

Agradecimientos

Llegado este punto, quiero agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado durante todo el tiempo que me ha llevado la realización de este Proyecto Final de Máster.

En primer lugar, agradecer a mi Director de Proyecto Fin de Máster, Ernesto Juliá Sanchis por todo el tiempo que ha destinado a que el desarrollo de este trabajo se realizara de la mejor manera posible, aún estando a miles de kilómetros de distancia. Con su conocimiento, la experiencia en el campo de la acústica y su dedicación, he podido aprender de manera rápida. Del mismo modo quiero agradecer al Codirector de este proyecto, Jorge Gabriel Segura Alcaraz por su valiosa orientación y ayuda prestada. Ha sido un privilegio poder contar con la guía y ayuda de ambos.

En segundo lugar, quiero agradecer el apoyo brindado y la buena acogida que el profesor Dante Fratta, de la Universidad de Wisconsin- Madison, me ofreció durante los 8 meses de estudio e investigación en su departamento de Geología de dicha universidad, codirigiendo este proyecto.

Dar las gracias también a la empresa PEMARSA, S.A, por su confianza en mí y su esfuerzo por hacerme llegar los materiales, objeto de estudio de este proyecto, y poder así llevar a cabo mi proyecto fin de máster. Sin su gran interés, la elaboración de este proyecto habría sido más dificultosa. Resaltar la figura del Director Técnico y Director de las Prácticas de Empresa, Antonio Pacetti, por todo el conocimiento que me ha transmitido y su implicación en este trabajo. Así como, a Javier López Amores por la atención que me ha prestado y todo que me ha enseñado en el laboratorio de control de calidad de la empresa.

Por otro lado, expreso mi gratitud hacía mi compañera de viaje Elena Torres Roca, la cual ha vivido cada uno de los momentos del desarrollo de este proyecto conmigo; a mi familia estar siempre ahí prestándome su incondicional apoyo y a mis amigos que hacen que hasta los momentos más duros sean agradables.

Resumen

La acumulación de neumáticos fuera de uso es un problema medioambiental que empieza a ser tomado en consideración por las empresas productoras y aquellas que trabajan en el sector del caucho. Distintas legislaciones a nivel estatal se han ido estableciendo a lo largo de los últimos diez años, las cuales han propiciado la optimización de gestión de estos productos, y han promovido la reutilización y reciclaje del caucho entre las empresas del sector. De esta manera cada vez es más fácil encontrar en el mercado artículos fabricados con caucho reciclado, como losetas diseñadas exclusivamente para pavimentos de salas de un determinado ejercicio físico. En una sala de tipo *fitness* se requiere un enlosado resistente y capaz de amortiguar los impactos y el sonido que se genera en ella, además de evitar que se propaguen al exterior. Por ello, empresas como PERMARSA, S.A., trabajan para fabricar el pavimento más adecuado en estas condiciones.

La presente tesina de máster se centra en el análisis del comportamiento dinámico y acústico de materiales multicapa fabricados principalmente con caucho reciclado en forma granular para su instalación como pavimento en una sala de *fitness*.

Se estudiaron doce materiales cuya diferenciación entre ellos se encontraba en el espesor, la densidad o el tamaño de grano del caucho reciclado utilizado. Todos ellos se sometieron a ensayos mecánicos y dinámicos de ultrasonidos, impacto, flexión en voladizo y compresión uniaxial dinámica. Con ellos se obtuvo la frecuencia natural de vibración, el módulo de Young a distintas frecuencias de excitación, la rigidez dinámica y el porcentaje de amortiguamiento a compresión cíclica y a flexión bajo impacto.

Los resultados obtenidos de los ensayos permitieron conocer cuál es el material más apropiado para la aplicación a la que se destina (salas *fitness*). Aquel que resultó más conveniente fue el de mayor espesor, densidad media (respecto a las tres que se estudiaron) y mayor tamaño de grano de caucho. Realizando una comparativa con otro material clásicamente utilizado para las mismas condiciones de uso, el Etilvinilacetato conocido como EVA, el material multicapa de caucho ofrece una rigidez dinámica menor y por lo tanto un mayor aislamiento frente al impacto, hecho que lo convierte en un posible futuro gran competidor del EVA.

adicionalmente a estas conclusiones, con los valores obtenidos del módulo elástico de Young en distintos rangos de frecuencia, se pudo realizar un gráfico modelo del

comportamiento elástico de materiales de caucho del tipo de los que se estudian en este proyecto, es decir, placas multicapa compuestas de caucho nuevo y caucho reciclado

Las conclusiones de este proyecto dan lugar a futuras líneas de trabajo en la mejora de las propiedades (como la ligereza) del material estudiado para la obtención de un pavimento de mayor calidad y al mismo tiempo abre una puerta a la investigación en mayor profundidad y detalle del comportamiento no uniforme de materiales compuestos por más de una capa de distintos tipos de caucho.

Palabras Clave: Caucho reciclado, material multicapa, pavimento, comportamiento elástico-dinámico, propiedades acústicas.

Summary

The increasing number of used tires is an environmental problem that is becoming an important issue to be taken into consideration by the manufacturing companies and those from the rubber industry. Some state laws have been set during the last decade which have resulted in the management optimization of these rubber products. Moreover, they have promoted the reusing and recycling of rubber among the companies from the rubber field. Therefore, it is easier to find recycled rubber products in today's market, such as pavement tiles entirely designed to be installed in specific exercising rooms. Fitness rooms for example, require a flooring system able to damp impact and sound waves generated in the room, as well as, avoiding the propagation of them towards the outside. This is one of the reasons why there are companies like PEMARSA S.A., that work on the development of the most suitable pavement for this kind of conditions.

The present master's thesis is focused on the dynamic and acoustic behavior analysis of multilayer materials made mainly of granular recycled rubber that will be used as a fitness' room pavement.

Twelve materials differentiated among themselves by the following properties: Thickness, density and rubber grain size used in their composition, were studied through mechanical and dynamical tests like ultrasounds, impact, cantilever deflection and dynamic uniaxial compression. These tests provided the value of the natural frequency of vibration, Young modulus at different excitation frequencies, dynamic stiffness and the damping percentage under cyclic compression strain and under flexural strain due to an impact.

Results obtained gave rise to know the most appropriate material to the intended application (fitness room). The material that revealed better properties for it was the one with higher thickness, medium density (among the three different studied densities) and bigger rubber grain size. A benchmarking against another material conventionally used for the same working conditions, the Ethylene Vinyl Acetate, commonly known as EVA, the multilayer rubber material shows a lower dynamic stiffness and consequently, a higher impact isolation. This fact turns this rubber composite into a possible future competitor of EVA.

Apart from these conclusions, Young's Modulus coefficient obtained in various frequency ranges let the development of a graph model about the elastic behavior of

rubbery materials like the ones studied in this project, panels composed by new and recycled rubber.

To end with, conclusions of this project can be followed by future research lines in the development and improvement of rubbery material properties (like lightweight) in order to succeed with a higher quality pavement . At the same time, there are doors open that lead to a deeper and more detailed research on the non-linear behavior of composite materials of many different rubber types in each layer.

Keywords: Recycled rubber, multilayer material, pavement, elastic-dynamic behavior, acoustic properties.

Contenido

1	MOTIVACIÓN.....	31
2	OBJETO DEL PROYECTO FIN DE MÁSTER	35
3	PLAN DE ESTUDIO	39
3.1	Prácticas de empresa	41
3.1.1	Objetivo de las prácticas.....	42
3.1.2	Actividad de la empresa	43
3.1.3	Organigrama.....	44
3.2	Trabajo en la Universidad de Wisconsin, Madison	45
4	INTRODUCCIÓN	47
4.1	Materiales	49
4.1.1	El caucho natural	49
4.1.2	El caucho sintético.....	50
4.1.3	Características generales del caucho	51
4.1.4	Comportamiento elástico del caucho	54
4.2	Componentes y métodos de fabricación del caucho.....	56
4.2.1	Tipos de aditivos	56
4.2.1.1	Agentes de vulcanización.....	56
4.2.1.2	Acelerantes.....	57
4.2.1.3	Activadores.....	57

4.2.1.4	Plastificantes	57
4.2.1.5	Anti-degradantes	58
4.2.1.6	Anti-reversión	58
4.2.1.7	Retardadores.....	58
4.2.1.8	Refuerzos	58
4.2.2	Mezclado.....	59
4.2.2.1	Vulcanización	61
4.2.2.2	Tipos de vulcanización	61
4.3	Etilvinilacetato (EVA)	65
4.4	Análisis del mercado.....	66
4.5	Aplicaciones del caucho reciclado	71
5	ESTADO DEL ARTE	75
5.1	Investigación en materiales	77
5.1.1	Compuestos multicapa de caucho reciclado	78
5.1.2	Propiedades de materiales compuestos de caucho reciclado	79
5.1.2.1	Propiedades dinámicas	79
5.1.2.2	Propiedades acústicas	81
5.2	Investigación en métodos de procesado.....	85
6	EXPERIMENTAL.....	87
6.1	Materiales	89

6.2	Ensayos previos	93
6.2.1	Cálculo de la gravedad específica.....	93
6.2.2	Cálculo del porcentaje de porosidad	95
6.3	Ensayos dinámicos de caracterización de los materiales	96
6.3.1	Ensayo de velocidad de ondas-P	96
6.3.2	Ensayo de frecuencia de vibración de viga en voladizo.....	101
6.3.2.1	Parámetros derivados del ensayo de viga en voladizo.....	102
6.3.3	Ensayo de determinación de la Rigidez Dinámica	103
6.3.3.1	Parámetro derivado del ensayo de rigidez dinámica	106
6.3.4	Ensayo de Compresión Dinámica Uniaxial (Cargas Cíclicas).....	107
6.4	Ensayo mecánico de flexión de viga en voladizo.....	109
7	RESULTADOS	111
7.1	Gravedad específica y porosidad.....	114
7.2	Velocidad de ondas- P.....	116
7.3	Frecuencia natural de vibración y amortiguamiento obtenidos por el ensayo de viga en voladizo bajo impacto	122
7.4	Rigidez dinámica.....	126
7.4.1	Módulo de Young.....	127
7.4.2	Reducción de sonido al impacto.....	128
7.5	Ensayo de argas cíclicas. Compresión Uniaxial Dinámica	129

