extracción, por lo tanto de diferente estructura fibrilar del material.

En la introducción se indicó, que el objetivo de la tesis es la elaboración de productos de naturaleza fibrilar, que sean de aplicación en la conformación de paneles para utilizarlos, como parte del acondicionamiento acústico en arquitectura.

Por tanto, el objetivo general del presente trabajo, es aprovechar el reciclado de este producto, para obtener un producto de mayor valor añadido, logrando con ello dar una solución viable al problema medioambiental planteado y crear las bases para el desarrollo en un futuro de un mercado para este tipo de residuo, mediante el desarrollo de estándares de calidad. Para ello nos planteamos la siguiente secuencia en el proceso de investigación:

1. Caracterización de las fibras suministradas, a nivel morfológico, térmico y composicional.
2. Investigación de un proceso para la elaboración de productos, de mayor valor añadido y su optimización.
3. Caracterización de parámetros funcionales de las muestras obtenidas.

1.1.10.1. Caracterización morfológica.

Emplearemos para la determinación morfológica de las fibras, primero la observación mediante el empleo de lupas y posteriormente la microscopía electrónica de barrido. Estas técnicas nos permitirán determinar las características generales, en cuanto a morfología, dimensiones lineales y seccionales de las fibras, así como de su distribución muestral.

1.1.10.2. Caracterización composicional

La técnica empleada aquí será el análisis por medio de reactivos, planteándonos en un principio, la determinación cualitativa y cuantitativa de la composición de las fibras provenientes del cord.

En cuanto a la búsqueda del proceso; la idea inicial fue desarrollar un proceso textil que pudiera configurar un producto compactado, desechado el hilado y posterior tisaje de las fibras por un lado, debido a la poca longitud de las fibras en algunos casos casi polvo y por otro lado por las adherencias de partículas de caucho, que las hacían inviables para un proceso de cardado, operación inicial, en el proceso de hilatura.

La alternativa por la que nos declinamos, a fin de conseguir que los citados inconvenientes se transformaran en ventajas, fué la tecnología non-woven, en la cual la consolidación por medio del calor (termo solado), se produce en uno de sus casos, mediante la incorporación en la mezcla, de fibras termo plásticas, que con un punto de fusión inferior al resto de fibras, actúan como ligante sustituyendo a los adhesivos.

Estas tecnologías aplicadas a nuestro material, cristalizaron en la aplicación de un proceso de termo compresión, valiéndonos del punto de fusión de las partículas de caucho, insertas en el material, inferior al de algunas fibras presentes, y al punto de fusión de las fibras recuperadas del reciclaje que al reblandecerse por medio de la temperatura y al aplicarles una solicitud de compresión, pueden actuar como agente aglutinador del material fibrilar; evitando de este modo, el uso de adhesivos que encarecen el producto y es generalmente la técnica mayoritaria hasta ahora, utilizada por la mayoría de investigadores en la confección de productos similares.

Otra ventaja, es la sencillez del proceso y la facilidad de reproducción del mismo en nuestro laboratorio. Hemos construido un molde para la compresión, construyendo así mismo una prensa la cual se ha adaptado a nuestro trabajo, mediante el montaje de resistencias eléctricas programables y por medio de un sistema termométrico dotado de temporizador. Las pruebas iniciales confirmaron la posibilidad de obtener un producto de compacidad óptima entre unos límites de compresión.

Dado este primer paso se plantearon para la optimización del proceso las siguientes etapas:

1.1.10.3. Búsqueda de experiencias previas.

El estudio tiene como antecedentes de partida, el trabajo realizado por Antonio Nadal Gisbert en su tesis doctoral y el mío propio en el proyecto final de carrera de Ingeniería de materiales donde se efectuó el análisis del grado de compactación óptimo del mat, consiguiendo que el material tuviera una estructura porosa, a fin de ser potencialmente factible, en el rendimiento de la absorción acústica, y unas condiciones estructurales a las solicitudes mecánicas, suficientes para su puesta en servicio investigaciones que hemos complementado, realizando búsquedas de publicaciones, revistas, y de las empresas del sector.

1.1.10.4. Estudio de la influencia de las variables presión, masa, temperatura y tiempo.

Realizando mediante termo compresión, diferentes planchas del producto y comprobando la influencia de los diferentes parámetros en las propiedades funcionales del producto obtenido.

1.1.10.5. Estudio de la influencia del espesor de las muestras.

En un proceso de optimización se ha comprobado la influencia en las propiedades físicas, densidad, grosor y grado de compactación obtenidas en las planchas de material.

La caracterización de parámetros funcionales, pretende el estudio de la relación entre los parámetros de conformación: temperatura, presión, masa y temperatura; con la determinación de los parámetros que definen el comportamiento acústicamente absorbente del producto reciclado, para ello se realizaron los útiles de corte de las probetas, para su experimentación en la obtención de valores de las siguientes propiedades: Coeficiente de absorción, Porosidad, Tortuosidad y permeabilidad al paso de un flujo de aire.

En definitiva, el objetivo de este estudio, es aportar al mundo de la acústica materiales, que puedan ser utilizados en el acondicionamiento acústico de edificios, con

bajo coste económico y que puedan competir en efectividad, con productos presentes en el mercado.

Procurando, que uno de los problemas del incremento de la polución sonora, el tráfico rodado, forme parte de la solución, mitigando en parte, el grave problema de los residuos imperecederos o perecederos a largo plazo.

1.2. Conclusiones.

El método de termocompresión en discontinuo, es el más sencillo y de una menor inversión para analizar la influencia de las variables, relativas a las propiedades conseguidas en el producto final.

Los procesos continuos como el termo solado, son procesos que requieren una inversión alta y producen grandes rendimientos.

Nuestro objetivo, es una vez caracterizado el material mediante el proceso en discontinuo, empezar a desarrollar un equipo de laboratorio, que nos permita elaborar productos de forma continua, lo cual nos permitiría el desarrollo de una patente y/o la consecución de proyectos nacionales y europeos.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Planificación del diseño de experimentos

Realizaremos un plan Factorial Equilibrado, concretamente el plan 2^2 , estudiando todos los factores a dos niveles, su facilidad en el diseño y análisis los convierte en buenos aliados de la industria al ser utilizados con óptimos resultados en la experimentación.

El estudio simultáneo de los 5 factores, se realiza mediante un único diseño de 32 pruebas, consistentes en las 16 combinaciones posibles de los dos niveles de los factores: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Tiempo (min), Masa (g) y Factor de compactación (%) en cada una de las dos clases de fibra estudiadas

Para el diseño del proceso experimental factorial, vamos a definir los siguientes niveles: los valores mínimo (-1) y máximo (+1).

Tabla 2.1. Rango experimental y niveles de las variables del proceso

Rango y Nivel		
Variables	-1	+1
X_1 : Clase de fibra nº	1	2
X_2 : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	220	240
X_3 : Tiempo (min)	60	90
X_4 : peso (g)	450	550
X_5 : FC (%)	0,5	0,64

Aplicando el mismo criterio, en cuanto a parámetros de conformación que nos indica el diseño de experimentos, se han configurado partiendo de otra clase de fibra (la que denominaremos fibra número tres) una serie idéntica de muestras, para verificar la idoneidad del sistema y diversificar la investigación con fibras procedentes del reciclado de NFU lo que repercutirá en mayor amplitud de datos en nuestro estudio.

Tabla 2. 2. Matriz de diseño de experimentos

Orden	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1º	-1	+1	+1	+1	-1
2º	+1	-1	+1	+1	-1
3º	-1	+1	+1	+1	-1
4º	-1	-1	-1	-1	+1
5º	-1	+1	-1	+1	+1
6º	+1	+1	-1	-1	-1
7º	-1	+1	+1	+1	+1
8º	-1	-1	-1	+1	+1
9º	-1	+1	-1	+1	-1
10º	-1	-1	-1	-1	-1
11º	+1	+1	-1	-1	+1
12º	+1	+1	+1	-1	-1
13º	-1	-1	+1	-1	+1
14º	+1	-1	-1	-1	-1
15º	-1	-1	+1	-1	-1
16º	+1	-1	-1	+1	-1
17º	-1	+1	-1	-1	-1
18º	+1	-1	+1	+1	+1
19º	+1	-1	-1	+1	+1
20º	-1	+1	+1	-1	+1
21º	+1	+1	+1	-1	+1
22º	-1	+1	-1	-1	+1
23º	+1	+1	+1	+1	+1
24º	-1	-1	+1	+1	-1
25º	-1	-1	+1	+1	+1
26º	+1	+1	-1	+1	+1
27º	+1	-1	+1	-1	+1
28º	+1	+1	-1	+1	-1
29º	-1	-1	-1	+1	-1
30º	+1	+1	+1	+1	-1
31º	+1	-1	-1	-1	+1
32º	+1	-1	+1	+1	-1

2.2. Materiales

Para la recuperación del material, se trituran y granulan los NFU, Figura (2.1) con la granulación se separan las fibras textiles y el acero del caucho y se obtienen gránulos y harina de caucho; en la forma, la superficie y la granulometría deseada.[57]

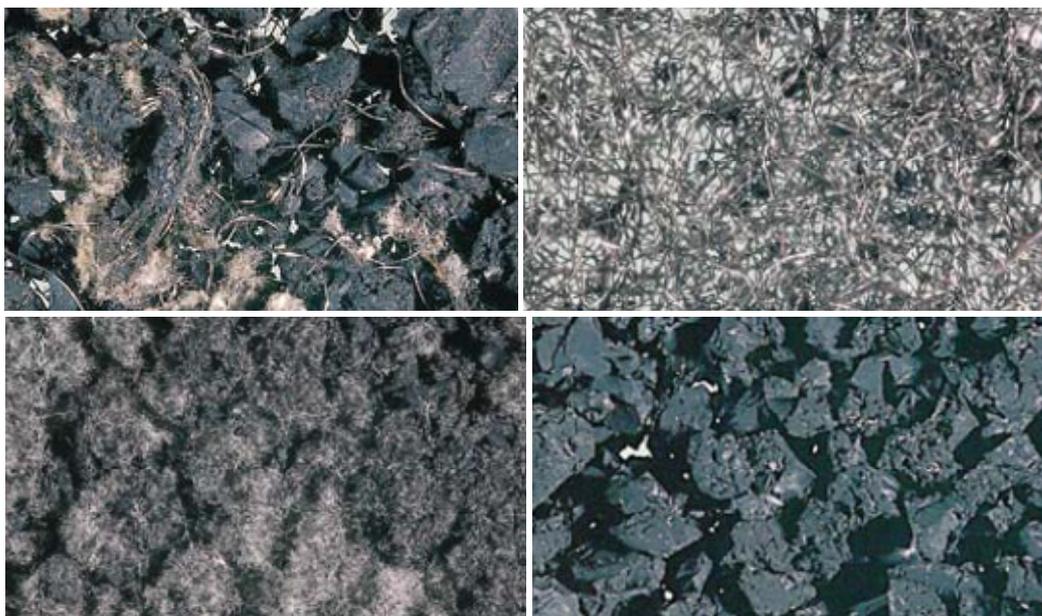


Figura 2. 1. Productos obtenidos del triturado de neumáticos

En este estudio hemos utilizado el fluff o fibras textiles Figura:



Figura 2. 2. Fluff proveniente del procesado de NFUs

2.2.1. Materiales obtenidos del reciclado de neumáticos fuera de uso

Se han empleado 3 clases de fibras procedentes del reciclado de NFU's suministradas por las empresas: (*INDUSTRIAS DEL NEUMÁTICO S.A.U Ctra. Aspe-Novelda, 3803680 ASPE (Alicante) España* y *RECIPNEU Parque Industrial de Sines - Apartado 26 7521-901 Sines – Portugal* Figura (2.3) la muestra que denominaremos número uno, está formada por hilos en su mayoría retorcidos a dos cabos, la número dos constituida por fibras muy cortas y la muestra numero 3 formada por hilos y fibras muy cortas.



Figura 2. 3. Fibras obtenidas de las empresas productoras

2.3. Equipos y procedimientos

2.3.1. Caracterización visual de fibras

El Apelmazamiento que experimentan las fibras en el proceso de empaquetado y transporte dan como resultado, conglomerados y son portadoras de partículas y adherencias de caucho, para poder obtener muestras que nos permitan un análisis visual y químico es necesario efectuar una apertura (desenmarañamiento) para conseguir su apertura y limpieza.

2.3.1.1. Preparación de las fibras

Utilizamos dos cardas manuales como la de la Figura (2.4) para abrir los enmarañamientos de fibras y separar las partículas de caucho adheridas, paralelizando las fibras y preparando la muestra para su análisis, Figura (2.3)

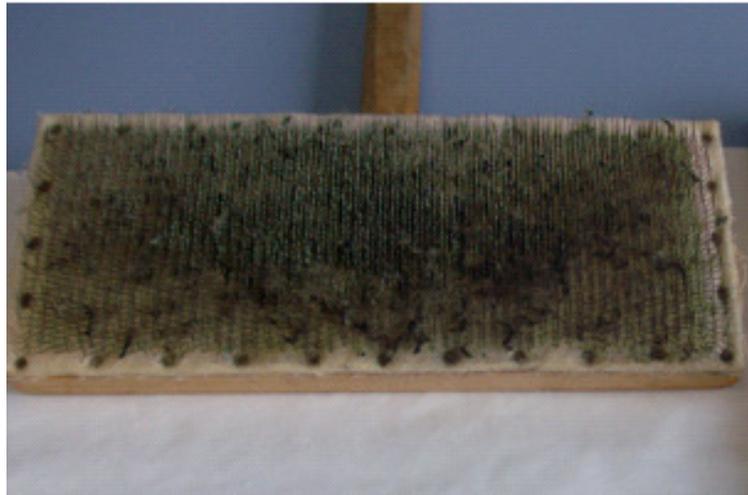


Figura 2. 4. Cardas manuales provistas de guarnición

2.3.1.2. Caracterización longitudinal de las fibras

Para caracterizar las fibras longitudinalmente, se ha utilizado la lupa estereoscópica modelo Olympus SZX7, (Japón) Figura (2.5). La lupa estereoscópica está compuesta por unos oculares con aumentos 10x y unos objetivos con un rango regulable de aumentos de 0.8x-5.6x y nos hemos ayudado de un calibre digital.

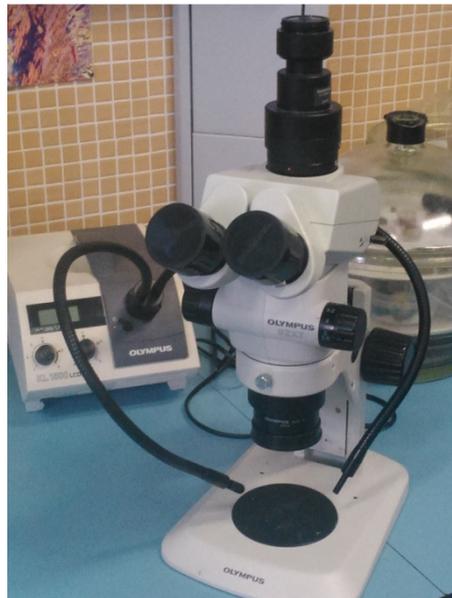


Figura 2. 5. Lupa estereoscópica modelo Olympus SZX7

Hemos procedido, a extender las fibras sobre un tejido de terciopelo de color negro, para procurar su máxima extensión, por la sujeción que nos permiten la

intercalación de las fibras de la muestra entre las fibrillas del tejido, a fin de medir la longitud de las fibras y al mismo tiempo, obtener un contraste visual óptimo de las fibras por la aportación cromática del fondo negro.

2.3.1.3. Caracterización seccional de las fibras

Para medir los diámetros de las fibras, hemos utilizado un microscopio electrónico de barrido (o SEM, de Scanning Electrón Microscopy) en su funcionamiento, usa electrones en lugar de luz para formar una imagen. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación.

La preparación de las muestras es relativamente fácil, pues la mayoría de SEMs sólo requieren que éstas sean conductoras [58]. La técnica consiste principalmente, en enviar un haz de electrones sobre la muestra, recubierta previamente por una capa delgada de metal y mediante un detector apropiado, para registrar el resultado de esta interacción. El haz se desplaza sobre la muestra, realizando un barrido en las direcciones X e Y, de tal modo que la posición en la que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición de brillo, proporcionalmente a la señal emitida, en un determinado punto de una pantalla.

En el microscopio electrónico de barrido, es necesario acelerar los electrones en un campo eléctrico, para aprovechar de esta manera su comportamiento ondulatorio, lo cual se lleva a cabo en el cañón del microscopio, donde se aceleran por una diferencia de potencial de 1.000 a 30.000 V. Los electrones acelerados salen del cañón, y son enfocados por las lentes condensadora y objetiva, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible, para así tener una mejor resolución. Con las bobinas deflectoras, se barre este fino haz electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea.

Cuando el haz incide sobre la muestra, se producen muchas interacciones entre los electrones del mismo haz y los átomos de la muestra. Por otra parte, la energía que pierden los electrones al colisionar contra la muestra, puede hacer que otros electrones salgan despedidos (electrones secundarios) y producir: rayos X, electrones Auger, etc. El más común de éstos microscopios, es el que detecta electrones secundarios y es con el que se hacen la mayoría de las imágenes de microscopía de barrido.

Para caracterizar los sustratos textiles, visualizar las micro y nano partículas depositadas sobre las fibras Se utiliza el microscopio electrónico de barrido Phenom

microscope (Fei Company, Oregon, USA). Mostrado en la Figura (2.6). Es un microscopio electrónico de barrido, con detector de electrones secundarios.



Figura 2. 6. Microscopio electrónico de barrido Phenom Microscope (FEI Company)

El procedimiento utilizado, ha sido recubrir las muestras con una capa de oro y paladio, con la finalidad de transformarlas en conductoras utilizando el Sputter Coater EMITECH mod. SC7620 (Quorum Technologies Ltd. EastSussex, UK). Figura (2.7)



Figura 2. 7. Sputter Coater EMITECH mod. SC7620

La capa de oro depositada en condiciones de vacío es de 5-7 nm. Las muestras analizadas eran de dimensiones 4 x 4 mm aproximadamente.

2.3.1.4. Caracterización composicional

En este punto, vamos a analizar las fibras que componen el material, para por un lado cualificar su composición y por otro lado, cuantificar el porcentaje de cada fibra presente en la muestra.

Para ello vamos a basarnos en el análisis químico cuantitativo, [59] fundado en la solubilidad selectiva de los componentes individuales de la mezcla. Hemos seleccionado una marcha analítica Tabla (2.3) con reactivos en frío, para proceder a la disolución selectiva de fibras.

Tabla 2. 3. Tabla de análisis para identificación y cuantificación de mezclas de fibras

REACTIVOS EN FRIO	FIBRAS									
	CA	PA	PAN	PES	EL	WO	SE	CV	CO	LIN
Acetona/H ₂ O 70/30)	SOL									
Acido fórmico 85%		SOL								
Acido nítrico 65 %			SOL							
Acido tricloroacético / cloroformo 1/1				SOL						
Hipoclorito sódico 1N/sosa caustica 3%						SOL	SOL			
Acido clorhídrico 36%							SOL	SOL		
Acido sulfúrico d=1,5								SOL		
Acido Sulfúrico d= 1,7					SOL				SOL	SOL

2.3.2. Control del peso de las muestras

Para el control del peso de las muestras previamente a introducirlas en el molde, utilizamos una Balanza de precisión marca Sartorius. Figura (2.8)



Figura 2. 8. Balanza de precisión marca Sartorius

Datos técnicos:

Modelo		PMA 7200
Capacidad/rango de pesada	g	7200
Legibilidad	g	0,1
Rango de tara (sustractivo)	g	-7200
Desviación máxima de linealidad	g	$\leq \pm 0,2$
Tiempo de estabilización (típico)	s	1
Tiempo de integración ajustable en forma externa	s	1,6 hasta 6,4
Secuencia de lectura ajustable en forma externa	s	0,1 hasta 0,4
Rango de estabilidad ajustable en forma externa	digito	0,25 hasta 8
Temperatura ambiental permitida durante el funcionamiento	$^{\circ}\text{C}$	0 hasta +40
Deriva de sensibilidad entre +10 $^{\circ}\text{C}$ hasta 30 $^{\circ}\text{C}$	1/K	$\leq \pm 10$ ppm
Plato de pesada \varnothing	mm	233
Carcasa de la balanza (anch.x prof. X alt.)	mm	233x329x391
Peso neto	g	5
Pesa de calibración	kg	5, clase F2 o mejor
Consumo eléctrico (típico)	VA	5 (típico)

2.3.3. Configuración de las placas

Una vez pesadas las fibras, se introducen lo más homogéneamente posible, en el seno del molde.

El factor de compactación, lo hayamos calculando la proporción entre la longitud del molde (pistón) y la parte introducida en el seno Figura (2.9).

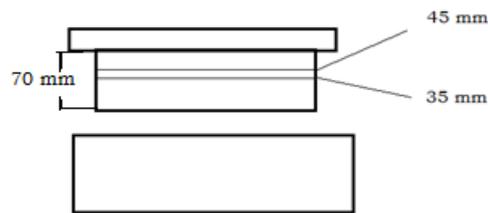


Figura 2. 9. Aplicación del Factor de compactación

Hemos hecho dos pruebas orientativas en cuanto al Factor de compactación 30 y 50 mm, como resultado comprobamos, con 30 mm le faltaba cohesión y la de 50 mm se le podía reducir la presión para tratar de aumentar la porosidad. En adelante aplicaremos 35 y 45 mm en la introducción de la tapa del molde que equivale a un factor de compactación (FC) de 0,5 y 0,64

El procedimiento para la compactación del material, se realiza mediante la compresión en el molde de aluminio Figura (2.10), con frontal abatible, para facilitar el desmoldeo de las muestras



Figura 2.10. Molde de aluminio con frontal abatible

Cuyas dimensiones, Figura (2.11) se han estudiado, para que dichas placas tengan una capacidad adecuada, en cuanto a suficiencia de superficie, que nos permita troquelar el número de muestras necesarias que vamos a utilizar en la experimentación, así como el grosor asimilable a los productos de lana mineral existentes en el mercado.

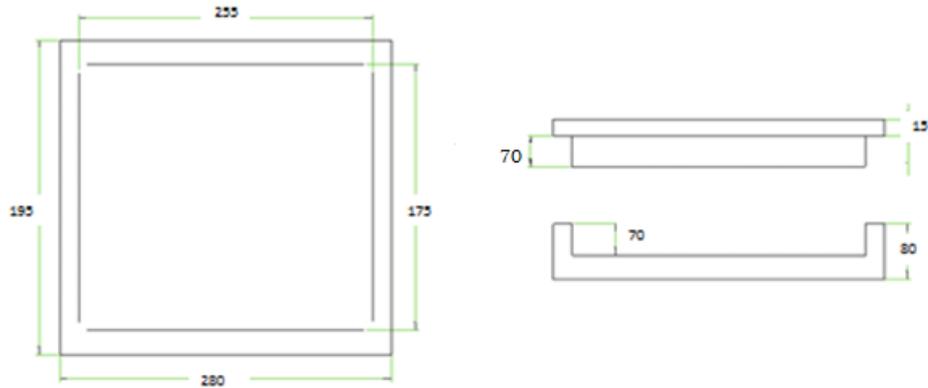


Figura 2.11. Planos del molde

El molde ha sido acoplado a una prensa hidráulica de 50 Tn, Figura (2.12) equipada con platos calientes, y adaptándola mediante el montaje de resistencias eléctricas programables por medio de un sistema termométrico, dotado de temporizador de dimensiones de trabajo de 50x60 cm fabricada por la empresa: Construcciones Dupra S.L de Castalla (Alicante)



Figura 2.12. Prensa hidráulica de 50 Tn equipada con platos calientes

Una vez las fibras introducidas en el molde, hemos programado la temperatura y el tiempo de exposición deseado, en cada ensayo.

2.3.4. Realización de las muestras

El conformado de las muestras, según nos demandaban los equipos a utilizar para la determinación de los parámetros funcionales: Coeficiente de absorción acústica, Porosidad, Tortuosidad, Resistencia al flujo de aire.

Se ha efectuado por medio de troqueles con el canto biselado, para facilitar la penetración en el corte, Figura (2.13) con diámetros de: 40 mm, 60 mm, 100 mm.



Figura 2.13. Troqueles de 42 mm, 60 mm, 100 mm, de diámetro, con el canto biselado

2.3.5. Determinación del coeficiente de absorción acústica

El tubo de impedancia acústica es un tubo rígido de sección circular, con una fuente de sonido en un extremo, un porta muestras en el extremo opuesto y dos micrófonos.

Según la ISO 10534-2, el esquema del equipo para medir el coeficiente de absorción acústica se muestra en la Figura (2.14)

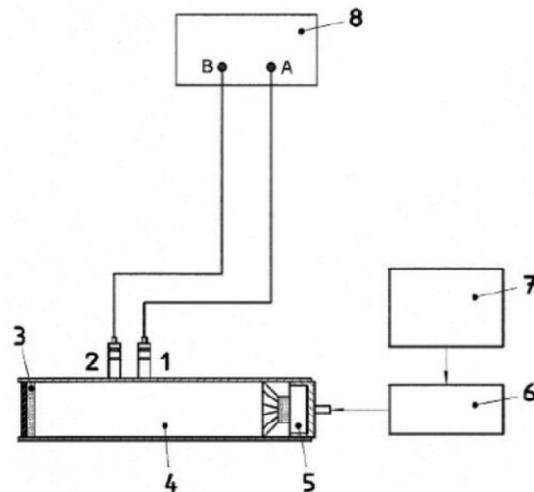


Figura 2.14. Esquema del montaje del tubo de impedancia acústica: ISO 10534-2

Donde: 1 y 2) Micrófonos Bruel&Kjaer model 4947, 3) Muestra de material de 40 mm de diámetro, 4) Tubo de ondas estacionarias, 5) Fuente de sonido, 6) Amplificador de señal, 7) Generador de señal, 8) Tarjeta de adquisición de datos NI USB 9233 y funciones de Matlab para el procesado de la señal.

El procedimiento para medir la absorción acústica mediante el tubo de impedancia acústica, se basa en la norma ISO 10534-2 (Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia) [60] comúnmente utilizada, para el estudio de la absorción acústica en materiales porosos y fibrosos.

En general los materiales porosos y fibrosos, presentan un mecanismo de absorción acústica, basado en la transformación por fricción, de la energía de la onda acústica incidente en calor.

La Figura (2.15) muestra una fotografía, del tubo de impedancia acústica utilizado para los ensayos.

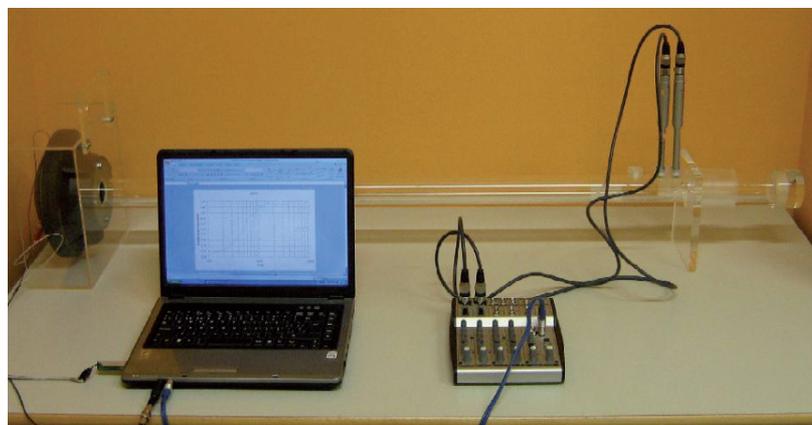


Figura 2.15. Fotografía del tubo de impedancia acústica

Hay dos parámetros en la normativa, que condicionan el rango de frecuencias de medida: el diámetro del tubo y la distancia entre micrófonos.

En este caso, el diámetro del tubo es de 40 mm y la separación entre micrófonos es de 30 mm, lo que permite un rango aproximado de medida de entre 400 y 4000 Hz.

En nuestro estudio, hemos introducido en el tubo de impedancia las muestras troqueladas de 40 mm de diámetro.

2.3.6. Determinación de la porosidad

Se utiliza una máquina de ensayos universal electromecánica Elib 50 (S.A.E. Ibertest, Madrid, España). Figura (2.16)

Los ensayos se han realizado a temperatura ambiente y con una célula de carga de 5 kN.

Se ha construido un dispositivo cilíndrico de acero compuesto de dos piezas, macho y hembra, con un diámetro de trabajo de 60 mm y una carrera de 150 mm, dentro de las cuales va a tener lugar el proceso de compresión de las muestras.



Figura 2.16. Máquina de ensayos universal electromecánica Elib 50

El procedimiento de trabajo ha consistido, en una vez medido el grosor de las muestras a presión atmosférica entre platos palpadores.

Se han introducido las muestras dentro del cilindro hueco, haciendo descender el pistón hasta comprimir la muestra con una carga de 5 kN, carga suficiente para comprimir la estructura porosa de la muestra, eliminando los poros, tomando nota de la distancia recorrida por el pistón (dato facilitado por el sistema informático de la máquina),

Por diferencia de recorridos entre vacío y con la muestra introducida, hemos medido el grosor y como el diámetro era conocido, calculamos el volumen comprimido a fin de compararlo con el volumen hallado a presión atmosférica y deducir la porosidad o parte de la muestra ocupada por aire.

2.3.7. Determinación de la Tortuosidad

Las pruebas de tortuosidad [59] se han llevado a cabo utilizando una fuente de alimentación marca Promax modelo FAC-307B, Figura (2.17) con un rango de 0-30 V y una intensidad máxima de 3 A.



Figura 2.17. Fuente de alimentación marca Promax modelo FAC-307B

El dispositivo para determinar la tortuosidad, Figura (2.18, 2.19) consta de un vaso cilíndrico de poliéster PET de 40 mm de diámetro, al que se le ha acoplado en toda [59] la base interior un electrodo de cobre unido a un hilo conductor, que se conecta a la fuente de alimentación, en la parte superior a forma de tapa, se ha dispuesto otro electrodo idéntico al anterior, que descansará sobre la muestra una vez sumergida, para asegurar la misma distancia entre electrodos con la muestra y sin la muestra (solo con el electrolito) hemos colocado una pinza a modo de retén sobre el hilo conductor, que irá conectado al otro polo en la fuente de alimentación, para que una vez fijado con el

electrodo apoyado en la superficie de la muestra, asegurarnos de que dicha distancia entre electrodos es idéntica, en el ensayo con el electrolito libre de muestra.

Esto nos permite, comprobar la resistencia eléctrica de la muestra sumergida en un líquido conductor (sulfato de cobre II) por la diferencia entre los valores de intensidad obtenidos a diferentes voltajes, en los ensayos con la muestra sumergida y sin la muestra solo con el electrolito, conservando la misma distancia de separación entre electrodos.

El procedimiento seguido ha consistido, en sumergir las muestras durante 24 horas en una disolución al 10% en peso w/w de sulfato de cobre, con la finalidad de obtener la máxima saturación posible entre los intersticios formados por los poros de la muestra, posteriormente se han sometido a un rango de diferencias de potencial entre los valores 1 y 8 V tomados a tramos de 0,5 V obteniendo los correspondientes valores de intensidad y por la ecuación de la ley de Ohm, calculamos la resistencia.

$$I = \frac{V}{R}$$



Figura 2.18. Dispositivo para determinar la tortuosidad



Figura 2.19. Detalle del vaso con los electrodos y la pinza retén

2.3.8. Determinación de la permeabilidad

Para los ensayos de resistencia al flujo de aire, basados en la norma ISO 9237:1995. Determinación de la permeabilidad al aire de los tejidos, hemos utilizado un permeámetro EHVAK 2000 Figura (2.20), que mide la diferencia de presión, sobre la muestra y la velocidad del paso de aire por la muestra. Figura (2.21)

Tal como indica la norma para muestras con una cierto grosor, hemos construido un anillo cilíndrico de 60 mm de diámetro por 30 mm de altura para impedir que el flujo de aire se evacua por el lateral de la muestra falseando el resultado, procediendo según la norma hemos evaluado las muestras como indica la Figura (2.21).



Figura 2. 20. Permeámetro EHVAK 2000



Figura 2. 21. Modo de trabajo para la evaluación de las muestras

2.4. Resultados y discusión.

2.4.1. Diseño de experimentos.

Tabla 2. 4. Numeración de coeficientes de absorción (CA),

Distribución Coeficientes de absorción	Hz
Coeficiente de absorción 1 (CA1)	400-999
Coeficiente de absorción 2 (CA2)	1000-1999
Coeficiente de absorción 3 (CA3)	2000-2999
Coeficiente de absorción 4 (CA4)	3000-3999

En la Tabla (2.5) representamos los máximos, del coeficiente de absorción por intervalo, de las 32 muestras.

Tabla 2. 5. Máximos coeficiente de absorción por intervalo de frecuencias.

CA1	CA2	CA3	CA4
0,59	0,93	0,87	0,65
0,48	0,89	0,85	0,62
0,40	0,86	0,86	0,66
0,67	0,64	0,72	0,80
0,60	0,97	0,87	0,63
0,85	0,98	0,70	0,67
0,42	0,99	0,98	0,97
0,79	0,79	0,59	0,70
0,70	0,68	0,75	0,80
0,73	0,96	0,76	0,65
0,72	1	0,91	0,80
0,71	0,99	0,87	0,83
0,61	0,89	0,75	0,62
0,54	0,54	0,60	0,65
0,66	0,67	0,75	0,80
0,62	0,96	0,84	0,58
0,85	0,82	0,79	0,84
0,53	0,85	0,79	0,75
0,60	0,58	0,65	0,71
0,77	0,98	0,83	0,81
0,47	0,44	0,49	0,54
0,55	0,58	0,65	0,70
0,51	0,94	0,89	0,63
0,66	0,63	0,67	0,72

0,48	0,97	0,95	0,69
0,57	0,48	0,53	0,57
0,85	0,99	0,73	0,92
0,68	0,99	0,86	0,68
0,47	0,47	0,54	0,59
0,65	0,58	0,64	0,67
0,55	0,57	0,63	0,69
0,69	0,96	0,76	0,80

Utilizando el diagrama de Pareto, Figura (2.22) analizamos como influyen los diferentes factores, en el coeficiente de absorción acústica y su interacción, parte innovadora en el diseño estadístico de experimentos, que a diferencia de la experimentación clásica, se estudia la influencia de un factor y la interacción de las influencias ejercidas por todos los factores presentes en el resultado de un experimento.

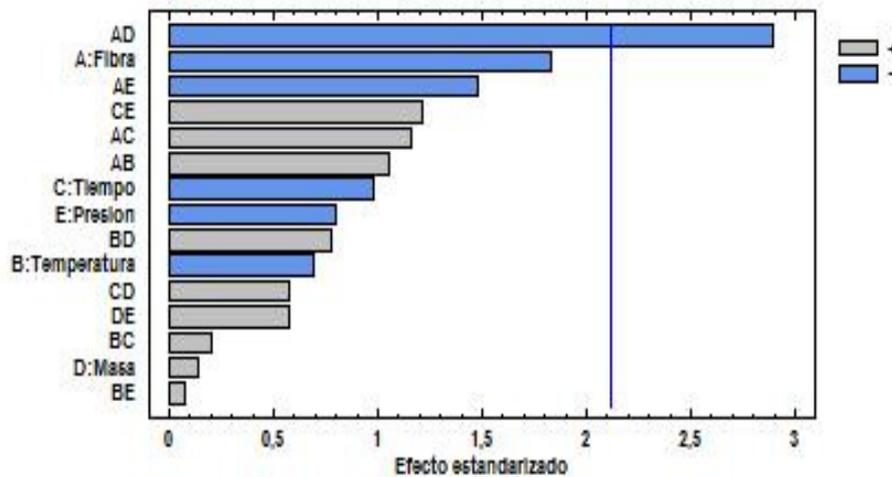


Figura 2. 22. Diagrama de Pareto estandarizada para CA1

En la optimización de la respuesta, la meta es maximizar CA1. Vemos que para este intervalo CA1 (400-999 Hz) los factores que influyen significativamente son la interacción de la fibra con el peso Figura (2.22) el máximo o valor optimo del coeficiente de absorción acústica de la muestra es 0,77 %. Aplicando las condiciones factoriales que indica la Tabla (2.6) en la respectiva columna.