7.6	Ensayo mecánico de flexión de viga en voladizo.....	131
8	DISCUSIÓN	132
8.1	Gravedad específica y porosidad.....	134
8.2	Velocidad de propagación de ondas.....	135
8.3	Frecuencia natural de vibración y amortiguamiento obtenidos por el ensayo de viga en voladizo.....	140
8.4	Rigidez dinámica y parámetros derivados de ella.....	144
8.4.1	Módulo de Young.....	146
8.4.2	Reducción del sonido al impacto	146
8.5	Ensayo de cargas cíclicas. Compresión Uniaxial Dinámica.....	147
8.6	Ensayo mecánico de flexión de viga en voladizo.....	150
9	CONCLUSIONES.....	157
	CONCLUSIONS	161
10	LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	165
11	REFERENCIAS.....	168
12	ANEXOS	178
12.1	Ensayo de propagación de ondas- P	180
12.2	Ensayo mecánico de flexión de viga en voladizo.....	181

Lista de figuras

Figura 3.1.1. Esquema de organización interna de PEMARSA, S.A.	44
Figura 4.1.1. Fórmulas químicas del monómero y del polímero del caucho natural.	49
Figura 4.1.2. Curva tensión-deformación de un alargamiento máximo del 600% y retorno del caucho crudo y del vulcanizado [13].	53
Figura 4.2.1. Sección transversal de un mezclador común tipo Banbury [25].	59
Figura 4.2.2. Esquema de un mezclador de cilindros con dos cilindros adicionales de menor tamaño [25].	60
Figura 4.2.3. Reacción química del polisopreno con el azufre durante la vulcanización.	62
Figura 4.4.1. Comparativa entre el IPI del sector del caucho y plásticos, y el IPI total español entre el 2009 y el 2014 [36].	67
Figura 4.4.2. Proceso de desvulcanización mediante la adición de un agente químico [39].	68
Figura 5.1.1. Sección del materia bicapa de caucho reciclado con las partes diferenciadas.	78
Figura 5.1.2. Publicaciones de caucho reciclado con aplicaciones acústicas entre el 1996 y el 2015.	82
Figura 5.1.3. Esquema de pavimento bicapa de caucho [73].	84
Figura 6.3.1. Esquema de perspectiva en alzado del ensayo de ultrasonidos.	98
Figura 6.3.2. Esquema de perspectiva en planta del ensayo de ultrasonidos con las zonas de colocación del palpador numeradas por orden de ejecución.	98
Figura 6.3.3. Esquema de vistas en lateral y de frente de la viga en Posición 1.	101
Figura 6.3.4. Esquema de vistas en lateral y de frente de la viga en Posición 2.	102
Figura 6.3.5. Gráfico frecuencia-amplitud al cuadrado para determinar el amortiguamiento [89].	103
Figura 6.3.6. Esquema de perspectiva en alzado del ensayo de rigidez dinámica.	104
Figura 6.3.7. Esquema de perspectiva en planta del ensayo de rigidez dinámica con los 5 puntos destacados donde golpear.	105
Figura 6.3.8. Esquema de colocación del material para el ensayo de rigidez dinámica.	106

Figura 6.3.9. Ejemplo de un ciclo de histéresis de uno de los materiales al someterlo a esfuerzos cíclicos de compresión.	109
Figura 6.4.1. Esquema representativo del ensayo de viga en voladizo.	110
Figura 7.4.1. Esquema de la muestra durante el ensayo.	126
Figura 8.1.1. Gráfico comparativo de porcentaje de porosidad de los materiales con espesor E1.	134
Figura 8.1.2. Gráfico comparativo de porcentaje de porosidad de los materiales con espesor E2.	135
Figura 8.2.1. Gráfico de velocidad de propagación en función de la densidad de las muestras E1	136
Figura 8.2.2. Gráfico de velocidad de propagación en función de la densidad de las muestras E2	136
Figura 8.2.3. Módulo de Young en función de la velocidad de propagación de onda para espesor E1.	137
Figura 8.2.4. Módulo de Young en función de la velocidad de propagación de onda para espesor E2.	137
Figura 8.2.5. Módulo de Young Medido en función de la densidad.	138
Figura 8.2.6. Módulo de Young Caculado en función de la densidad.	139
Figura 8.3.1. Situación del centro de gravedad respecto a la fuerza aplicada en las probetas.	141
Figura 8.3.2. Frecuencia natural de vibración en función de la longitud del voladizo para muestras de espesor E1 en ambas posiciones, 1 y 2.	141
Figura 8.3.3 Frecuencia natural de vibración en función de la longitud del voladizo para muestras de espesor E2 en ambas posiciones, 1 y 2.	142
Figura 8.4.1. Gráfico de rigidez dinámica en función de la densidad los materiales. .	144
Figura 8.4.2. Rigidez dinámica en función del espesor de placas de EVA [34].	145
Figura 8.4.3. Gráfico reducción de sonido según la densidad de los materiales.	146
Figura 8.5.1. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 25 ciclos a 1%/min y 40%/min para muestras de espesor E1.	148

Figura 8.5.2. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 250 ciclos a 40%/min para muestras de espesor E1.	148
Figura 8.5.3. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 25 ciclos a 1%/min y 40%/min para muestras de espesor E2.....	149
Figura 8.5.4. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 250 ciclos a 40%/min para muestras de espesor E2.	149
Figura 8.6.1. Módulo de Young según la frecuencia de excitación del ensayo.....	151
Figura 8.6.2. Representación esquemática del modelo de Kelvin Voigt [98].	154
Figura 12.2.1. Situación del centro de gravedad en la sección de cada muestra.	181

Lista de tablas

Tabla 4.1.1. Comparativa de las propiedades del caucho crudo y del caucho vulcanizado. Datos recopilados de varios estudios [13, 14].	52
Tabla 4.1.2. Comparativa de las propiedades del caucho crudo y del caucho vulcanizado. Datos recopilados de varios estudios [13, 14]. (Continuación)	53
Tabla 4.4.1. Porcentaje de Distribución del Destino de la Facturación por del Sector. Transformador de Caucho y Látex [35].	66
Tabla 6.1.1. Valores de cada parámetro variable en los materiales a ensayar.	90
Tabla 6.1.2. Cantidades en peso de cada material.	91
Tabla 6.1.3. Distintas series de material de caucho reciclado a estudiar.	91
Tabla 7.1.1. Resultados de gravedad específica.	114
Tabla 7.1.2. Resultados de porosidad calculados a partir de la gravedad específica.	115
Tabla 7.2.1 Velocidad de propagación de las ondas P en la capa de superficie y en el relleno.	116
Tabla 7.2.2 Velocidad de propagación de las ondas P en el material compuesto.	117
Tabla 7.2.3. Valores del módulo restringido de la superficie y del relleno	118
Tabla 7.2.4. Valores del módulo restringido del compuesto, el medido y el calculado.	119
Tabla 7.2.5. Valores del módulo de Young de la superficie y del relleno.	120
Tabla 7.2.6. Valores del módulo de Young del compuesto, el medido y el calculado.	121
Tabla 7.3.1. Frecuencia natural de vibración de cada material en posición 1, según la longitud de voladizo.	122
Tabla 7.3.2. Frecuencia natural de vibración de cada material en posición 2, según la longitud de voladizo.	123
Tabla 7.3.3. Amortiguamiento en % de cada material en posición 1 según la longitud de voladizo.	124
Tabla 7.3.4, Amortiguamiento en % de cada material en posición 2 según la longitud de voladizo.	125
Tabla 7.4.1. Valores de rigidez dinámica de todos los materiales.	126
Tabla 7.4.2. Valores de módulo de Young obtenido por la rigidez dinámica.	127

Tabla 7.4.3. Valores de reducción de sonido al impacto calculada por la rigidez dinámica.	128
Tabla 7.5.1. Amortiguamiento materiales de espesor E1 bajo ciclos de 25 y 250 y distintas velocidades de deformación.	129
Tabla 7.5.2. Amortiguamiento materiales de espesor E2 bajo ciclos de 25 y 250 y distintas velocidades de deformación.	130
Tabla 7.6.1. Módulo de Young calculado por flexión de viga en voladizo.....	131
Tabla 8.6.1. Comparativa numérica del módulo de Young en función de la frecuencia de excitación. Ensayo pseudoestático y rigidez dinámica.	151
Tabla 8.6.2. Comparativa numérica del módulo de Young en función de la frecuencia de excitación. Ensayo de viga en voladizo bajo un impacto y ultrasonidos..	153
Tabla 12.1.1. Tiempos de propagación de onda en la superficie, relleno y compuesto.	180
Tabla 12.2.1. Datos necesarios para el cálculo del módulo de Young por flexión de viga en voladizo.	181
Tabla 12.2.2. Datos necesarios para el cálculo del módulo de Young por flexión de viga en voladizo.	182

1 Motivación

El caucho es un material que ofrece múltiples y variadas aplicaciones, desde sellar a amortiguar o transportar pero es especialmente conocido en la fabricación de neumáticos, llantas, calzado y artículos impermeables y aislantes.

Durante los últimos años se han producido desarrollos importantes que han ampliado aún más el campo de aplicación industrial en el sector del caucho debido al gran volumen generado de neumáticos fuera de uso (NFU). Estos neumáticos constituyen un residuo que, si no es gestionado de manera adecuada, da lugar a un problema ambiental y de seguridad muy importante. Es por ello que en octubre de 2001, en España se aprobó el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006, y además, se han constituido dos Sistemas Integrados de Gestión, uno de ellos denominado SIGNUS ECOVALOR, creado legalmente el 19 de mayo de 2005, y el otro, TRATAMIENTO DE NEUMÁTICOS USADOS (TNU) gestionado por ASINME y constituido el 13 de julio de 2006. De este modo es como se gestiona actualmente la recogida de NFU en España con el objeto de asegurar el máximo porcentaje de recuperación.

Los materiales utilizables obtenidos de los residuos de neumáticos se componen de distintos polímeros naturales y sintéticos como son, el Caucho Natural (NR), Estireno Butadieno (SBR), Polibutadieno (BR), Polisoprenos Sintéticos (IR), entre otros, que se usan principalmente como parte de los componentes de las capas asfálticas para la construcción de carreteras o suelos de parques infantiles. Se pueden usar también en alfombras, partes aislantes de los vehículos, en la fabricación de tejados y cubiertas, pasos a nivel, etc. Uno de los usos más actuales es el deportivo. Los residuos reciclados de neumático ya se han utilizado anteriormente para pistas de atletismo u otros campos de juego y carriles de bicicletas. Sin embargo, ahora empiezan a realizarse instalaciones completas de salas de fitness con este tipo de material ya que proporciona mayor aislamiento acústico y al impacto que los materiales convencionales utilizados hasta ahora. Hoy en día ya se han desarrollado proyectos que estudian cómo mejorar cada vez más estos parámetros. Por ejemplo, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, estudiaron las propiedades que podía aportar la adición de diferentes tamaños de partículas de caucho al hormigón [1, 2] así como el Instituto de Acústica del CSIC [3].