Tabla 2. 6. Optimizar Respuesta, maximizar CA1

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Fibra	-1,0	1,0	-1,0
Temperatura	220,0	240,0	220,0
Tiempo	60,0	90,0	60,0
Peso	450,0	550,0	550,0
FC	0,5	0,64	0,5

Tabla 2. 7. Coeficiente de regresión

Coeficiente	Estimado
constante	8,05954
A:Fibra	0,179482
B:Temperatura	-0,0205127
C:Tiempo	-0,0286799
D:Peso	-0,0102791
E:FC	-0,5851
AB	0,00214826
AC	0,00157129
AD	-0,00117642
AE	-0,0600997
BC	0,0000273047
BD	0,0000316768
BE	0,000306478
CD	0,0000156908
CE	0,00330801
DE	0,000468183

StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos Tabla (2.7). La ecuación del modelo ajustado es:

$$CA1 = 8,05954 + 0,179482 * Fibra - 0,0102791 * Peso - 0,00117642 * Fibra * Peso$$

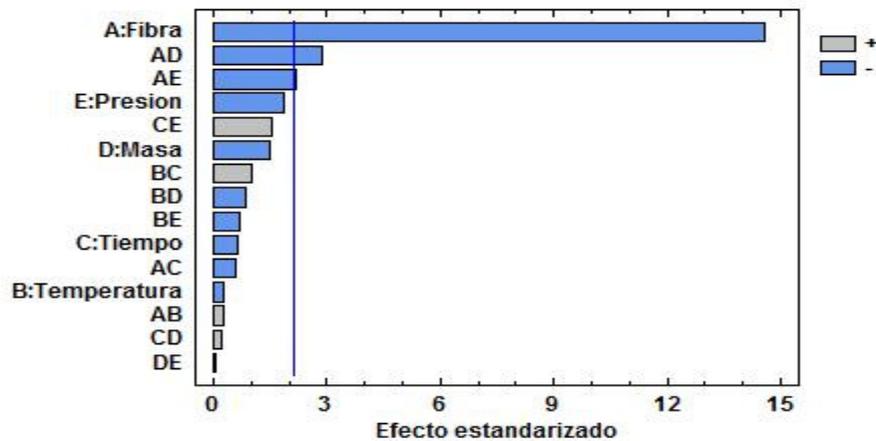


Figura 2. 23 Diagrama de Pareto estandarizada para CA2

En la optimización de la respuesta, la meta es maximizar CA2.

Para este intervalo CA2 (1000-1999 Hz) el factor significativo es la fibra Figura (2.23), y el valor óptimo del coeficiente de absorción acústica de la muestra es 0,99%. Aplicando las condiciones factoriales que indica la Tabla (2.8) en la respectiva columna.

Tabla 2. 8. Optimizar Respuesta: maximizar CA2

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Fibra	-1,0	1,0	-1,0
Temperatura	220,0	240,0	220,0
Tiempo	60,0	90,0	90,0
Peso	450,0	550,0	550,0
FC	0,5	0,64	0,64

Tabla 2. 9. Coeficiente de regresión

Coefficiente	Estimado
constante	-0,535555
A:Fibra	0,358087
B:Temperatura	0,0111498
C:Tiempo	-0,0320453
D:Peso	0,004463
E:FC	0,173478
AB	0,000333175
AC	-0,000497354
AD	-0,00071994
AE	-0,0549727
BC	0,0000834836
BD	-0,0000216952
BE	-0,00173065
CD	0,00000383148
CE	0,00260274
DE	-0,0000349533

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos Tabla (2.9). La ecuación del modelo ajustado es:

$$CA2 = -0,535555 + 0,358087 * Fibra + 0,004463 * Peso + 0,173478 * FC - 0,00071994 * Fibra * Peso - 0,0549727 * Fibra * FC$$

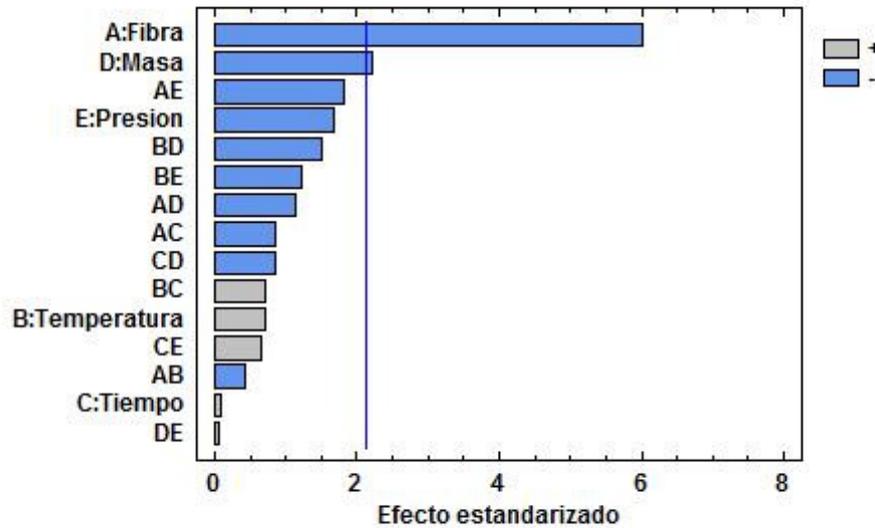


Figura 2. 24 Diagrama de Pareto estandarizada para CA3

En la optimización de la respuesta, la meta es maximizar CA3. Para este intervalo, CA3 (2000-2999 Hz) la fibra y el peso son los factores significativos Figura (2.24). El valor óptimo del coeficiente de absorción acústica, de la muestra es 0,91 %. Aplicando las condiciones factoriales que indica la Tabla (2.10) en la respectiva columna.

Tabla 2.10. Optimizar Respuesta: maximizar CA3

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Fibra	-1,0	1,0	-1,0
Temperatura	220,0	240,0	240,0
Tiempo	60,0	90,0	90,0
Peso	450,0	550,0	450,0
FC	0,5	0,64	0,5

Tabla 2.11. Coeficiente de regresión

Coefficiente	Estimado
constante	-6,34336
A:Fibra	0,503256
B:Temperatura	0,0322425
C:Tiempo	-0,0127127
D:Peso	0,0105799
E:FC	0,665506
AB	-0,000643688
AC	-0,000845746
AD	-0,000337
AE	-0,0528677
BC	0,0000691224
BD	-0,0000440216
BE	-0,00359696
CD	-0,0000164779
CE	0,00128417
DE	0,0000322422

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos Tabla (2.11). La ecuación del modelo ajustado es:

$$CA3 = -6,34336 + 0,503256 * Fibra + 0,0105799 * Peso - 0,000337 * Fibra * Peso$$

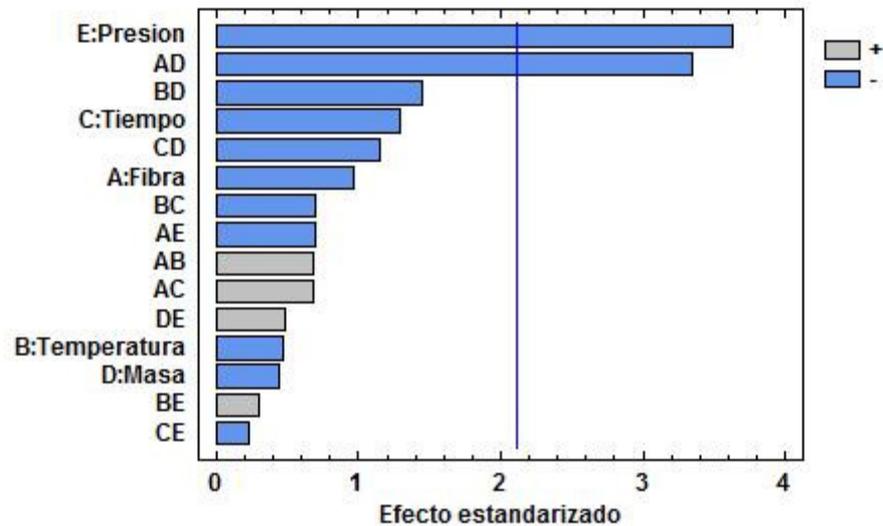


Figura 2. 25. Diagrama de Pareto estandarizada para CA4

En la optimización de la respuesta, la meta es maximizar CA4.

Para este intervalo, CA4 (3000-3999 Hz) los factores significativos son el FC y la interacción de la fibra y el peso, Figura (2.25), el valor óptimo del coeficiente de absorción acústica de la muestra es 0,85 %. Aplicando las condiciones factoriales que indica la Tabla (2.12) en la respectiva columna.

Tabla 2.12. Optimizar Respuesta: maximizar CA4

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Fibra	-1,0	1,0	-1,0
Temperatura	220,0	240,0	220,0
Tiempo	60,0	90,0	60,0
Peso	450,0	550,0	550,0
FC	0,5	0,64	0,5

Tabla 2.13. Coeficiente de regresión

Coeficiente	Estimado
constante	-3,65701
A:Fibra	0,246217
B:Temperatura	0,0196276
C:Tiempo	0,0243093
D:Peso	0,00905585
E:FC	-0,371845
AB	0,000888574
AC	0,00058799
AD	-0,000869385
AE	-0,0181291
BC	-0,0000605298
BD	-0,0000377334
BE	0,000792016
CD	-0,000019874
CE	-0,000392484
DE	0,000249372

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es $CA4 = -3,65701 + 0,246217 \cdot \text{Fibra} + 0,00905585 \cdot \text{Peso} - 0,371845 \cdot \text{FC} - 0,000869385 \cdot \text{Fibra} \cdot \text{Peso}$

En la Tabla (2.14) exponemos los resultados de las ecuaciones de regresión de los intervalos CA1-CA4.

Tabla 2.14. Resumen de las ecuaciones de los intervalos de frecuencias

Tabla Resumen de las ecuaciones de los modelos ajustados	
CA1	$8,05954 + 0,179482*Fibra - 0,0102791*Peso - 0,00117642*Fibra*Peso$
CA2	$-0,535555 + 0,358087*Fibra + 0,004463*Peso + 0,173478*FC - 0,00071994*Fibra*Peso - 0,0549727*Fibra*FC$
CA3	$-6,34336 + 0,503256*Fibra + 0,0105799*Peso - 0,000337*Fibra*Peso$
CA4	$-3,65701 + 0,246217*Fibra + 0,00905585*Peso - 0,371845*FC - 0,000869385*Fibra*Peso$

En la Figura (2.26), mostramos los resultados del diseño de experimentos, cuya meta era la de maximizar los coeficientes de absorción acústica de cada intervalo estudiado

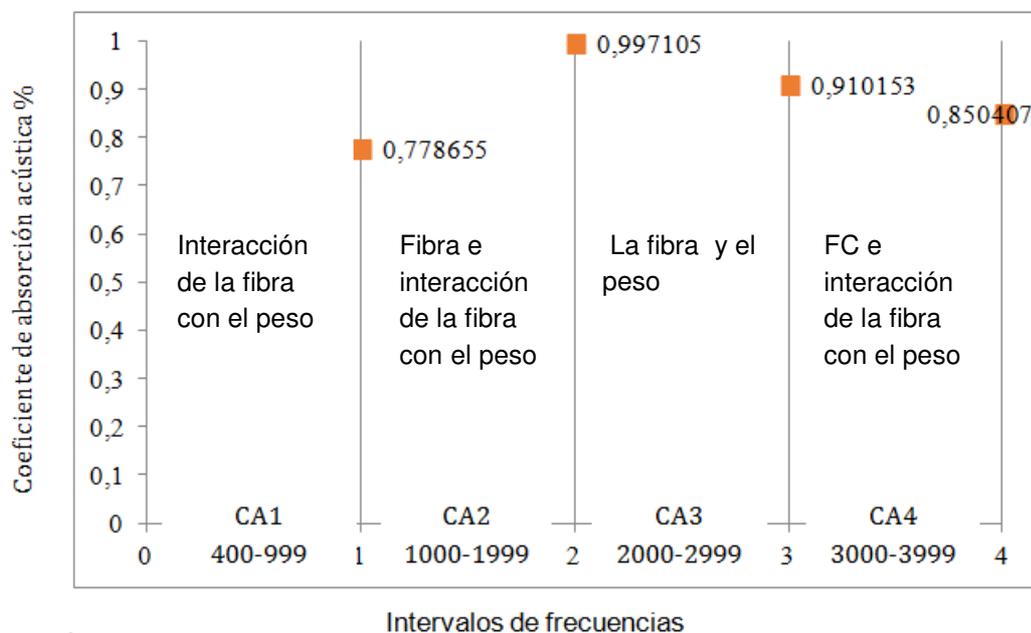


Figura 2. 26. Resultado de maximizar los coeficientes de absorción por intervalo

Aplicando el mismo criterio, en cuanto a los parámetros de conformación que nos indica el diseño de experimentos, se han configurado una serie de muestras, a

partir de otra clase de fibra la que denominaremos fibra tres, para verificar la idoneidad del sistema y obtener una fuente adicional de datos, respecto al comportamiento funcional de la fibra en cuestión.

2.4.1.1. Discusión

En la Figura (2.26) observamos los factores que más influyen en cada intervalo y los máximos de coeficiente de absorción acústica, conseguidos en cada uno de ellos, siendo 0,77 para CA1; 0,99 en CA2; 0,91 en CA3 y 0,85 en CA4.

2.4.1.2. Conclusiones

Se ha empleado un método bien definido y exhaustivo, el trabajo ha sido ímprobo pero muy efectivo en cuanto a la consecución de resultados por encima de nuestras mejores expectativas.

El diseño de experimentos nos ha sido muy útil, sobre todo en la relación del número de muestras y las relaciones entre parámetros, los parámetros de mayor influencia han sido: el tipo de fibra, el peso y su interrelación, es notorio que la clase de fibra es fundamental para los resultados y el peso de fibra es la que influye en la densidad de la muestra y por lo tanto en su capacidad de absorción acústica.

Si analizamos más detenidamente los coeficientes de las expresiones vemos que en valor absoluto son los coeficientes que afectan al tipo de fibra, los mayores y por lo tanto los que más afectan al coeficiente de absorción acústica. Les siguen aunque no para todas las muestras los coeficientes de la presión, con un orden de magnitud similar. Al analizar la influencia de la masa introducida estos coeficientes afectan en un orden de magnitud 10 veces inferior como media. En cuanto a la temperatura y tiempo de compresión, prácticamente no influyen, así como los coeficientes de parámetros combinados no lo hacen en todos los tramos de frecuencia y además de una manera mínima.

Concluimos pues que en las muestras obtenidas por termo compresión y dentro de los márgenes empleados en los diferentes parámetros, son los parámetros de tipo de fibra y presión los que dirimen fundamentalmente los procesos de absorción acústica. Una posible justificación para este comportamiento es que la estructura de poros y su interconexión la define el tipo de fibra en un primer lugar por su morfología y que durante el proceso de compresión, hay un cierto paralelismo de las fibras, la presión contribuye a densificar al producto, manteniendo la orientación de las fibras. Podemos justificar que la temperatura y el tiempo afectan poco debido a que no existen o existen

en pequeña cantidad la interacción entre los polímeros constitutivos de las fibras y el propio triturado de neumático adherido a ellas.

Otra conclusión a extraer, es que el diseño de experimentos ha sido bien planteado, dado que el resultado obtenido en cuanto al coeficiente de absorción, se aproxima al comportamiento real de las muestras elaboradas después de este análisis

2.4.2. Resultados de la caracterización física de las fibras

2.4.2.1. Distribución longitudinal

Con la observación visual de las longitudes de las fibras por medio de la lupa electrónica, obtenemos el resultado de la fotografía, Figura (2.27)

En la Figura (2.28) se representan, las longitudes de fibra y su distribución por tamaño.



N° 1

N° 2

N° 3

Figura 2. 27. Longitudes de las fibras 1, 2 y 3

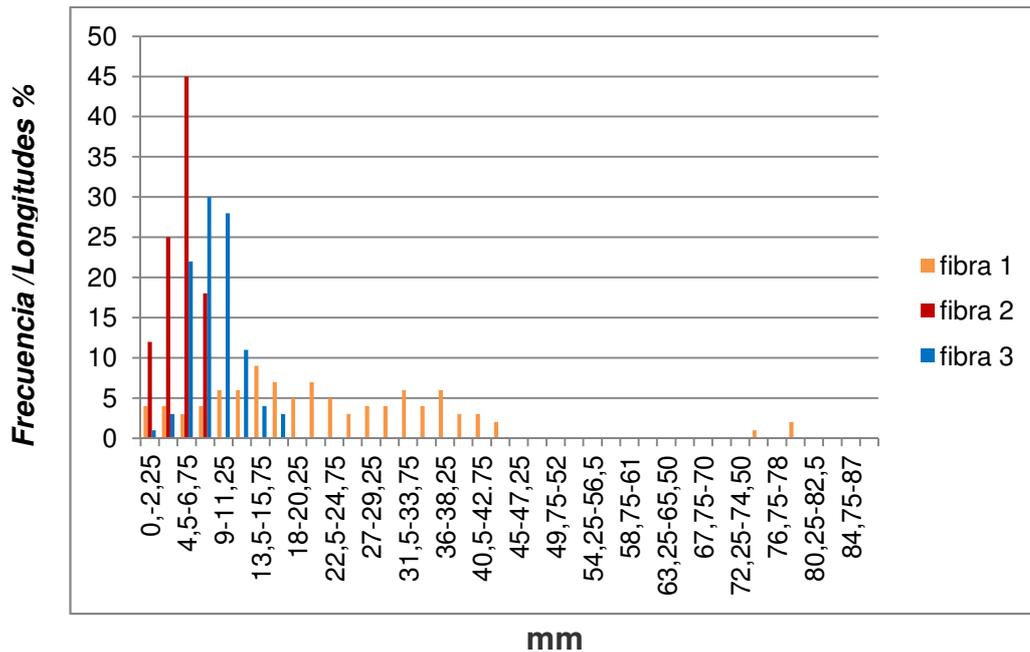


Figura 2. 28. Distribución de longitudes de fibras

2.4.2.2. Discusión longitudes de fibra

La fibra uno, tiene un rango de longitudes extenso, oscila entre 2 y 43, mm encontrándose fibras entre 74 y 78 mm, la distribución es muy variada encontrando un pico entre 13 y 16 mm y un mínimo en el intervalo de 0 a 2,25 mm.

La fibra dos, fibras muy cortas casi polvo están más igualadas, tienen longitudes entre 2 y 8 mm, siendo que el 45% de las fibras tienen una longitud entre 4 y 7 mm y el mínimo lo componen fibras de 0 hasta 2,25 mm con un 12%.

En la fibra número tres, la distribución por longitudes se encuentra entre 2 y 16 mm con un máximo entre 7 y 9 mm que representa un 30% y la longitud más corta la encontramos en el intervalo de 0 hasta 2 mm que representa aproximadamente un 1%.

2.4.2.3. Distribución seccional

Para la determinación visual de los diámetros hemos utilizado el microscopio electrónico por barrido de electrones, resultando las imágenes de la Figura (2.29)

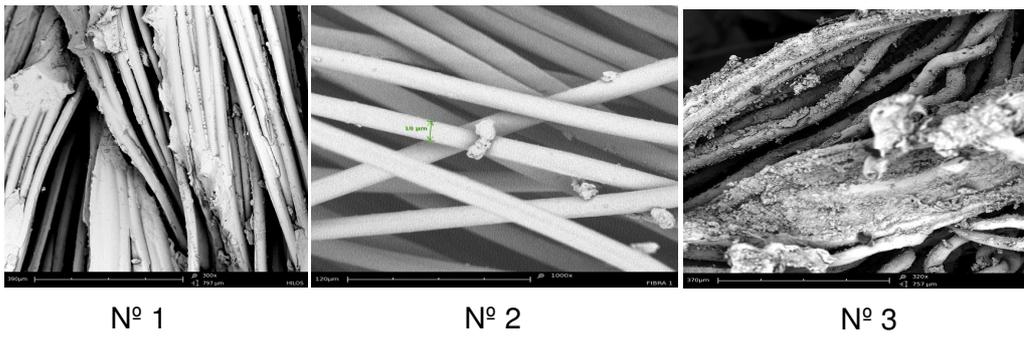


Figura 2. 29 Imágenes obtenidas por microscopia electrónica fibra 1,2 y 3

La Figura (2.30) representa, la distribución por tamaño de los diámetros de las muestras

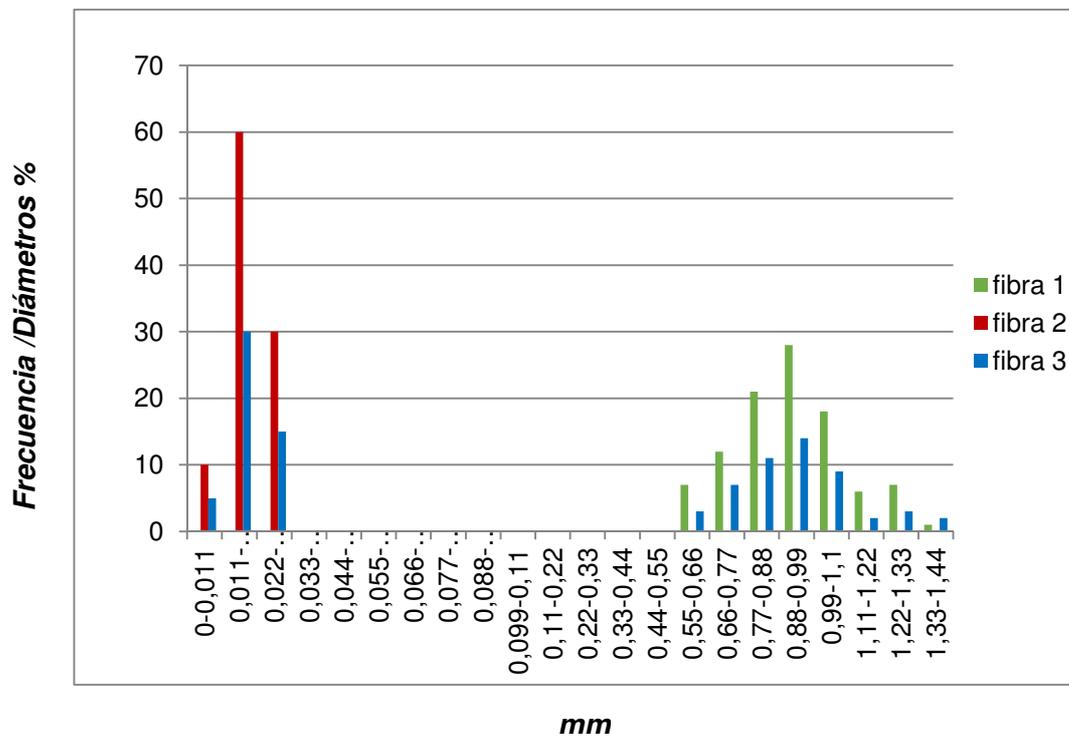


Figura 2. 30. Distribución de diámetros

2.4.2.4. Discusión diámetros

Los diámetros en la muestra uno, pertenecen a trozos de hilos formados por fibras paralelizadas y retorcidas a 2 cabos, por este motivo su distribución fluctúa entre 0,5 y 1,33 mm, hallando un máximo en 0,88 a 0,99 donde se engloban el 28% de las fibras.

En la muestra dos los diámetros pertenecen a fibras, por lo tanto sus medidas varían desde 0,01 a 0,02 mm, el máximo se encuentra en el rango entre 0,011 y 0,022 mm al que pertenecen el 60 % de las fibras.

En la muestra tres vemos dos distribuciones distintas al estar compuesta por hilos y fibras, por un lado tenemos un rango de 0,011 a 0,033 mm con un máximo entre 0,011 y 0,022 mm que integra el 30% de las fibras en este rango y por otro lado el rango entre 0,66 y 1,44 mm donde el máximo se encuentra entre 0,88 a 0,99 mm.

2.4.3. Resultados de la caracterización composicional de las fibras

Los resultados de los análisis practicados a las fibras que componen el material estudiado, se exponen en la Tabla (2.15) y gráficamente en la Figura (2.31)

Tabla 2.15. Distribución de fibras y residuos de caucho en la muestra

Denominación de la fibra	Contenido en la mezcla % en peso
Lana (Wo)	5,22
Poliamida (Pa)	57,75
Viscosa (Cv)	3,15
Acrílica (Pac)	7,89
Poliéster (Pet)	25,98

El residuo de caucho representa un 35% del total del peso de la muestra, siendo el 65 % fibras sintéticas.

En la Tabla (2.15) y la Figura (2.31) observamos que el cord de los neumáticos de donde proceden las fibras estudiadas, están compuestos por diferentes clases de fibras, las que están en mayor proporción son la Poliamida con casi un 58 % seguida del poliéster con un 26%, las fibras de naturaleza proteínica y celulósica están en pequeña proporción sobre un 8%.

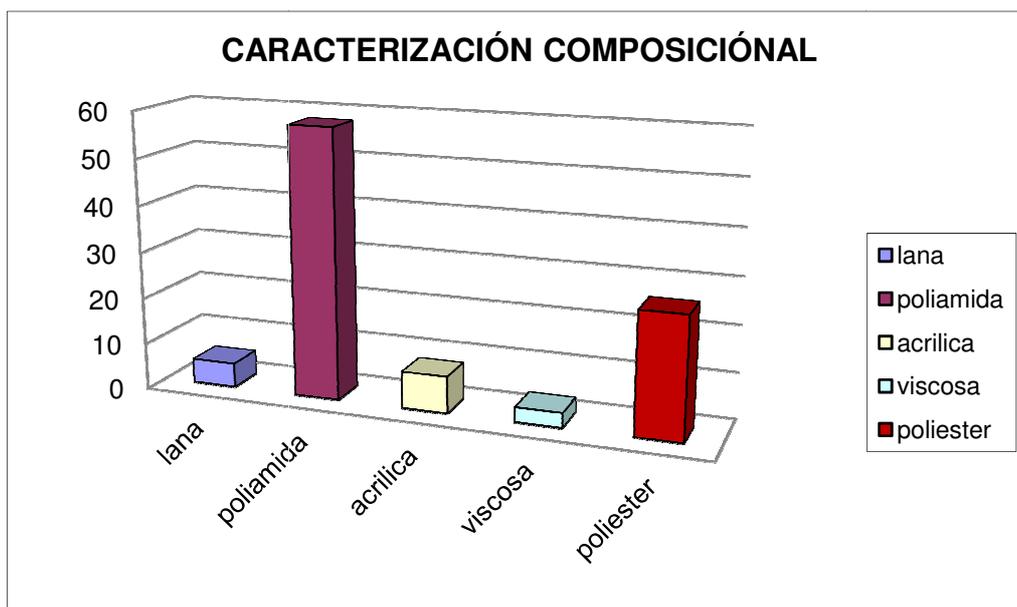


Figura 2. 31. Gráfico de porciones de la composición de las fibras

Las temperaturas de reblandecimiento y fusión de las fibras sintéticas (datos obtenidos de la Asociación española de químicos y coloristas textiles, AEQCT) expuestas en la Tabla (2.16) están por encima de 220 °C, solo el poliacrilonitrilo (Pac) tiene una temperatura de reblandecimiento de 210 °C.

Tabla 2.16. Rango de Temperaturas críticas de las fibras

Clase de fibra	Descomposición	Reblandecimiento	Fusión
Poliamida		235°C	256°C
Poliéster		230-240°C	260°C
Acrílica		210°C	235°C
Lana	130°C		
Rayón viscosa	185-205°C		

2.4.3.1. Discusión composición fibras

En la tabla (2.15), exponemos las clases de fibras presentes en la muestra y la proporción de cada una de ellas y en la Tabla (2.16) representamos las temperaturas de reblandecimiento y de fusión de las fibras sintéticas, la importancia de estos datos es

fundamental en el tratamiento calorífico que vamos a aplicar en la confección de las muestras, por un lado excedernos de las temperaturas de fusión, producirían solidificación del material, en detrimento de la estructura porosa que lo debe de caracterizar y por otro lado tratamos de superar alguna de las temperaturas de reblandecimiento, para que las fibras al reblandecerse y ayudadas por la presión, pudieran actuar como material aglutinante de las fibras.

Ante la presencia en poca proporción, de fibras naturales que carecen de temperaturas de reblandecimiento y de fusión, y solo presentan la temperatura de descomposición, cuyo valor está por debajo de 220°C, para evitar la combustión mantendremos el molde cerrado, hasta que la muestra recupere la temperatura ambiente, suprimiendo al máximo la presencia de oxígeno, esta condición producirá un proceso de carbonizado en estas fibras estabilizándolas térmicamente.

2.4.3.2. Conclusión

La morfología de las fibras aparece distribuida en un amplio rango de longitudes y diámetros y el propio análisis permite prever que una de ellas la N° 3, parece una mezcla de las otras dos, N°1 y N°2.

El análisis de la naturaleza de las fibras, nos permite fijar la temperatura máxima de termocompresión en 240 °C evitando así el riesgo de fundición de todas las fibras y el apelmazamiento de la placa afectando la porosidad.

2.4.4. Coeficiente de absorción acústica, porosidad, tortuosidad, permeabilidad.

El número de muestras evaluadas asciende, a 66, de las cuales hemos obtenido los datos correspondientes a sus características funcionales: Coeficiente de absorción acústica, Porosidad, Tortuosidad, Permeabilidad al flujo de aire, debido a la cantidad de gráficos de las curvas del coeficiente de absorción, hemos condensado esta información para su consulta en el Anexo I y las tablas de datos de los parámetros acústicos en su totalidad en el Anexo II.

En este punto, vamos a plasmar y desarrollar los datos obtenidos de las mejores muestras de cada tipo de fibra que han destacado por sus cualidades funcionales.

Este apartado estará compuesto por los resultados obtenidos de cada una de las muestras de cada fibra (fibras 1,2 y 3) y por la combinación entre ellas, composiciones de dos fibras y composiciones de tres fibras, estructurándolas por capas o mezclándolas aleatoriamente.

2.4.4.1. Monocapa, Fibra N° 1

En la Tabla (2.17) presentamos las dimensiones y el peso correspondientes de la muestra evaluada N° 8

Tabla 2.17. Parámetros dimensionales muestra N° 8

Nºmuestra	Peso	Diámetro	Espesor	Volumen	Densidad
8	14,33 g	4,2 cm	2,5 cm	32,98 cm ³	0,434 g/cm ³

2.4.4.2. Coeficiente de absorción acústica

En la Tabla (2.18) se muestran los resultados de los valores máximos del coeficiente de absorción acústica de cada intervalo, obtenidos en el tubo de impedancia acústica y los factores de conformación de cada placa, el criterio empleado para determinar la muestra con el mejor resultado ha sido el valor máximo y la continuidad en todo el rango, en este caso, la muestra que reúne las mejores condiciones de las 16 pruebas realizadas con la fibra N° 1, es la N° 8 cuyos parámetros de conformación son: 220 °C, 60 min, 550 g, 0,64 %.

Tabla 2.18. Máximos coeficiente de absorción por intervalo fibra N° 1

Nº	°T	t'	Peso	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
1	240	90	450	0,5	0,40	0,87	0,86	0,66
3	240	90	550	0,5	0,60	0,97	0,87	0,63
4	220	60	450	0,64	0,85	0,93	0,70	0,67
5	240	60	550	4,5	0,79	0,79	0,59	0,70
7	240	90	550	0,64	0,731	0,958	0,759	0,654
8	220	60	550	0,64	0,72	1	0,92	0,80
9	240	60	550	0,5	0,71	0,99	0,87	0,83
10	220	60	450	0,5	0,61	0,89	0,75	0,62
13	220	90	450	0,64	0,62	0,96	0,84	0,58
15	220	90	450	0,5	0,53	0,85	0,79	0,75
17	240	60	450	0,5	0,77	0,98	0,83	0,81
20	240	90	450	0,64	0,51	0,94	0,89	0,63
22	240	60	450	0,64	0,48	0,97	0,95	0,69
24	220	90	550	0,5	0,85	0,99	0,73	0,92
25	220	90	550	0,64	0,68	0,99	0,86	0,68
29	220	60	550	0,5	0,69	0,96	0,76	0,80

La tabla (2.19) nos muestra, los coeficientes de absorción máximos en cada intervalo.

Tabla 2.19. Máximos coeficiente de absorción

CA1	CA2	CA3	CA4
0,72	1	0,91	0,79

En la Figura (2.32) observamos la curva del coeficiente de absorción acústica en el rango de frecuencias entre (400-4000) Hz, donde se produce el máximo del coeficiente de absorción acústica 1 (que equivale al 100%) sobre 1500 Hz y todos los puntos están por encima del 0,7%.

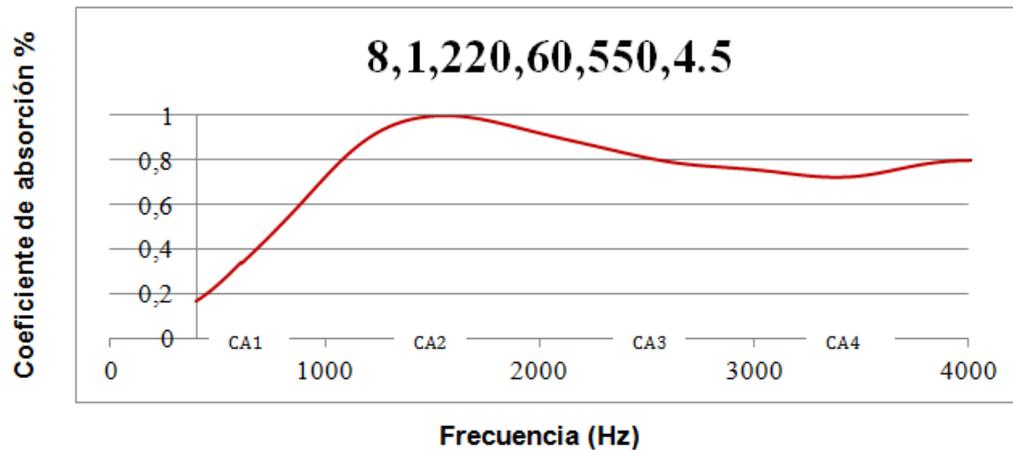


Figura 2. 32. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título del gráfico se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición el peso de la fibra y la presión

2.4.4.3. Porosidad

La Tabla (2.20) representa los valores de la porosidad obtenidos en la muestra Nº 8 utilizando la Ecuación (2.1). Vemos que la porosidad es del 61 %

Tabla 2. 20. Porosidad

Diámetro (cm)	Volumen inicial (cm ³)	Volumen comprimido (cm ³)	Volumen porosidad (cm ³)
60	70,68	27,14	43,54

Volumen inicial – volumen comprimido = volumen porosidad

$$\frac{\text{Volumen porosidad}}{\text{Volumen inicial}} = \text{Porosidad}$$

(2. 1)

$$\frac{43,54}{70,68} = 0,61$$

$$\text{Porosidad} = 0,61$$

2.4.4.4. Tortuosidad

En la Tabla (2.21) se han tabulado, los valores de diferencia de potencial aplicados y las intensidades correspondientes debidas a la resistencia opuesta por la muestra N° 8

Tabla 2. 21. Diferencia de potencial e intensidades de la muestra y del electrolito

Diferencia de potencial (V)	Intensidad muestra (A)	Intensidad electrolito (A)
1	0,02	0,1
1,5	0,04	0,16
2	0,05	0,22
2,5	0,06	0,27
3	0,07	0,32
3,5	0,08	0,36
4	0,09	0,4
4,5	0,1	0,45
5	0,11	0,5
5,5	0,12	0,54
6	0,13	0,6
6,5	0,14	0,66
7	0,15	0,72
7,5	0,17	0,79
8	0,18	0,85

En la Figura (2.33), se muestran los resultados de intensidad del material y el electrolito, a diferentes valores (1-8 V) de diferencia de potencial, donde la pendiente coincide con la resistencia.

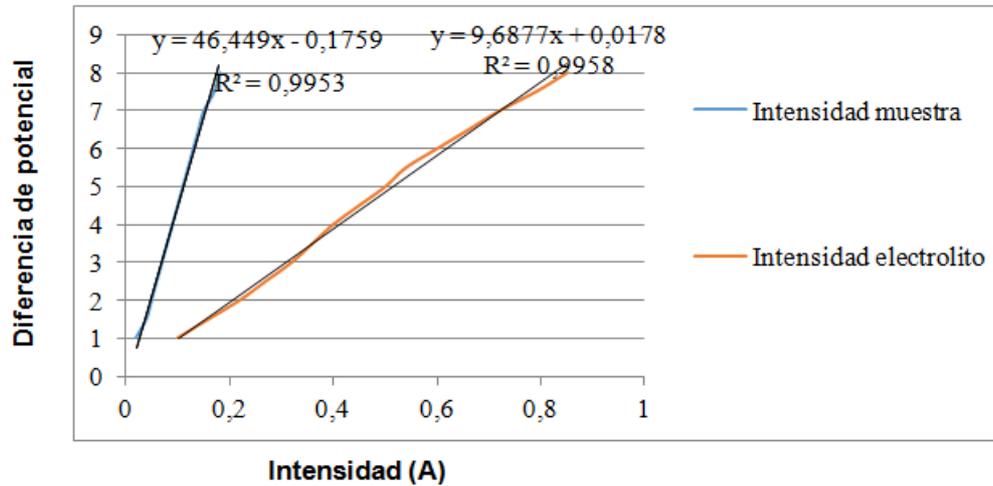


Figura 2. 33. Líneas de tendencia de la muestra y del electrolito.