Todo suelo técnico para este tipo de instalación deportiva debe de cumplir una serie de características mecánicas, dinámicas y acústicas determinadas que ofrezcan un excelente acondicionamiento de la sala así como, calidad, comodidad y seguridad para los usuarios durante el ejercicio.

El análisis de pavimentos de caucho reciclado proveniente de neumáticos tanto de coche como de camión, se encuentra actualmente en gran desarrollo en España debido al REAL DECRETO 1619/2005, del 30 de diciembre,[4] el cual tiene como objetivo principal prevenir la generación de neumáticos fuera de uso. Además, establece el régimen jurídico de su producción y gestión, fomentando la aplicación de la jerarquía de gestión de residuos. Debido a ello, muchas empresas que trabajan con la fabricación de materiales de caucho, se han puesto en marcha para optimizar sus residuos industriales, así como optimizar la gestión de sus recursos y reducir el impacto ambiental. Una de estas empresas es PEMARSA, S.A., la cual ha proporcionado cada una de las muestras de distinta granulometría, espesor y densidad para poder investigar en la mejor opción para las deseadas salas de *fitness*.

2 Objeto del Proyecto Fin de Máster

El objeto genérico del presente proyecto fin de máster consiste en determinar las propiedades acústicas y dinámicas de pavimentos multicapa de caucho, donde una de las capas está compuesta por caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso. La aplicación de este tipo de pavimento se dirige al sector del *fitness*, por lo tanto, como suelo técnico de un espacio deportivo cerrado, este pavimento debe cumplir una serie de características mecánicas y acústicas que cumplan con la normativa específica vigente del lugar donde se vaya a instalar, el DB - HR CTE (Código Técnico de Edificación) [5] en el caso de instalaciones deportivas de España.

Por consiguiente, los objetivos específicos que sirven de guía para el desarrollo del presente trabajo son los siguientes:

- Conocer cómo influyen parámetros como el espesor, la densidad o la granulometría en el comportamiento dinámico y acústico del material y que por lo tanto, condicionan las características finales del producto. Es decir, ver cuáles son aquellos criterios que más intervienen en el acondicionamiento y aislamiento acústico de las salas de *fitness*.
- Ensayar distintas series del mismo material variando cada vez tan un solo uno de los parámetros de los que se habrán estudiado anteriormente y que afectan a la funcionalidad del producto final.
- Caracterización mecánica, llevando a cabo ensayos de rigidez dinámica, ultrasonidos, flexión en voladizo, impacto sobre viga en voladizo y cargas cíclicas.
- Caracterización acústica mediante ensayos de impacto.

Tras el proceso de caracterización de todos los materiales, se evaluará cuál de todos ellos es el que mejores propiedades ofrece para una instalación deportiva de *fitness*, realizando comparativas con los materiales típicos que se han estado utilizando anteriormente para este uso, como es el EVA, Etilvinilacetato.

En este proyecto se presenta además, un modelo adecuado de evaluación del comportamiento dinámico de los materiales multicapa compuestos de caucho granular.

El presente Proyecto Final de Máster servirá para la obtención del título en "Máster en Ingeniería, Procesado y Caracterización de Materiales" de la Universidad Politécnica de Valencia (Campus de Alcoy), ratificando todos los conocimientos adquiridos y desarrollados durante el ejercicio del mismo, así como futura línea de investigación para estudios de doctorado.

.

3 Plan de estudio

La realización de este proyecto final de máster se enmarca en el contexto de unas prácticas de empresa realizadas en PEMARSA S.A. y una estancia de 8 meses en el departamento de Ingeniería Geológica de la Universidad de Wisconsin, Madison, Estados Unidos.

3.1 Prácticas de empresa

En las siguientes páginas de este proyecto queda incluido el trabajo realizado durante la fase de prácticas de empresa realizadas por Victoria Sanz Buades, alumna de segundo curso del Máster Oficial de Ingeniería Procesado y Caracterización de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Campus de la Universidad Politécnica de Valencia.

Las prácticas se realizaron en PEMARSA,S.A. durante un período de 3 meses (de Octubre a Diciembre de 2014) dedicando una cantidad total de 225 horas. Estas prácticas fueron la primera toma de contacto real con el material que se estudia en esta tesina de máster Además sirvió para conocer de forma más profunda y detallada el proceso de fabricación del caucho.

La dirección de la empresa es la siguiente:

PEMARSA S.A. / PAVIGYM
Partida Canastell I-98, Apdo. 61
03690 Sant Vicent del Raspeig. Alicante
Teléfono: 965 67 50 70
Web: <https://www.pavigym.com>

El trabajo desarrollado durante el período de prácticas fue supervisado por el Director Técnico de PEMARSA, S.A., Antonio Pacetti quien realizó la labor de Tutor de Empresa.

3.1.1 Objetivo de las prácticas

El principal objetivo de estas prácticas fue conocer de primera mano el proceso de fabricación del material objeto de estudio de esta tesina y establecer distintas series del mismo material con variaciones en su composición (densidad y granulometría) y algunos parámetros físicos (espesor) para analizar con posteriormente las propiedades dinámicas y acústicas de cada serie. Además, se llevaron a cabo otro tipo de trabajos que sirvieron para conocer de manera más detallada sobre el caucho. Estos trabajos son los quedan especificados a continuación:

- El control de calidad de la empresa, realizado ensayos mecánicos del producto final así como realizando ensayos mecánicos del producto durante las distintas etapas de su elaboración para verificar el buen procesado: El ensayo realizado a las muestras de caucho sintético aún por vulcanizar fue el ensayo de reometría. En cuanto a los ensayos mecánicos ejecutados sobre muestras una vez vulcanizadas en laboratorio, así como los ensayos realizados al producto final de caucho no reciclado fueron: El ensayo a compresión simple, tracción uniaxial, dureza superficial, contracción por temperatura y degradación.
- Caracterización acústica de dichos prototipos tanto en el laboratorio de la empresa como el laboratorio acústico de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (UPV). Para ello se llevaron a cabo ensayos de transmisión acústica (según la ASTM E2611-09) [6], rigidez dinámica (según la UNE EN 29052-1) [7] y absorción acústica al impacto (ensayo interno de la empresa).

El desarrollo de estas prácticas se realizaron en el departamento de I+D y Producción de la empresa llevando a cabo, tal y como se ha explicado, la investigación de nuevos productos y el control de calidad de los productos que se fabrican actualmente.

3.1.2 Actividad de la empresa

PEMARSA, S.A., es una empresa manufacturera con más 50 años en el mercado que actualmente trabaja diseñando y fabricando suelos técnicos de Etilvinilacetato (EVA) y caucho. Empezó desarrollando suelos de zapatos y ahora destaca por su innovación en suelos a medida para *fitness* y actividades de ejercicio en grupo como spinning o cuerpo/mente tipo yoga o pilates, los cuales combinan con una desarrollada tecnología interactiva con sonido, luces y suelos con sensores. Su marca deportiva es conocida como PAVIGYM y el concepto del programa de entrenamiento deportivo que ofrece se conoce como PRAMA, el cual incluye el entrenamiento personal de entrenadores. Su mercado se expande por más de 40 países, principalmente entre Europa y Estados Unidos.

Aparte del suelo deportivo de *fitness*, ofrece también pavimentos para ganado y suelos de parques infantiles.

Actualmente, ha iniciado su fabricación y lanzamiento al mercado de productos de caucho reciclado. Estos productos constan de dos partes claramente diferenciadas: la capa superficial fabricada con restos de caucho provenientes de la producción de la misma empresa (cumpliendo así con la Directiva 2008/98/CE sobre residuos [8]) y un relleno fabricado con caucho de neumático. El resultado final es un producto bicapa que aporta mejoras mecánicas y acústicas en las instalaciones de *fitness*. Es en el control de calidad e investigación y desarrollo de estos productos donde interviene y forma parte este proyecto final de máster.

3.1.3 Organigrama

PEMARSA, S.A., es una mediana empresa que cuenta con unos 70 trabajadores. Se divide principalmente en 5 departamentos distintos, los cuales quedan claramente identificados en el siguiente esquema de la organización interna de la empresa:

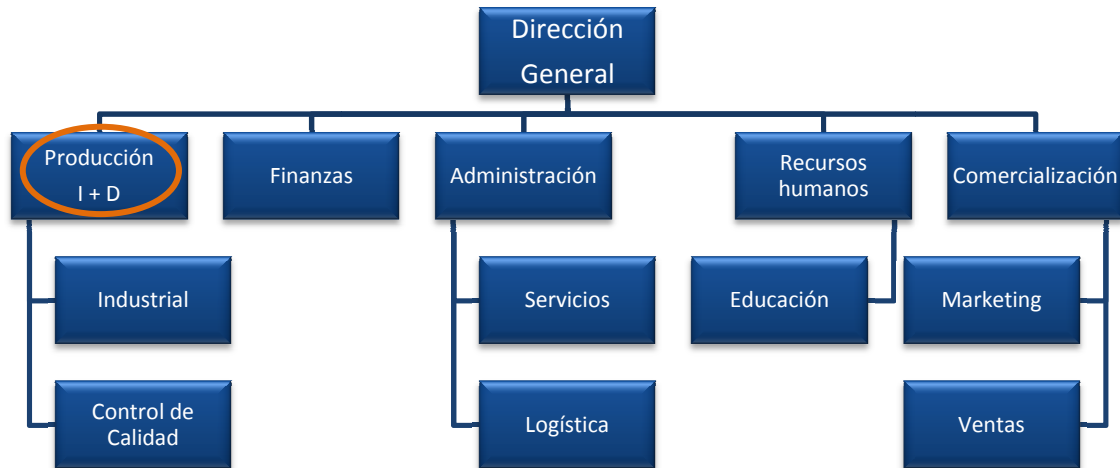


Figura 3.1.1. ¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.

Este organigrama representa la estructura departamental de PEMARSA, S.A., empresa proveedora de los materiales objeto a estudiar en esta tesina. En él, queda destacado el departamento donde se realizan los estudios de Investigación y Desarrollo, exactamente donde se pasaron las prácticas de máster. En este departamento de Producción e I+D (Investigación y Desarrollo), es donde se crean, se desarrollan y se estudian tanto los nuevos productos como los que ya están comercializados con el fin de obtener productos de primera calidad que satisfacen las exigencias del cliente y poder competir en un mercado cada día más cambiante.

El departamento de Producción e I+D, trabajando conjuntamente con el de Finanzas, Administración, Recursos Humanos y Comercialización da lugar a una estructura empresarial afianzada que puede seguir ofreciendo nuevos productos al sector del *fitness*.

3.2 Trabajo en la Universidad de Wisconsin, Madison

La parte de caracterización del material multicapa de caucho reciclado se llevó a término en un período de 8 meses (de Enero de 2014 a Septiembre de 2014).en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Geológica de la Universidad de Wisconsin, Madison, bajo la tutorización del profesor Dante Fratta.

El objetivo de esta estancia fue caracterizar el comportamiento dinámico y acústico de los materiales obteniendo valores de frecuencia natural de vibración. rigidez dinámica, módulo elástico y amortiguamiento por distintos métodos de ensayo. Con la experiencia ganada durante el período de prácticas y los resultados obtenidos de los distintos ensayos dinámicos ejecutados a posteriori en esta universidad, se pudo realizar un modelo de comportamiento de materiales de caucho que están fabricados con varias capas de distintos tipos de caucho, tanto reciclado como nuevo. Este modelo proporciona un conocimiento más focalizado en el desarrollo del mejor pavimento técnico-acústico para instalaciones de *fitness*.

4 Introducción

4.1 Materiales

Esta sección del proyecto explica de forma genérica el origen y las características del caucho.

4.1.1 El caucho natural

El caucho es obtenido naturalmente en forma de emulsión lechosa (látex) del árbol Hevea Braziliensis, originario de la selva tropical del Amazonas [9] o del Castilloa Elástica (hule), originario de México.

Una vez recolectado y tamizado para quitarle las impurezas, el látex recibe un tratamiento con ácido fórmico (CH_2O_2) para que las partículas en suspensión se aglutinen y todo seguido, se coloca en un molde. A continuación se prensa y se deja secar al aire (evaporación) o se seca con humo (ahumado) generalmente en el mismo lugar donde se ha cosechado, con el fin de solidificarlo y obtener así el material que se conoce como caucho crudo.

El caucho es un hidrocarburo, concretamente el cis -1,4- poliisopreno o 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es $(\text{C}_5\text{H}_8)_n$ tal y como se muestra en la Figura 4.1.1.

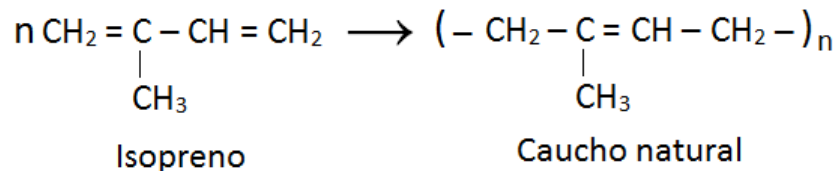


Figura 4.1.1. Fórmulas químicas del monómero y del polímero del caucho natural.

La sucesión de las unidades de isopreno en la cadena es perfectamente regular. La presencia de enlaces dobles es muy importante ya que son éstos los que determinan la reactividad química de la molécula y su habilidad para reaccionar con sulfuros u otros agentes en el proceso de vulcanización, explicado más adelante.

El primer uso conocido del caucho se remonta al 1770 como goma de borrar trazos de lápiz. Fue en el 1834 cuando el químico alemán Friedrich Ludersdorf y el químico estadounidense Nathaniel Hayward descubrieron que si le añadían azufre a la goma

de caucho, reducían y eliminaban la pegajosidad. Más tarde, en 1839, el inventor estadounidense Charles Goodyear, basándose en las averiguaciones de los dos químicos anteriores, descubrió que cociendo caucho con azufre desaparecían por completo las propiedades no deseables del caucho. Llamó este proceso como vulcanización, proceso por el cual se introduce una red de enlaces entrecruzados entre las moléculas poliméricas por medio de la combinación del caucho crudo con azufre y otros compuestos tipo rellenos, reforzantes, aceleradores, pigmentos, ... bajo la acción del calor (se explica de forma más detallada en el siguiente apartado de este proyecto). El resultado del proceso de vulcanización es un material sólido más estable y duro pero sin perder la elasticidad es decir, se convierte en un elastómero. Además, es resistente al ataque químico y presenta una mayor durabilidad [10, 11].

Las aplicaciones del caucho natural son muy numerosas. Sus propiedades únicas hacen que se pueda utilizar tanto en neumáticos como suelas de zapatos, acoplamientos, juntas, revestimientos, adhesivos, etc.,...

4.1.2 El caucho sintético

Actualmente cabe la posibilidad de fabricar el caucho sintéticamente. El caucho sintético es aquel que se obtiene de forma artificial a partir de hidrocarburos insaturados. Los principales cauchos sintéticos son: Polisopreno (IR), Polibutadieno (BR), Caucho de Nitrilo (NBR/HNBR) , Estireno-Butadieno (SBR), Neopreno (CR), Caucho de Butilo (IIR/BIIR/CIIR), Caucho de Etileno-Propileno (EPM/EPDM).

Las ventajas que ofrece un polímero artificial frente a uno natural son básicamente uniformidad, una distribución más homogénea del peso molecular así como menor grado de impurezas (esta es la mayor ventaja del caucho sintético frente al natural ya que las impurezas limitan las propiedades del material). Por esta razón, el caucho sintético ofrece una excelente resistencia química a los ácidos, aceites minerales, gases y otras sustancias, además de ser más estable a temperaturas elevadas que el caucho natural.

A pesar de todas estas diferencias, el comportamiento del caucho sintético se asemeja al del caucho natural, de modo que se puede manejar de la misma manera.

4.1.3 Características generales del caucho

Las moléculas poliméricas que conforman el caucho se encuentran desordenadas y enredadas entre ellas. Cuando se les aplica una fuerza, éstas se alinean en la dirección del estiramiento, pero cuando la fuerza cesa, vuelven a su forma original. Esta es la particularidad de los elastómeros, por la cual, el caucho se considera un elastómero.

Un polímero es clasificado como elastómero si cumple con las siguientes condiciones: Las moléculas deben de ser capaces de rotar libremente en el nexo de unión de cada monómero y la fuerza de atracción entre las cadenas (fuerzas intermoleculares secundarias) debe de ser baja para que deslicen entre ellas como ocurre en los líquidos. Sin embargo, si tan solo ocurriese esto, el material se comportaría como un líquido y no como un sólido. La tercera condición que controla este comportamiento es el hecho de que las moléculas se unen de forma química o por enlaces de tipo mecánico en algunos puntos a lo largo de la longitud de la cadena para formar una red tridimensional (teóricamente dos puntos de unión por cadena) [12].

Los puntos de enlace entre las cadenas se introducen normalmente por el proceso de vulcanización del caucho crudo. En otras palabras, el vulcanizado es el paso de moléculas deslocalizadas a moléculas localizadas de forma homogénea pero al azar, en un medio sólido. El estado sólido que emerge con la vulcanización es un estado sólido amorfo en equilibrio [11]. Por lo tanto, es un proceso que debe de realizarse después de darle la forma deseada al artículo de caucho es decir, cuando aún está en un estado semi-líquido o plástico.

Para poder conocer de manera más concreta las propiedades del caucho, se debe de diferenciar entre el caucho crudo (antes de vulcanizar) y el caucho ya vulcanizado ya que varían significativamente. Se podría considerar la vulcanización como el punto de inflexión entre ambos materiales. La principal diferencia entre uno y otro se encuentra en el número de uniones químicas permanentes que poseen, y por lo tanto el grado de rigidez.

Se sabe que si el caucho crudo se mantiene a temperatura baja (a 0°C o menos) cristaliza gradualmente. Como en otros materiales, la cristalización del caucho va acompañada por un aumento de la densidad y por una liberación de calor latente.

A -195 °C, se comporta como un sólido duro y transparente que en estado de extensión adquiere estructura fibrosa. Pasa a ser quebradizo y opaco entre 0°C y 10°C. Sobre los 20°C se convierte en translúcido y empieza a ser elástico. Por encima de los 50°C llega a ser plástico y pegajoso (la plasticidad es un valor que varía mucho de un árbol a otro). Cuando se calienta y alcanza los 200°C se ablanda y baja la viscosidad, y por último cuando la temperatura se eleva hasta 250 °C, empieza a descomponerse. Debido a los cristales formados, el caucho cristalino es menos extensible que el amorfo, aunque mantiene cierta fase amorfa. Las mismas características generales del proceso de cristalización que se encuentran en el caucho crudo, se encuentran también en el caucho vulcanizado, pero éste último presenta generalmente una mayor resistencia a los cambios de temperatura.

Si se comparan las propiedades físicas y mecánicas de ambos cauchos, se obtienen los datos de balance detallados en la Tabla 4.1.1 :

Tabla 4.1.1. Comparativa de las propiedades del caucho crudo y del caucho vulcanizado. Datos recopilados de varios estudios [13, 14].

PROPIEDADES	CAUCHO CRUDO	CAUCHO VULCANIZADO
Comportamiento	Termoplástico	Termoestable *
Apariencia superficial	Pegajoso	No pegajoso
Resistencia a la tracción (Kg/cm2)	Baja	Alta (≈200)
Elasticidad	Baja	Alta
Deformación permanente	Alta	Casi nula
Alargamiento(%)	1200	≈700-800
Resistencia al desgarró	Baja	Alta
Resistencia abrasión y desgarró	Buena	Excelente

(Continuación)

Tabla 4.1.2. Comparativa de las propiedades del caucho crudo y del caucho vulcanizado. Datos recopilados de varios estudios [13, 14]. (Continuación)

Dureza Shore A	20-90	60-90
Rango de temperatura donde no pierde propiedades (°C)	10 a 60	- 40 a 100
Solubilidad en disolventes comunes (carbono, gasolina, tetra cloruro, etc.)	Soluble	Insoluble
Permeabilidad a gases	Regular	Baja
Absorción de líquidos (hinchamiento)	Alta	Baja

* *Comportamiento generalmente termoestable pero estudios actuales han demostrado que puede convertirse en un proceso reversible [15, 16].*

Tal y como se puede comprobar en el siguiente gráfico de tensión-deformación (Figura 4.1.2), donde se representa el primer ciclo de carga y descarga de un ensayo dinámico, el caucho vulcanizado necesita mayores cargas para ser deformado y cuando los esfuerzos desaparecen, recupera prácticamente al 100% su forma original. Sin embargo, el caucho sin vulcanizar pierde alrededor de un tercio de su longitud inicial, recuperando aproximadamente un 66% de su deformación. Los ensayos cíclicos son esenciales a la hora de analizar elastómeros dadas las condiciones de servicio a las que la mayoría de los artículos fabricados son expuestos (mayormente neumáticos de automóviles o suelas de zapatos).