En la Ecuación (2.2) resolvemos la tortuosidad, operando con las pendientes de las líneas de tendencia que representan la resistencia eléctrica, en los ensayos con muestra y sin muestra y con el resultado de la porosidad obtenido en la Ecuación (2.1)

$$\frac{\text{Pendiente (I) muestra}}{\text{pendiente (I) electrolito}} \times \text{porosidad} = \text{Tortuosidad} \quad (2.2)$$

$$\frac{46,45}{9,69} \times 0,61 = 2,92$$

$$\text{Tortuosidad} = 2,92$$

2.4.4.5. Permeabilidad al flujo de aire.

En la Tabla (2.22) se exponen los valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire de la muestra N° 8 y su cálculo en la Ecuación (2.3)

Tabla 2. 22. Valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire

Presión (Pa)	Tobera	k Tobera	Densidad del aire kg/m ³	k Conversión mm/s
80	4	311	1,2	0,278

$$K \text{ tobera} \times \sqrt{\frac{\text{Presión}}{\text{densidad aire}}} = \text{permeabilidad al aire} \quad (2.3)$$

$$311 \times \sqrt{\frac{80}{1,2}} = 2539,30 \frac{m^3}{m^2 \times h}$$

$$2539,30 \times 0,278 = 705,93 \frac{mm}{s}$$

$$\text{Permeabilidad al aire} = \frac{705,93mm}{s}$$

2.4.4.6. Parámetros acústicos muestra N°8

En la tabla (2.23), exponemos los parámetros de conformación de las placas y los resultados de los parámetros acústicos

Tabla 2. 23. Resultados de los parámetros acústicos muestra N° 8 fibra N° 1

N°	°T	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
8	220	60	550	0,64	0,434	0,61	2,95	705,92

2.4.4.7. Monocapa, fibra N° 2

En la Tabla (2.24) presentamos las dimensiones y el peso correspondientes de la muestra evaluada N° 14

Tabla 2. 24. Parámetros dimensionales muestra N° 14

N°muestra	Peso	Diámetro	Espesor	Volumen(cm ³)	Densidad
14	12,56 g	4,2 cm	3 cm	39,58 cm ³	0,317 g/cm ³

2.4.4.8. Coeficiente de absorción acústica

En la Tabla (2.25) se muestran los resultados de los valores máximos del coeficiente de absorción acústica de cada intervalo, obtenidos en el tubo de impedancia

acústica y los factores de conformación de cada placa, aplicando el criterio de máxima absorción y continuidad en todo el rango, el mejor resultado en este caso, de las 16 pruebas realizadas con la fibra N° 2 es el resultado de la muestra N° 14, cuyos parámetros de conformación son: 220 °C; 60 min; 450 g; 0,5 %.

Tabla 2. 25. Máximos, coeficiente de absorción por intervalo fibra N° 2

Nº	°T	t'	Peso	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
2	220	90	450	0,5	0,67	0,64	0,71	0,80
6	240	60	450	0,5	0,70	0,68	0,75	0,80
11	240	60	450	0,64	0,54	0,54	0,60	0,65
12	240	90	450	0,5	0,66	0,67	0,75	0,80
14	220	60	450	0,5	0,85	0,82	0,79	0,84
16	220	60	550	0,5	0,60	0,58	0,65	0,71
18	220	90	550	0,64	0,47	0,44	0,49	0,54
19	220	60	550	0,64	0,55	0,58	0,65	0,70
21	240	90	450	0,64	0,66	0,63	0,67	0,72
23	240	90	550	0,64	0,57	0,48	0,53	0,57
26	240	60	550	0,64	0,47	0,47	0,54	0,60
27	220	90	450	0,64	0,65	0,58	0,64	0,70
28	240	60	550	0,5	0,55	0,57	0,63	0,69
30	240	90	550	0,5	0,61	0,57	0,63	0,69
31	220	60	450	0,64	0,41	0,48	0,55	0,58
32	220	90	550	0,5	0,43	0,48	0,55	0,61

La tabla (2.26) nos muestra, los coeficientes de absorción máximos en cada intervalo.

Tabla 2. 26. Máximos coeficiente de absorción

CA1	CA2	CA3	CA4
0,85	0,82	0,79	0,84

En la Figura (2.34) observamos la curva del coeficiente de absorción acústica en el rango de frecuencias entre (400-4000) Hz, donde se produce el máximo de absorción acústica 0,83 sobre 800 Hz y todos los valores están por encima del 0, 7%.

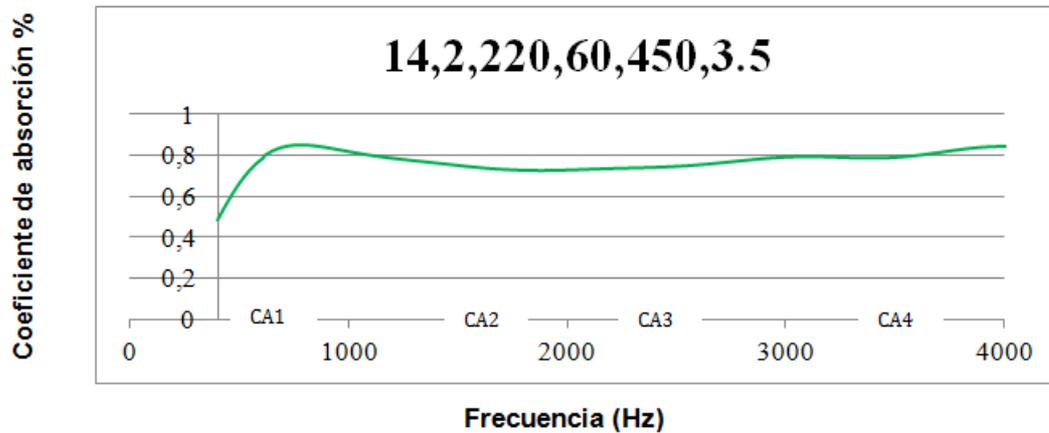


Figura 2. 34. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título del gráfico se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

2.4.4.9. Porosidad

La Tabla (2.27) representa los valores de la porosidad obtenidos en la muestra Nº 14 utilizando la Ecuación (2.4), vemos que la porosidad es del 73 %

Tabla 2. 27. Porosidad

Diámetro (cm)	Volumen inicial (cm ³)	Volumen comprimido (cm ³)	Volumen porosidad (cm ³)
60	84,82	22,90	61,92

$$\text{Volumen inicial} - \text{volumen comprimido} = \text{volumen porosidad} \quad (2.4)$$

$$84,82 - 22,90 = 61,92$$

$$\frac{61,92}{84,82} = 0,73$$

$$\text{Porosidad} = 0,73$$

2.4.4.10. Tortuosidad

En la Tabla (2.28) se han tabulado los valores de diferencia de potencial aplicados y las intensidades correspondientes, correspondientes a la resistencia opuesta por la muestra N° 14.

Tabla 2. 28. Diferencia de potencial e intensidades de la muestra y el electrolito

Diferencia de potencial (V)	Intensidad muestra (A)	Intensidad electrolito (A)
1	0,02	0,09
1,5	0,03	0,13
2	0,03	0,17
2,5	0,04	0,22
3	0,05	0,26
3,5	0,06	0,31
4	0,06	0,36
4,5	0,07	0,41
5	0,08	0,45
5,5	0,09	0,5
6	0,09	0,55
6,5	0,1	0,6
7	0,11	0,65
7,5	0,12	0,7
8	0,13	0,75

En la Figura (2.35) se muestran los resultados de la intensidad obtenida con el material y con el electrolito por separado a diferentes valores (1-8 V) de diferencia de potencial, donde la pendiente coincide con la resistencia.

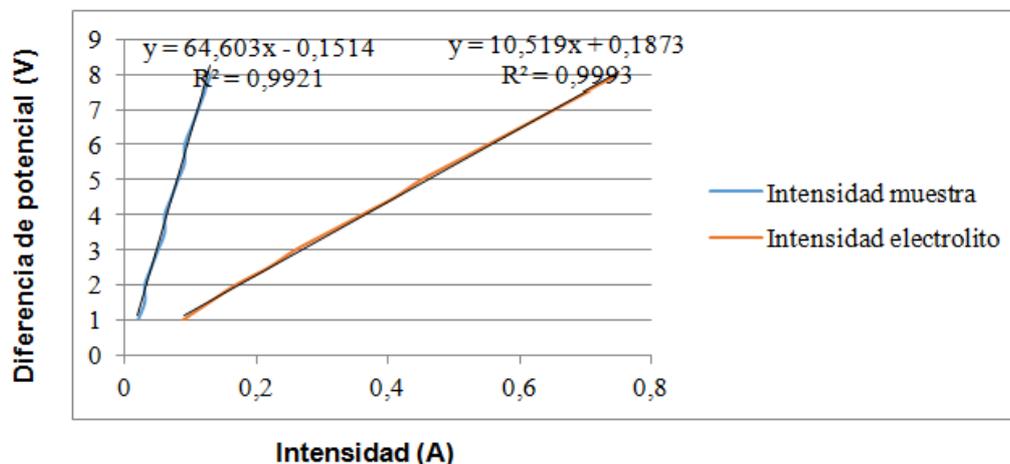


Figura 2. 35. Líneas de tendencia de la muestra y del electrolito

En la Ecuación (2.5) resolvemos la tortuosidad, operando con las pendientes de las líneas de tendencia, que representan la resistencia eléctrica, en los ensayos con muestra y sin muestra, y con el resultado de la porosidad obtenido en la Ecuación (2.3)

$$\frac{\text{Pendiente (I) muestra}}{\text{pendiente (I)electrolito}} \times \text{porosidad} = \text{Tortuosidad} \quad (2.5)$$

$$\frac{64,60}{10,52} \times 0,73 = 4,48$$

$$\text{Tortuosidad} = 4,48$$

2.4.4.11. Permeabilidad al flujo de aire

En la Tabla (2.29) se exponen, los valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire de la muestra N° 14 y su cálculo en la Ecuación (2.6)

Tabla 2. 29. Valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire

Presión (Pa)	Tobera	k Tobera	Densidad del aire (kg/m ³)	K, Conversión (mm/s)
160	2	78	1,2	0,278

$$K \text{ tobera} \times \sqrt{\frac{\text{Presión}}{\text{densidad aire}}} = \text{permeabilidad al aire} \quad (2.6)$$

$$78 \times \sqrt{\frac{160}{1,2}} = 900,66 \frac{m^3}{m^2 \times h}$$

$$900,66 \times 0,278 = 250,38 \frac{mm}{s}$$

$$\text{Permeabilidad al aire} = 250,38 \text{ mm/s}$$

2.4.4.12. Parámetros acústicos muestra N°14

En la tabla (2.30), exponemos los parámetros de conformación de las placas y los resultados de los parámetros acústicos

Tabla 2. 30. Resultados de los parámetros acústicos muestra N° 14, fibra N° 2

N°	°T	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
14	220	60	450	0,5	0,317	0,73	4,48	250,38

2.4.4.13. Monocapa, fibra N° 3

En la Tabla (2.31) presentamos las dimensiones y el peso correspondientes de la muestra evaluada, N° 35

Tabla 2. 31. Parámetros dimensionales muestra N°35

N°muestra	Peso	Diámetro	Espesor	Volumen	Densidad
35	13,08 g	4,2 cm	3 cm	39,58 cm ³	0,348 g/cm ³

2.4.4.14. Coeficiente de absorción acústica

En la Tabla (2.32) se muestran los resultados de los valores máximos del coeficiente de absorción acústica de cada intervalo, obtenidos en el tubo de impedancia acústica y los factores de conformación de cada placa, el mejor resultado según el criterio de valor máximo y continuidad en todo el rango, en este caso, de las 16 pruebas realizadas con la fibra N° 3, es la N° 35 cuyos parámetros de conformación son: 220 °C, 60 min., 550 g, 0,5 %.

Tabla 2. 32. Máximos coeficiente de absorción por intervalo fibra N° 3

N°	°T	t'	Peso	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
33	220	60	550	0,64	0,69	0,74	0,56	0,60
34	220	60	450	0,5	0,90	0,96	0,78	0,84
35	220	60	550	0,5	0,87	0,96	0,82	0,83
36	220	60	450	0,64	0,70	0,91	0,87	0,76
49	240	90	450	0,5	0,74	1	0,93	0,82
50	240	90	550	0,5	0,74	0,87	0,73	0,73
51	240	90	550	0,64	0,80	0,88	0,68	0,71

52	240	90	450	0,64	0,70	0,98	0,92	0,76
53	240	60	450	0,5	0,90	0,99	0,87	0,88
54	240	60	450	0,64	0,52	0,99	0,99	0,85
55	240	60	550	0,5	0,81	0,98	0,90	0,86
56	240	60	550	0,64	0,79	0,95	0,76	0,78
57	220	90	450	0,5	0,58	0,98	0,97	0,83
58	220	90	450	0,64	0,66	0,98	0,94	0,78
59	220	90	550	0,64	0,88	0,91	0,66	0,75
60	220	90	550	0,5	0,89	0,99	0,82	0,90

La tabla (2.33) nos muestra, los coeficientes de absorción máximos en cada intervalo.

Tabla 2. 33. Máximos, coeficiente de absorción

CA1	CA2	CA3	CA4
0,87	0,96	0,82	0,83

En la Figura (2.36) observamos la curva del coeficiente de absorción acústica en el rango de frecuencias entre (400-4000) Hz, donde se produce el máximo de absorción acústica por encima de 0,9 sobre 700 Hz y todos los valores se encuentran por encima del 0,7%, observamos que la absorción a bajas frecuencias (menos de 1000 Hz) es bastante eficiente.

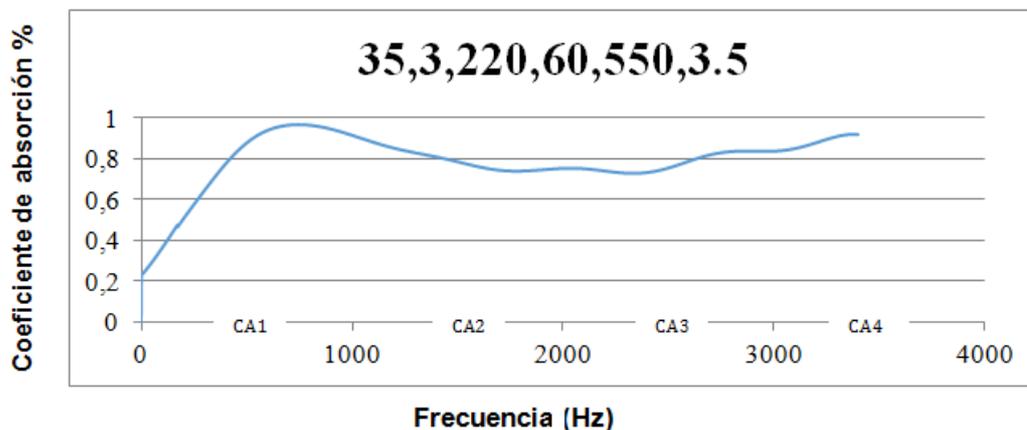


Figura 2. 36. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título del gráfico se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición el peso de la fibra y la presión

2.4.4.15. Porosidad

La Tabla (2.34) representa los valores de la porosidad obtenidos en la muestra N° 35, utilizando la Ecuación (2.7). Vemos que la porosidad es del 0,74 %

Tabla 2. 34. Porosidad

Diámetro (cm)	Volumen inicial (cm ³)	Volumen comprimido (cm ³)	Volumen porosidad (cm ³)
60	84,82	22,05	62,76

$$\text{Volumen inicial} - \text{volumen comprimido} = \text{volumen porosidad}$$

$$\frac{\text{Volumen porosidad}}{\text{Volumen inicial}} = \text{Porosidad}$$

(2. 7)

$$84,82 - 22,053 = 62,769$$

$$\frac{62,769}{84,82} = 0,74$$

$$\text{Porosidad} = 0,74$$

2.4.4.16. Tortuosidad

En la Tabla (2.35) se han tabulado los valores de diferencia de potencial aplicados y las intensidades correspondientes, debidas a la resistencia opuesta por la muestra N° 35

Tabla 2. 35. Diferencia de potencial e intensidades de la muestra y el electrolito

Diferencia de potencial (V)	Intensidad muestra (A)	Intensidad electrolito (A)
1	0,02	0,1
1,5	0,03	0,15
2	0,03	0,2
2,5	0,04	0,25
3	0,05	0,31
3,5	0,06	0,37
4	0,06	0,42

4,5	0,07	0,47
5	0,08	0,53
5,5	0,09	0,58
6	0,1	0,64
6,5	0,1	0,7
7	0,11	0,76
7,5	0,12	0,81
8	0,13	0,87

En la Ecuación (2.8) resolvemos la tortuosidad, operando con las pendientes de las líneas de tendencia que representan la resistencia eléctrica, en los ensayos con muestra y sin muestra y con el resultado de la porosidad obtenido en la Ecuación (2.7)

$$\frac{\text{Pendiente (I)muestra}}{\text{pendiente (I)electrolito}} \times \text{porosidad} = \text{Tortuosidad} \quad (2.8)$$

$$\frac{63,76}{9,04} \times 0,74 = 5,21$$

$$\text{Tortuosidad} = 5,21$$

2.4.4.17. Permeabilidad al flujo de aire

En la Tabla (2.36) se exponen los valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire, de la muestra N° 35 y su cálculo en la Ecuación (2.9)

Tabla 2. 36. Valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire.

Presión Pa	Tobera	k Tobera	ρ densidad del aire kg/m ³	k conversión mm/s
130	3	156	1,2	0,278

$$K \text{ tobera} \times \sqrt{\frac{\text{Presión}}{\text{densidad aire}}} = \text{permeabilidad al aire} \quad (2.9)$$

$$156 \times \sqrt{\frac{130}{1,2}} = 1623,69 \frac{m^3}{m^2 \times h}$$

$$1623,69 \times 0,278 = 451,38 \frac{mm}{s}$$

$$\text{Permeabilidad al aire} = \frac{451,38 \text{ mm}}{s}$$

2.4.4.18. Parámetros acústicos, muestra N° 35

En la tabla (2.37) exponemos, los parámetros de conformación de las placas y los resultados de los parámetros acústicos

Tabla 2. 37. Resultados de los parámetros acústicos muestra N° 35 fibra N° 3

N°	°T	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
35	220	60	550	0,5	0,349	0,74	5,21	451,38

2.4.4.19. Discusión coeficiente de absorción monocapa

En la Figura (2.37) vemos las curvas de absorción acústica de los resultados de las 3 fibras, que en un principio habíamos considerado que nos ofrecían el mejor rendimiento de absorbancia acústica.

La Fibra 1 (muestra N° 8) obtiene una absorbancia del 100% en 1700 Hz y en todo el rango desde 1200 a 4000 Hz supera el 70% de absorción, en bajas frecuencias, menos de 1000 Hz, está por debajo del 60%.

La Fibra 2 (muestra N° 14) tiene un comportamiento diferente a las otras dos fibras, vemos como tiene un máximo a 400 Hz, no muy acentuado respecto al conjunto que absorbe por encima del 70% en todo el rango prácticamente desde el principio.

La Fibra 3 (muestra N° 35) con un perfil parecido al de la fibra 1, con el máximo superior al 0,9 sobre 700 Hz, tiene un desplazamiento hacia frecuencias más bajas donde mejora el rendimiento de la Fibra 1, manteniendo a partir de 600 Hz una absorbancia superior al 70%.

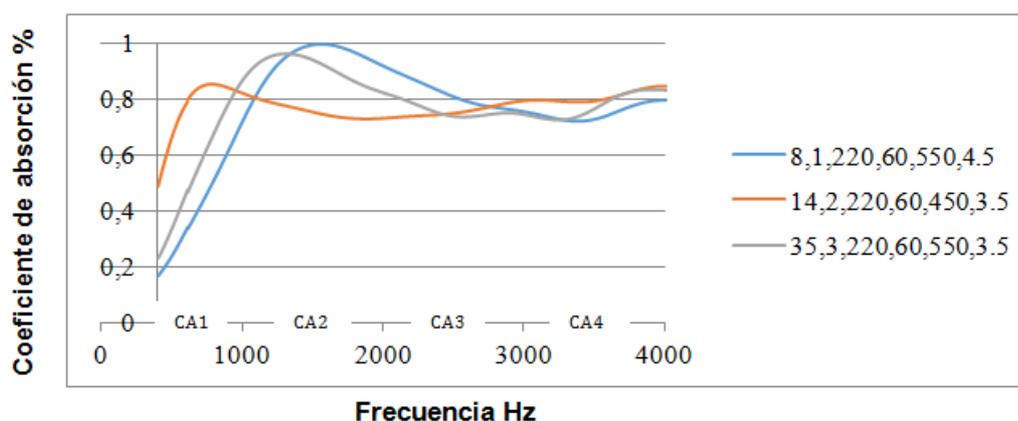


Figura 2. 37. Comparativa mejores resultados monocapa, en el título de las series se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.

Tabla 2. 38. Resultados de los parámetros acústicos muestras Nº 8, 14, 35 fibras Nº 1, 2,3

Nº	°T	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	permeabilidad
8	220	60	550	0,64	0,434	0,61	2,95	705,92
14	220	60	450	0,5	0,317	0,73	4,48	250,38
35	220	60	550	0,5	0,349	0,74	5,21	451,38

2.4.5. Bicapa, fibra Nº 1 y Nº 2

Las placas de las muestras bicapa, están constituidas por 2 capas de diferentes fibras con 1/2 del peso total de la placa, dispuesta una sobre otra, observando el criterio de anteponer los poros de mayor tamaño a los de menor tamaño, a fin de que las ondas sonoras, tengan una interacción más amplia con los dos materiales y no se solapen los efectos que se producen en un material, con el apantallamiento del otro, en lo que respecta a los parámetros de conformación, hemos elegido como los más idóneos los utilizados en las muestras escogidas como mejores de cada fibra (monocapa), y en el caso de no coincidir las fibras en algún parámetro, hemos confeccionado las muestras pertinentes para satisfacer la variación de los parámetros, con el fin de conseguir los mejores resultados en el coeficiente de absorción acústica, el método de exposición al tubo de impedancia acústica será colocar la muestra de tal manera, que la onda de sonido emitida por los micrófonos del tubo, incida sobre la fibra en el orden expuesto en el título de la muestra. Ejemplo fibra (1,2), será la fibra Nº 1 en la que primero incidirá la onda sonora.

.El criterio seguido para el conformado con las fibras 1 y 2 como componentes de las muestras, está basado en la elaboración de las muestras monocapa, donde la temperatura y el tiempo de exposición óptimo de las 2 mejores placas (Nº 8 y 14) es igual para ambas, 220 °C y 60', en cuanto al peso y el FC para cada una es distinto, por ese motivo vamos a conformar 4 placas con los parámetros temperatura y tiempo de exposición, como constantes y vamos a variar el peso y el FC.

En la Tabla (2.39) se muestran los parámetros dimensionales de las muestras de ensayo bicapa Nº 37, 38, 39 y 40.

Tabla 2. 39. Parámetros dimensionales muestra ensayo.

Nºmuestra	Peso (g)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Volumen(cm ³)	Densidad (g/cm ³)
37	11,46	4,2	3,43	45,25	0,253
38	15,2	4,2	2,5	32,98	0,460
39	12,34	4,2	3,08	40,63	0,303
40	13,38	4,2	2,56	33,77	0,396

2.4.5.1. Coeficiente de absorción acústica

Los valores máximos, conseguidos en el ensayo de absorción acústica, y los parámetros de conformación de las placas se pueden consultar en la Tabla (2.40)

Tabla 2. 40. Máximos coeficiente de absorción por intervalo

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total (g)	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
37	220	60	275	550	0,5	0,63	0,79	0,94	0,97
38	220	60	275	550	0,64	0,63	0,79	0,94	0,97
39	220	60	225	450	0,5	0,82	0,93	0,96	0,97
40	220	60	225	450	0,64	0,73	0,82	0,92	0,98

En la Figura (2.38) vemos las curvas de cada muestra generadas en el ensayo de absorción acústica, vemos que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica está representado por la muestra Nº 39, absorbe por encima del 90% prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado.

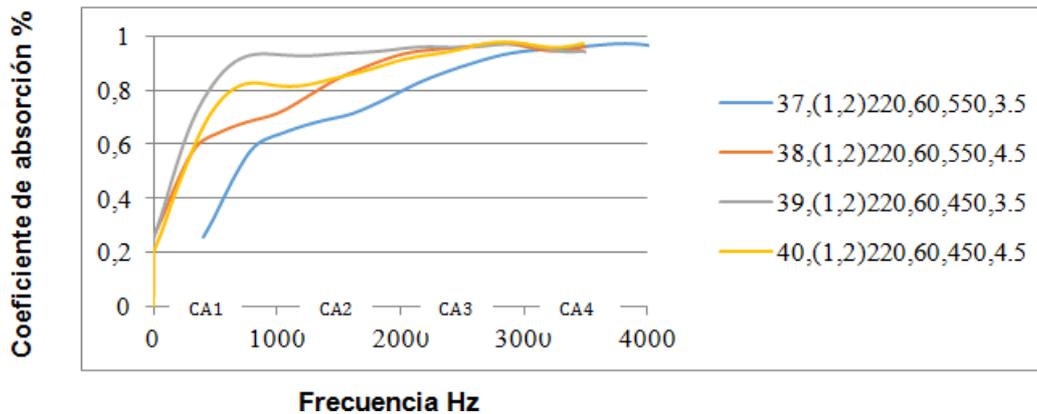


Figura 2. 38. Gráfico comparativo de las muestras (1,2) en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

2.4.5.2. Parámetros acústicos

En la tabla (2.41) se exponen los parámetros de conformación de las placas: Temperatura, Tiempo, Peso, Factor de compactación y los resultados de los parámetros funcionales: Porosidad, Tortuosidad, Permeabilidad, obtenidos de las muestras N° 37, 38, 39,40.

Tabla 2. 41. Parámetros de conformación de placas y parámetros funcionales de las muestras,

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total (g)	FC	Porosidad	Tortuosidad	permeabilidad
37	220	60	275	550	0,5	0,71	3,12	395,89
38	220	60	275	550	0,64	0,70	3,77	250,38
39	220	60	225	450	0,5	0,75	2,83	769,26
40	220	60	225	450	0,64	0,63	4,76	293,60

2.4.5.3. Fibra N°1 y N° 3

El criterio seguido para el conformado con las fibras 1 y 3 como componentes de las muestras, está basado en la elaboración de las muestras monocapa, donde la temperatura, el tiempo de exposición y el peso de las 2 mejores placas (N° 8 y 35) es igual para ambas, 220°C, 60' y 550 g, siendo diferente el FC, por ese motivo, vamos a conformar 2 placas con los parámetros temperatura, tiempo de exposición y peso como constantes y vamos a variar, el FC.

En la tabla (2.42) se muestran los parámetros dimensionales de las muestras ensayo bicapa N° 41 y N° 42.

Tabla 2. 42. Parámetros dimensionales de la muestra de ensayo.

Nºmuestra	Peso (g)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
41	16,85	4,5	3,18	41,95	0,401
42	14,21	4,5	2,30	30,34	0,468

2.4.5.4. Coeficiente de absorción acústica.

Los valores máximos por intervalo, conseguidos en el ensayo de absorción acústica, y los parámetros de conformación de las placas, se pueden consultar en la Tabla (2.43)

Tabla 2. 43. Máximos coeficiente de absorción por intervalo

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total (g)	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
41	220	60	275	550	0,5	0,84	0,99	0,87	0,96
42	220	60	275	550	0,64	0,67	0,90	0,86	0,90

En la Figura (2.39) representamos las curvas de cada muestra generadas en el ensayo de absorción acústica, vemos que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica está representado por la muestra N° 41, que absorbe por encima del 80% y tiene un máximo del 100% en 1400 Hz, la muestra N° 42 tiene una mayor absorción a bajas frecuencias.

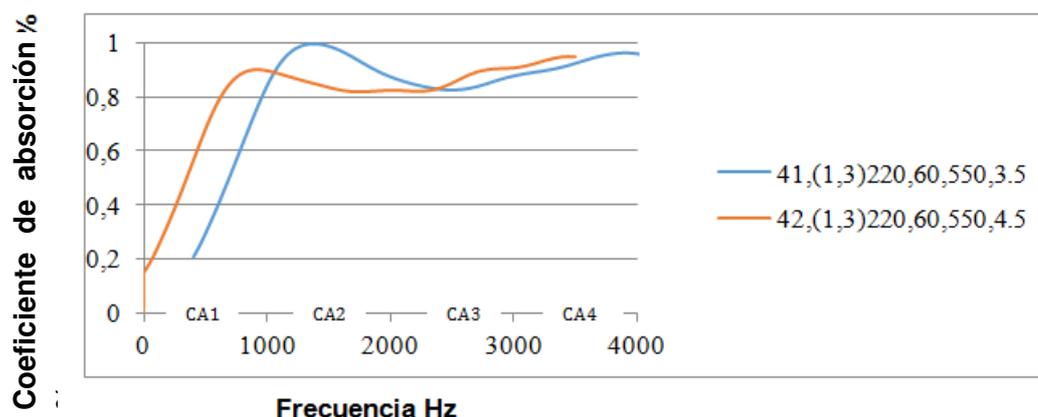


Figura 2. 39. Gráfico comparativo de las muestras (1,3) en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

2.4.5.5. Parámetros acústicos

En la tabla (2.44) se exponen los parámetros de conformación de las placas: Temperatura, Tiempo, Peso, Factor de compactación y los resultados de los parámetros funcionales: Porosidad, Tortuosidad, Permeabilidad, obtenidos de las muestras N° 41 y N° 42

Tabla 2. 44. Parámetros de conformación de placas y parámetros funcionales de las muestras.

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total (g)	FC	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
41	220	60	275	550	0,5	0,66	3,84	636,31
42	220	60	275	550	0,64	0,55	5,05	442,62

2.4.5.6. Fibra 3 y 2

El criterio seguido para el conformado con las fibras 3 y 2 como componentes de las muestras bicapa, está basado en la elaboración de las muestras monocapa, donde el tiempo, la temperatura y el FC óptimo, de las 2 mejores muestras (N° 14 y N° 35) es igual para ambas, 220 g; 0,5 % y 60', difiriendo en el peso, por lo tanto vamos a conformar 2 muestras, con los parámetros: temperatura, tiempo de exposición y FC, como constantes y variando el peso.

En la tabla (2.45) se muestran los parámetros dimensionales de las muestras del ensayo bicapa N° 43 y N° 44.

Tabla 2. 45. Parámetros dimensionales muestras ensayo bicapa

Nºmuestra	Peso (g)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Volumen(cm ³)	Densidad (g/cm ³)
43	16,54	4,2	3,28	43,27	0,382
44	11,3	4,2	3,24	42,75	0,264

2.4.5.7. Coeficiente de absorción acústica

Los valores máximos por intervalo, conseguidos en el ensayo de absorción acústica, y los parámetros de conformación de las placas, se pueden consultar en la Tabla (2.46)

Tabla 2. 46. Máximos coeficiente de absorción por intervalo

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total (g)	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
43	220	60	275	550	0,5	0,66	0,79	0,85	0,85
44	220	60	225	450	0,5	0,84	0,89	0,89	0,92

En la Figura (2.40) representamos las curvas de cada muestra, generadas en el ensayo de absorción acústica, observamos que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica, está representado por la muestra N° 44, la cual absorbe por encima del 90%, prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado.

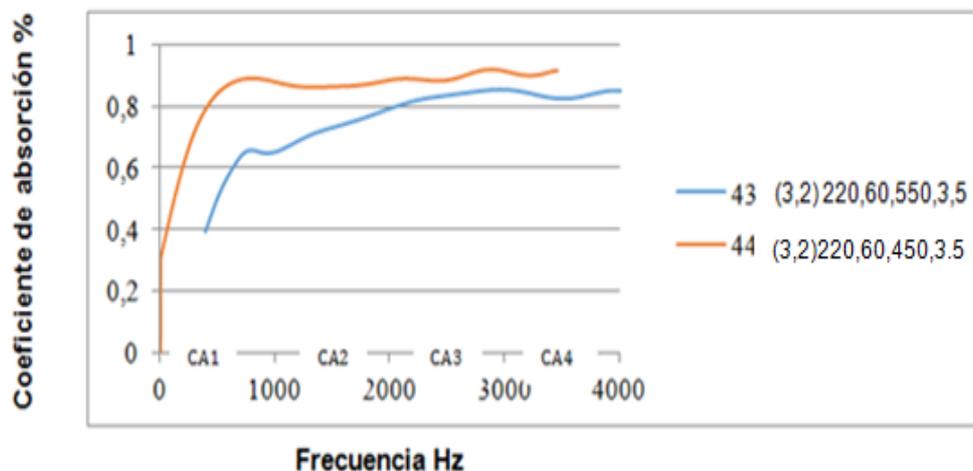


Figura 2. 40. Gráfico comparativo de las muestras, en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición el peso de la fibra y la presión.

2.4.5.8. Parámetros acústicos

En la tabla (2.43) se exponen los parámetros de conformación de las placas: Temperatura, Tiempo, Peso, Factor de compactación y los resultados de los parámetros funcionales: Porosidad, Tortuosidad, Permeabilidad, obtenidos de las muestras N° 43 y N° 44.

Tabla 2.43. Parámetros de conformación de placas y parámetros funcionales de las muestras

N°	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total (g)	FC	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
43	220	60	275	550	0,5	0,74	3,46	132,78
44	220	60	225	450	0,5	0,70	2,95	293,60

2.4.5.9. Discusión coeficiente de absorción bicapa

En la Tabla (2.39) se muestran los parámetros dimensionales de las muestras de ensayo bicapa N° 37, 38, 39 y 40 constituidas por las fibras n° 1 y 2

En la Figura (2.38) observamos en las curvas generadas en el ensayo de absorción acústica de cada muestra, que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica, está representado por la muestra N° 39, absorbe por encima del 90%, prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado.

En la tabla (2.42) se muestran los parámetros dimensionales de las muestras ensayo bicapa N° 41 y 42 constituidas por las fibras n° 1 y 3.

En la Figura (2.39) se representan las curvas generadas en el ensayo de absorción acústica de cada muestra, observamos que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica está representado por la muestra N° 41, absorbe por encima del 80% y tiene un máximo del 100% en 1400 Hz, la muestra N° 42 absorbe más a bajas frecuencias.

En la tabla (2.45) se muestran los parámetros dimensionales de las muestras ensayo bicapa N° 43 y 44 constituidas por las fibras n° 3 y 2.

En la Figura (2.40) vemos las curvas de cada muestra generadas en el ensayo de absorción acústica, constatando que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica está representado por la muestra N° 44, absorbe por encima del 90% prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado.

2.4.6. Tricapa, fibra 1, 3, 2

Las placas de las muestras tricapa, están constituidas por 3 capas de diferentes fibras con 1/3 del peso total de la placa, dispuesta una sobre otra y ordenadas por tamaño de poro, en lo que respecta a los parámetros de conformación, hemos elegido como los más idóneos los utilizados en las muestras escogidas como mejores de cada fibra, y en el caso de no coincidir en algún parámetro hemos confeccionado las muestras pertinentes para satisfacer la variación de los parámetros, con la finalidad de conseguir los mejores resultados en el coeficiente de absorción acústica, el método de exposición adentro del tubo de impedancia acústica, será colocar la muestra de tal manera, que la fuente de sonido emitida por los micrófonos del tubo incida sobre la fibra en el orden expuesto en el título de la muestra. Ejemplo fibra (1, 3, 2), será la fibra nº 1 en la que primero incida la onda sonora y la nº 3 la siguiente, así sucesivamente.

El criterio aplicado para el conformado con las fibras 1, 3, 2 como componentes de las muestras, está basado en la elaboración de las muestras monocapa, donde la temperatura y el tiempo de exposición óptimo de las 3 mejores muestras (Nº 8, 14 y 35) es igual para las tres, 220 °C y 60', en cuanto al peso y el FC para cada una es distinto, por ese motivo, vamos a conformar 4 muestras con los parámetros temperatura y tiempo de exposición, como constantes, variando el peso y el FC

2.4.6.1. Parámetros acústicos

En la tabla (2.47) se exponen los parámetros de conformación de las placas: Temperatura, Tiempo, Peso, Factor de compactación y los resultados de los parámetros funcionales: Porosidad, Tortuosidad, Permeabilidad, obtenidos de las muestras Nº 45, 46, 47 y 48.

Tabla 2. 47. Parámetros de conformación de placas y parámetros funcionales de las muestras

Nºmuestra	Peso (g)	Diámetro(cm)	Espesor (cm)	Volumen(cm ³)	Densidad (g/cm ³)
45	15,94	4,2	2,5	32,98	0,483
46	13,88	4,2	3,24	42,75	0,324
47	14,21	4,2	3,35	44,20	0,321
48	13,26	4,2	2,45	32,32	0,410

2.4.6.2. Coeficiente de absorción acústica

Los valores máximos por intervalo, conseguidos en el ensayo de absorción acústica y los parámetros de conformación de las placas, se pueden consultar en la Tabla (2.48)

Tabla 2. 48. Máximos coeficiente de absorción por intervalo

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total (g)	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
45	220	60	183	550	0,64	0,70	0,7315	0,792	0,837
46	220	60	150	450	0,5	0,81	0,903	0,930	0,950
47	220	60	183	550	0,5	0,80	0,87	0,91	0,93
48	220	60	150	450	0,64	0,74	0,87	0,86	0,89

En la Figura (2.41) observando las curvas de cada muestra generadas en el ensayo de absorción acústica, vemos que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica está representado por la muestra N° 46, absorbe por encima del 90%, prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado y absorbe de 0,4 a 0,6 % en frecuencias de 400 a 600 Hz.

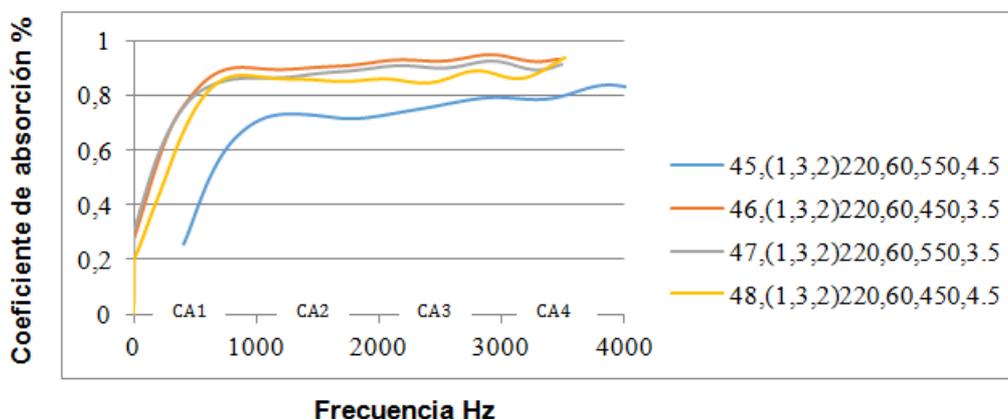


Figura 2. 41. Gráfico comparativo de las muestras, en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

En la tabla (2.49) exponemos los parámetros de conformación de las placas y los parámetros funcionales de las muestras 45, 46, 47,48.

Tabla 2. 49. Parámetros de conformación y parámetros acústicos

Nº	°T	t'	Masa	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
45	220	60	550	0,64	483	0,656	5,04	212,27
46	220	60	450	0,5	324	0,734	3,35	598,47

47	220	60	550	0,5	321	0,773	5,22	254,26
48	220	60	450	0,64	410	0,690	4,02	523,72

2.4.6.3. Fibra 2, 3,1

Con el motivo de comprobar si existen efectos adicionales al interponer una capa entre las otras dos y comprobar el resultado que obtendríamos si las muestras las colocáramos invertidas en el tubo de impedancia, teniendo las fibras más compactadas (por la clase de fibra) en primer plano con relación a la onda sonora, hemos medido el coeficiente de absorción acústica de la muestra N° 48 Tabla (2.50) por la otra cara.

Tabla 2. 50. Máximos coeficiente de absorción por intervalo

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por capa(g)	Peso total(g)	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
48º	220	60	150	450	0,64	0,67	0,70	0,67	0,77

En la Figura (2.42) observamos las curvas de cada muestra generadas en el ensayo de absorción acústica, comprobando que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica, está representado por la muestra N° 48 en la configuración (1, 3, 2), que absorbe por encima del 80% prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado y absorbe de 0,4 a 0,6 % a frecuencias de 400 a 600 Hz. La muestra colocada en el tubo con el orden (2, 3, 1) como podemos ver, tiene un comportamiento como absorbente acústico inferior.

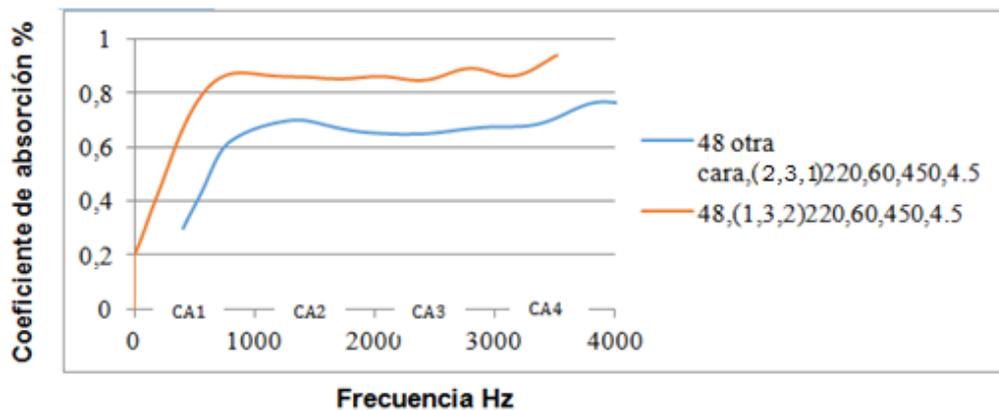


Figura 2. 42. Gráfico comparativo de la Muestra N° 48 por ambas superficies. En el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

2.4.6.4. Discusión coeficiente de absorción tricapa

En la tabla (2.47) se exponen los parámetros de conformación de las placas: Temperatura, Tiempo, Peso, Factor de compactación y los resultados de los parámetros funcionales: Porosidad, Tortuosidad, Permeabilidad, obtenidos de las muestras N° 45, 46,47 y 48, conformadas con las fibras n° 1, 3, 2.

En la Figura (2.41) representamos las curvas generadas en el ensayo de absorción acústica de cada muestra, vemos que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica, está representado por la muestra N° 46, la cual absorbe por encima del 90%, prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado y absorbe de 0,4 a 0,6 % a frecuencias de 400 a 600 Hz.

Colocando la muestra invertida en el tubo de impedancia, teniendo las fibras más compactadas (por la clase de fibra) en primer plano con relación a la onda sonora, hemos medido el coeficiente de absorción acústica de la muestra N° 48 compuesta por las fibras n° 2, 3, 1. Tabla (2.50).

En la Figura (2.42) presentamos las curvas de cada muestra generadas en el ensayo de absorción acústica, observando que el mejor comportamiento en cuanto a absorbancia acústica, está representado por la muestra N° 48 en la configuración (1, 3, 2) con una absorción por encima del 80%, prácticamente en todo el rango de frecuencias evaluado y absorbe de 0,4 a 0,6 % a frecuencias de 400 a 600 Hz. La muestra colocada en el tubo con el orden (2, 3, 1) como podemos ver, tiene un comportamiento inferior, como absorbente acústico.

2.4.7. Muestras compuestas por mezclas de fibras, fibra 1 y 2

Las muestras que hemos realizado como mezclas de dos fibras, han sido conformadas con 1/2 de cada fibra del peso total de la placa, en una mezcla desordenada de las fibras, con el propósito de evaluar, aplicándoles los mismos parámetros de conformación, las diferencias respecto al coeficiente de absorción acústica, al ser cotejadas con las muestras formadas con capas homogéneas, En la Tabla (2.51) vemos los parámetros dimensionales de la muestra N° 61

Tabla 2. 51. Parámetros dimensionales de la muestra ensayada

Nºmuestra	Peso (g)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Volumen(cm ³)	Densidad (g/cm ³)
61	11,56	4,2	3,45	45,52	0,253

2.4.7.1. Coeficiente de absorción acústica

Los valores máximos por intervalo, conseguidos en el ensayo de absorción acústica y los parámetros de conformación de las placas, se pueden consultar en la Tabla (2.52)

Tabla 2. 52. Máximos coeficiente de absorción por intervalo

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por fibra(g)	Peso total (g)	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
61	220	60	225	450	0,5	0,80	0,87	0,91	0,93

En la Figura (2.43) observamos el comportamiento de la muestra Nº 61, con un máximo de 0,9 en 1300 Hz y una absorción sobre el 0,8% en todo el rango estudiado

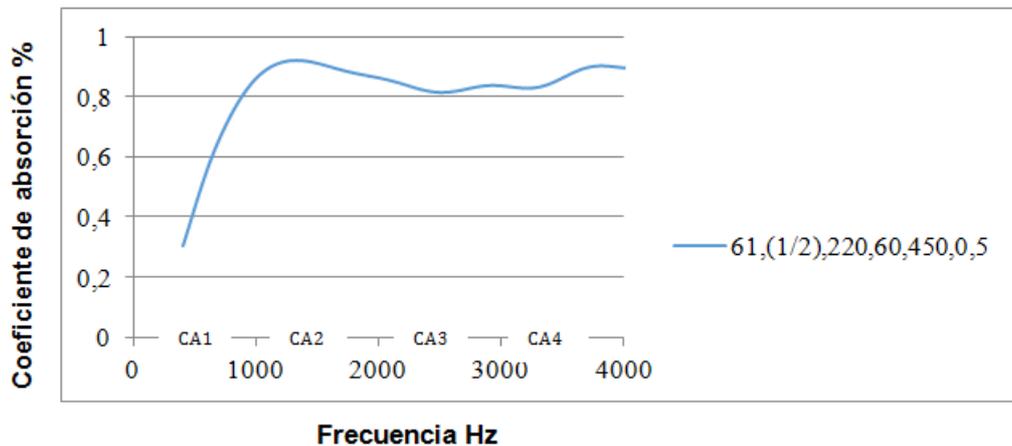


Figura 2. 43. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título de la serie se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

En la tabla (2.53) exponemos los parámetros de conformación de la placa y los parámetros funcionales de la muestra 61.

Tabla 2. 53. Parámetros de conformación de placa y parámetros acústicos de la muestra

Nº	°T	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	permeabilidad
61	220	60	225	0,5	0,253	0,68	0,03	1654,63

2.4.7.2. Discusión coeficiente de absorción mezclas de fibras, fibra 1, 2.

En la Figura (2.43) observamos el comportamiento de la muestra N° 61 con un máximo de 0,9 en 1300 Hz y una absorción sobre el 0,8% en todo el rango estudiado

2.4.8. Muestras compuestas por mezclas de fibras, fibra 1, 3, 2.

En este caso las fibras mezcladas son la 1, 3 y 2, el peso por fibra es 1/3 del peso total de la placa, la hemos conformado con los mismos parámetros con que realizamos la placa por capas y con las mismas fibras.

En la Tabla (2.53) se muestran los parámetros dimensionales de las muestra de mezcla

Tabla 2. 54. Parámetros dimensionales de la muestra de ensayo.

Nºmuestra	Peso (g)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Volumen(cm ³)	Densidad (g/cm ³)
62	10,92	4,5	3,1	40,903	0,266

2.4.8.1. Coeficiente de absorción acústica

Los valores máximos por intervalo, conseguidos en el ensayo de absorción acústica, y los parámetros de conformación de las placas se pueden consultar en la Tabla (2.54)

Tabla 2. 55. Máximos del coeficiente de absorción por intervalo.

Nº	°T (°C)	t' (min)	Peso por fibra(g)	Peso total (g)	FC	CA1	CA2	CA3	CA4
62	220	60	150	450	0,5	0,79	0,95	0,92	0,89

En la Figura (2.44) vemos la curva de la muestra N° 62 generadas en el ensayo de absorción acústica, la muestra absorbe el 90 % a 1500 Hz y se mantiene por encima del 80% en todo el rango.

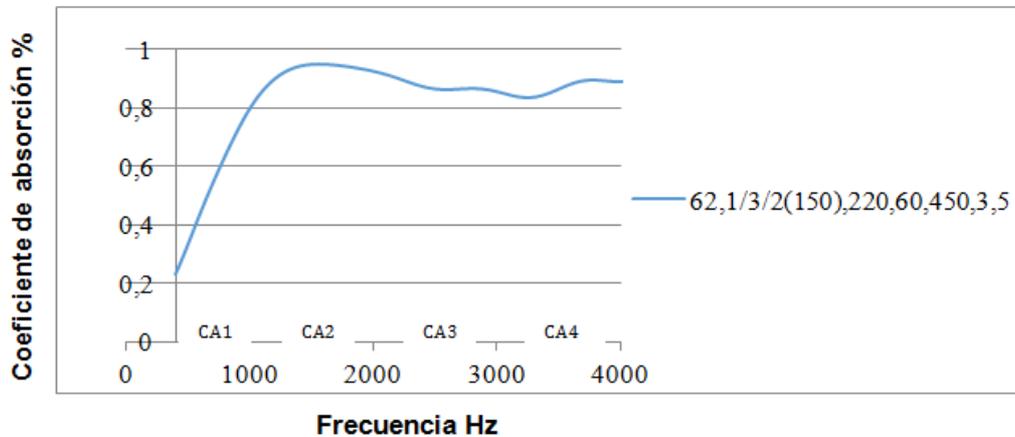


Figura 2. 44. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título de la serie se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

En la tabla (2.56) exponemos los parámetros de conformación de la placa y los parámetros funcionales de la muestra N° 62.

Tabla 2. 56. Parámetros de conformación de placa y parámetros acústicos de las muestras

Nº	°T	t'	Peso por fibra	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
62	220	60	150	0,5	0,267	0,73	1,06	541,37

2.4.8.2. Discusión coeficiente de absorción, mezclas de fibras, fibra 1, 3, 2.

En la Figura (2.44) representamos la curva generada en el ensayo de absorción acústica de la muestra N° 62, observamos que la muestra absorbe el 90 % a 1500 Hz y se mantiene por encima del 80%, en todo el rango de frecuencias estudiadas.

2.4.9. Comparativa entre conformado con bicapa y mezcla aleatoria.

En la figura (2.45) observamos el comportamiento de la muestra N° 39 generada con las fibras 1 y 2 por capas y la muestra n° 61 compuesta por las mismas fibras mezcladas, vemos un comportamiento distinto con un desplazamiento de máximos, la muestra N° 39 es más eficiente a partir de 1000 Hz, con un coeficiente de 0,9, mientras que la muestra N° 61, obtiene mejores resultados, en frecuencias menores de 1000 Hz. Llegando a un coeficiente de 0,9 a 800 Hz.

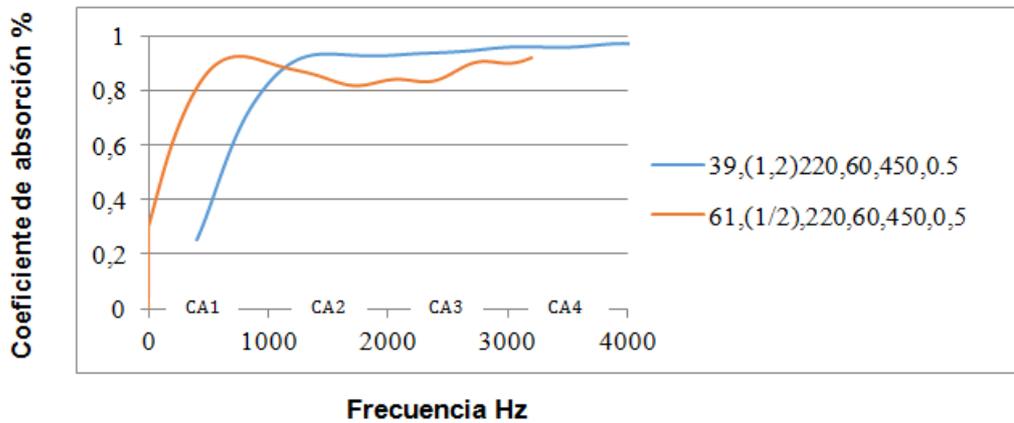


Figura 2. 45. Gráfico, comparativo de las muestras bicapa y mezcla. En el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.

2.4.10. Comparativa entre conformado con tricapa y mezcla aleatoria.

En la figura (2.46) observamos el comportamiento de la muestra N° 46 generada con las fibras 1, 3, 2 por capas y la muestra n° 62 compuesta por las mismas fibras mezcladas, vemos un comportamiento bastante aproximado, con una coincidencia de máximos, la muestra N° 46 es más eficiente a partir de 900 Hz, con un coeficiente de 0,9, la muestra N° 62, tiene un menor coeficiente de absorción acústica en el rango de 1500 a 3500 Hz, por encima del 0,8.

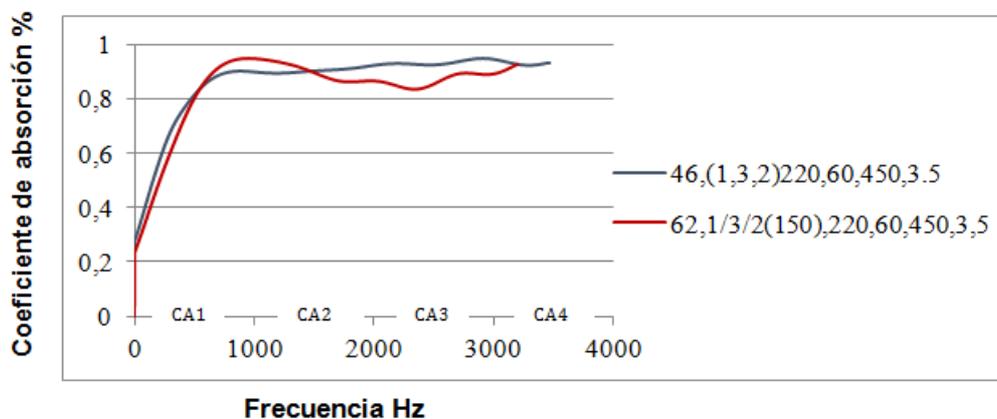


Figura 2. 46. Gráfico, comparativo de las muestras tricapa y mezcla en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

2.4.11. Mejor resultado

En la figura (2.47) se expone el mejor resultado de entre todas las combinaciones ensayadas, como vemos, el comportamiento de la muestra N° 39 es muy regular en todo el rango de frecuencias estudiado, con un coeficiente de absorción acústica por encima del 0,9 a partir de 1200 Hz, teniendo una absorción notable a bajas frecuencias, con coeficientes de absorción acústica entre 0,4 y 0,6 por debajo de los 1000 Hz.

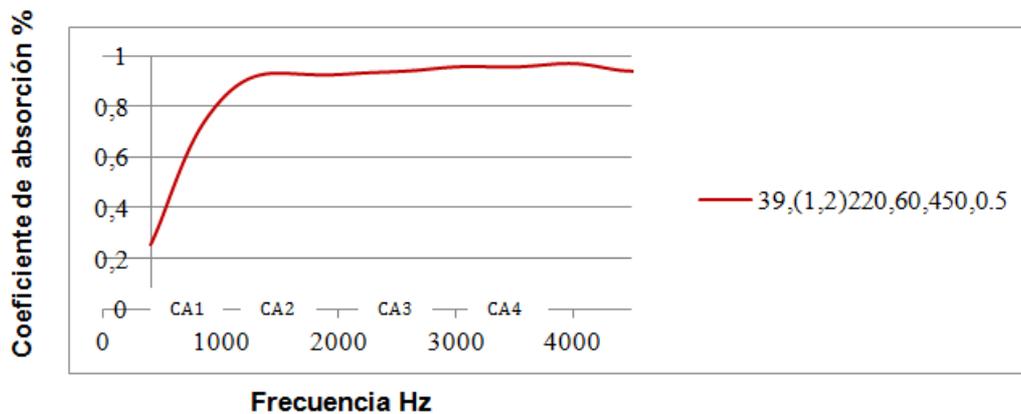


Figura 2. 47. Gráfico del mejor resultado del Coeficiente de absorción acústica, en el título de la serie se incluye: el n° de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión

2.4.12. Comparativa con la lana mineral.

En la Figura (2.48) vemos el resultado de comparar la muestra N° 39 y dos muestras de lana mineral de 30 mm y 40 mm de espesor, siendo esta materia la que se usa habitualmente como acondicionador acústico, acompañando en el reverso a los paneles de escayola con orificios, que vemos regularmente en el techo de las edificaciones.

Tanto la muestra N° 39, como la lana mineral de 40 mm tienen un comportamiento similar, como hemos descrito en la evaluación de la muestra, la lana de 30 mm de espesor tiene un comportamiento diferente, llega al 100% de absorción acústica a partir de los 2000 Hz y se mantiene constante a partir de este punto, el rendimiento a bajas frecuencias por debajo de 1000 Hz, es notablemente más bajo.

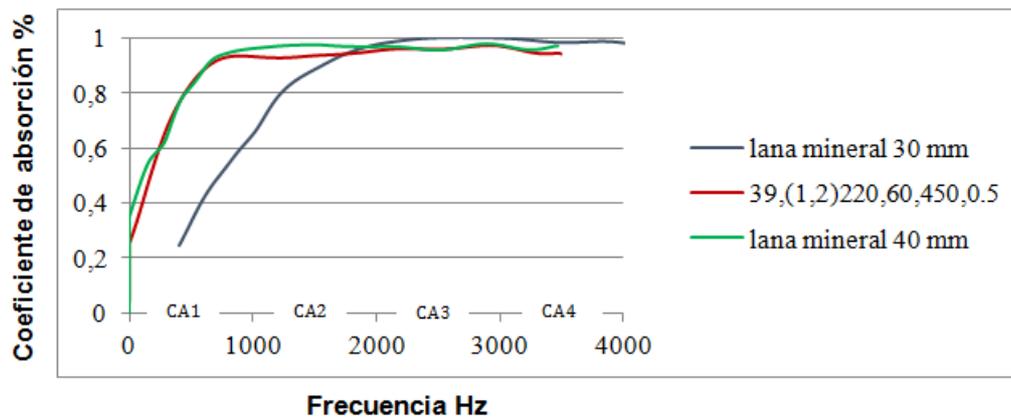


Figura 2. 48. Gráfico comparativo entre el comportamiento de la muestra N° 39 y la lana mineral en el título de las series se incluye: el n° de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.

2.4.13. Conclusiones

Concluimos que el n° de muestras realizadas 63 en la investigación de sus cualidades como absorbentes acústicos, ha sido suficiente en cuanto a posibles combinaciones de las tres clases de fibra.

La Fibra n°1 consigue el mejor resultado con un peso de 550 g y FC de 0,64 llegando a máximos del 1 en el coeficiente de absorción acústica, esto está relacionado con la morfología de la fibra que al estar compuesta por fragmentos de hilos, es necesario mas proximidad (compactación) entre ellos, en la placa para poder interaccionar mejor con la onda sonora.

La Fibra n°2, consigue el mejor resultado, con un peso de 450 g y FC 0,5, superando el 0,83 de coeficiente de absorción, en un máximo sobre 600 HZ, la mejor cualidad de esta fibra, es su poder de absorción constante en todo el rango de frecuencias, entre (400-4000) Hz, donde los valores del coeficiente de absorción acústica están por encima del 0,7%, sin duda la morfología de estas fibras cortas con diámetros pequeños, provoca un mayor encaje entre ellas y necesitan de una compactación menor.

La Fibra n°3, en los resultados está en un punto intermedio entre la 1 y la 2, con un peso de 550 g como la n°1 y un FC de 0,5 como la muestra n°2 su composición formada por mezcla de fibras y fragmentos de hilos, produce que por un lado su punto máximo, sea menor que en la fibra n°1 y que su rango de absorción se desplace hacia frecuencias más bajas, teniendo un comportamiento intermedio entre la fibra n°1 y n°2

este fenómeno puede darse por sus características, al estar compuestas por elementos comunes a cada una de las otras muestras.

Al analizar la relación en las muestras monocapa entre los parámetros físicos y acústicos se concluye.

- La densidad se incrementa y el espesor disminuye con el factor de compactación, algo que cabe esperar pues es un resultado fruto del proceso de compactación, por otro lado este resultado se obtiene debido también a que en el proceso, el paralelismo entre las fibras se mantiene, existiendo en principio poco entrecruzamiento.

- La porosidad disminuye con el factor de compactación y también lo hace la tortuosidad, mientras que la permeabilidad se incrementa. Este resultado tan solo se puede justificar considerando la diferente morfología del tipo de fibras empleadas y la compactación obtenida.

- A mayores porosidades se consiguen también mayores tortuosidades, sin embargo las permeabilidades disminuyen. Muestras con mayores espesores presentan también mayor permeabilidad. La porosidad mayor va asociada a menores densidades. Concluimos pues que la tortuosidad afecta más a la permeabilidad que la porosidad.

- Tortuosidades mayores van asociados a menores permeabilidades, lo que nos permite concluir con el apartado anterior y a mayores espesores así como a densidades más bajas. Tenemos pues muestras más densas de mayor espesor y más tortuosas que disminuyen la permeabilidad

2.4.13.1. Bicapa

Al analizar la relación en las muestras bicapa entre los parámetros físicos y acústicos se concluye que:

- El factor de compactación disminuye espesores e incrementa densidades, algo que cabía esperar de un producto de naturaleza preferentemente fibrosa, donde no existen reacciones que puedan dar lugar a espumados de ningún tipo, ni reacciones de contracción.

- El factor de compactación provoca una disminución de la porosidad y un ligero incremento de la tortuosidad, hecho este que nos indica que la disminución de volumen y de la porosidad, provoca un ligero entrecruzamiento de las fibras.

- Con el incremento del factor de compactación, se produce un decremento de la permeabilidad, resultado lógico si se tienen en cuenta los apartados anteriores.
- La porosidad presenta una relación inversa con la tortuosidad, los productos más porosos suelen ser menos tortuosos y a la inversa, hecho que justifica la naturaleza del producto de naturaleza fibrosa y el proceso de conformado que es la termocompresión.
- Los productos más permeables son los de mayor espesor y menor densidad, hecho lógico dado que la permeabilidad está relacionada directamente con la porosidad e inversamente con la tortuosidad.

2.4.13.2. Muestras tricapa 1.3.2.

- El factor de compactación, provoca un decremento de espesores y una mayor densificación del producto. Provocando una disminución de la porosidad y también de la permeabilidad resultado esperado del propio proceso.
- La porosidad se incrementa con el espesor y disminuye las densidades del producto final, es evidente que el proceso de compactación disminuye el tamaño de los poros en el sentido de la onda acústica incidente.
- Espesores mayores van asociados a densidades menores, efecto este también debido a la porosidad existente.
- En tres de las muestras analizadas, el incremento de la porosidad, va seguido de un decremento de la tortuosidad y un incremento de la permeabilidad, indicando este resultado que el proceso de elaboración supone una mayor influencia en la porosidad que en la tortuosidad, hecho este comprensible por la naturaleza del producto fibroso. Sin embargo en una cuarta muestra, el incremento de la porosidad va seguido de un incremento de la tortuosidad y un descenso de la permeabilidad y en este caso, el incremento de la porosidad es superado en efecto, por la tortuosidad consiguiéndose un efecto de disminución de la permeabilidad. Hay que tener en cuenta por otro lado que es la muestra más densa y de mayor espesor, resultado lógico al comprobar estos dos parámetros físicos. También hay que considerar que las fibras consideradas, son fibras que aparecen con un mayor o menor grado de contaminación del triturado de neumático de diferente granulometría.
- El incremento de la tortuosidad va asociado a una disminución de la permeabilidad, efecto que cabía esperar, dado que en todas las muestras analizadas el

incremento de la tortuosidad, supone un decremento de la permeabilidad causado por que el camino que sigue la onda acústica es más tortuoso.

2.4.13.3. Muestra 2, 3, 1

Conclusión, la ubicación de la muestra menos permeable en la capa donde incide la onda sonora disminuye los procesos de absorción acústica, haciendo al conjunto menos permeable al paso de la onda acústica.

- Por otro lado observamos como las frecuencia de absorción se desplaza a frecuencias mayores lo que equivale a longitudes de onda menores, hecho este evidente dado que la longitud de onda que va a provocar los fenómenos de absorción acústica, debe estar relacionada con el tamaño de poro, su distribución y su interconexión, es decir con su porosidad, su distribución y la distribución de la misma que configura la tortuosidad.
- Podemos considerar en una primera aproximación, que la porosidad de la muestra no se modifica o modifica poco con el cambio del sentido (132 a 231) de ubicación de la muestra, teniendo en cuenta como se ha obtenido la muestra, el mismo criterio pero más conservador podríamos aplicar a la tortuosidad, luego podemos afirmar en principio que la pérdida del coeficiente de absorción disminuye porque la capa de menor permeabilidad que es la primera capa provoca un fenómeno de reflexión de determinadas longitudes de onda, hecho este que confirma los valores menores del coeficiente de absorción acústica en todo el rango de frecuencias, por otro lado la baja absorción a bajas frecuencias y longitudes de onda mayores puede ser un indicador de un tamaño de poro menor que el encontrado en las otras capas.
- Por contra la distribución 1, 3, 2 teniendo en cuenta las permeabilidades decrecientes es una combinación optima pues permite una mejor absorción acústica por el hecho de absorción progresiva por capas de mayor a menor permeabilidad.

2.4.13.4. Comparativa capas y mezclas 1/2 y 1+2

En cuanto al factor de compactación ha sido el mismo para muestra bicapa y la mezcla. La mezcla aparece como un producto menos poroso, mucho menos tortuoso y más permeable, de mayor espesor y de menor densidad.

- La absorción a bajas frecuencias, es menor en la muestra de la mezcla que en la bicapa a pesar de tener esta muestra un mayor espesor, este efecto puede

ser debido a la configuración, tamaño y distribución de los poros en la muestra fruto de la mezcla, su baja tortuosidad y densidad configuran a la muestra fruto de la mezcla como un producto mucho más poroso que tortuoso y como resultado mucho más permeable.

2.4.13.5. Comparativa capas y mezclas 1/3/2 y 1+3+2

La mayor densidad, con la menor porosidad, mayor tortuosidad, mayor espesor y mayor permeabilidad se consigue con la muestra tricapa. Parece haber aquí un efecto compensatorio entre la formación tricapa y la mezcla ternaria. Existiendo en este caso un comportamiento similar, siendo más regular el comportamiento a mayores frecuencia en la muestra tricapa.

2.4.13.6. Fibras estándar Justificación final.

Los diferentes valores obtenidos para las porosidades y tortuosidades son resultado de la diferente configuración de las muestras debido a los diferentes tipos de fibra utilizados y a la variación de los parámetros de conformado. Las densidades oscilan entre 295 y 543 Kg/m³ y las permeabilidades oscilan entre 171 y 1695 mm/s

- Podemos pues concluir que los productos obtenidos son relativamente densos comparados con las espumas de naturaleza polimérica (Espumas de poliuretano para fines de absorción acústica (11-80 Kg/m³), El estudio realizado ha sido amplio y exhaustivo.
- Los resultados muestran como el proceso de conformación de las fibras influye en el rango de frecuencias y en el valor del coeficiente de absorción acústica.

3. CONCLUSIONES FINALES

3.1. Introducción

En cuanto a los resultados obtenidos

- Problemática medioambiental

En Europa en el 2014 el tratamiento ejecutado por las diferentes empresas de gestión NFUs, ascendió a 1.200.231 Tn y en España a 144.549 Tn de las cuales, la recuperación de fibras textiles, representan un 5% del peso, tenemos para hallarles nuevas aplicaciones 60.000 Tn de fibras textiles a nivel europeo y 7.227 Tn en nuestro país.

Vemos que de las fibras textiles hasta ahora aparte de su valoración energética, no existen aplicaciones a pesar que el peso de la fibra a recuperar es sustancialmente importante. En la legislación analizada, la valorización energética del NFU, está considerada para el NFU en general, pero no existe un apartado específico, para la reutilización y o valoración de diferentes tipos de este residuo específicamente. La aplicación de las fibras en productos finales con características funcionales eficientes, debe llevar a la consecución de estándares de calidad y ser revalorizada como productos derivado del NFU.

- Tecnología textil

Los no-tejidos son una lámina o red de fibras y filamentos artificiales o naturales, excluyendo al papel, que no se ha tejido y conforman un velo o napa de fibras flexibles y porosas, sin trama, como el fieltro donde las fibras están adheridas entre sí usando alguno de los siguientes métodos:

- Agregando un adhesivo.
- Fusionando las fibras con calor.
- Fusionando las fibras, disolviendo y resolidificando su superficie.
- Creando «marañas» o «mechones» con las fibras.
- Usando puntadas para mantener las fibras en su lugar.

Dada la naturaleza de las fibras, podríamos emplear métodos de compactación: como agregar un adhesivo, fusionar fibras con el calor, creando mechones y marañas entre las fibras.

En nuestro caso debido a la disparidad de diámetros y longitudes y punto de fusión de las fibras, hemos utilizado el proceso de termocompresión en discontinuo, es el más sencillo y de menor inversión, para analizar la influencia de las variables, con respecto a las propiedades conseguidas en el producto final. Consiste en aplicar calor y

presión a la fibras enmarañadas, donde también pueden haber existido efectos de reblandecimiento de fibras por la temperatura.

- Fundamentos acústicos

Los métodos empleados para la caracterización acústica de los materiales confeccionados han sido: el tubo de impedancia acústica donde hemos medido el coeficiente de absorción acústica, la porosidad la hemos obtenido mediante el cálculo de diferencia de volúmenes, entre volumen a presión atmosférica y volumen a 5 KN de presión, la tortuosidad la hemos evaluado, por la diferencia entre los valores de intensidad obtenidos a diferentes voltajes mediante la inmersión de la muestra en un electrolito, comprobando la resistencia eléctrica de la muestra sumergida y con el electrolito solamente, conservando la misma distancia de separación entre electrodos, la permeabilidad la hemos determinado utilizando un permeámetro EHVAK 2000, que mide la diferencia de presión, sobre la muestra y la velocidad del paso de aire por la muestra.

- Diseño de experimentos

Los métodos empleados son:

El diseño factorial, se usa en experimentos, que incluyen varios factores cuando queremos estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. El más importante es el de k factores, cada uno con sólo dos niveles que pueden ser cuantitativos o cualitativos. Una réplica completa de este diseño requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se le llama diseño factorial 2^k

El análisis de la varianza (ANOVA, Analysis of variance) [28] engloba modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está repartida en ciertos componentes debido a diferentes variables explicativas.

El Análisis de Pareto es una comparación cuantitativa y ordenada de elementos o factores según su contribución a un determinado efecto.

El Modelo para los datos, el de las medias como el de los efectos, son modelos estadísticos lineales, la variable de respuesta es una función lineal de los parámetros del modelo

Optimización de un proceso, en un experimento de caracterización, el interés suele centrarse en determinar las variables del proceso que afectan la respuesta. El

siguiente paso es la optimización, determinar la región de los factores importantes que conduzcan a la mejor respuesta posible.

- Estudio bibliométrico

En la búsqueda bibliográfica las referencias con las palabras claves relacionadas con el reciclado de las fibras y las propiedades referentes a sus usos acústicos hallamos muy pocas referencias, pero cuando nos centramos en “recycled fibers and acoustics and absorber” no encontramos ningún artículo relacionado.

En el campo del reciclado de fibras y fluff las pocas referencias encontradas justifican el proceso innovador que supone nuestra investigación.

3.2. Experimental

- Diseño de experimentos

Los parámetros de mayor influencia han sido: el tipo de fibra, la masa y su interrelación, es notorio que la clase de fibra es fundamental para los resultados y la masa o peso de fibra es la que influye en la densidad de la muestra y por lo tanto en su capacidad de absorción acústica.

El diseño de experimentos, nos ha sido muy útil sobre todo en la relación del número de muestras y las interacciones entre parámetros.

- Análisis morfológico

La fibra uno, tiene un rango de longitudes extenso, oscila entre 2 y 43, mm encontrándose fibras entre 74 y 78 mm. Los diámetros en la muestra uno, pertenecen a trozos de hilos formados por fibras paralelizadas y retorcidas a 2 cabos, por este motivo su distribución fluctúa entre 0,5 y 1,33 mm.

La fibra dos, compuesta por fibras muy cortas, casi polvo, están más igualadas, tienen longitudes entre 2 y 8 mm. Los diámetros en la muestra dos pertenecen a fibras, por lo tanto sus medidas varían desde 0,01 a 0,02 mm.

En la fibra número tres, la distribución por longitudes se encuentra entre 2 y 16 mm. En los diámetros de la muestra tres vemos dos distribuciones distintas al estar compuesta por hilos y fibras por un lado tenemos un rango de 0,011 a 0,033 mm y por otro un rango entre 0,66 y 1,44 mm.

Hemos comprobado que la fibra 1 y la fibra 2 se complementan en cuanto a absorción acústica se refiere, la fibra uno ofrece máximos del 1 en algunos intervalos y la fibra dos ofrece mejor absorción a bajas frecuencias y continuidad en todo el rango con una absorción menor, sobre el 0,8%, al combinarlas se produce un efecto sinérgico y el resultado es una absorción cercana al 100% en todo el rango de frecuencias.