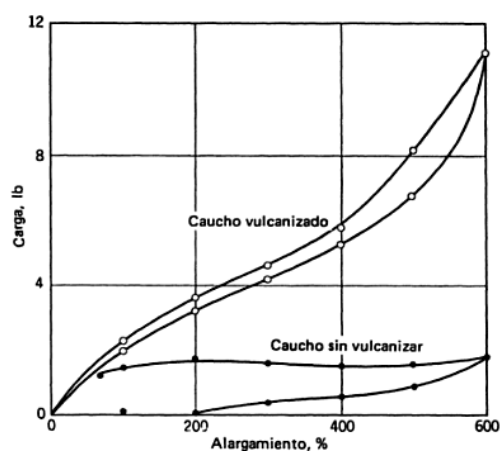


Figura 4.1.2. Curva tensión-deformación de un alargamiento máximo del 600% y retorno del caucho crudo y del vulcanizado [13].

Muchas aplicaciones del caucho demandan una resistencia a la tracción, desgarró, rigidez, etc., muy elevada que ni siquiera los vulcanizados ofrecen, y por lo tanto es necesario añadir rellenos al caucho crudo para mejorar estas propiedades. Pueden ser rellenos inertes o reforzantes dependiendo de su naturaleza, los cuales se detallan en el siguiente capítulo.

4.1.4 Comportamiento elástico del caucho

El comportamiento elástico del caucho ha sido estudiado desde el momento en que se descubrió este material debido a la complejidad que presenta, ya que no cumple con la teoría clásica de sólidos elásticos. Pero, no fue hasta el 1932 cuando Meyer descubrió los requisitos moleculares que explican el comportamiento único del caucho. Él fue el primero en considerar que las cadenas poliméricas eran flexibles y podían articular libremente entre ellas. Por lo tanto la elasticidad de los elastómeros se podía definir con teorías cinéticas en lugar de teorías estáticas.

Para entender la teoría de la elasticidad del caucho, la cual está directamente relacionada con la estructura molecular, es necesario estudiar las propiedades estáticas de la red que forman las cadenas. Como ya se ha dicho anteriormente, el caucho está formado por moléculas largas enredadas capaces de estirarse o comprimirse al aplicar una fuerza externa y capaces de volver a su estado original tras la eliminación de dicha fuerza. Cuando las cadenas se estiran disminuye su entropía, por lo que al cesar la fuerza de estiramiento las cadenas vuelven al estado inicial aumentando la entropía. Las leyes de la termodinámica confirman este comportamiento. El estado ordenado de las moléculas es menos probable que ocurra que el orden al azar. Es decir, el caucho tiene entropía máxima (grado de desorden molecular máximo) en el estado no deformado y por lo tanto siempre tenderá a volver al estado de ausencia de limitaciones externas. En esto se basa la teoría de elasticidad de los cauchos [17].

La primera teoría de elasticidad estática del caucho fue dada por Kuhn y Treolar [12]. Más adelante James y Guth [18] estudiaron este material considerándolo un elastómero ideal y analizaron así el comportamiento de las cadenas de forma individual e aislada, siendo éstas de igual longitud y con igual número de enlaces. Esta propuesta idealizada cuenta la energía libre total como la suma de la energía libre de

cada una de las cadenas. En este caso, restringiendo el estiramiento en una dirección, el trabajo elástico es entonces igual a la fuerza de retracción y al cambio de longitud. De este modo, la fuerza reactiva se debe a la disminución de entropía en extensión. Se puede decir que un caucho se deforma cuando cambia la configuración de las moléculas, no cuando cambia la distancia entre ellas como ocurre con los metales por ejemplo. Además, Lord Kelvin probó que la fuerza retráctil del caucho aumenta al aumentar la temperatura. Se conoce que las moléculas se mueven cada vez más enérgicamente con el calor y la molécula se hace más corta.

Por otro lado, la experimentación demuestra que las cadenas no se mueven independientemente sino que existen interacciones moleculares entre ellas que afectan al comportamiento general del caucho. Esta es la razón por la que aparecieron las teorías de unión restringida y deslizamiento de enlaces, las cuales van más allá de la escala de cadenas moleculares. Además, las teorías moleculares más modernas hablan de la dependencia del módulo elástico sobre la deformación [13, 19].

La cantidad de energía que el caucho es capaz de almacenar y utilizar para regresar a su forma original es 150 veces mayor que la del acero. Pero a medida que pasa el tiempo, se va perdiendo esa energía almacenada en forma de calor. Por eso, el gráfico de tensión-deformación típico de un elastómero puro siempre presenta la forma de histéresis (Figura 4.1.2). La parte en que el caucho se está deformando y no recuperando, muestra una forma en S. Durante la extensión, el módulo elástico decrece gradualmente hasta que alcanza un punto donde la deformación empieza a disminuir con la extensión. Con aditivos, el gráfico varía pero el punto de inflexión sigue apareciendo ya que este se debe al comportamiento en conjunto de la red tridimensional y sus limitaciones [20].

Tal y como queda demostrado, la elasticidad del caucho es un tema muy amplio que se ha estudiado durante muchos años y aún sigue en desarrollo dado que cada vez se obtienen cauchos con distintas propiedades y distintos comportamientos. En este apartado del proyecto tan solo se ha querido dar una visión general de ello.

4.2 Componentes y métodos de fabricación del caucho

El proceso de fabricación y los componentes que comúnmente se añaden al caucho natural o sintético para la obtención de mejores propiedades finales en los artículos de caucho son los que se mencionan a continuación.

4.2.1 Tipos de aditivos

A lo largo del tiempo y tras muchos estudios, se ha comprobado que utilizando tan solo azufre el grado de entrecruzamiento obtenido es insuficiente. Por cada enlace con el caucho, de 40 a 55 átomos de azufre son necesarios. La estructura resultante contiene polisulfuros, grupos de sulfuros colgantes y sulfuros cíclicos. De modo que la mayoría del azufre no queda unido entre las cadenas, dando como resultado una estructura inestable y con poca resistencia al envejecimiento [21]. De modo que para alcanzar la calidad deseada se deben de añadir otro tipo de componentes antes del vulcanizado. No existe ninguno que ofrezca todas las mejoras que se necesita, por lo tanto es necesario mezclar varios tipos de compuestos tales como acelerantes, activadores, inhibidores, antidegradantes,... entre otros [22]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un aditivo como un reforzante puede aumentar una propiedad mecánica y al mismo tiempo disminuir otra. La cantidad de relleno también es un parámetro que afecta de manera significativa. Existe un valor máximo óptimo que si se sobrepasa, el reforzante actúa de diluyente afectando negativamente al vulcanizado [13].

4.2.1.1 Agentes de vulcanización

Como ya se ha visto el azufre es el agente de vulcanización por excelencia, sin embargo el selenio, telurio y el mono cloruro de azufre u otros compuestos que liberan este elemento en las condiciones en que se realiza la operación también se utilizan. Su principal objetivo es efectuar la vulcanización después de que sea expuesto a la temperatura conveniente [23]. La cantidad puede variar entre 0,5 y 4 % del peso total.

4.2.1.2 Acelerantes

Los acelerantes tal y como su nombre indica, aumentan la rapidez de vulcanización. En ocasiones aumentan también las propiedades físicas. El primero en utilizarse fue la anilina pero debido a su toxicidad se substituyó por los óxidos de metales, aldehídoaminas y las guanidinas.

Hay una gran variedad de acelerantes que se pueden añadir al caucho tanto en las etapas iniciales de la vulcanización como en las terminales de la misma, incluyendo mezclas de ellos. Este gran abanico de combinaciones posibles ha permitido que la vulcanización pueda realizarse eficientemente en unos segundos a 200°C o pocas horas a temperatura ambiente [24].

Los acelerantes se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Tipo aditivo para mejorar la calidad de las mezclas asfálticas que se usan en la construcción
- Orgánicos o inorgánicos
- Ácidos o básicos
- Naturaleza química
- Velocidad de curado

De todos ellos, los acelerantes que más aumentan la velocidad de vulcanización son los tipo xanthate, pero los que más se utilizan son los tiazoles [21]. El porcentaje en peso más común va entre 0,5 y 2 %.

4.2.1.3 Activadores

Reaccionan con los acelerantes y ayudan a obtener el máximo beneficio de éstos consiguiendo una rápida vulcanización más económicamente que si se usa mayor concentración de acelerador sin el activador. Pueden ser óxidos metálicos (tipo óxido de zinc o magnesio).

4.2.1.4 Plastificantes

Son sustancias que reducen la viscosidad del caucho durante el mezclado y la masticación. Lo son los mercaptanes o compuestos de azufre.

4.2.1.5 Anti-degradantes

Se trata de antioxidantes, antiozonantes y otro tipo de materiales que actúan retrasando el deterioro del caucho ya que la insaturación de las cadenas de hidrocarburo del caucho hace que éste sea susceptible al calor, la luz, el oxígeno, el ozono, ...

Los anti-degradantes hacen su función tanto durante como después del vulcanizado. El principal anti-degradante usado es la parafina que sólo actúa cuando una parte de ella contenida en el material aparece en la superficie creando una capa continua.

4.2.1.6 Anti-reversión

En la vulcanización con azufre existe un momento óptimo para las propiedades físicas del caucho. Sobrepasar este punto se significa la pérdida de enlaces químicos y una reducción de las propiedades físicas. A este fenómeno se le conoce como reversión. Los agentes anti-reversión se encargan de evitar que la reversión tenga lugar.

4.2.1.7 Retardadores

Es una sustancia que retrasa el comienzo de la vulcanización pero no afecta el subsiguiente curso de la vulcanización. Los retardadores comerciales más aceptados para las vulcanizaciones con azufre son el ácido salicílico, ácido benzoico, anhídrido ftálico, y la tricloromelamina.

4.2.1.8 Refuerzos

Los refuerzos influyen de forma directa en las propiedades físico-mecánicas del producto final. Se añaden para mejorar propiedades específicas. Hay que tener en cuenta que dependiendo del tipo de refuerzo, otras características pueden verse afectadas, como la viscosidad o la velocidad de reacción. El componente de refuerzo más común es el negro de carbón que aumenta la resistencia a la tensión y al desgaste.

4.2.2 Mezclado

El primer paso del proceso de fabricación del caucho es el mezclado. Un buen mezclado proporcionará el éxito de una buena manufactura.

El tipo de sistema utilizado para mezclar caucho depende de la materia prima y de la escala de la operación. Para cantidades de mediana y gran escala se utilizan mezcladores internos (industrialmente conocidos como Banbury), mientras que para cantidades pequeñas se utilizan molinos de dos rodillos, pero en ocasiones pueden combinarse ambos procesos.

En el mezclador interno todos los ingredientes de la pesada del caucho se mezclan a la vez en una cámara donde hay dos rodillos en forma de espiral que giran en sentido inverso y a continuación, la mezcla se extrae de forma continua y homogénea por un laminador automático (Figura 4.2.1). Por el contrario, un mezclador de cilindros es un proceso que se considera manual y que consiste en dos cilindros metálicos dispuestos paralelamente en un mismo plano pero que giran en sentidos opuestos y convergentes hacia el espacio entre ambos (Figura 4.2.2). El cilindro posterior tiene una posición fija mientras que el anterior puede moverse en la dirección de los ejes y por lo tanto es el responsable de la separación entre los cilindros y del espesor de la mezcla. La combinación de ambos procesos se realiza dejando pasar la mezcla proveniente del mezclador interno por dos cilindros [25, 26].

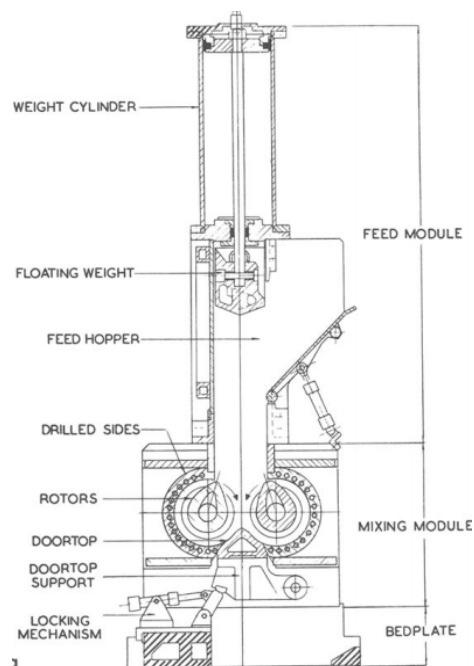


Figura 4.2.1. Sección transversal de un mezclador común tipo Banbury [25].

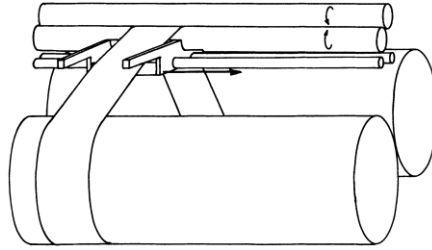


Figura 4.2.2. Esquema de un mezclador de cilindros con dos cilindros adicionales de menor tamaño [25].

El mezclado se puede dividir en cinco pasos:

- Reducción de la viscosidad
- Incorporación
- Mezclado de distribución y dispersión
- Homogeneidad

El primero de ellos, "reducción de la viscosidad" tiene lugar cuando debido a las fuerzas a las que se ve sometido el caucho una vez es introducido en el mezclador, (tipo Banbury o cilindros) experimenta una extensión de las cadenas poliméricas y consecuentemente un aumento de la temperatura, una reducción de la viscosidad y una pérdida de elasticidad. En este estado de fluidez del caucho es cuando se incorporan los aditivos correspondientes de manera que quedan embebidos en una matriz de caucho. La incorporación y distribución se suelen dar simultáneamente. Con la incorporación del aditivo, el caucho fluye entre las nuevas partículas y por lo tanto se dificulta la maleabilidad, aumentando también la densidad de la mezcla. Como consecuencia, aumenta de nuevo la viscosidad y esto conlleva la aplicación de mayores fuerzas de mezclado, lo cual se define como "mezclado de dispersión".

El tamaño de las partículas de aditivo se va reduciendo con el mezclado y poco a poco la fuerza aplicada va siendo cada vez menor. El objetivo de esta etapa es aumentar al máximo la superficie de contacto de la partícula de aditivo con el caucho.

El tiempo y la velocidad de mezclado depende del tipo de componentes utilizados y de la naturaleza del caucho. Un aumento de la velocidad no significa una mayor distribución y dispersión de la mezcla.

Para finalizar el mezclado, una mezcla se puede considerar satisfactoriamente homogénea cuando al ser analizada por métodos visuales o químicos, según la escala considerada, no existen diferencias entre una zona inspeccionada y otra [25].

4.2.2.1 Vulcanización

La vulcanización del caucho es el proceso químico responsable de la formación de la red tridimensional de enlaces entre las moléculas que forman el caucho crudo. Antes de la vulcanización, las cadenas moleculares del caucho no están unidas entre sí y por lo tanto el movimiento entre ellas es posible. Desde la macroscópica esto se puede observar como un comportamiento inelástico (plástico) del material.

Dicho de otra manera, la vulcanización es el proceso donde se introducen enlaces químicos entre las cadenas que limitan el movimiento independiente entre ellas y consecuentemente, la deformación plástica desaparece. Un material totalmente vulcanizado (curado) muestra un comportamiento claramente elástico que se puede explicar con modelos de red molecular [12].

La vulcanización se puede caracterizar fácilmente midiendo la evolución de los enlaces formados en función del tiempo, en una curva conocida como la curva de curado. La medición se realiza mediante un reómetro de motor oscilante (ODR), reómetro Moving-Die (MDR) o un analizador de la procesabilidad del caucho (RPA) [27].

4.2.2.2 Tipos de vulcanización

Hoy en día hay muchas maneras de llevar a cabo el proceso de vulcanización. Los métodos más comunes son el uso de azufre y el uso de peróxidos (éste último es más novedoso) además de otros compuestos que aportan características adicionales al caucho final y aumentan la eficacia del proceso. El primero de ellos fue descubierto por Charles Goodyear en 1839 cuando volcó un recipiente de azufre y caucho sobre una estufa. Entonces observó que el caucho adquiría un nuevo aspecto y mejores propiedades con la presencia de azufre (S) y calor. El proceso interno químico que da lugar a este fenómeno ocurre de la siguiente manera: A lo largo de la molécula de caucho hay sitios conocidos como "sitios de cura" donde el azufre tiende a unirse y a formar una cadena que une con otro "sitio de cura" de otra molécula, creando así la red reticular de las moléculas. Estos puntos de cura o reacción están formados por átomos de hidrógenos alílicos, es decir, por un átomo de hidrógeno (H) unido a un átomo de carbono (C) que es adyacente a un enlace doble. En el caso del polisopreno o metilbutadieno, el átomo de azufre se une a un grupo metileno (CH_2) cercano al enlace doble donde el enlace es más débil, dando lugar a un tior o mercaptano. A continuación, este nuevo compuesto se une al enlace doble de otra molécula

obteniendo así la reticulación. En la Figura 4.2.3, se puede ver el esquema de la reacción química.

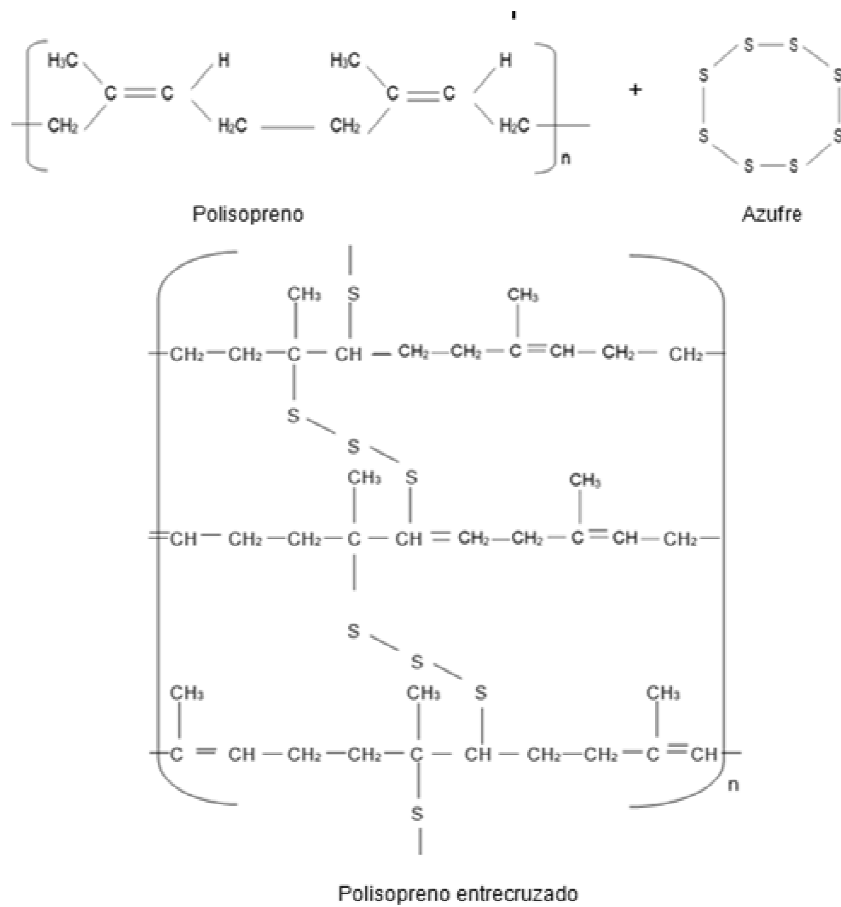


Figura 4.2.3. Reacción química del polisopreno con el azufre durante la vulcanización.

La estructura molecular más común del azufre en la naturaleza es el S8 o ciclooctazufre, el cual representa una forma de anillo con 8 átomos de azufre. Ésta es una estructura muy estable, de modo que para que reaccione con el caucho es necesario aplicar calor, alcanzando los 119°C del punto de fusión del azufre.

El tamaño de los puentes de unión creados por los átomos de azufre tienen entre 2 y 10 átomos de largo. Puentes cortos dan mejor resistencia al calor y puentes largos dan mejores propiedades dinámicas de tipo flexión, pero menos resistencia al calor (ya que el movimiento que sufren los átomos con el aumento de la temperatura es más grande).

El azufre es un agente vulcanizador lento. Inicialmente la vulcanización se realizaba con una concentración de azufre del 8% a 140°C y duraba aproximadamente 5 horas. Actualmente con el aporte de otros elementos el proceso se ha reducido generalmente a unos minutos (alrededor de 20 min) con tan solo 125°C de temperatura. Generalmente el rango de temperatura en el que tiene lugar la vulcanización va desde 150°C a 200°C sin ningún otro elemento.

La vulcanización con azufre puede tan solo ser aplicada a cauchos con cadenas moleculares insaturadas (como el natural) o en cauchos con grupos químicos insaturados ya que la presencia de enlaces dobles reactivos es mayor [27] En el caucho natural la vulcanización con azufre requiere de mayores cantidades de azufre y menor cantidad de acelerador que en el caucho sintético.