La fibra tres es prácticamente una mezcla entre la 1 y la 2. Y su contribución en las muestras compuestas, no ha sido determinante en los mejores resultados, que los han obtenido las fibras 1 y 2.

- Análisis químico

El cord de los neumáticos de donde proceden las fibras estudiadas, están compuestos por diferentes clases de fibras, las que están en mayor proporción en peso, son la Poliamida con casi un 58 % seguida del Poliéster con un 26% las fibras de naturaleza proteínica y celulósica están en pequeña proporción sobre un 8%.

- Relación entre los parámetros físicos y acústicos

En la fibra número uno, los parámetros que más influyen en la conformación de esta fibra son la masa y el factor de compactación o sea la densidad, mientras que la temperatura afecta en menos cuantía y el tiempo no afecta.

En la fibra número dos, el parámetro menos influyente es el tiempo y los que más afectan son: el factor de compactación, la masa introducida en el molde y la temperatura.

En la fibra número tres, el parámetro menos influyente es el tiempo y los parámetros que más influyen: la masa, el factor de compactación y la temperatura.

En los tres tipos de fibras, el tiempo de compactación influye poco en las posibles reacciones, entre las fibras y entre las fibras y el molde. El incremento de la masa es evidente que influye, dado que es un factor determinante de la densidad del producto final, lo mismo podemos indicar sobre el factor de compactación.

La influencia de parámetros como la temperatura son dependientes del tipo de fibra y especialmente de su contenido en caucho, que puede provocar en el proceso de

sinterizado, revulcanizados en ciertos puntos de la muestra, además del posible reblandecimiento.

- Criterio de selección

El criterio para escoger los mejores resultados de cada fibra se ha basado en:

La fibra número uno, la muestra nº 8 que tiene el máximo de coeficiente de absorción 1 que representa el 100% de absorción en el rango más amplio.

La fibra dos, la muestra nº 14 que presenta la mayor absorción con los valores constantes, en todo el rango de Frecuencias.

La fibra número tres, la muestra nº 35 que tiene el mayor coeficiente de absorción entre todas las muestras confeccionadas con esta fibra en todos los intervalos.

- Monocapa

El factor de compactación, reduce espesores e incrementa densidades, aspecto este que se obtiene como resultado del proceso de termo compresión y la naturaleza de las fibras que son en sí elementos flexibles.

La tortuosidad disminuye con la compactación debido posiblemente al provocar un mayor paralelismo de las fibras.

Las muestras más porosas son menos densas, hecho este que vendría también justificado por el paralelismo de las fibras durante el proceso de compactación.

Las muestras menor compactadas son más tortuosas, indicando este resultado que la compactación posiblemente incrementa el paralelismo.

Hay que entender, que el conjunto de los resultados obtenidos, está influenciado lógicamente por el tamaño de la fibra y su manipulación en el proceso de compactación.

La permeabilidad, disminuye con el proceso de compactación, debido principalmente a la disminución de los poros.

La permeabilidad, es una función directamente relacionada con la porosidad e inversamente relacionada con la tortuosidad, también lógicamente con el espesor y la densidad obtenida en cada muestra.

La mejor muestra obtenida, ha sido la número ocho con el coeficiente de absorción 0,72, 1,01, 0,92 0,80 en los intervalos C1, C2, C3, C4 y con los parámetros físicos 2,5 cm de espesor 0,434 g/cm³ densidad y con los parámetros acústicos porosidad 0,62, tortuosidad 3, permeabilidad 705,93 mm/s.

Las muestras empleadas, pueden tener cierto grado de heterogeneidad, debido a la composición de la fibra su distribución en longitudes y su mayor o menor contaminación en caucho.

- Bicapa

Las afirmaciones realizadas con anterioridad, sobre las muestras monocapa, en cuanto a la influencia del factor de compactación con respecto a los parámetros como: densidad, espesor, tortuosidad, porosidad y permeabilidad se mantienen, pero en este caso tendría que tenerse en cuenta, los factores de interfase y los parámetros acústicos de cada una de las fases (capas analizadas) y como no, sus posibles efectos en la porosidad y tortuosidad, que ahora son el resultado de la combinación de porosidades y tortuosidades de cada capa y la interfase. Tengamos en cuenta, que la permeabilidad obtenida está directamente relacionada con estos parámetros y su interrelación.

La mejor muestra obtenida ha sido la número treinta y nueve con los coeficiente de absorción 0,83; 0,93; 0,96; 0,97 en los intervalos C1, C2, C3, C4 y con los parámetros físicos 3,08 cm de espesor 0,303 g/cm³ de densidad y con los parámetros acústicos, porosidad 0,76; tortuosidad 3; permeabilidad 769,26 mm/s.

- Tricapa

En las muestras tricapa, se ha seguido la secuencia lógica de mayor porosidad a menor, para hacer la muestra más permeable y el resultado obtenido en cuanto a coeficiente de absorción y parámetros físicos y acústicos, ha sido la muestra número cuarenta y seis con los coeficiente de absorción 0,810; 0,90; 0,93; 0,95 en los intervalos C1, C2, C3, C4 y con los parámetros físicos 3,24 cm de espesor 0,324 g/cm³ densidad y con los parámetros acústicos, porosidad 0,73; tortuosidad 3, permeabilidad 598,48 mm/s.

Lo dicho en las muestras bicapa es aplicable también en este caso y el resultado obtenido con la muestra medida a la inversa era esperable, debido a la baja

permeabilidad de la capa realizada con la fibra 2. Tan solo se hizo para confirmar el planteamiento teórico.

- Comparativa conformado por capas y conformado por mezclas

En cuanto a las muestras bicapa y las muestras de mezcla, el mejor resultado se obtiene con la muestra número treinta y nueve, conformada por capas cuyos valores de parámetros físicos, acústicos y coeficiente de absorción acústica quedan reflejados en el apartado de bicapa (página 153)

Con respecto a las muestras tricapa y la mezcla de las tres fibras, el comportamiento acústico analizado a través de su coeficiente de absorción es semejante, a pesar tener parámetros físicos y acústicos diferenciados, existiendo una especie de compensación entre ellos.

- El mejor resultado de las combinaciones y muestras ensayadas

La búsqueda de los efectos de absorción acústica entre combinaciones de las tres fibras, ha dado su fruto al conseguir en la muestra número treinta y nueve un resultado, donde se conjugan las propiedades de la fibra 1 muestra número ocho, al conseguir absorbancias del 100% en ciertos valores de rango, con el comportamiento de la fibra 2 muestra número catorce, con valores máximos menores pero con una curva más estable en todo el rango de frecuencias estudiado, la muestra treinta y nueve, combinación por capas de la fibra 1 y 2, carece de máximos destacables pero ofrece un perfil de coeficiente de absorción acústica, con un absorción por encima del 90% a partir de 1000 Hz y del 40% hasta el 80% entre las frecuencias de 400 a 900 Hz., el comportamiento de la muestra número treinta y nueve, es muy regular en todo el rango de frecuencias estudiado, con un coeficiente de absorción acústica por encima del 0,9 a partir de 1200 Hz, teniendo una absorción a bajas frecuencias notable, con coeficientes entre 0,4 y 0,6 por debajo de los 1000 Hz.

La comparación del comportamiento acústico, coeficiente de absorción, medido con el tubo de impedancia acústica, nos muestra que sus resultados son similares a los conseguidos en las muestras formadas con lana mineral y por lo tanto competidor de este tipo de productos en el mercado.

Los resultados obtenidos de los restos textiles provenientes de NFUs, muestran como el proceso de conformación de las fibras influye, en el valor de la absorción acústica, en el rango de frecuencias analizado y en su distribución. Son buenos candidatos para competir con los productos comerciales, en la lucha contra el ruido,

convirtiendo parte del causante del problema, la circulación rodada, en parte de la solución.

Se ha empleado un método bien definido y exhaustivo, el trabajo ha sido ímprobo pero muy efectivo en cuanto a la consecución de resultados que han superado nuestras mejores expectativas.

3.3. Nuevas líneas de investigación

Analizar el comportamiento acústico de nuestros materiales, con la aplicación de modelos teóricos, para materiales; monocapa, bicapa, tricapa y mezclas.

Mezclar triturado de polvo de neumático que quede suspendido dentro de las muestras fibrosas tanto monocapa como bicapa, tricapa y mezclas

Elaboración de productos mixtos de mat fibroso y muestras perforadas de productos elaborados con triturado de neumático

Obtención y caracterización de muestras combinadas mediante termo-compresión de mezclas de triturado de neumático y fibras sueltas mezclada y bajo la condición de mat, como, materiales para absorción acústica y vibracional

Elaboración de muestras ignifugadas y caracterización de las mismas

Uso de tecnologías como el wedlaid para conformar productos en continuo.

4. REFERENCIAS

- [1] R. J., Manual de tecnología del caucho, in: C.N.d.I.d. Caucho (Ed.), 1989, pp. 393-394.
- [2] C. X.E., Reciclaje de residuos diversos, in: D.d. Santos (Ed.), 2000, pp. 495-497.
- [3] B. M.H., Neumáticos, in: S.A. McGraw-Hill /Interamericana de España (Ed.) Manual McGraw-Hill de Reciclaje, 1996, pp. 18.11-18.16.
- [4] G. Ramos, F.J. Alguacil, F.A. Lopez, Revista De Metalurgia, 47 (2011) 273-284.
- [5] A. Borlea, T. Rusu, O. Vasile, Materiale Plastice, 49 (2012) 275-278.
- [6] A. Santini, L. Morselli, F. Passarini, I. Vassura, S. Di Carlo, F. Bonino, Waste Management, 31 (2011) 489-494.
- [7] L. Bizikova, T. Kluvankova-Oravska, Ekonomicky Casopis, 51 (2003) 447-460.
- [8] E.-E.T.R.M.s. Association, in: A.D. Studio (Ed.), Brussels, 2014.
- [9] E.-E.T.R.M.s. Association, in: A.D. Studio (Ed.), Brussels 2014.
- [10] INDA, in, Edinburgo, 2015.
- [11] J.Detrell, in, TECNITEX, Terrasa, 1996.
- [12] M. Delany, E. Bazley, Applied Acoustics, 3 (1970) 105-116.
- [13] J.F. Allard, Y. Champoux, Journal of the Acoustical Society of America, 91 (1992) 3346-3353.
- [14] D.L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, Journal of Fluid Mechanics, 176 (1987) 379-402.
- [15] N. Voronina, Appl. Acoust., 42 (1994) 165-174.
- [16] N. Voronina, Applied Acoustics, 48 (1996) 121-132.
- [17] B. Castagnede, A. Aknine, B. Brouard, V. Tarnow, Applied Acoustics, 61 (2000) 173-182.
- [18] J.F. Allard, G. Daigle, The Journal of the Acoustical Society of America, 95 (1994) 2785-2785.
- [19] M. Garai, F. Pompoli, Applied Acoustics, 66 (2005) 1383-1398.
- [20] D. Bies, C.H. Hansen, Applied Acoustics, 13 (1980) 357-391.
- [21] R.E. Collins, (1976).

- [22] A.E. Scheidegger, *Soil Science*, 86 (1958) 355.
- [23] P. Carman, *Transactions-Institution of Chemical Engineers*, 15 (1937) 150-166.
- [24] R.J. Brown, *Geophysics*, 45 (1980) 1269-1275.
- [25] C.t.A.C. 40, in: C.I. Español (Ed.) *UNE EN_ISO 9237*, AENOR, Madrid, 1995.
- [26] I. 9237, in, *Bruxeles*, 1995.
- [27] D. C.Montgomeri, in, *Limusa S.A., Mexico D.F.*, 2002.
- [28] F.J.T. Tejedor, in: L.M. S.A. (Ed.), *Schaum*, Madrid, 1999.
- [29] A. Bartl, A. Hackl, B. Mihalyi, M. Wistuba, I. Marini, *Process Safety and Environmental Protection*, 83 (2005) 351-358.
- [30] F.A.a.F. D'alessandro, *International Journal of Acoustics and Vibration* 16 (2011) 119-125.
- [31] J. Ramis, J. Alba, R. del Rey, E. Escuder, V.J. Sanchis, *Materiales De Construccion*, 60 (2010) 133-143.
- [32] B.E.N. Delany M.E., *Appl. Acoust.*, 3 (1969) 105-116.
- [33] J.F. Allard, P. Herzog, D. Lafarge, M. Tamura, *Applied Acoustics*, 39 (1993) 3-21.
- [34] M.A. Biot, *Journal of the Acoustical Society of America*, 28 (1956) 168-178.
- [35] M.A. Biot, *Journal of the Acoustical Society of America*, 28 (1956) 179-191.
- [36] D.A. Bies, P.A. Franken, *Journal of the Acoustical Society of America*, 33 (1961) 695-&.
- [37] D.A. Bies, *Journal of the Acoustical Society of America*, 48 (1970) 75-&.
- [38] D.A. Bies, C.H. Hansen, *Applied Acoustics*, 13 (1980) 357-391.
- [39] E.W. Behrens, *Journal of the Acoustical Society of America*, 100 (1996) 663-665.
- [40] R. Kirby, A. Cummings, *Applied Acoustics*, 56 (1999) 101-125.
- [41] Y. Miki, *Journal of the Acoustical Society of Japan* 11 (1990) 25-28.
- [42] J. Alba, J. Ramis, M.T. Lorenzana, R. del Rey, *Rev. Int. Metod. Numer. Calc. Dise.*, 24 (2008) 147-162.
- [43] J.P. Arenas, M.J. Crocker, *Sound and Vibration*, 44 (2010) 12-17.
- [44] K.O. Ballagh, *Applied Acoustics*, 48 (1996) 101-120.

- [45] C.N. Wang, J.H. Torng, *Applied Acoustics*, 62 (2001) 447-459.
- [46] N. Kino, T. Ueno, *Appl. Acoust.*, 68 (2007) 1439-1458.
- [47] N. Kino, *Appl. Acoust.*, 73 (2012) 590-603.
- [48] J. Ramis, R. del Rey, J. Alba, L. Godinho, J. Carbajo, *Materiales De Construcción*, 64 (2014).
- [49] M.H. Fouladi, M.J.M. Nor, M. Ayub, M. Ghassem, *Journal of Computational Acoustics*, 20 (2012).
- [50] L. Youneung, J. Changwhang, *AUTEX Research Journal*, 3 (2003) 78-84.
- [51] C.W. Lou, J.H. Lin, K.H. Su, *Textile Research Journal*, 75 (2005) 390-394.
- [52] H.S. Seddeq, N.M. Aly, A. Marwa A, M.H. Elshakankery, *J. Ind. Text.*, 43 (2013) 56-73.
- [53] Z.X. Sun, Z.G. Shen, S.L. Ma, X.J. Zhang, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22 (2013) 3140-3146.
- [54] R. Maderuelo-Sanz, A.V. Nadal-Gisbert, J.E. Crespo-Amoros, F. Parres-Garcia, *Applied Acoustics*, 73 (2012) 402-408.
- [55] F.J. Jimenez-Espadafor, J.A.B. Villanueva, M.T. Garcia, E.C. Trujillo, A.M. Blanco, *Materials & Design*, 32 (2011) 3608-3616.
- [56] F.J. Jimenez-Espadafor, J.A. Becerra Villanueva, M.T. García, E.C. Trujillo, A.M. Blanco, *Materials & Design*, 32 (2011) 3608-3616.
- [57] [www. Signus.es](http://www.Signus.es), Esquema del reciclaje, in, 2012.
- [58] D.A. Skoog, D.M. West, M. Calcagno, *Análisis instrumental*, Interamericana, 1984.
- [59] N. UNE, in: 40-327-94 *Análisis químico cuantitativo* , 1994.
- [60] W. Yang, Y. Li, *Science China Technological Sciences*, 55 (2012) 2278-2283.

APORTACIONES CIENTIFICAS DERIVADAS DE LA ELABORACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Capítulos de Libros

AUTORES (p.o. de firma): M. Zamorano Canto; J. Segura Alcaraz; J. E. Crespo; E. Julia; A. V. Nadal Gisbert; J. M. Gadea Borell.

TÍTULO: *Caracterización físico-química de productos elaborados a partir de residuos procedentes de neumático fuera de uso (NFU's)*

EDITORIAL: 3C Tecnología

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): Avances en el área de materiales y sus procesos. (ISBN 978-84-942901-9-0)

VOLUMEN: 5 PÁGINAS: 56 – 65 **AÑO:** 2014 **CLAVE:** CL

Congresos Internacionales publicados en Editorial

AUTORES (p.o. de firma): Nadal Gisbert, Antonio; Vicente Boix García, Macarena Agud Albesa, Lucia; Zamorano Cantó, Manuel; Peydro, M. A.; Miró Martínez, Pau

TÍTULO: *Mathematical modelling of elastomeric waste compaction process.*

EDITORIAL:

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): International Conference Sustainable Materials Science and Technology (SMST 2015) (ISSN 978-84-944311-0-4)

VOLUMEN: PÁGINAS: 1 - 4 **AÑO:** 2015 **CLAVE:** PR

AUTORES (p.o. de firma): Zamorano Cantó, Manuel; Nadal Gisbert, Antonio Vicente; Parres, F.; Crespo Amorós, José Enrique; Luis Miguel; Antonio Macias García;

TÍTULO: Physico-chemical characterization of fibers from ELTs

EDITORIAL: Portalegre Polytechnic Institute and Extremadura University

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): 5th International Congress of Energy and Environment Engineering and Management (CIIEM 2013) (ISSN 978-989-98406-4-5)

VOLUMEN: PÁGINAS: 1 – 4 **AÑO:** 2013 **CLAVE:** PR

AUTORES (p.o. de firma): A. Nadal; J. E. Crespo; F. Parres; M. Zamorano; L. M. Pérez; R. Maderuelo;

TÍTULO: *Investigación del comportamiento acústico de productos elaborados mediante fibras recicladas de neumático (FLUFF)*

EDITORIAL: Compobell S.L.

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): VI Jornadas La investigación ante la sociedad del conocimiento. Sostenibilidad y medioambiente (ISSN 978-84-608-0976-0)

VOLUMEN: PÁGINAS: 277 – 280 **AÑO:** 2009 **CLAVE:** PR

Actas Congresos Nacionales

AUTORES (p.o. de firma): M. Zamorano Cantó; P. Miró i Martínez; A. V. Nadal-Gisbert; J. E. Crespo Amorós; J. Segura Alcaraz;

TÍTULO: *Estudio de las componentes de la impedancia acústica en paneles de fibra provenientes de reciclado de neumáticos (NFU's)*

EDITORIAL: Compobell, S.L

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): II Congreso I+D+i. Campus de Alcoi. Creando sinergias (ISSN 978-84-942655-2-5)

VOLUMEN: PÁGINAS: 69 – 76 **AÑO:** 2014 **CLAVE:** PR

AUTORES (p.o. de firma): M. Zamorano Cantó; J. Segura Alcaraz; A. Nadal Gisbert; J. E. Crespo Amorós;

TÍTULO: *Influencia de los parámetros de conformado en el coeficiente de absorción acústica de fibras provenientes de reciclado de neumáticos (nfu's)*

EDITORIAL: Sociedad española de acústica

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): Tecniacústica 2014. 45º Congreso Español de Acústica. 8º Congreso Ibérico de Acústica. Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental. (ISSN 978-84-87985-25-6)

VOLUMEN: PÁGINAS: 810 – 817 **AÑO:** 2014 **CLAVE:** PR

AUTORES (p.o. de firma): Nadal Gisbert, Antonio Vicente; Crespo Amorós, José Enrique; Zamorano Cantó, Manuel; Juliá Sanchís, Ernesto; Gadea Borrell, José M^a; Segura Alcaraz, Jorge Gabriel;

TÍTULO: *Estudio de la Influencia de las Características Físicas de Residuos Provenientes de Neumáticos Reciclados en el Coeficiente de Absorción Acústica*

EDITORIAL: Compobell, S.L.

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): I Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias (ISSN 978-84-941363-6-8)

VOLUMEN: PÁGINAS: 133 – 136 **AÑO:** 2013 **CLAVE:** PR

AUTORES (p.o. de firma): Nadal Gisbert, Antonio Vicente; Crespo Amorós, José Enrique; Zamorano Cantó, Manuel; Juliá Sanchís, Ernesto; Segura Alcaraz, Jorge Gabriel; Gadea Borrell, José M^a;

TÍTULO: *Análisis de la influencia de los parámetros del proceso de conformado por compactación en las características mecánicas y acústicas de los productos elaborados con residuos provenientes de los NFUs*

EDITORIAL: Sociedad Española de Acústica (SEA)

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): Tecniacústica 2013. 44^º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. EAA European Symposium on Environmental Acoustics and Noise Mapping. (ISSN 978-84-87985-23-2)

VOLUMEN: PÁGINAS: 1537 – 1543 **AÑO:** 2013 **CLAVE:** PR

AUTORES (p.o. de firma): J.E. Crespo; R. Maderuelo; A. V. Nadal; F. Parres; M. Zamorano;

TÍTULO: *Investigación de la influencia de la granulometría del EPDMCR en el coeficiente de absorción acústica de productos obtenidos mediante un proceso de termocompresión*

EDITORIAL: Editorial Marfil S.A.

REF. REVISTA/LIBRO (ISBN, ISSN, SUPV): V Congreso La investigación ante la sociedad del conocimiento. Sostenibilidad y medioambiente (ISSN 978-84-608-0827-5)

VOLUMEN: PÁGINAS: 233 – 236 **AÑO:** 2008 **CLAVE:** PR

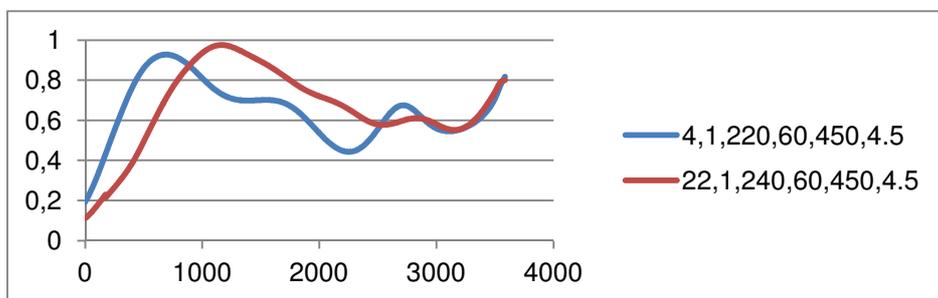
5. ANEXOS

ANEXO I

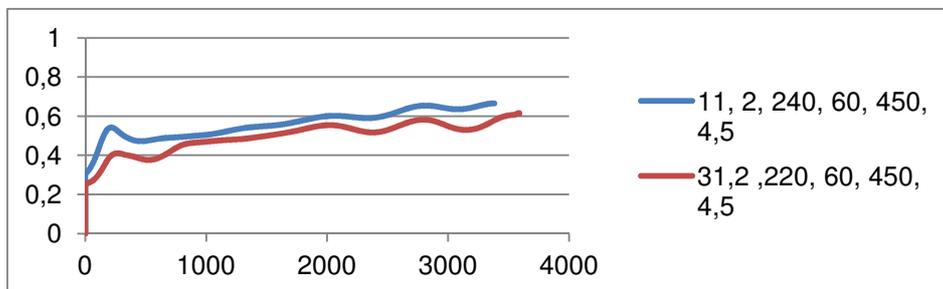
Temperatura Variable

Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
4º	1	1	220	60	450	0,64
22º	1	1	240	60	450	0,64
31º	1	2	220	60	450	0,64
11º	1	2	240	60	450	0,64
36º	1	3	220	60	450	0,64
54	1	3	240	60	450	0,64

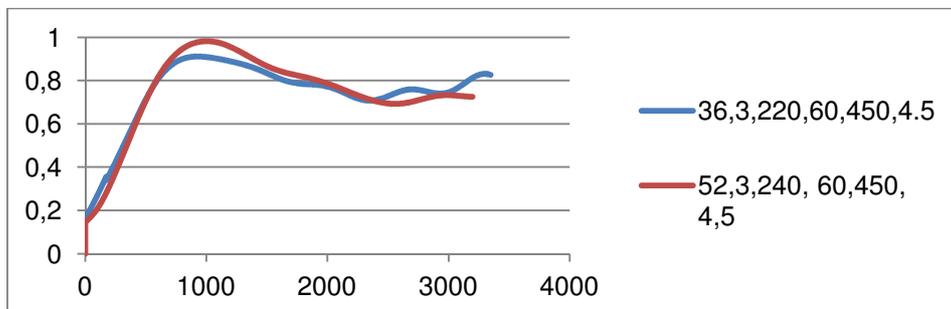
Fibra 1



Fibra 2

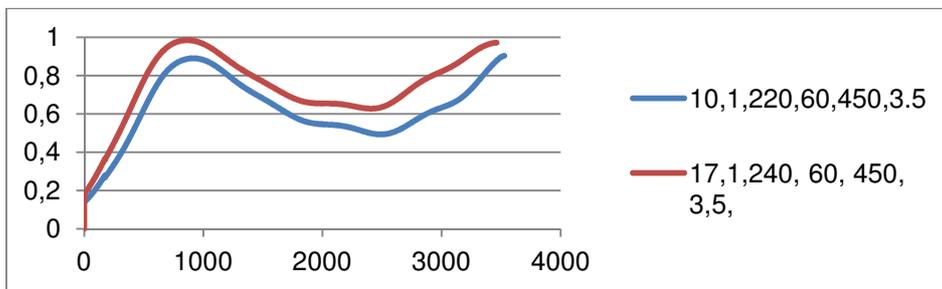


Fibra 3

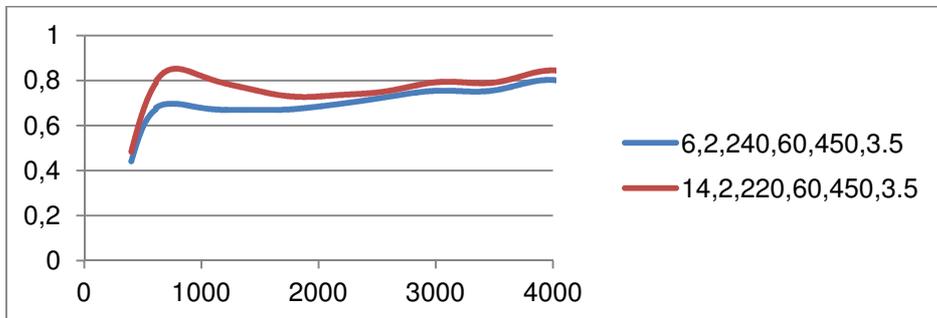


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
6º	1	2	240	60	450	0,5
17º	1	1	240	60	450	0,5
10º	1	1	220	60	450	0,5
14º	1	2	220	60	450	0,5
34º	1	3	220	60	450	0,5
53	1	3	240	60	450	0,5

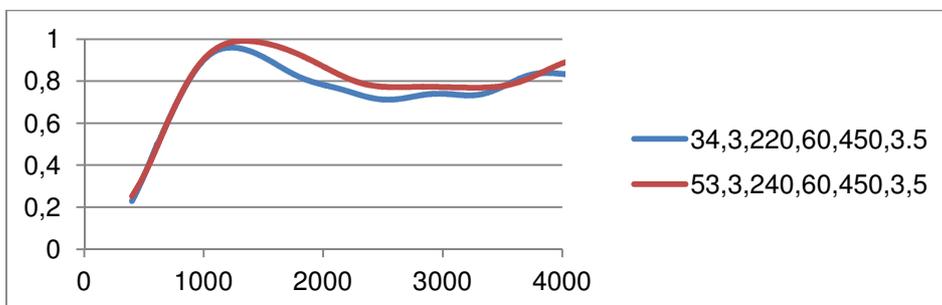
Fibra 1



Fibra 2

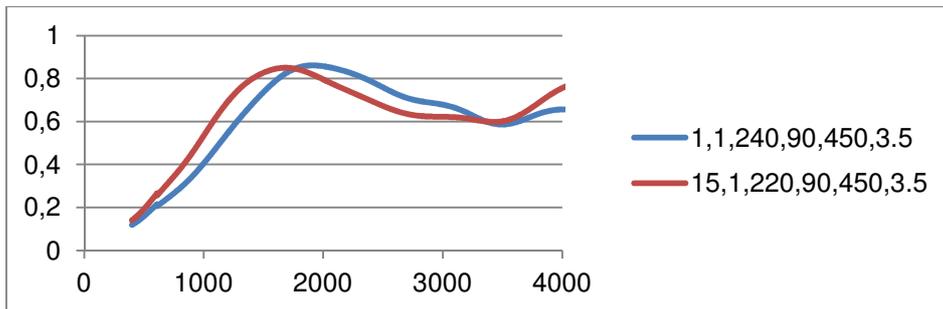


Fibra 3

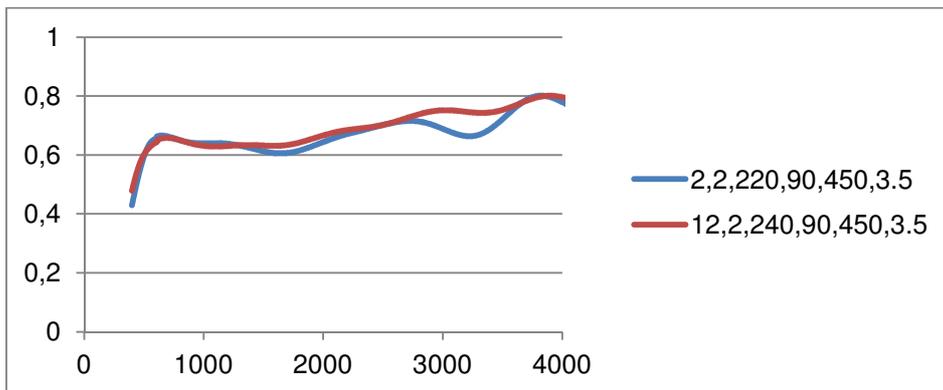


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
15º	1	1	220	90	450	0,5
1º	1	1	240	90	450	0,5
2º	1	2	220	90	450	0,5
12º	1	2	240	90	450	0,5
57	1	3	220	90	450	0,5
49	1	3	240	90	450	0,5

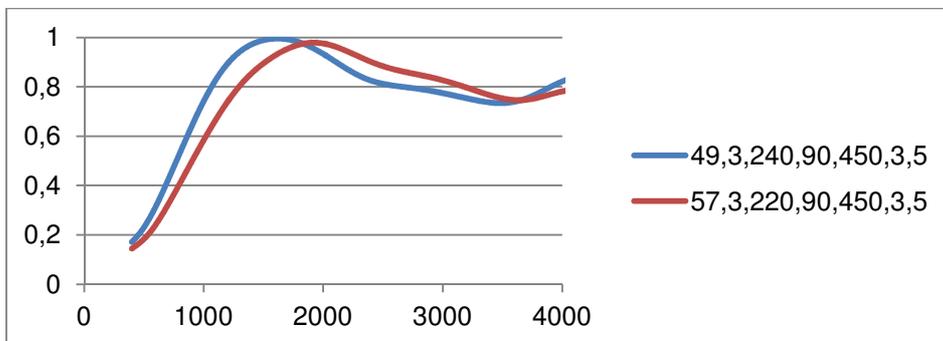
Fibra 1



Fibra 2

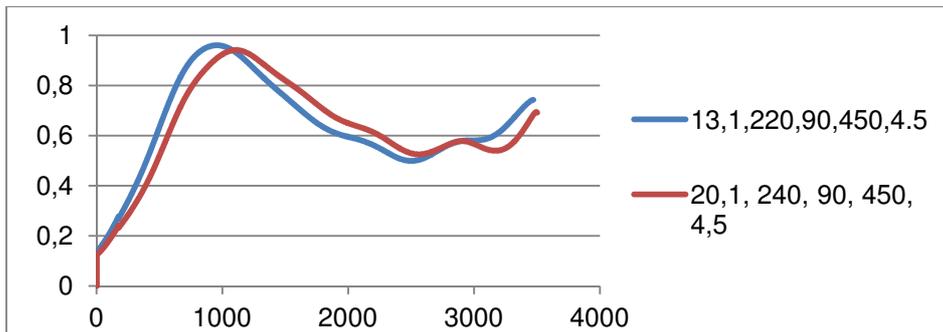


Fibra 3

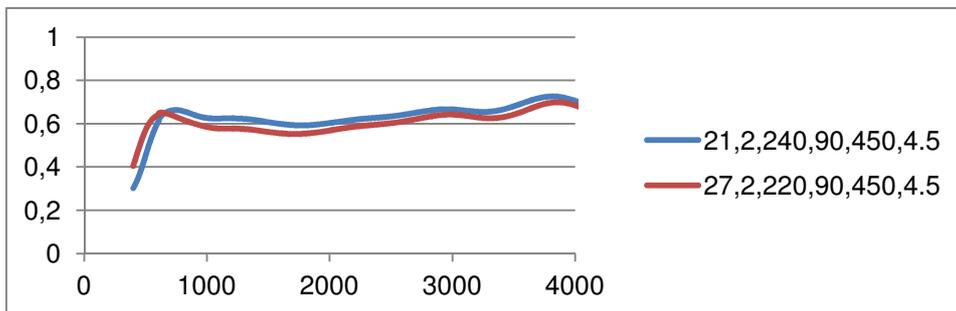


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
13º	1	1	220	90	450	0,64
20º	1	1	240	90	450	0,64
27º	1	2	220	90	450	0,64
21º	1	2	240	90	450	0,64
58º	1	3	220	90	450	0,64
52º	1	3	240	90	450	0,64

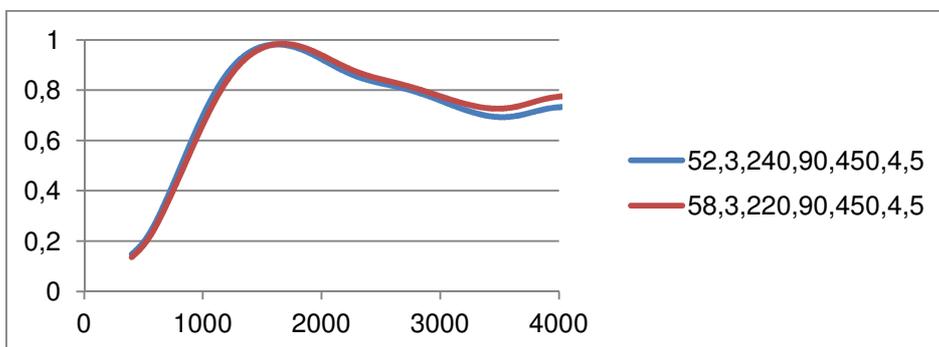
Fibra 1



Fibra 2

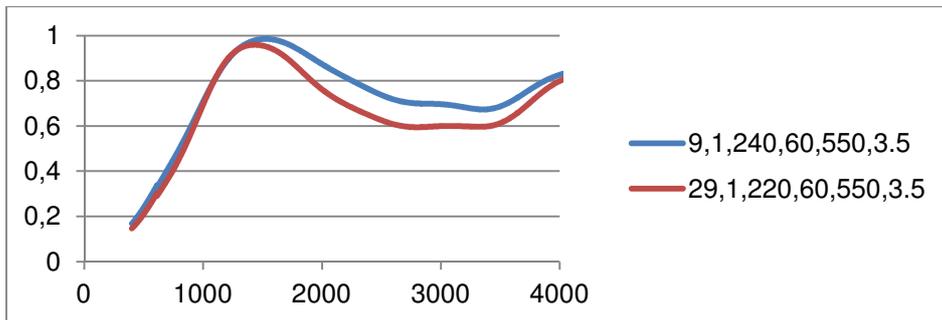


Fibra 3

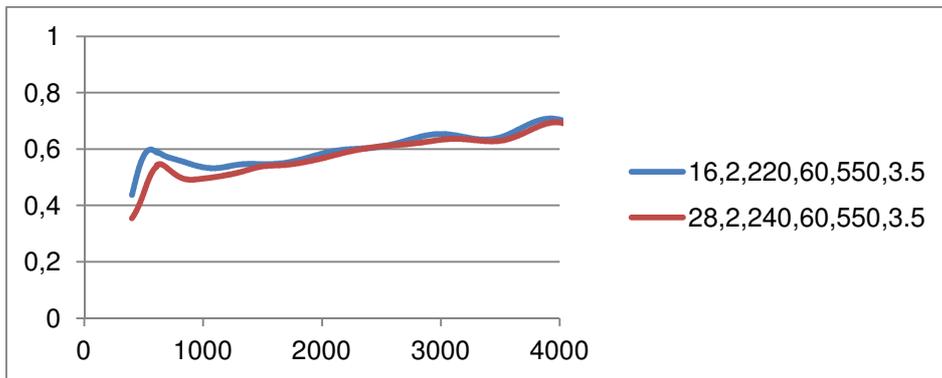


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
29º	1	1	220	60	550	0,5
9º	1	1	240	60	550	0,5
16º	1	2	220	60	550	0,5
28º	1	2	240	60	550	0,5
35	1	3	220	60	550	0,5
55º	1	3	240	60	550	0,5

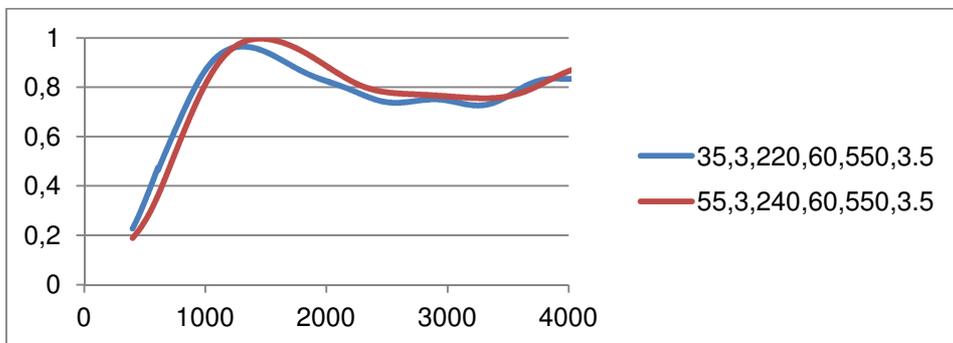
Fibra 1



Fibra 2

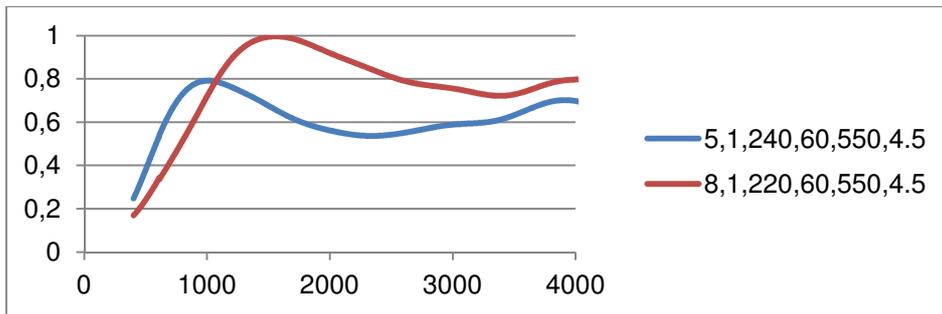


Fibra 3

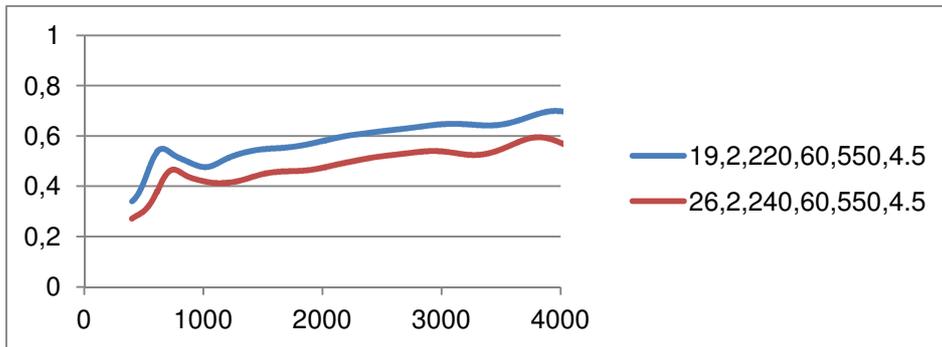


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
8º	1	1	220	60	550	0,64
5º	1	1	240	60	550	0,64
19º	1	2	220	60	550	0,64
26º	1	2	240	60	550	0,64
33º	1	3	220	60	550	0,64
56º	1	3	240	60	550	0,64

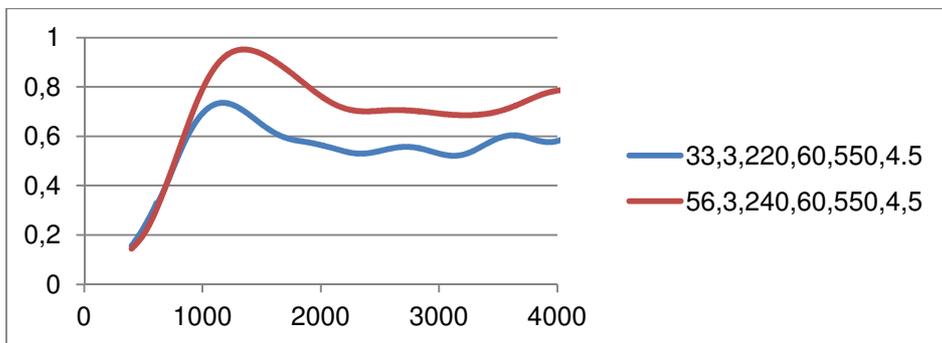
Fibra 1



Fibra 2

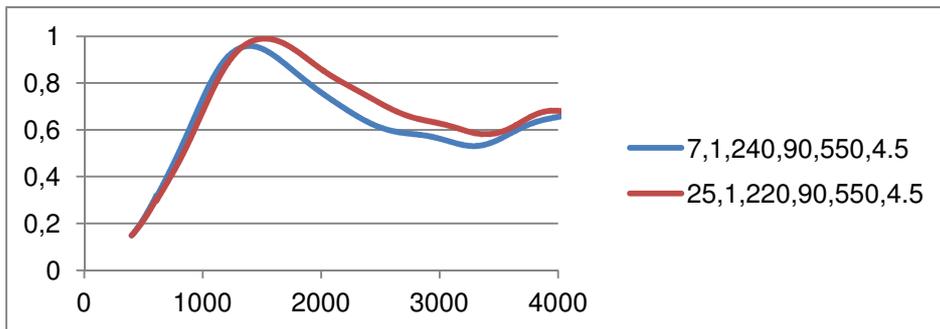


Fibra 3

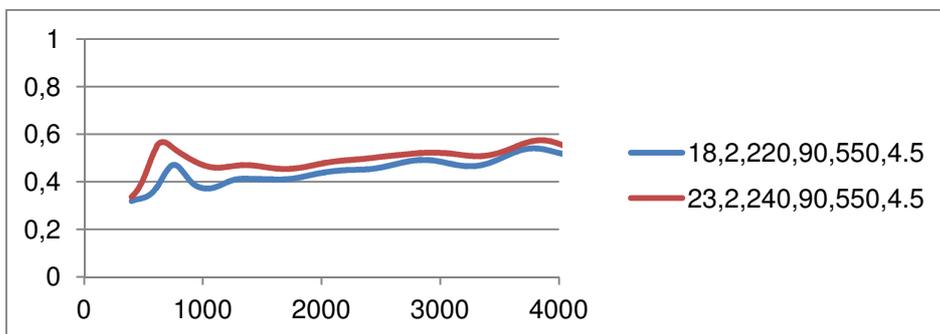


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
25º	1	1	220	90	550	0,64
7º	1	1	240	90	550	0,64
18º	1	2	220	90	550	0,64
23º	1	2	240	90	550	0,64
59	1	3	220	90	550	0,64
51º	1	3	240	90	550	0,64

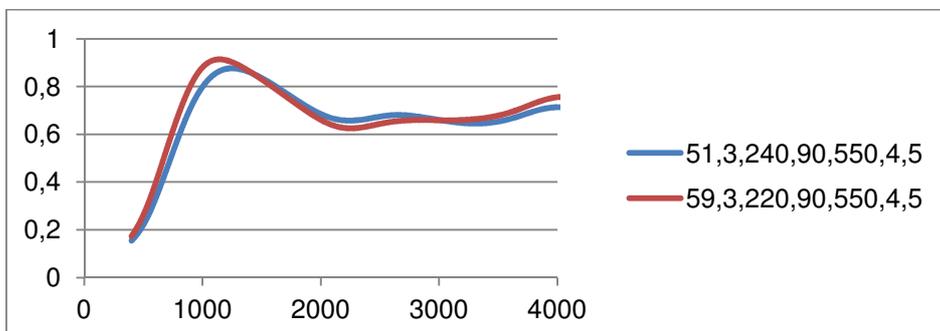
Fibra 1



Fibra 2

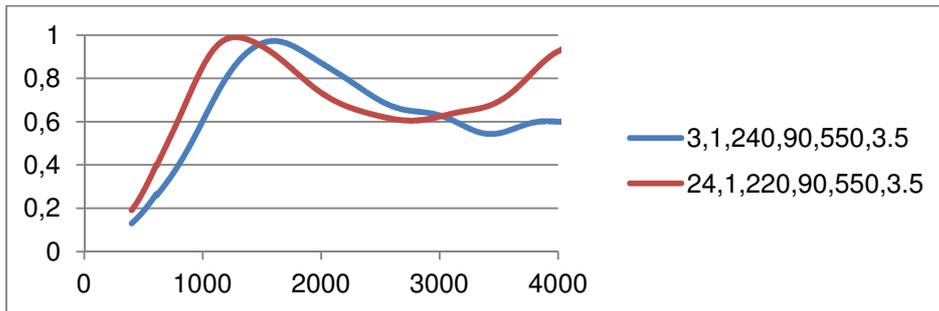


Fibra 3

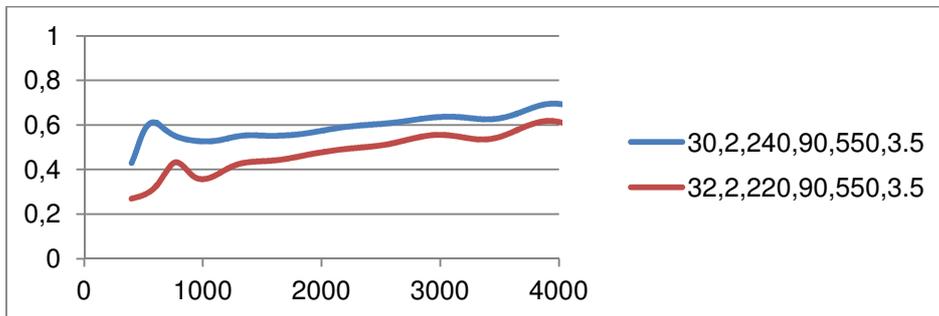


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
24º	1	1	220	90	550	0,5
3º	1	1	240	90	550	0,5
32º	1	2	220	90	550	0,5
30º	1	2	240	90	550	0,5
60	1	3	220	90	550	0,5
50	1	3	240	90	550	0,5

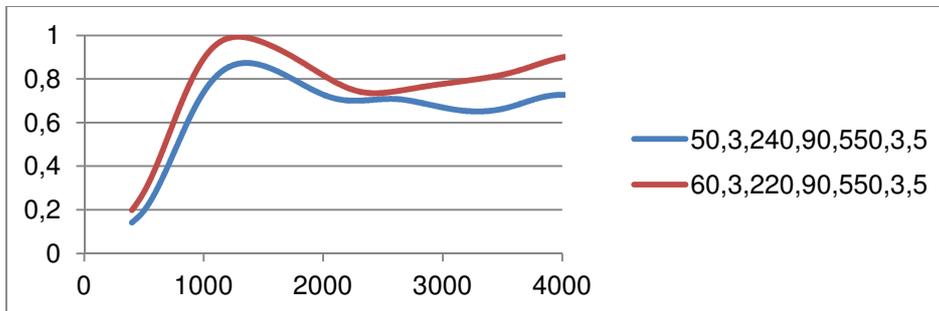
Fibra 1



Fibra 2



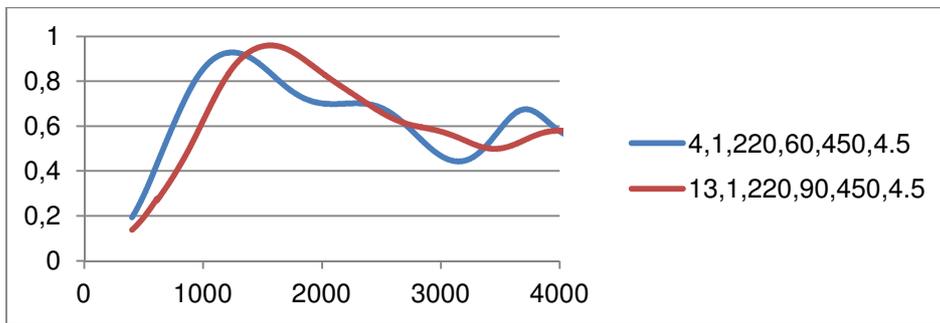
Fibra 3



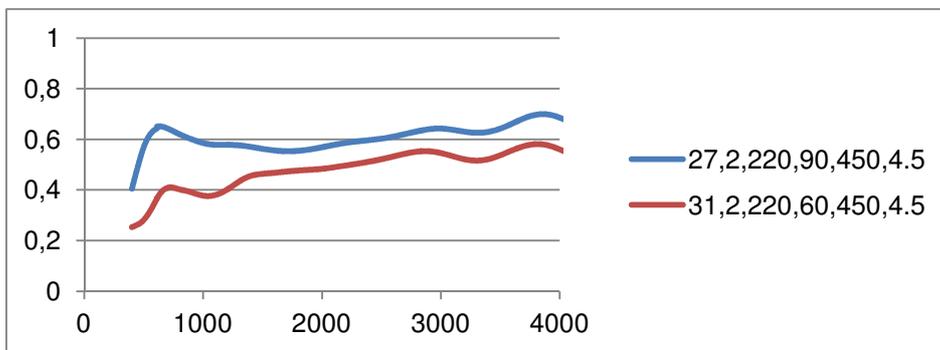
Tiempo variable

Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
4º	1	1	220	60	450	0,64
13º	1	1	220	90	450	0,64
31º	1	2	220	60	450	0,64
27º	1	2	220	90	450	0,64
36º	1	3	220	60	450	0,64
58	1	3	220	90	450	0,64

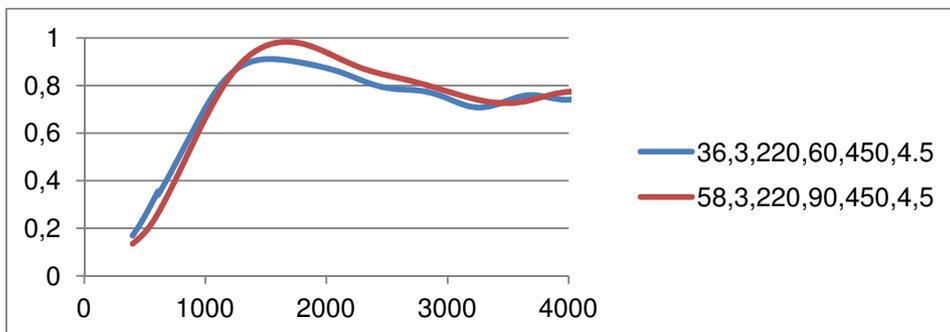
Fibra 1



Fibra 2

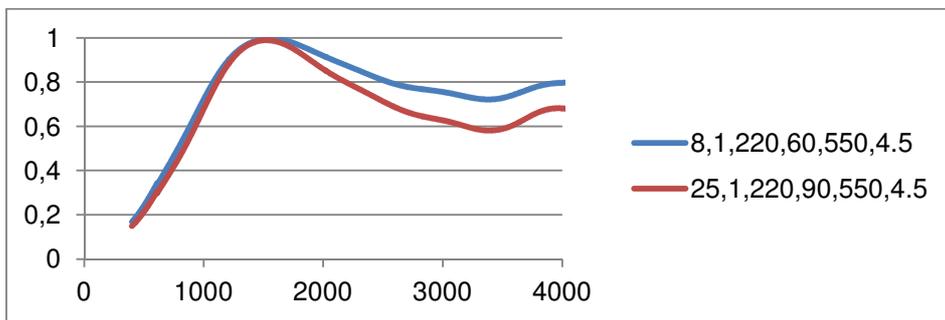


Fibra 3

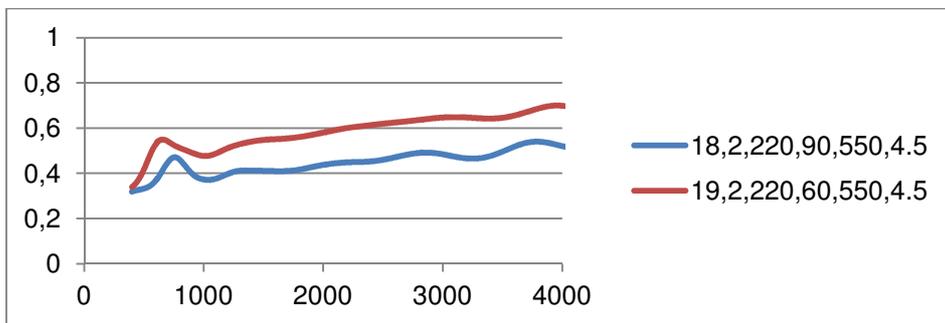


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
8º	1	1	220	60	550	0,64
25º	1	1	220	90	550	0,64
19º	1	2	220	60	550	0,64
18º	1	2	220	90	550	0,64
33º	1	3	220	60	550	0,64
59º	1	3	220	90	550	0,64

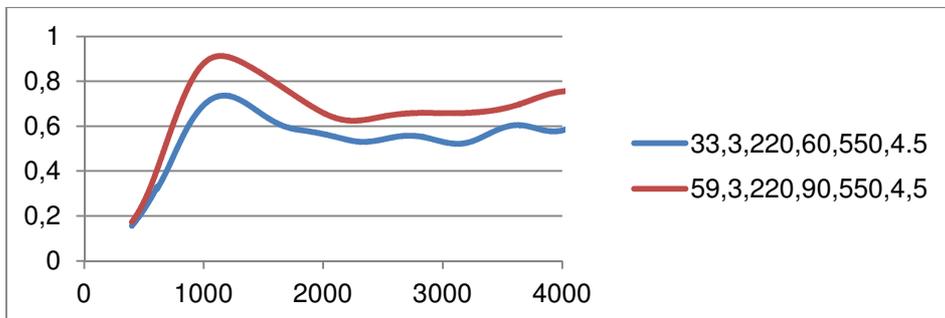
Fibra 1



Fibra 2

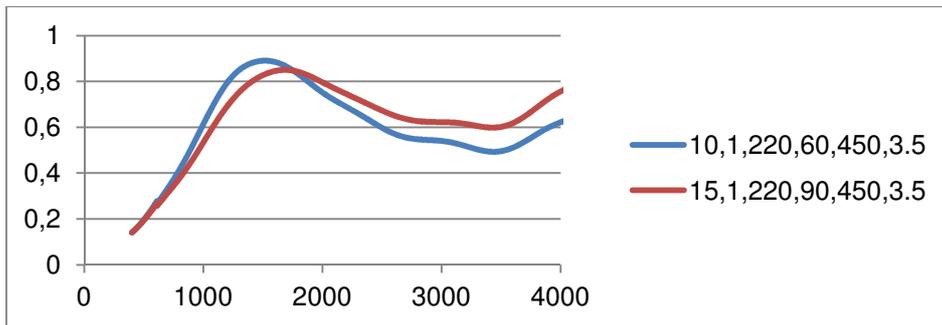


Fibra 3

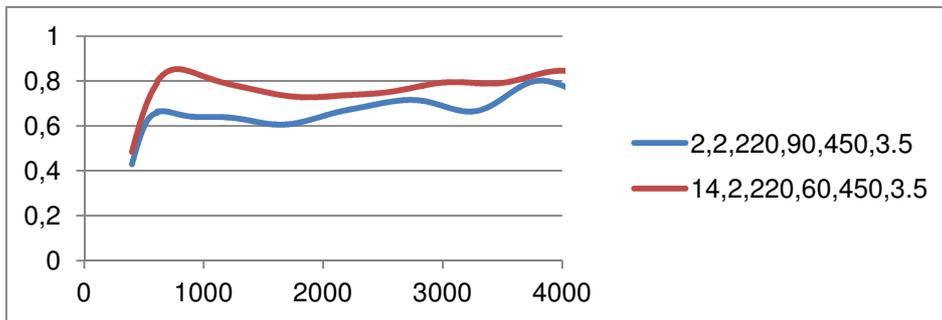


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
10º	1	1	220	60	450	0,5
15º	1	1	220	90	450	0,5
14º	1	2	220	60	450	0,5
2º	1	2	220	90	450	0,5
34º	1	3	220	60	450	0,5
57º	1	3	220	90	450	0,5

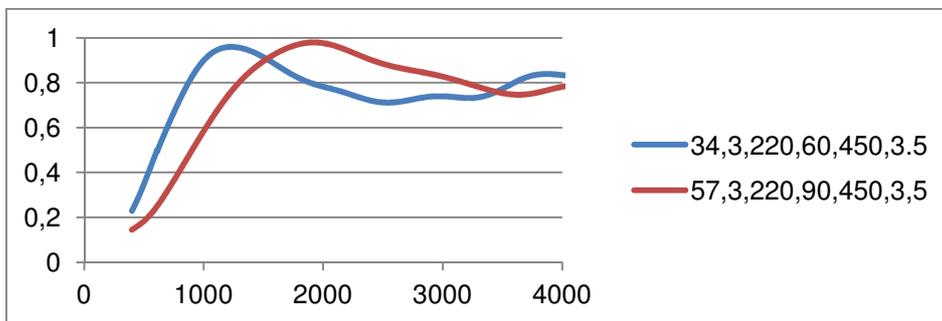
Fibra 1



Fibra 2

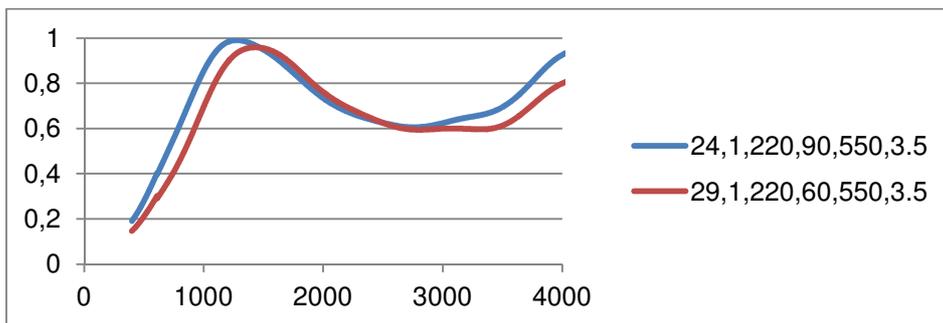


Fibra 3

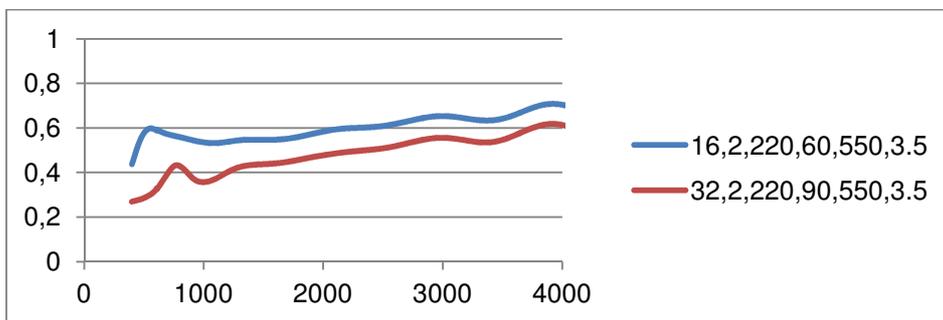


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
29º	1	1	220	60	550	0,5
24º	1	1	220	90	550	0,5
16º	1	2	220	60	550	0,5
32º	1	2	220	90	550	0,5
35º	1	3	220	60	550	0,5
60º	1	3	220	90	550	0,5

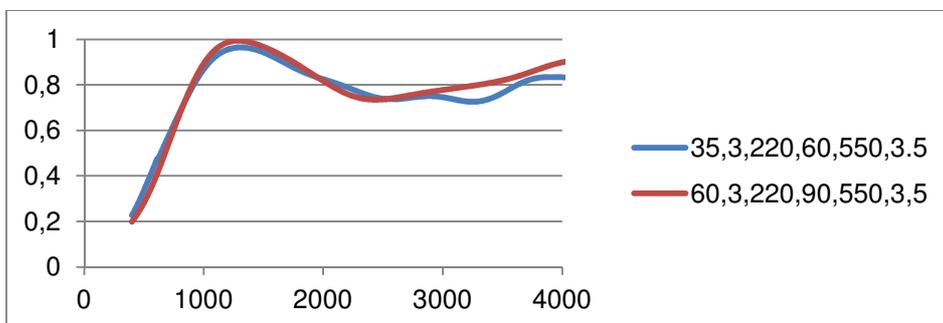
Fibra 1



Fibra 2

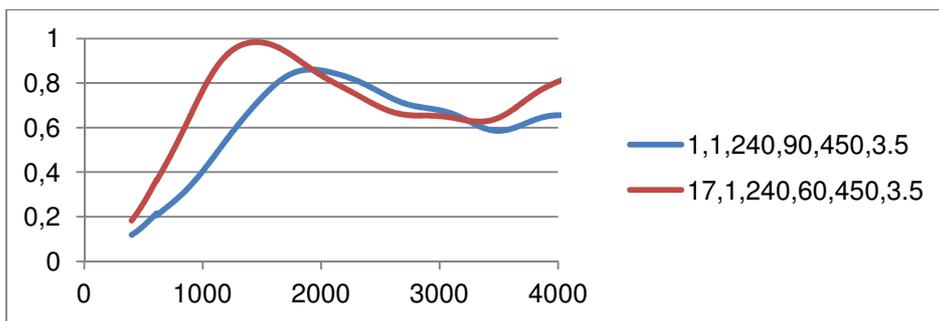


Fibra 3

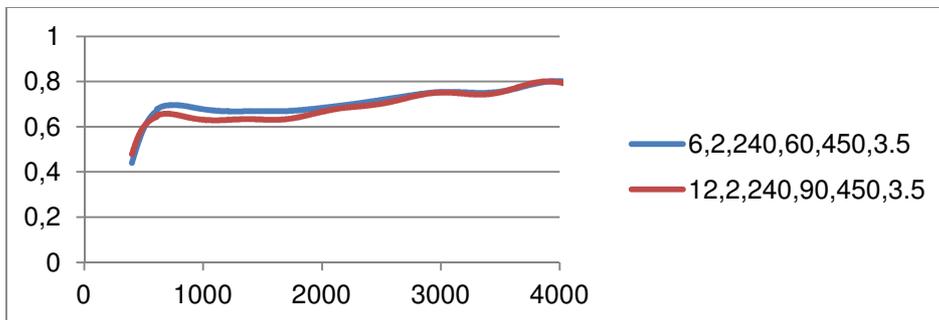


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
17º	1	1	240	60	450	0,5
1º	1	1	240	90	450	0,5
6º	1	2	240	60	450	0,5
12º	1	2	240	90	450	0,5
53	1	3	240	60	450	0,5
49	1	3	240	90	450	0,5

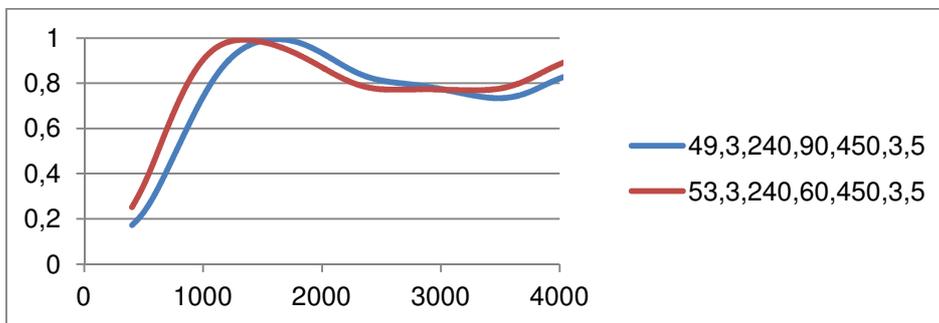
Fibra 1



Fibra 2

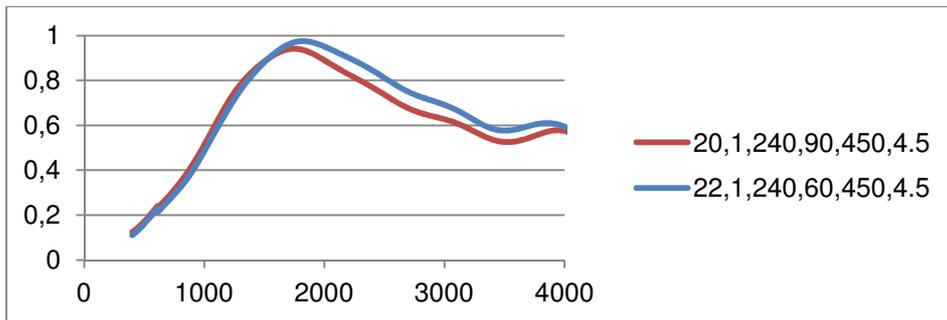


Fibra 3

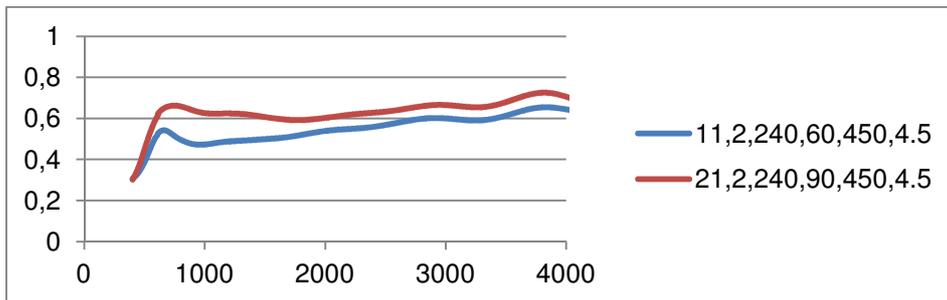


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
22º	1	1	240	60	450	0,64
20º	1	1	240	90	450	0,64
11º	1	2	240	60	450	0,64
21º	1	2	240	90	450	0,64
54º	1	3	240	60	450	0,64
52º	1	3	240	90	450	0,64

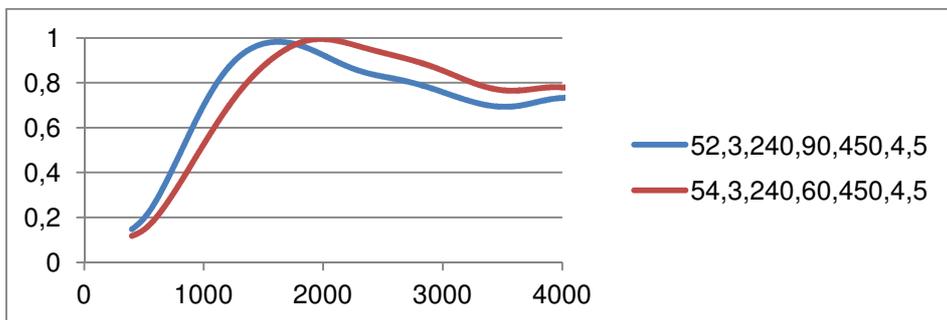
Fibra 1



Fibra 2

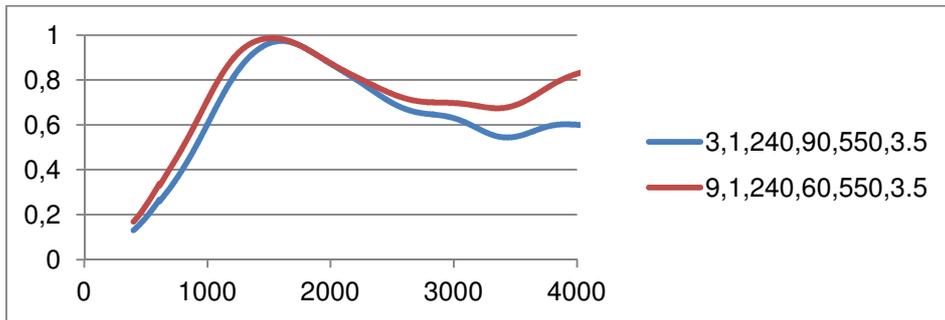


Fibra 3

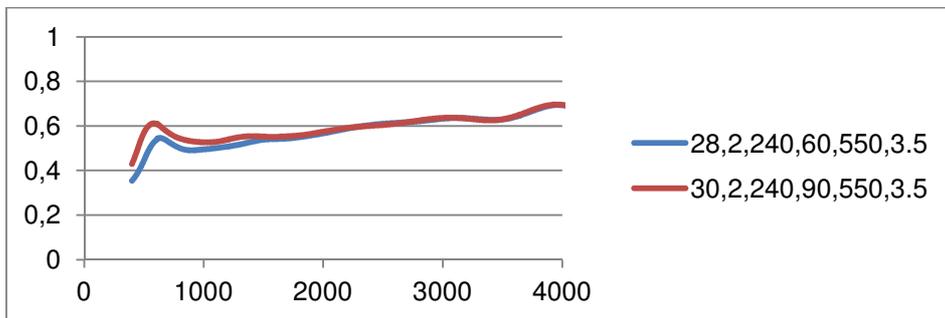


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
9º	1	1	240	60	550	0,5
3º	1	1	240	90	550	0,5
28º	1	2	240	60	550	0,5
30º	1	2	240	90	550	0,5
55º	1	3	240	60	550	0,5
50º	1	3	240	90	550	0,5

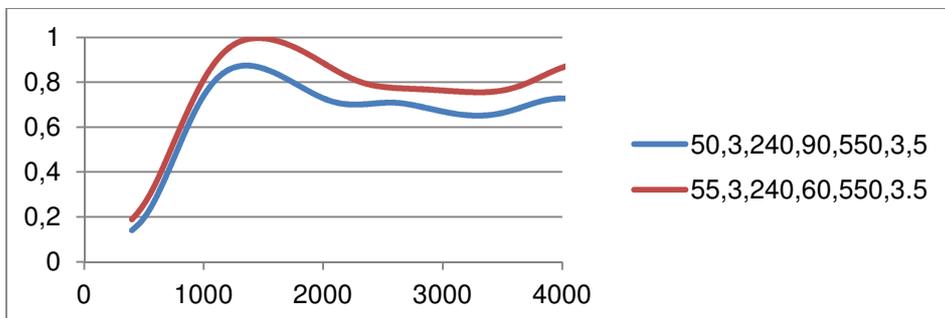
Fibra 1



Fibra 2

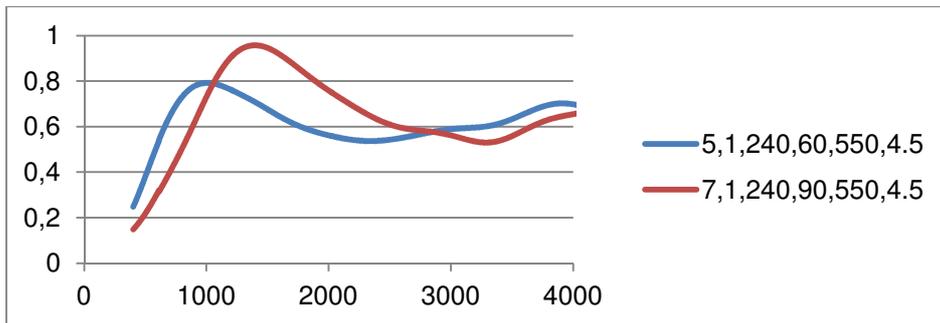


Fibra 3

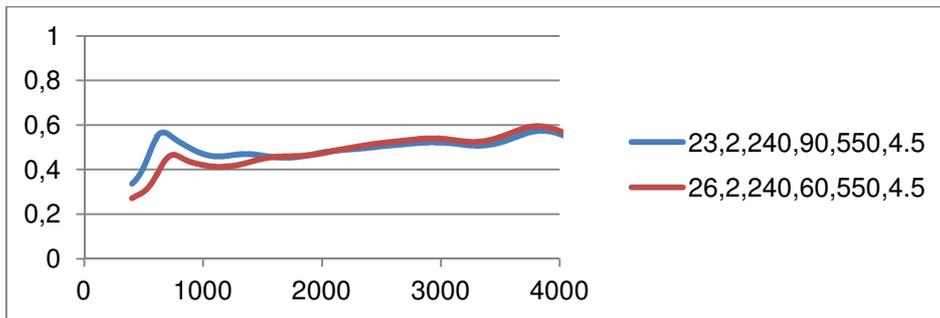


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
5º	1	1	240	60	550	0,64
7º	1	1	240	90	550	0,64
26º	1	2	240	60	550	0,64
23º	1	2	240	90	550	0,64
56º	1	3	240	60	550	0,64
51º	1	3	240	90	550	0,64