En cuanto a la vulcanización con peróxidos, la primera vez que se llevó a cabo fue en 1915 por I.I. Ostrosmislenskii. usando peróxido de benzoilo. Los enlaces carbono-carbono que se forman son térmicamente más estables que los entrecruzamientos que contienen átomos de azufre, generados por vulcanización convencional basados en azufre [28].

A diferencia de la vulcanización con azufre, los enlaces dobles de carbono no se requieren para poder vulcanizar con peróxidos, de modo que se pueden utilizar también en elastómeros saturados tipo copolímeros etileno-polipropileno (EPM) o siliconas. Sin embargo, los enlaces químicos mediante peróxidos son más eficientes con polímeros altamente insaturados debido a la alta concentración de hidrógenos alílicos.

Algunos polímeros se pueden fácilmente vulcanizar con peróxidos mientras que otros sufren degradación. Algunos que sí se pueden vulcanizar son el caucho natural, el caucho estireno-butadieno, el polisopreno, polibutadieno, nitrilo, EPDM, entre otros [24]. Y entre los peróxidos más utilizados se encuentran el peróxido di(2,4-diclorobenzoilo), peróxido de benzoilo, t-butil perbenzoato, peróxido de dicumilo,...

Además de estos dos tipos de vulcanización existen otros para algunos elastómeros en particular. Por ejemplo, los óxidos metálicos se usan para la vulcanización del neopreno y las resinas fenólicas con cloruros metálicos para la vulcanización del caucho de butilo.

Tal y como se puede comprobar con los diferentes tipos de vulcanizado, independientemente de los componentes de cada mezcla, la cinética de reacción, el efecto de la temperatura, la presión y el tiempo son los parámetros que principalmente definen las propiedades del caucho vulcanizado y por lo tanto las aplicaciones adecuadas (mayormente en el sector del automóvil) [29]. Por ejemplo, hay estudios que demuestran que en la vulcanización del caucho natural elevadas temperaturas de curado producen una red con menor densidad de enlaces [30]. Algunas simulaciones y modelos validados por la propia experimentación, como el modelo de M. Andre, y P. Wriggers pueden predecir cuál será la respuesta mecánica del caucho según la variación de los parámetros mencionados [31]. Además, algunos de ellos pueden incluso medir cuál es la variación de la temperatura dentro del molde de vulcanización de una pieza.

Las empresas que trabajan con el curado del caucho intentan controlar al máximo los valores físicos y mecánicos que intervienen y modifican el proceso de vulcanizado para optimizar, reducir los costes y aumentar la productividad [32].

4.3 Etilvinilacetato (EVA)

El Etilvinilacetato (también conocido como EVA) es un copolímero de etileno y acetato de vinilo. Sus propiedades dependen del nivel de acetato de vinilo, la cristalinidad, el nivel de ramificación, el peso molecular y la polaridad. Se trata de un polímero que se asemeja a los elastómeros en cuanto a su flexibilidad pero que puede procesarse como los termoplásticos. Por ello, queda clasificado dentro del grupo de los elastómeros termoplásticos. El entrecruzamiento de las cadenas poliméricas en este tipo de polímeros está formado por dipolos débiles o enlaces por puente de hidrógeno. Debido a su estructura poseen la capacidad de ser estirados, alargarse de forma moderada y recuperar su forma inicial; así como, la deformación permanente es muy baja y pueden procesarse en forma de colada a altas temperaturas por lo que se pueden reutilizar tras pasarlos por procesos de extrusión o moldeado [33].

Las desventajas de los elastómeros termoplásticos con respecto al caucho convencional o a los termoestables son el alto coste de las materias primas, la pobre resistencia química y térmica y la baja estabilidad térmica. A pesar de estas características el EVA es clásicamente utilizado en el sector de pavimentos por su absorción al impacto, ligereza, textura y capacidad de ser adquirir cualquier forma. Por ello, se puede utilizar como material referente para comparar ciertas propiedades de los materiales multicapa de caucho reciclado analizadas a lo largo de este proyecto. En el apartado de "Discusión" de este proyecto se realiza una pequeña comparativa entre las características dinámicas a impacto de este material y las que ofrecen los multicapa reciclados de caucho.

Las características de un EVA común para pavimentos técnicos son las siguientes [34]:

- Elevada cantidad de vinilo en su composición (%): 60-90
- Espesor (m) : 0,1 - 0,029
- Densidad (g/cm^3) = 0,13 - 0,36

4.4 Análisis del mercado

El sector del caucho en España se divide en tres subgrupos dentro de la Nomenclatura de Actividades Económicas, la clasificación de las actividades económicas usada en la Unión Europea: La fabricación de neumáticos (CNAE 25.11), la fabricación de recauchutados (CNAE 25.12) y la fabricación de otros productos de caucho (CNAE 25.13) comúnmente denominados como “no neumáticos”.

La estructura empresarial del sector del Caucho se compone de dos partes claramente diferenciadas: La fabricación de neumáticos y cámaras para todo tipo de vehículos, y una parte que comprende productos de variada naturaleza (caucho moldeado, extruido,...) cuyo destino abarca el sector de la automoción, calzado, construcción y la industria en general. La fabricación de productos de caucho destinada al sector de la automoción es alrededor del 85% de la facturación total nacional, según el Consorcio Nacional de Industriales del Caucho (la Organización empresarial española del Sector del Caucho que trabaja como interlocutor sectorial con las Administraciones y Organismos Públicos y Privados, tanto nacionales como internacionales). El 15% restante está compuesto por el sector del calzado, industria, construcción, electrodomésticos, y otros productos. Los porcentajes de distribución de la facturación en los países prioritarios de la Unión Europea entre el año 2000 y el año 2004 quedan detallados en la siguiente Tabla 4.4.1.

Tabla 4.4.1. Porcentaje de Distribución del Destino de la Facturación por del Sector. Transformador de Caucho y Látex [35].

% Distribución de la Facturación	% 2.000 Fact.	% 2.001 Fact	% 2.002 Fact	% 2.003 Fact	% 2.004 Fact
- Automoción (Neumáticos)	61,2%	62,4%	61,2%	63,6%	62,9%
- Automoción (Recauchutado)	2,2%	1,2%	1,2%	1,4%	1,7%
- Automoción (C. Industrial)	19,8%	19,1%	17,7%	17,1%	20,1%
TOTAL AUTOMOCION	83,2%	82,7%	80,0%	82,1%	84,7%
- Calzado	3,6%	3,0%	3,4%	2,9%	2,3%
- Industria	4,9%	5,6%	6,4%	5,5%	4,9%
- Construcción	2,9%	2,4%	3,1%	2,8%	2,5%
- Electrodomésticos	2,3%	3,6%	4,0%	3,6%	2,7%
- Consumo	1,5%	1,3%	1,6%	1,3%	1,2%
- Otros	1,6%	1,4%	1,6%	1,8%	1,7%
TOTAL NO AUTOMOCION	16,8%	17,3%	20,0%	17,9%	15,3%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

Según las estadísticas e informes realizados por la Subdirección General de Estudios, Análisis y Planes de Actuación del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España (MINETUR) en abril del 2015; muestran que en el año 2013, un 2,28% del total de la industria española eran empresas que se dedicaban al sector del caucho y materias plásticas. El número de PYMEs (Pequeñas y Medianas Empresas) alcanzaba los 4.323 y tan solo 35 eran no PYMEs tal y como queda especificado en las Presentaciones Sectoriales de Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España.

Del total de empresas del sector, el 70,4% eran exportadoras según SG Estudios, Análisis y Planes de Actuación, a partir de datos de la Escuela Industrial de Empresas (2013). Además, observando el IPI (Índice de Producción Industrial) del sector de caucho y plásticos en España (Figura 4.4.1), se puede ver como en el 2013 hay una pequeña recuperación de sector, más grande que la que se observa en el conjunto del IPI de la industria española. Esto significa que se trata de un sector que como todos los demás, se vio afectado durante los 3 años anteriores, pero que a partir del 2013 empezó a recuperarse y desarrollarse, hecho que coincide con las buenas cifras registradas por TNU (Tratamiento de Neumáticos Usados) en cuanto a la gestión de neumáticos fuera de uso durante esos años [36].



Figura 4.4.1. Comparativa entre el IPI del sector del caucho y plásticos, y el IPI total español entre el 2009 y el 2014 [36].

Tanto en España como en el resto del mundo, el sector del caucho reciclado se está desarrollando cada vez más debido a la enorme cantidad de neumáticos que se usan y que quedan amontonados en vertederos creando así uno de los mayores problemas medioambientales, ya que el caucho entra en proceso de descomposición después de 100 años de ser desechado y tarda 10 siglos en degradarse naturalmente.

El caucho una vez ha sido vulcanizado es un material que debido a su estructura interna presenta dificultades a la hora de manejarlo y reciclarlo. Se trata de un polímero reticulado que es difícil de fundir y de procesar. Por ello, se necesita aplicar tratamientos especiales con el objetivo de alcanzar un procesamiento fácil a la hora de su reciclaje y evitar el gran inconveniente ambiental que provoca su stock en los vertederos. El primer paso del proceso de reciclado es la trituración. A continuación se extrae total o parcialmente el acero y las fibras de refuerzo que contiene y se aplica una segunda molienda. El material resultante está entonces listo para usarlo como relleno de otros materiales o para desvulcanizarlo. La desvulcanización es el proceso por el cual se obtiene caucho no reticulado a partir de uno reticulado, rompiendo los puentes que unen las macromoléculas entre sí. Existen varias formas de desvulcanizar como se explican se en artículo de B. Adhikari o M. Myre [37, 38].

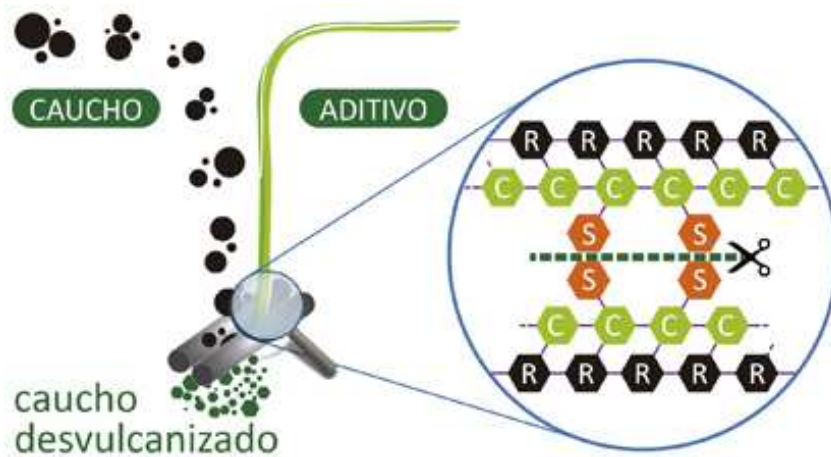


Figura 4.4.2. Proceso de desvulcanización mediante la adición de un agente químico [39].