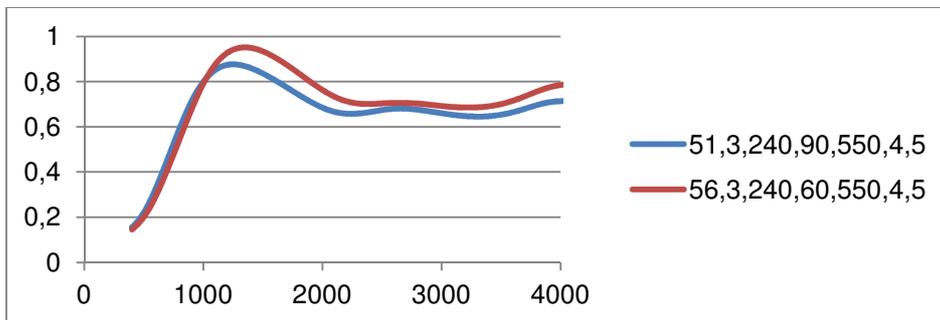
Fibra 1



Fibra 2



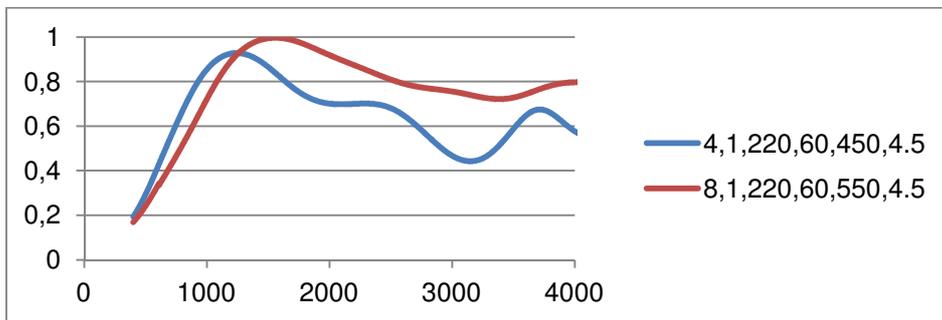
Fibra 3



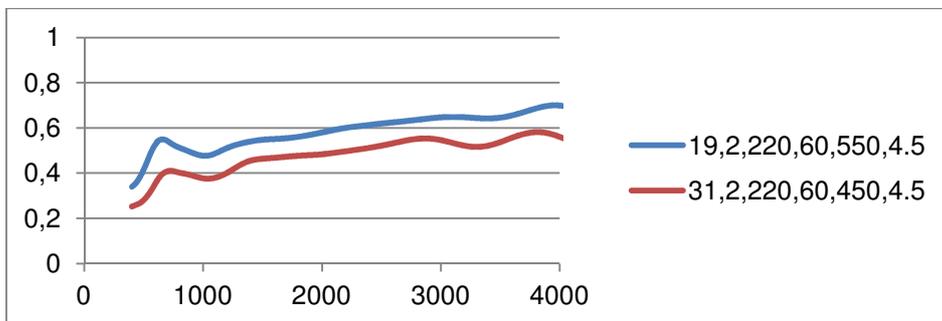
Masa variable

Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
4º	1	1	220	60	450	0,64
8º	1	1	220	60	550	0,64
31º	1	2	220	60	450	0,64
19º	1	2	220	60 <td 550	0,64	
36º	1	3	220	60	450	0,64
33º	1	3	220	60	550	0,64

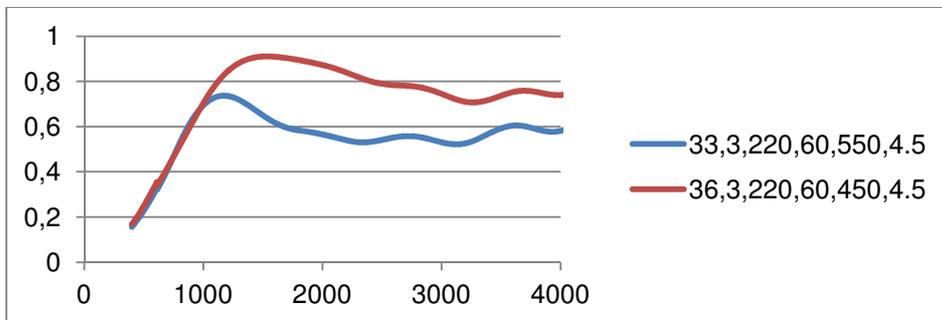
Fibra 1



Fibra 2

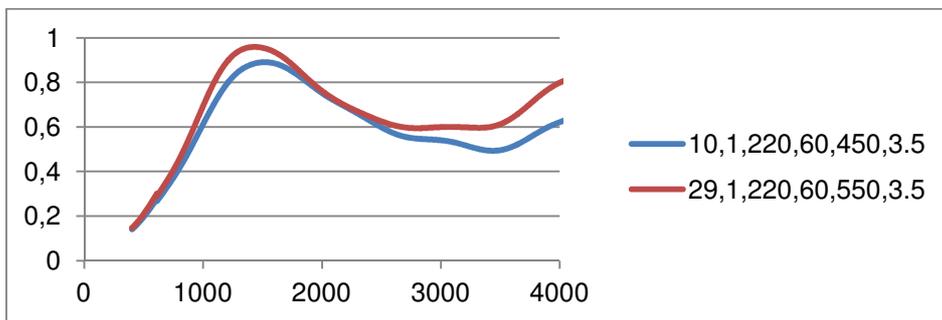


Fibra 3

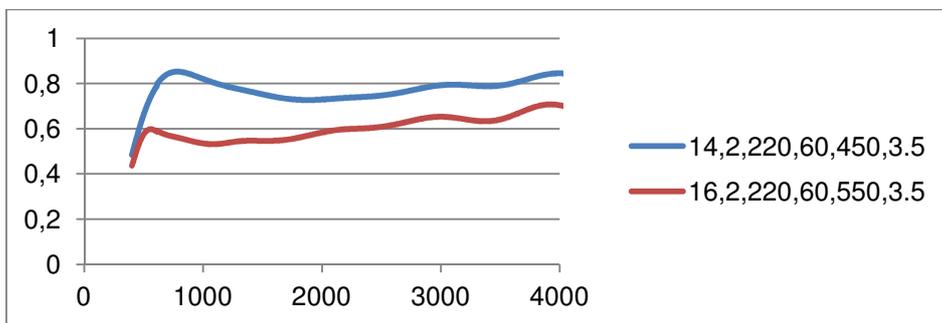


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
10º	1	1	220	60	450	0,5
29º	1	1	220	60	550	0,5
14º	1	2	220	60	450	0,5
16º	1	2	220	60	550	0,5
34º	1	3	220	60	450	0,5
35º	1	3	220	60	550	0,5

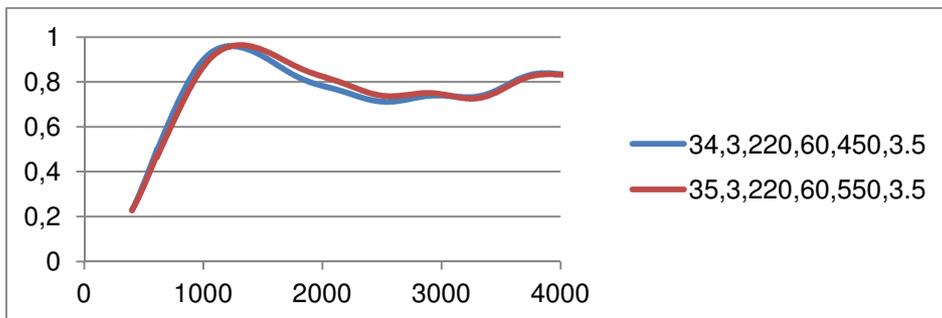
Fibra 1



Fibra 2

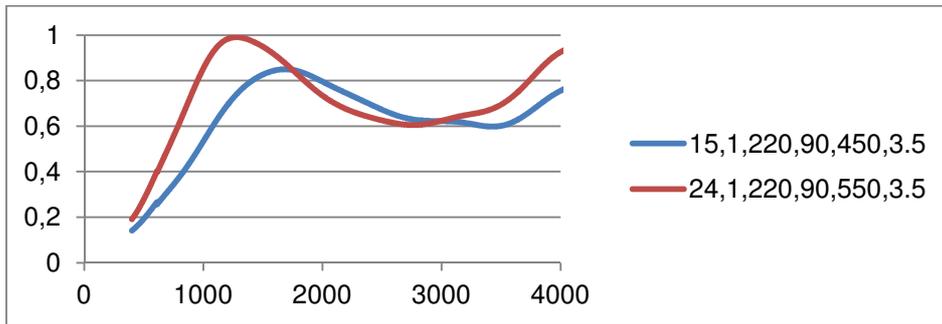


Fibra 3

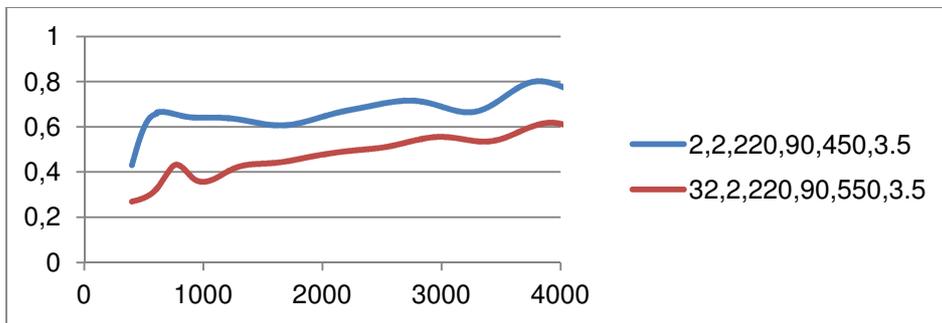


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
15º	1	1	220	90	450	0,5
24º	1	1	220	90	550	0,5
2º	1	2	220	90	450	0,5
32º	1	2	220	90	550	0,5
57º	1	3	220	90	450	0,5
60º	1	3	220	90	550	0,5

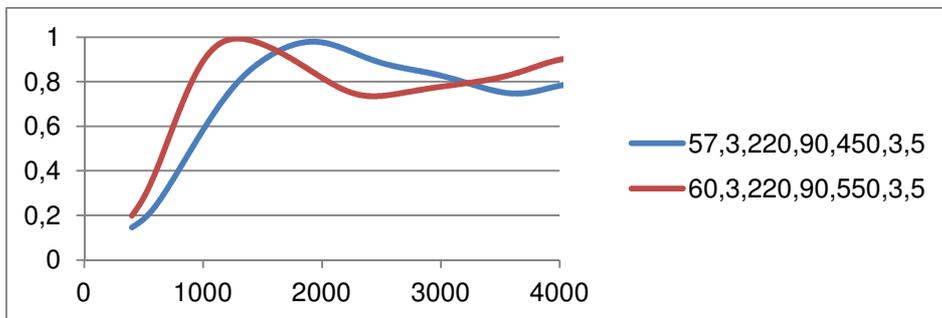
Fibra 1



Fibra 2

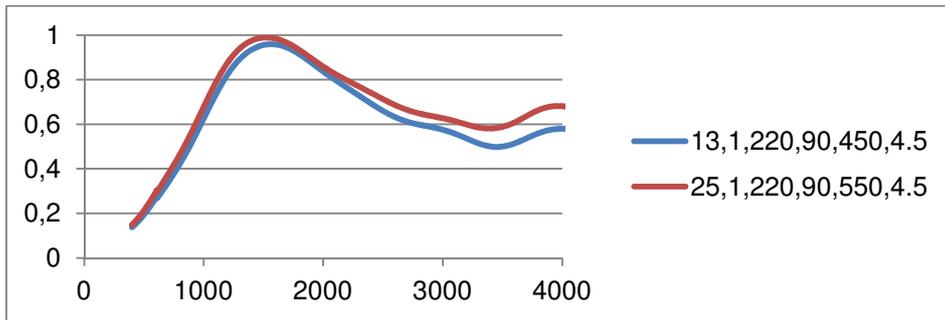


Fibra 3

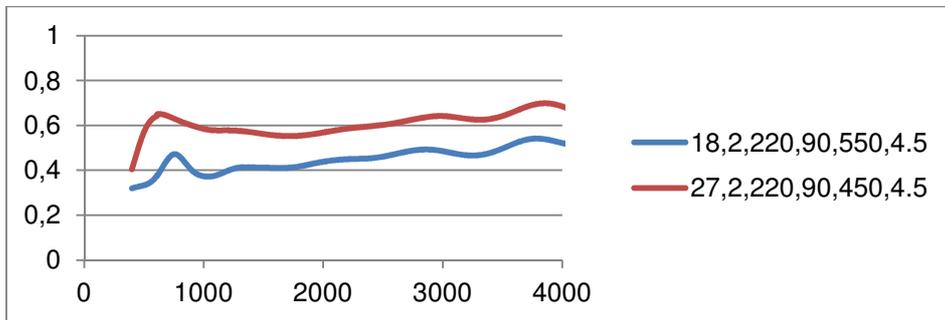


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
13º	1	1	220	90	450	0,64
25º	1	1	220	90	550	0,64
27º	1	2	220	90	450	0,64
18º	1	2	220	90	550	0,64
58º	1	3	220	90	450	0,64
59º	1	3	220	90	550	0,64

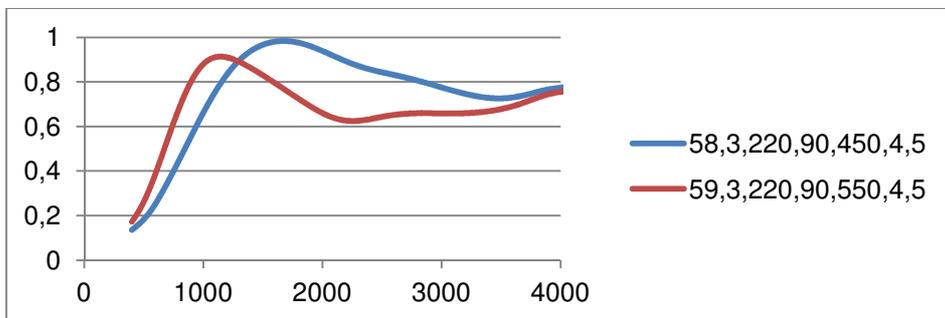
Fibra 1



Fibra 2

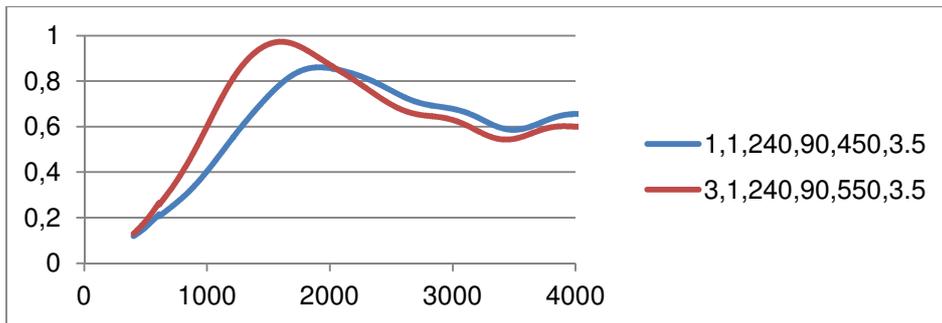


Fibra 3

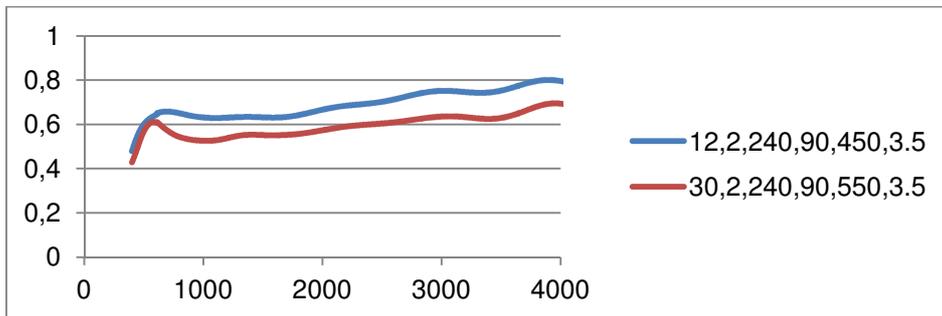


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
1º	1	1	240	90	450	0,5
3º	1	1	240	90	550	0,5
12º	1	2	240	90	450	0,5
30º	1	2	240	90	550	0,5
49º	1	3	240	90	450	0,5
50º	1	3	240	90	550	0,5

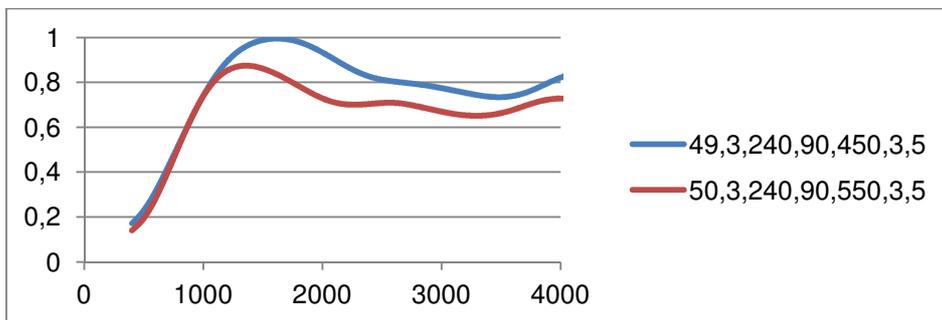
Fibra 1



Fibra 2

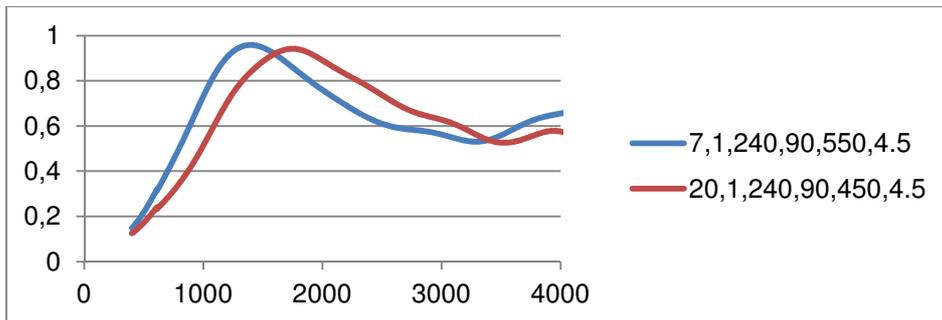


Fibra 3

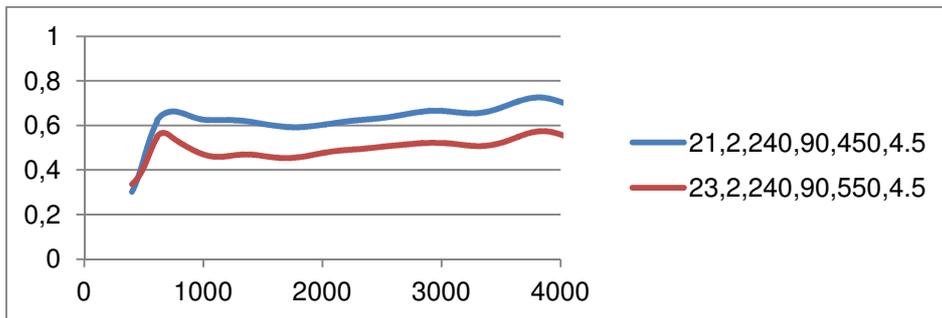


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
20º	1	1	240	90	450	0,64
7º	1	1	240	90	550	0,64
21º	1	2	240	90	450	0,64
23º	1	2	240	90	550	0,64
52	1	3	240	90	450	0,64
51	1	3	240	90	550	0,64

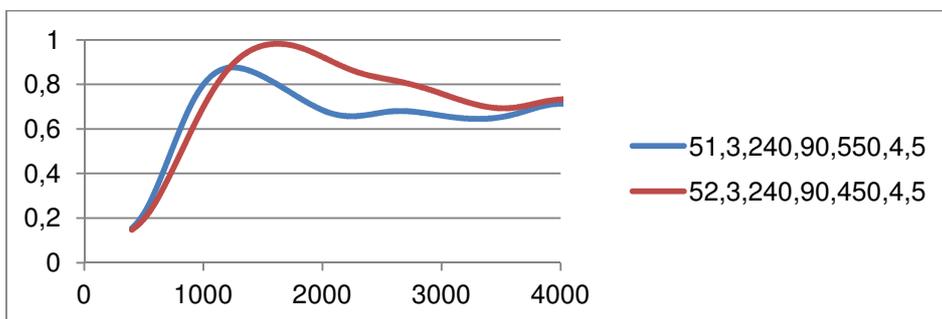
Fibra 1



Fibra 2

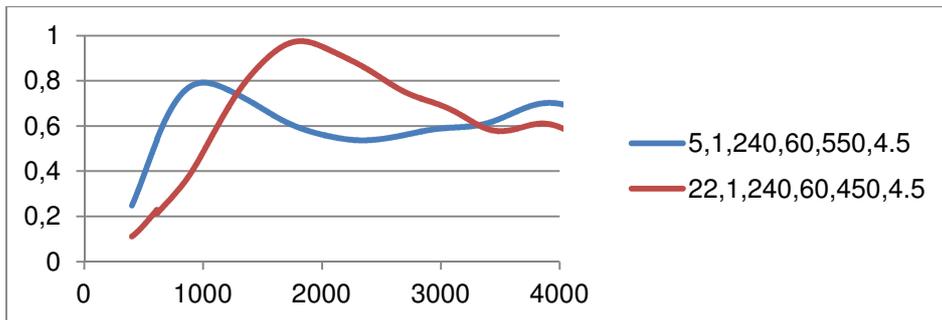


Fibra 3

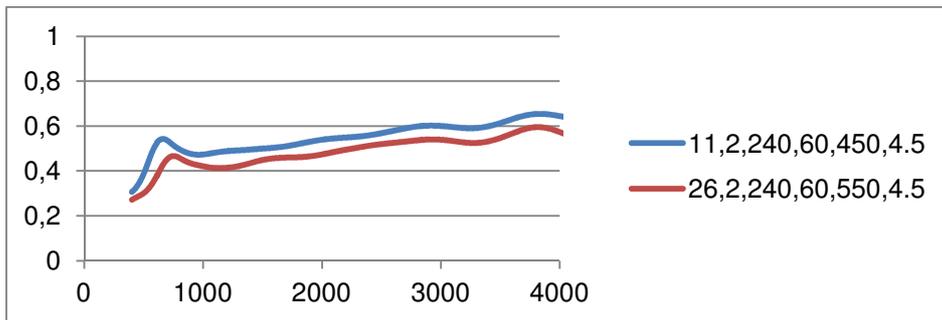


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
22º	1	1	240	60	450	0,64
5º	1	1	240	60	550	0,64
11º	1	2	240	60	450	0,64
26º	1	2	240	60	550	0,64
54	1	3	240	60	450	0,64
56	1	3	240	60	550	0,64

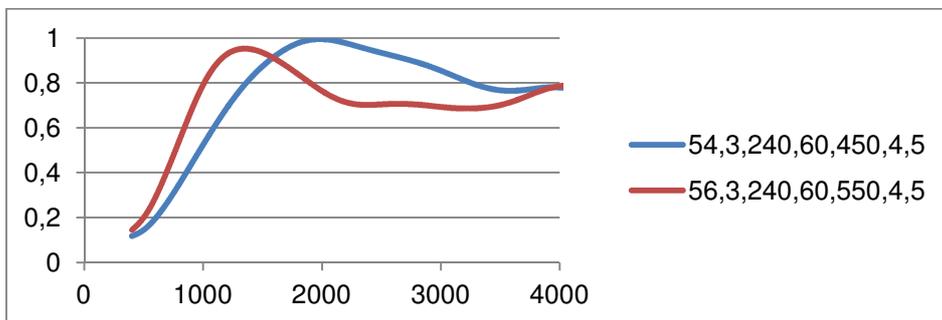
Fibra 1



Fibra 2

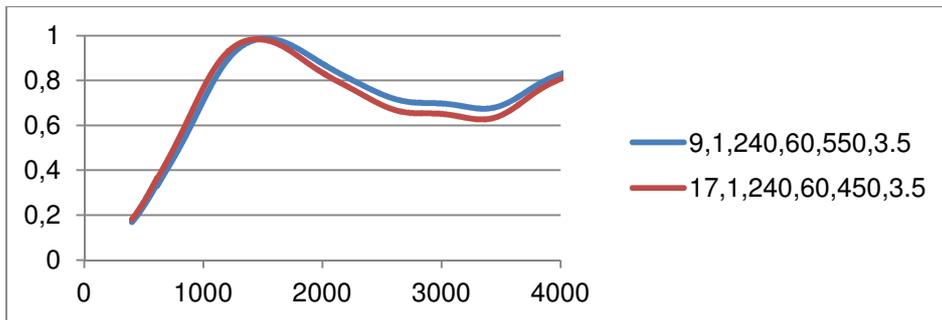


Fibra 3

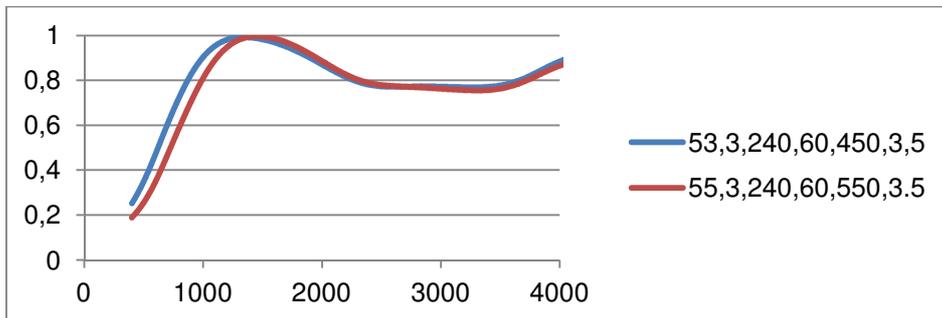
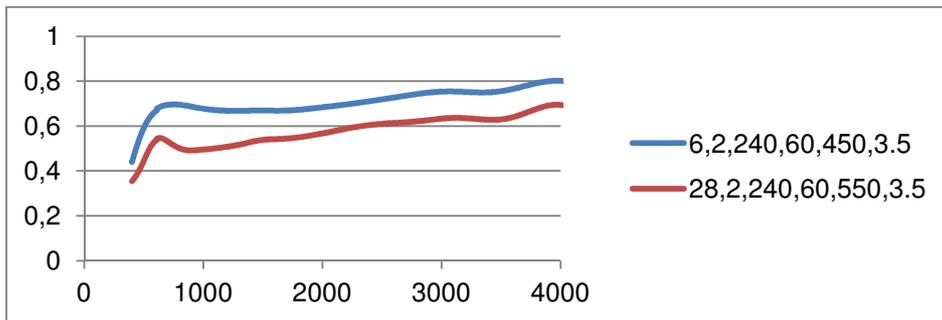


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
17º	1	1	240	60	450	0,5
9º	1	1	240	60	550	0,5
6º	1	2	240	60	450	0,5
28º	1	2	240	60	550	0,5
53	1	3	240	60	450	0,5
55	1	3	240	60	550	0,5

Fibra 1



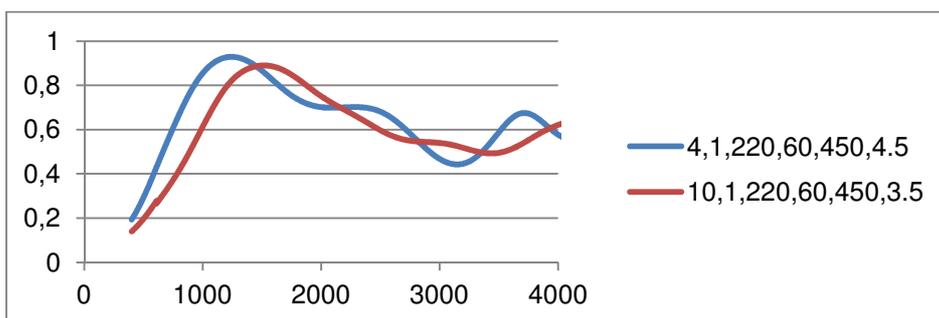
Fibra 2



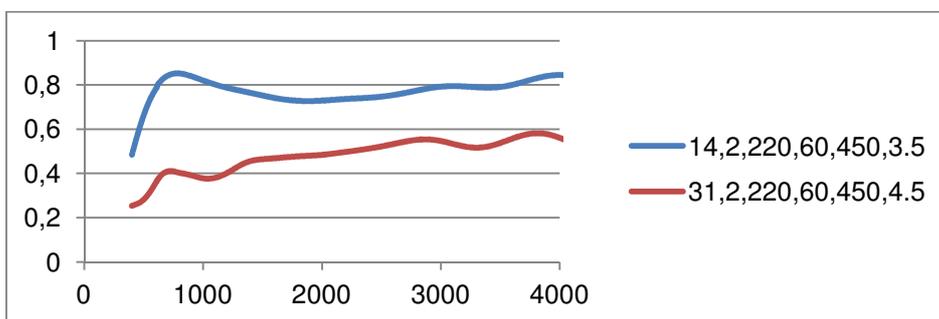
Presión variable

Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
4º	1	1	220	60	450	0,64
10º	1	1	220	60	450	0,5
14º	1	2	220	60	450	0,5
31º	1	2	220	60	450	0,64
34º	1	3	220	60	450	0,5
36º	1	3	220	60	450	0,64

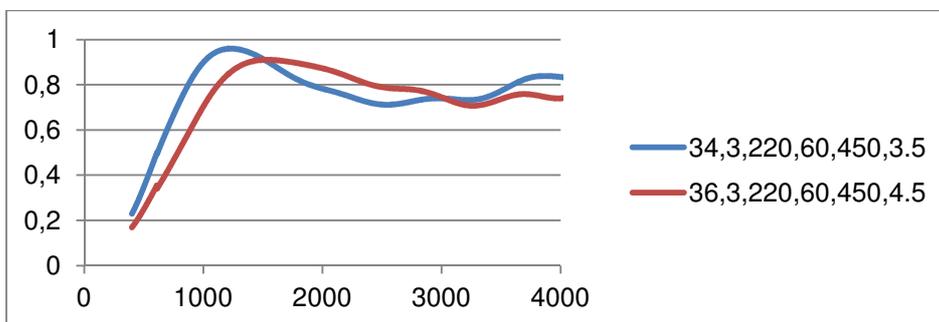
Fibra 1



Fibra 2

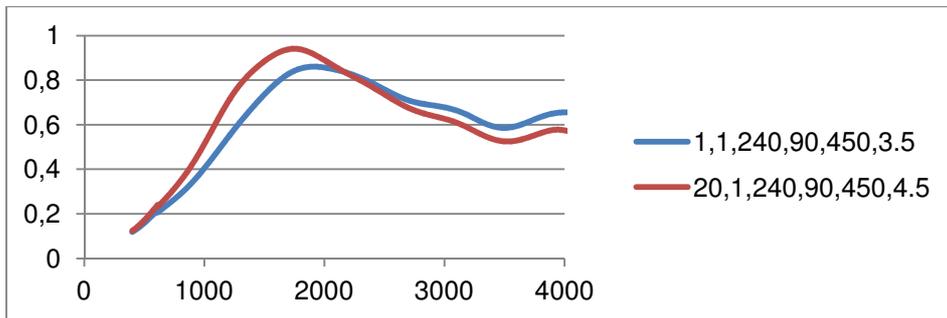


Fibra 3

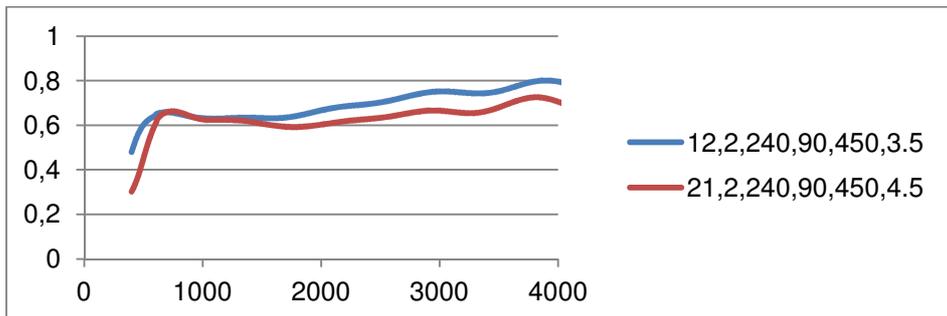


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
1º	1	1	240	90	450	0,5
20º	1	1	240	90	450	0,64
12º	1	2	240	90	450	0,5
21º	1	2	240	90	450	0,64
49	1	3	240	90	450	0,5
52	1	3	240	90	450	0,64

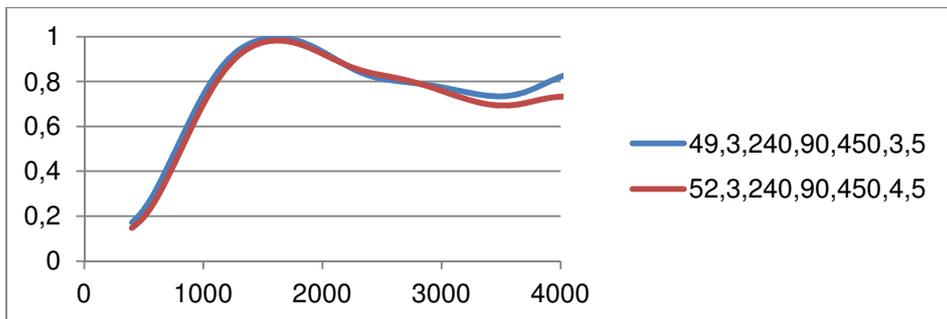
Fibra 1



Fibra 2

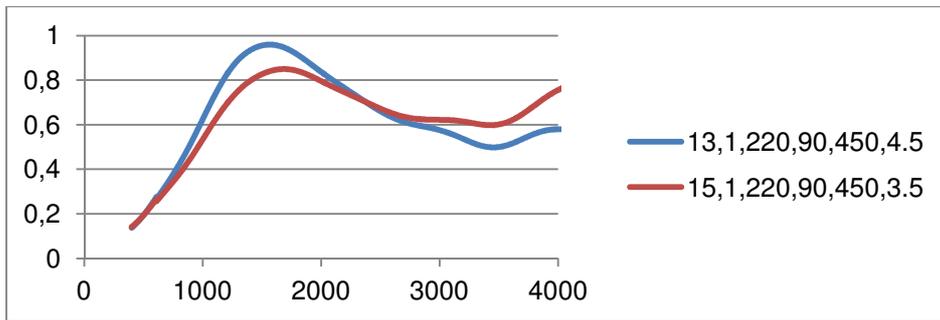


Fibra 3

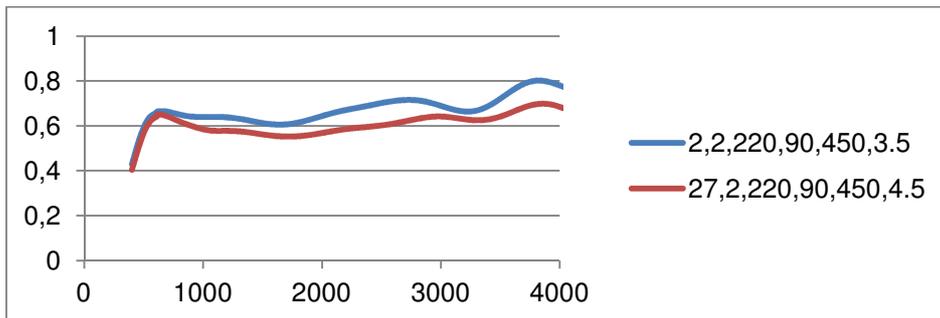


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
15º	1	1	220	90	450	0,5
13º	1	1	220	90	450	0,64
2º	1	2	220	90	450	0,5
27º	1	2	220	90	450	0,64
57º	1	3	220	90	450	0,5
58º	1	3	220	90	450	0,64

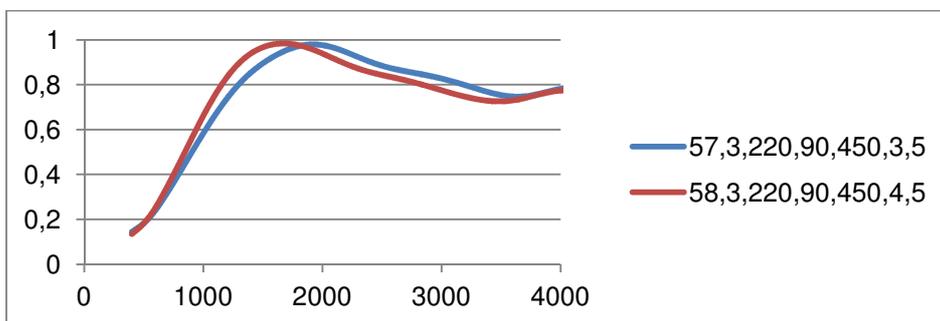
Fibra 1



Fibra 2

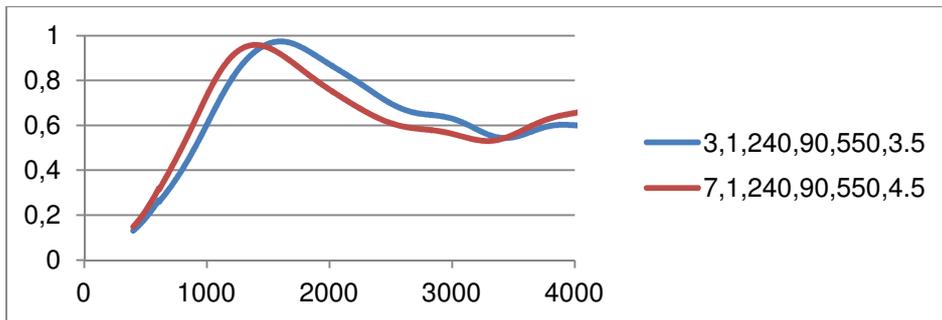


Fibra 3

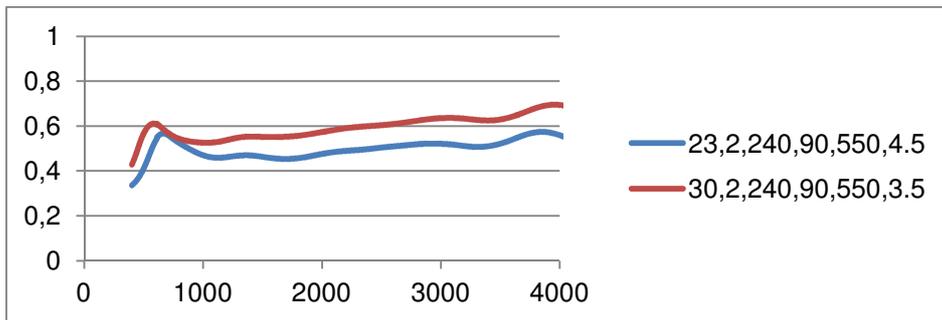


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
3º	1	1	240	90	550	0,5
7º	1	1	240	90	550	0,64
30º	1	2	240	90	550	0,5
23º	1	2	240	90	550	0,64
50º	1	3	240	90	550	0,5
51º	1	3	240	90	550	0,64

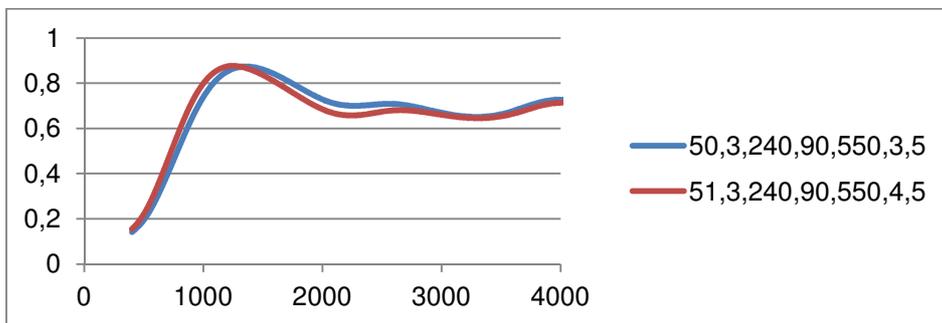
Fibra 1



Fibra 2

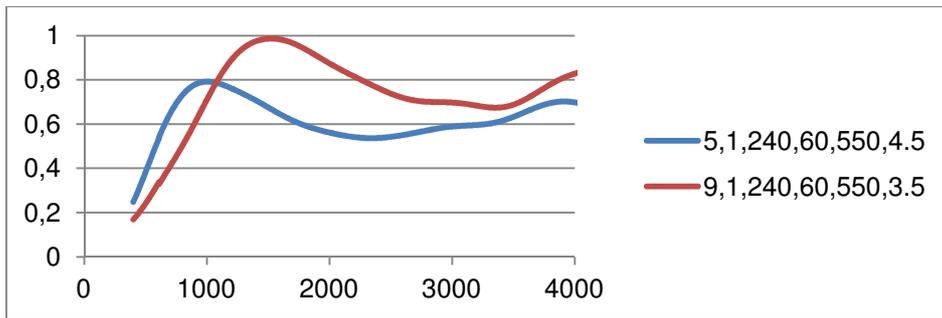


Fibra 3

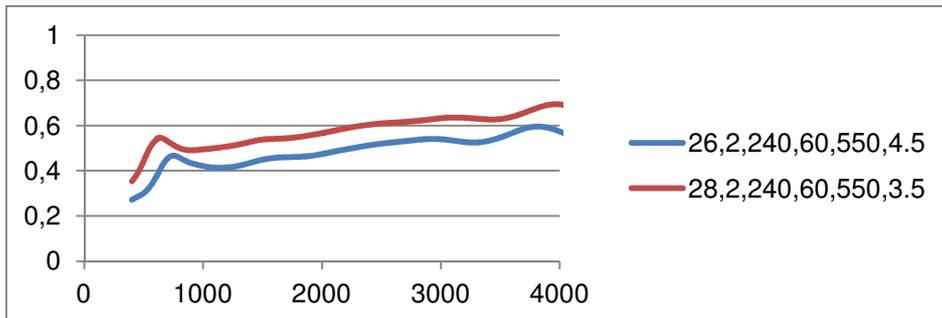


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
9º	1	1	240	60	550	0,5
5º	1	1	240	60	550	0,64
28º	1	2	240	60	550	0,5
26º	1	2	240	60	550	0,64
55	1	3	240	60	550	0,5
56	1	3	240	60	550	0,64

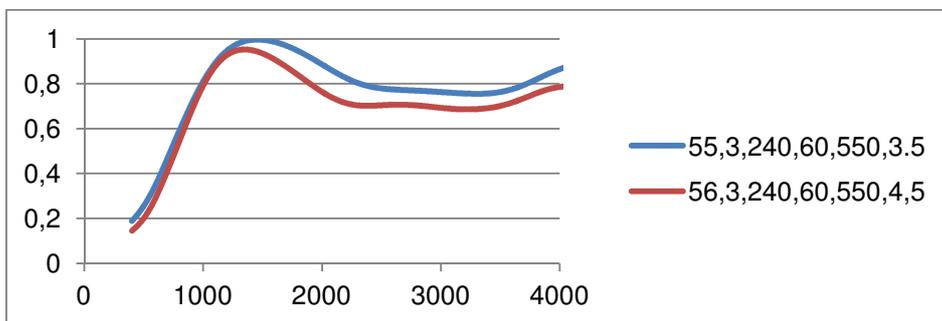
Fibra 1



Fibra 2

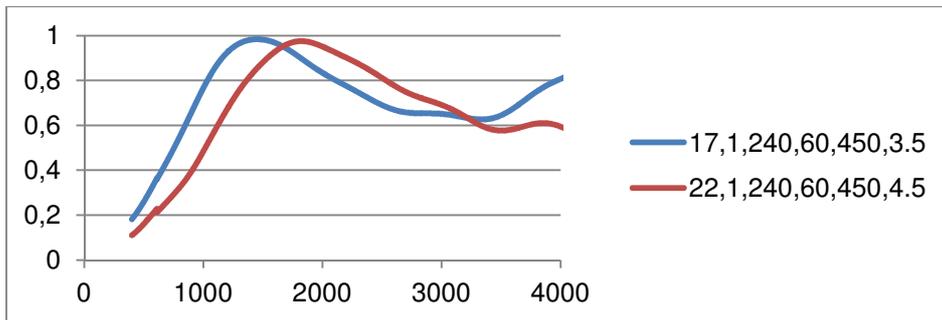


Fibra 3

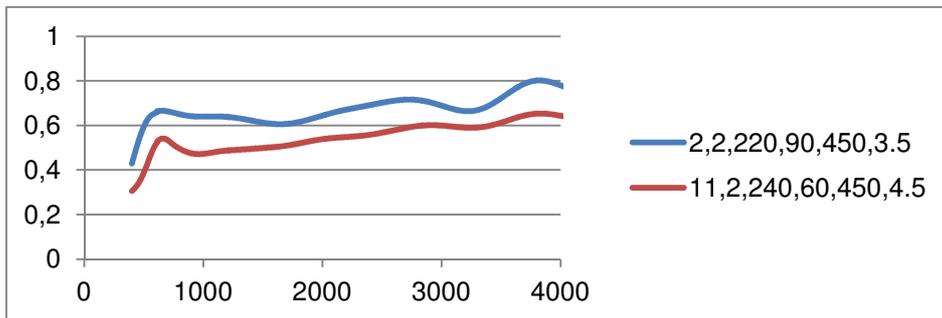


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
17º	1	1	240	60	450	0,5
22º	1	1	240	60	450	0,64
6º	1	2	240	60	450	0,5
11º	1	2	240	60	450	0,64
53	1	3	240	60	450	0,5
54	1	3	240	60	450	0,64

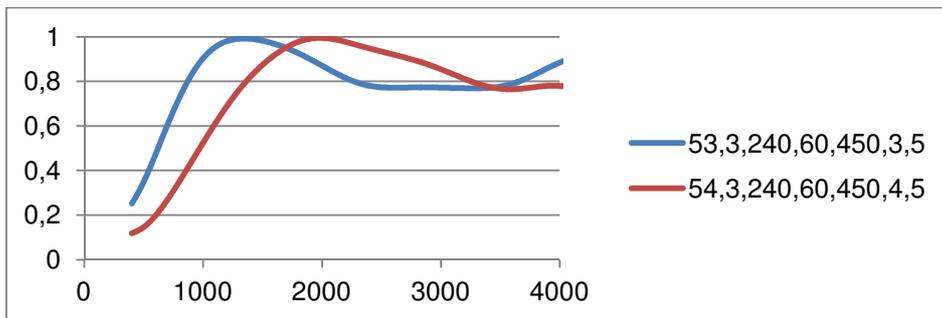
Fibra 1



Fibra 2

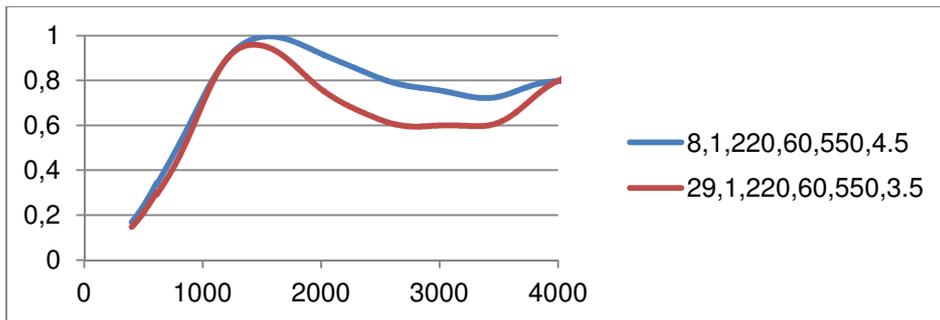


Fibra 3

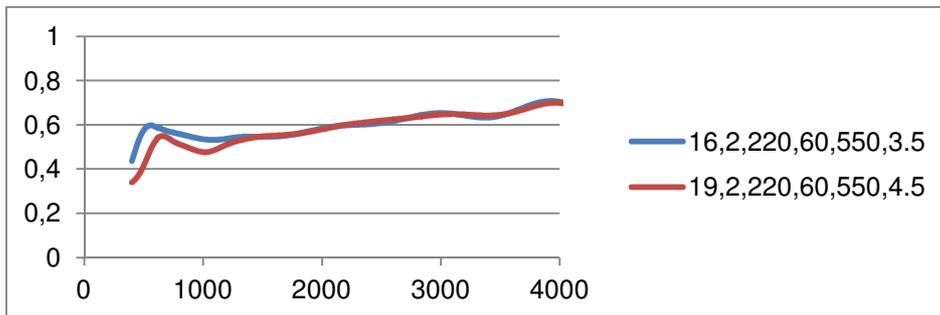


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
29º	1	1	220	60	550	0,5
8º	1	1	220	60	550	0,64
16º	1	2	220	60	550	0,5
19º	1	2	220	60	550	0,64
35º	1	3	220	60	550	0,5
33º	1	3	220	60	550	0,64

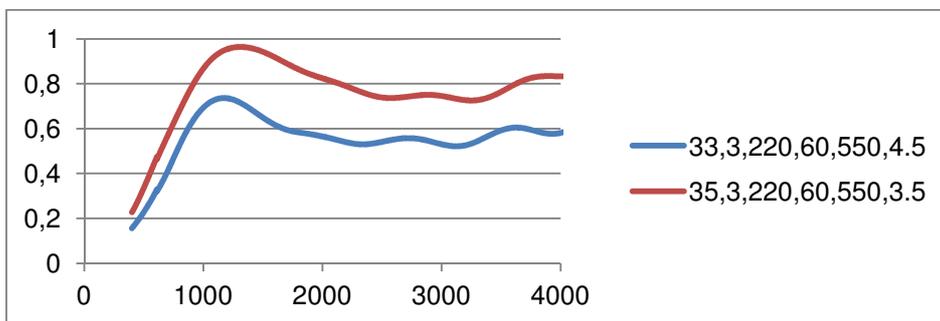
Fibra 1



Fibra 2

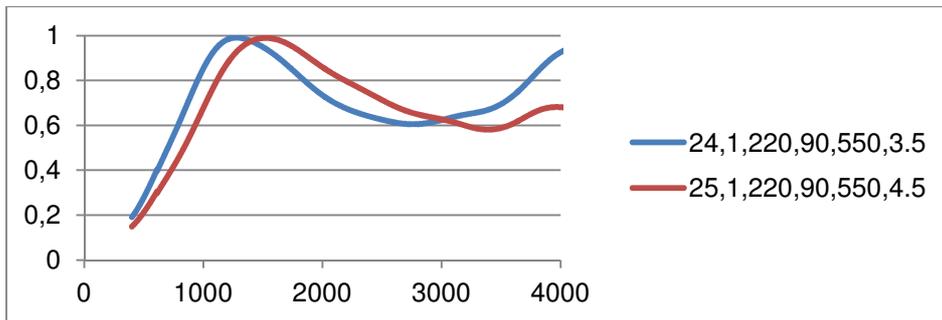


Fibra 3

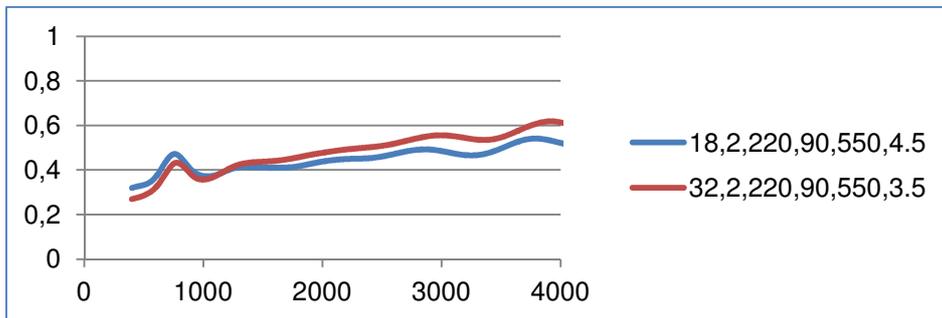


Nº muestra	Fase	Fibra	Temperatura	Tiempo	Peso	FC
24º	1	1	220	90	550	0,5
25º	1	1	220	90	550	0,64
32º	1	2	220	90	550	0,5
18º	1	2	220	90	550	0,64
60	1	3	220	90	550	0,5
59	1	3	220	90	550	0,64

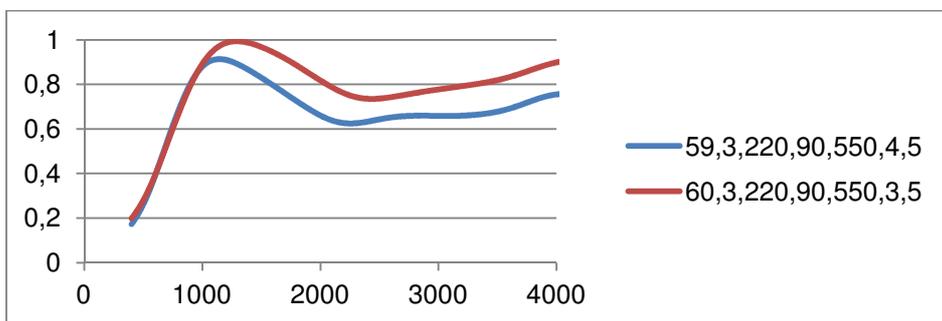
Fibra 1



Fibra 2



Fibra 3



ANEXO II

PARÁMETROS ACUSTICOS

Fibra nº1

Nº	°T	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
1	240	90	450	0,5	0,391	0,65	2,25	7,42
3	240	90	550	0,5	0,381	0,61	1,43	945,35
4	220	60	450	0,64	0,387	0,70	1,52	1369,22
5	240	60	550	0,64	0,476	0,62	2,15	769,26
7	240	90	550	0,64	0,485	0,62	2,50	769,26
8	220	60	550	0,64	0,434	0,62	2,95	705,93
9	240	60	550	0,5	0,380	0,68	1,31	966,63
10	220	60	450	0,5	0,371	0,70	1,49	985,74
13	220	90	450	0,64	0,372	0,65	0,76	950,38
15	220	90	450	0,5	0,322	0,73	1,62	1073,49
17	240	60	450	0,5	0,305	0,74	1,32	1695,47
20	240	90	450	0,64	0,450	0,66	1,60	998,33
22	240	60	450	0,64	0,411	0,51	1,03	789,25
24	220	90	550	0,5	0,430	0,67	1,43	827,77
25	220	90	550	0,64	0,463	0,55	1,75	636,31
29	220	60	550	0,5	0,413	0,65	1,80	476,72

Fibra nº2

Nº	ºT	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
2	220	90	450	0,5	0,343	0,73	2,59	279,94
6	240	60	450	0,5	0,311	0,72	7,76	254,27
11	240	60	450	0,64	0,356	0,67	7,18	207,61
12	240	90	450	0,5	0,321	0,71	6,99	225,69
14	220	60	450	0,5	0,317	0,73	4,48	250,38
16	220	60	550	0,5	0,332	0,67	8,06	492,88
18	220	90	550	0,64	0,447	0,59	5,78	484,87
19	220	60	550	0,64	0,338	0,65	11,08	146,80
21	240	90	450	0,64	0,406	0,69	6,81	139,97
23	240	90	550	0,64	0,544	0,60	9,33	192,93
26	240	60	550	0,64	0,534	0,59	12,66	216,84
27	220	90	450	0,64	0,416	0,59	6,38	171,43
28	240	60	550	0,5	0,375	0,66	6,75	177,05
30	240	90	550	0,5	0,382	0,63	4,45	234,21
31	220	60	450	0,64	0,500	0,62	6,53	197,95
32	220	90	550	0,5	0,420	0,65	6,76	182,50

Fibra nº 3

Nº	ºT	t'	Peso	FC	Densidad	Porosidad	Tortuosidad	Permeabilidad
33	220	60	550	0,64	0,597	0,65	9,05	159,59
34	220	60	450	0,5	0,387	0,64	3,67	520,61
35	220	60	550	0,5	0,349	0,74	5,22	451,39
36	220	60	450	0,64	0,376	0,62	7,91	529,44
49	240	90	450	0,5	0,303	0,71	2,03	950,38
50	240	90	550	0,5	0,507	0,55	4,01	468,43
51	240	90	550	0,64	0,492	0,68	5,96	424,55
52	240	90	450	0,64	0,359	0,68	1,88	558,08
53	240	60	450	0,5	0,296	0,75	2,59	827,77
54	240	60	450	0,64	0,348	0,60	3,97	499,16
55	240	60	550	0,5	0,344	0,71	3,56	585,32
56	240	60	550	0,64	0,422	0,69	4,02	500,77
57	220	90	450	0,5	0,245	0,76	2,39	512,37
58	220	90	450	0,64	0,383	0,58	6,83	488,75
59	220	90	550	0,64	0,484	0,60	6,68	424,55
60	220	90	550	0,5	0,378	0,77	2,89	483,31

1. Índice de Tablas

Tabla 1. 1. Composición de un neumático.....	22
Tabla 1. 2. Constitución de un neumático.....	23
Tabla 1. 3. Composición de bandas de rodamientos de neumáticos	28
Tabla 1. 4. Composición de flancos de neumáticos.....	29
Tabla 1. 5. Composición de relleno de talón.....	30
Tabla 1. 6. Programas específicos para Neumáticos fuera de uso	33
Tabla 1. 7. Rutas de recuperación europeas 2012.....	39
Tabla 1. 8. Recuperación de productos en Europa.....	40
Tabla 1. 9. Distribución europea de aplicaciones de productos	41
Tabla 1. 10. Pautas generales para diseñar un experimento	61
Tabla 1.11. Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada “ground tyre rubber and fiber”	67
Tabla 1.12. Tabla Resultados obtenidos en función de las palabra clave de búsqueda utilizada “crumb rubber and fiber”.....	67
Tabla 1.13. Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada “fiber”	67
Tabla 1.14. Tabla Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada recycled “fibers”.....	67
Tabla 1.15. Resultados obtenidos en función de las palabra clave de búsqueda utilizada “fluff”	68
Tabla 1.16. Tabla Resultados obtenidos en función de las palabras clave de búsqueda utilizada “impedance tube and fiber”.....	68
Tabla 1.17. Resultados obtenidos en función de las palabra clave de búsqueda utilizada “absorption coefficient and fiber”.....	68
Tabla 1.18. Palabras clave que aparecen en más número de publicaciones	68
Tabla 1.19. Palabras clave que aparecen en menos número de publicaciones	69
Tabla 2.1. Rango experimental y niveles de las variables del proceso	79
Tabla 2. 2. Matriz de diseño de experimentos	80
Tabla 2. 3. Tabla de análisis para identificación y cuantificación de mezclas de fibras	86
Tabla 2. 4. Numeración de coeficientes de absorción (CA),.....	96
Tabla 2. 5. Máximos coeficiente de absorción por intervalo de frecuencias.	97

Tabla 2. 6. Optimizar Respuesta, maximizar CA1	99
Tabla 2. 7. Coeficiente de regresión	99
Tabla 2. 8. Optimizar Respuesta: maximizar CA2	100
Tabla 2. 9. Coeficiente de regresión	100
Tabla 2.10. Optimizar Respuesta: maximizar CA3	101
Tabla 2.11. Coeficiente de regresión	101
Tabla 2.12. Optimizar Respuesta: maximizar CA4	102
Tabla 2.13. Coeficiente de regresión	102
Tabla 2.14. Resumen de las ecuaciones de los intervalos de frecuencias	103
Tabla 2.15. Distribución de fibras y residuos de caucho en la muestra	108
Tabla 2.16. Rango de Temperaturas criticas de las fibras	109
Tabla 2.17. Parámetros dimensionales muestra N° 8.....	111
Tabla 2.18. Máximos coeficiente de absorción por intervalo fibra N° 1	111
Tabla 2.19. Máximos coeficiente de absorción	112
Tabla 2. 20. Porosidad	112
Tabla 2. 21. Diferencia de potencial e intensidades de la muestra y del electrolito	113
Tabla 2. 22. Valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire	114
Tabla 2. 23. Resultados de los parámetros acústicos muestra N° 8 fibra N° 1	115
Tabla 2. 24. Parámetros dimensionales muestra N° 14.....	115
Tabla 2. 25. Máximos, coeficiente de absorción por intervalo fibra N° 2	116
Tabla 2. 26. Máximos coeficiente de absorción	116
Tabla 2. 27. Porosidad	117
Tabla 2. 28. Diferencia de potencial e intensidades de la muestra y el electrolito	118
Tabla 2. 29. Valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire	119
Tabla 2. 30. Resultados de los parámetros acústicos muestra N° 14, fibra N° 2	120
Tabla 2. 31. Parámetros dimensionales muestra N°35.....	120
Tabla 2. 32. Máximos coeficiente de absorción por intervalo fibra N° 3	120
Tabla 2. 33. Máximos, coeficiente de absorción	121
Tabla 2. 34. Porosidad	122
Tabla 2. 35. Diferencia de potencial e intensidades de la muestra y el electrolito	122
Tabla 2. 36. Valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al aire.	123
Tabla 2. 37. Resultados de los parámetros acústicos muestra N° 35 fibra N° 3	124
Tabla 2. 38. Resultados de los parámetros acústicos muestras N° 8, 14, 35 fibras N° 1, 2,3 .	125

Tabla 2. 39. Parámetros dimensionales muestra ensayo.....	126
Tabla 2. 40. Máximos coeficiente de absorción por intervalo	126
Tabla 2. 41. Parámetros de conformación de placas y parámetros funcionales de las muestras,	127
Tabla 2. 42. Parámetros dimensionales de la muestra de ensayo.....	128
Tabla 2. 43. Máximos coeficiente de absorción por intervalo	128
Tabla 2. 44. Parámetros de conformación de placas y parámetros funcionales de las muestras.....	129
Tabla 2. 45. Parámetros dimensionales muestras ensayo bicapa	130
Tabla 2. 46. Máximos coeficiente de absorción por intervalo	130
Tabla 2. 47. Parámetros de conformación de placas y parámetros funcionales de las muestras	132
Tabla 2. 48. Máximos coeficiente de absorción por intervalo	133
Tabla 2. 49. Parámetros de conformación y parámetros acústicos.....	133
Tabla 2. 50. Máximos coeficiente de absorción por intervalo	134
Tabla 2. 51. Parámetros dimensionales de la muestra ensayada.....	135
Tabla 2. 52. Máximos coeficiente de absorción por intervalo	136
Tabla 2. 53. Parámetros de conformación de placa y parámetros acústicos de la muestra	136
Tabla 2. 54. Parámetros dimensionales de la muestra de ensayo.....	137
Tabla 2. 55. Máximos del coeficiente de absorción por intervalo.....	137
Tabla 2. 56. Parámetros de conformación de placa y parámetros acústicos de las muestras	138

2. Índice de Figuras

Figura 1. 1. Esquema simplificado de neumático	22
Figura 1. 2. Composición en % de una cubierta de neumático.	24
Figura 1. 3. Composición en % de una cubierta de neumático y de R.S.U.....	24
Figura 1. 4. Sección de un neumático representando sus diferentes partes.....	25
Figura 1. 5. Cubierta diagonal.....	26
Figura 1. 6. Cubierta radial.....	27
Figura 1. 7. Talón	29
Figura 1. 8. Evolución del tratamiento de nfus.....	35
Figura 1. 9. Datos internacionales de recuperación de NFUs	43
Figura 1. 10. Analogía acústico-eléctrica, para el cálculo de la tortuosidad.....	57
Figura 2. 1. Productos obtenidos del triturado de neumáticos.....	81
Figura 2. 2. Fluff proveniente del procesado de NFUs	81
Figura 2. 3. Fibras obtenidas de las empresas productoras.....	82
Figura 2. 4. Cardas manuales provistas de guarnición.....	83
Figura 2. 5. Lupa estereoscópica modelo Olympus SZX7.....	83
Figura 2. 6. Microscopio electrónico de barrido Phenom Microscope (FEI Company).....	85
Figura 2. 7. Sputter Coater EMITECH mod. SC7620	85
Figura 2. 8. Balanza de precisión marca Sartorius	87
Figura 2. 9. Aplicación del Factor de compactación	88
Figura 2.10. Molde de aluminio con frontal abatible	88
Figura 2.11. Planos del molde.....	89
Figura 2.12. Prensa hidráulica de 50 Tn equipada con platos calientes	89
Figura 2.13. Troqueles de 42 mm, 60 mm, 100 mm, de diámetro, con el canto biselado.....	90
Figura 2.14. Esquema del montaje del tubo de impedancia acústica: ISO 10534-2.....	91
Figura 2.15. Fotografía del tubo de impedancia acústica	92
Figura 2.16. Máquina de ensayos universal electromecánica Elib 50	92
Figura 2.17. Fuente de alimentación marca Promax modelo FAC-307B	93
Figura 2.18. Dispositivo para determinar la tortuosidad.....	94
Figura 2.19. Detalle del vaso con los electrodos y la pinza retén.....	95
Figura 2. 20. Permeámetro EHVAK 2000	95
Figura 2. 21. Modo de trabajo para la evaluación de las muestras	96

Figura 2. 22. Diagrama de Pareto estandarizada para CA1	99
Figura 2. 23 Diagrama de Pareto estandarizada para CA2.....	100
Figura 2. 24 Diagrama de Pareto estandarizada para CA3.....	101
Figura 2. 25. Diagrama de Pareto estandarizada para CA4.....	102
Figura 2. 26. Resultado de maximizar los coeficientes de absorción por intervalo	103
Figura 2. 27. Longitudes de las fibras 1, 2 y 3	105
Figura 2. 28. Distribución de longitudes de fibras	106
Figura 2. 29 Imágenes obtenidas por microscopia electrónica fibra 1,2 y 3.....	107
Figura 2. 30. Distribución de diámetros	107
Figura 2. 31. Gráfico de porciones de la composición de las fibras	109
Figura 2. 32. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título del gráfico se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición el peso de la fibra y la presión	112
Figura 2. 33. Líneas de tendencia de la muestra y del electrolito.....	114
Figura 2. 34. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título del gráfico se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión	117
Figura 2. 35. Líneas de tendencia de la muestra y del electrolito.....	118
Figura 2. 36. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título del gráfico se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición el peso de la fibra y la presión	121
Figura 2. 37. Comparativa mejores resultados monocapa, en el título de las series se incluyen: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.	125
Figura 2. 38. Gráfico comparativo de las muestras (1,2) en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.....	127
Figura 2. 39. Gráfico comparativo de las muestras (1,3) en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.....	129
Figura 2. 40. Gráfico comparativo de las muestras, en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición el peso de la fibra y la presión.....	130
Figura 2. 41. Gráfico comparativo de las muestras, en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.....	133
Figura 2. 42. Gráfico comparativo de la Muestra Nº 48 por ambas superficies. En el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión	134

Figura 2. 43. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título de la serie se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.....	136
Figura 2. 44. Gráfico del Coeficiente de absorción acústica, en el título de la serie se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.....	138
Figura 2. 45. Gráfico, comparativo de las muestras bicapa y mezcla. En el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.	139
Figura 2. 46. Gráfico, comparativo de las muestras tricapa y mezcla en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión	139
Figura 2. 47. Gráfico del mejor resultado del Coeficiente de absorción acústica, en el título de la serie se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión	140
Figura 2. 48. Gráfico comparativo entre el comportamiento de la muestra N° 39 y la lana mineral en el título de las series se incluye: el nº de muestra, la clase de fibra, la temperatura, el tiempo de exposición, el peso de la fibra y la presión.	141

3. Índice de ecuaciones

$Z = \rho_0 C_0 \left[1 + 0,0571\rho_0\sigma - 0,754 - j0,087\rho_0\sigma - 0,732 \right]$	(1.1) .. 48
$\Gamma = 2\pi f/C_0 \left[1 + 0,0978(\rho_0/\sigma)^{-0,700} - j0,189 \left(\rho_0/\sigma \right)^{-0,595} \right]$	(1.2).. 48
$W = \rho M_{12} = W_a - Z$	(1.3 a) 49
$W = W_a - Z - 1 + \Psi - \Psi$	(1.4). 49
$\gamma = \xi + i\beta = K(2 + Q)/(1 + Q) + iK(1 + \Psi)$	(1.5) 49
$\Psi = 1 - H_1 + q_0 H_2 \mu_k \rho_0$	(1.6). 50
$q_0 - 1 + 2x_{1041} - H_2 - 1$	(1.7). 50
$\emptyset = 1 - \rho_m / \rho_f$	(1.8). 50
$W = W_a - Z = 1 + \Psi - \Psi U$	(1.9). 51
$\gamma = \xi + \beta = K\Psi_1 + 1 + \Psi_1 + BF_1 + \Psi + K_1 + \Psi_1 + X$	(1.10). 51
$T^n = 1 - n(1 - T^0)$	(1.11). 51
$\emptyset n = 1 - n_1 - \emptyset_0$	(1.12). 51
$\xi n = n \xi_0$	(1.13). 51
$\sigma d_{2\rho m} - k_1 = k_2$	(1.14). 52
$\sigma = G\rho_m^J$	(1.15). 52
$Wa = \rho_0 c_0 \left[1 + c_1 \rho_0 \sigma - c_2 \right]$	(1.16). 53
$Z = -\rho_0 c_0 \left[3\rho_0 \sigma - c_4 \right]$	(1.17). 53
$\Gamma = 2\pi f c_0 \left[5\rho_0 \sigma - c_6 \right]$	(1.18). 53
$\Gamma = 2\pi f c_0 \left[1 + c_7 \rho_0 \sigma - c_8 \right]$	(1.19). 53
$W_1 = W_a + Z \coth \Omega + \Gamma_1 = W_a + Z \coth \Omega + \Gamma_1$	(1.20). 53
$\alpha n = 4W_a \rho_0 c_0 W_1^2 + 2\rho_0 c_0 W_a + \rho_0 c_0^2$	(1.21). 53
$\alpha = 1 - r ^2$	(1.22). 54
$r = H_1^2 - H_1 H_r - H_1^2 \cdot e_2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1$	(1.23). 54
$W\rho \cdot c_0 = W_a \rho \cdot c_0 + j \cdot x\rho \cdot c_0 = 1 + r_1 - r$	(1.24). 55
$\emptyset = \nabla AVT = \nabla AVA + \nabla E$	(1.25). 55
$T = \Sigma m \Sigma e \emptyset$	(1.26) 55
$\Delta P = \sigma \cdot F$	(1.27). 56
$\Delta V = R \cdot A$	(1.28). 56
$Q = iE$	(1.29 b). 56
$R = 1Q \cdot LS = \Sigma LS$	(1.30). 56

$$\Delta P = \pi \cdot YA \cdot F \quad \text{Siendo} \quad \pi = \Delta PF \cdot AY \quad (1.31) \dots 57$$

$$\Delta V = \Sigma LS \cdot A \quad \text{con} \quad \Sigma = \Delta VA \cdot SL \quad (1.32) \dots 57$$

$$\sigma F = \Delta PF \quad (1.33) \dots 57$$

$$\sigma = \Delta P \vartheta = \Delta F \cdot \$ = \sigma F \cdot \$ \quad (1.34) \dots 58$$

$$\S = \Delta P \vartheta \cdot 1h = \Delta PF \cdot \$ h \quad (1.35) \dots 58$$

$$F = \varpi \text{\AA} \times 167 \quad (1.36) \dots 58$$

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij} \quad (1.37) \dots 63$$

$$SCEfecto = n^\circ \text{ de datos} \cdot Efecto2 \quad (1.38) \dots 64$$

4. Glosario de términos empleados

\dot{A}	Área
ξ	Atenuación
E	Campo eléctrico
Ψ	Característica estructural
α	Coeficiente de absorción acústica
r	Coeficiente de reflexión
μ	Coeficiente dinámico de la viscosidad
Q	Conductividad eléctrica
β	Constante de fase
γ	Constante de propagación
Γ	Constante de propagación compleja
Ω	Constante de propagación parte real
ρ_m	Densidad aparente de la masa del material
i	Densidad de corriente
ρ_f	Densidad de las fibras
ρ_0	Densidad del aire
d	Diámetro de la fibra
l	Dimensión característica
X_1	Distancia entre el micrófono y el punto más alejado
h	Espesor
n	Factor de forma dinámica
q_0	Factor definido por la ecuación empírica
F	Flujo de aire
f	Frecuencia
H_{12}	Función de transferencia compleja
H_i	Función de transferencia de la onda incidente
H_R	Función de transferencia de la onda reflejada
W	Impedancia característica
Z	Impedancia característica compleja
W_a	Impedancia característica real
A	Intensidad eléctrica
L	longitud
Λ'	Longitud térmica característica
ϖ	Media aritmética
M	Modulo de la masa de aire
K	Número de onda
k_0	Número de onda complejo

κ	Permeabilidad
\emptyset	Porosidad
P	Presión del aire
a_e	Radio efectivo del capilar
σ_F	Resistencia al flujo de aire
R	Resistencia eléctrica
σ	Resistencia específica al flujo por unidad de espesor
ξ	Resistividad al flujo de aire
Σ	Resistividad eléctrica
Σ_e	Resistividad eléctrica con el electrolito
Σ_m	Resistividad eléctrica con la muestra
$\$$	Sección recta
b	Semianchura del hueco de los poros
S	superficie
T	Tortuosidad
\uplus	Velocidad del flujo de aire
C_0	Velocidad del sonido en el aire
V	Voltios
V	Volumen