Respecto a Europa, con el objeto de poder luchar contra el problema medioambiental, la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, es la que constituye el marco normativo vigente para la producción y gestión de residuos en la Unión Europea [8]. En cuanto a España, el "REAL DECRETO

1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso" [4] ha hecho que las empresas que trabajan con este material, pongan en marcha un plan de gestión de sus residuos. SIGNUS (Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados) [40] y TNU (Tratamiento de Neumáticos Usados) [41] son dos sistemas de Gestión Integrados constituidos como sociedades sin ánimo de lucro que sirven de plataforma de recogida y distribución de neumáticos a los distintos recicladores o valorizadores. Estos sistemas repercuten al cliente final con una tarifa establecida por ley en cada neumático vendido y en concepto de reciclaje.

Por todas estas razones, actualmente existen unas 1.500 empresas en el territorio español que trabajan con el caucho y aproximadamente una tercera parte de ellas, incluidos talleres que trabajan con neumáticos, ya están adheridos a estos sistemas SIGMUS y/o TNU de gestión, los cuales recogen y gestionan el neumático utilizado. Además, algunas de ellos, como es el caso de PEMARSA, S.A., apuestan también por la reutilización interna de sus propios residuos. Ya es común ver empresas que utilizan los restos de la fabricación de sus propios productos junto con caucho proveniente de NFU para fabricar y sacar al mercado otros productos con otras propiedades. Por ello, es importante diferenciar dos tipos distintos de caucho reciclado: El que proviene de los neumáticos y el que proviene de los restos de la fabricación de otros productos de caucho. El primero de ellos requiere mayor atención dado el gran volumen de material que se genera cada día, sin olvidar los restos de diferentes tipos de caucho producidos por cada una de las empresas que trabajan en el sector.

En el proceso productivo del caucho los costes energéticos son muy elevados. Las empresas del caucho conocen que la mejora de su gestión energética afecta de forma directa a su competitividad y por lo tanto, deben aprender a controlar sus costes energéticos en función de su demanda de producción y desarrollar una política energética [42, 43].

PEMARSA S.A., inició la reutilización de los retales de las planchas de caucho hace unos años. Para ello, fue necesario la creación de un nuevo plan y un nuevo sistema de control que respetara las leyes ambientales nacionales. De este modo, además de reducir el impacto en el medio ambiente, se crearon beneficios internos al mejorar el uso de los recursos (reduciendo el uso de materia prima y energía y principalmente, mejorando el manejo de los desechos). De esta manera se obtuvo la certificación internacional ISO 14001 : DIRECCIÓN MEDIOAMBIENTAL por AENOR, líder

indiscutible en certificación ambiental en España, tercer país del mundo en certificaciones ISO 14001 [44].

En el 2013 se contabilizaban 301.647 certificados emitidos de empresas que cumplían con la ISO 14001 en 171 países distintos, según el informe anual de la Organización Internacional de Normalización (ISO). España ocupaba el tercer puesto en Europa y el quinto puesto en el mundo por número de certificados ISO 14001, con más de 16.000 certificaciones. Tal y como se puede ver, existe un gran número de empresas españolas que ya han implementado un sistema de control medioambiental.

4.5 Aplicaciones del caucho reciclado

Por lo que respecta a las posibles aplicaciones del granulado de caucho obtenido por trituración de los neumáticos, los principales productos de caucho reciclado que ya existen en el mercado se usan de la siguiente manera:

- Tipo combustible alternativo con fines energéticos (la obtención de gas y energía eléctrica).
- Tipo aditivo para mejorar la calidad de las mezclas asfálticas que se usan en la construcción de las carreteras así como aditivo en las mezclas de cemento de elementos no estructurales. Se puede utilizar siendo disuelto con el betón o como relleno substituyendo parte de la grava. De ese modo, se reduce la cantidad de materia prima utilizada y se le da un uso a los desechos de neumático. Las propiedades mecánicas, acústicas y la durabilidad se ven beneficiadas con el aporte del caucho y el coste total de la obra disminuye. Las principales características que hacen que el caucho sea un buen agregado en pavimentos son la ligereza, la baja conductividad térmica, la alta conductividad hidráulica y la gran resistencia a grandes deformaciones [45, 46]. Existen muchos estudios sobre cementos y hormigones con este tipo de aditivo [47-49].
- Relleno de campos de césped artificial, aplicación que consume en España cerca del 59% del NFU [50, 51].
- Alfombras y felpudos u otros productos moldeados de bajas especificaciones técnicas.
- Suelos elásticos prefabricados en forma de baldosas, planchas o rollos, para pavimentos deportivos o parques infantiles (siendo éste último el artículo más conocido) debido a la buena resistencia a cambios climáticos, el bajo coste de mantenimiento y principalmente por la capacidad de absorción al impacto, evitando así lesiones por caídas de los niños [52, 53]. Existen distintos tipos y diseños de suelos, tipo continuo, de grano suelto o tipo loseta. Dependiendo del diseño, tamaño de grano, forma de grano, matriz ligante en su caso, acabado superficial, entre otras variables, los suelos ofrecerán mayor o menor amortiguamiento. Las empresas buscan la mejor combinación de todas estas variables con el objetivo de conseguir sacar al mercado el mejor producto.

El sector de fabricación de pavimentos hechos de reciclado de caucho en España, va en aumento. Mayormente se trata de un sector de pequeñas y medianas empresas que ya trabajan con el caucho y que apuestan por reutilizar sus propios desechos como materia prima para sacar nuevos productos al mercado. Cada día la competitividad es mayor y los productos ofrecidos por estas empresas son de mayor calidad. Actualmente la mayoría de estas empresas están centrando su atención en el campo del aislamiento térmico y acústico ya que es el área más desconocida hasta ahora, donde existe una importante vía de desarrollo para el sector.

El interés en la utilización de un material, como el caucho procedente de los NFU y de los desechos de las propias fábricas, como material absorbente acústico se centra en que tan solo se requieren tratamientos mecánicos de mezclado y curado, técnicas sencillas y rápidas de realizar, para obtener un material novedoso y de mayores prestaciones. Con los granos obtenidos del neumático, si se varía la granulometría y la dosificación utilizada se puede obtener una amplia gama de materiales acústicos. El Instituto de Acústica del CSIC, de España, desarrolló un proyecto sobre este tema para la construcción de barreras anti-ruido al tráfico rodado. El resultado de este estudio demostró que combinando la granulometría y el espesor de la pantalla se podía adaptar la absorción acústica de distintos espectros de frecuencia [3, 54].

Además de pantallas acústicas, existen ya en el mercado paneles o losetas fabricadas también con caucho granular reciclado embebido en una matriz de polímero tipo:

- Soluciones de Chitosán, fibra biopolimérica que proviene del esqueleto de los crustáceos, con el objetivo de fabricar pavimentos porosos y permeables que permitan el paso del agua hacia el suelo [55].
- Espumas. La espuma de poliuretano es un ejemplo. Para ello es necesario moler el grano de caucho hasta obtener partículas tipo polvo. El aporte de polvo de caucho aumenta las propiedades mecánicas, la estabilidad térmica y el aislamiento acústico del poliuretano [56]. Otro ejemplo de aglutinante espumoso es el látex espumado [57].
- Caucho natural u otros tipos de caucho realizando el mezclado en molinos de dos cilindros. La mezcla de caucho de acrilonitrilo-butadieno reciclado con caucho natural disminuye el tiempo de vulcanización. Además, la resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura disminuyen [58].

- Resinas poliméricas de poliuretano por su rápido curado a temperatura ambiente y su baja densidad, características que facilitan la fabricación de piezas por moldeo. Además aportan durabilidad y resistencia al impacto.

Por lo general, las empresas que fabrican pavimentos con propiedades acústicas están en proceso de desarrollo de este género. Aún no existen grandes diferencias entre los materiales que se encuentran en el mercado fabricados por unas empresas y otras. Sin embargo, la demanda de productos de mayor absorción y acondicionamiento acústico va en aumento debido a una sociedad cada vez más ruidosa. La Organización Mundial de la Salud (OMS) describe al ruido como la primera molestia ambiental en los países industrializados, un problema que afecta a la calidad de vida y que se debe paliar cuanto antes. Es por ello que a día de hoy en España existen muchas ordenanzas municipales, autonómicas, estatales y normativas de ruido con distintas exigencias en materia acústica como es el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación, aprobado en 2007, donde se establecen las reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de protección frente al ruido según el uso de la sala, edificio o área [5].

5 Estado del Arte

5.1 Investigación en materiales

Como se ha dicho anteriormente, a día de hoy el caucho reciclado que se destina a pavimentos va mayormente a la fabricación de asfalto y en segundo lugar, a pavimentos para parques infantiles. Por otro lado, existen también suelos técnicos para diversos deportes fabricados con este material. A este tipo de pavimento es donde se dirige el desarrollo de este proyecto.

Tradicionalmente los suelos técnicos deportivos interiores se hacían de madera u losas de hormigón pintado por su resistencia, durabilidad y apariencia, pero son materiales muy pobres acústicamente. Con el desarrollo de los materiales poliméricos, actualmente es posible diseñar de manera particular y más sencilla cada una de las salas dependiendo del ejercicio que se desarrolla en ella, obteniendo así las mejores propiedades acústicas y de confort en cada una de ellas.

Independientemente de cuál sea su actividad y su proceso de construcción, todo suelo deportivo debe de cumplir con las siguientes características: Dureza, resiliencia, fricción, absorción al impacto, durabilidad, propiedades acústicas y estética.

Como ocurre con los suelos de parques infantiles, existen diferentes maneras de construir suelos técnicos de caucho reciclado pero la más común y más rápida para llevar a cabo es mediante el uso de losetas prefabricadas con sistema de machiembredo. Se trata de losetas unicapa de entre 20 mm y 60 mm de espesor, dependiendo de su uso y lugar de instalación. Para el caso de pavimentos interiores sobre forjados o soleras de hormigón, el espesor ronda entre los 20 mm y 30 mm. En cuanto a la granulometría, 1 mm y 6 mm es el rango de tamaño de grano más común para losetas. Y la densidad, varía alrededor de 1 gr/cm^3 (información obtenida de las fichas técnicas de los productos que ya existen en el mercado).

5.1.1 Compuestos multicapa de caucho reciclado

Las losetas multicapa de caucho reciclado proveniente de los neumáticos y de otros tipos de productos de caucho, son un producto que se encuentra aún en fase de investigación a nivel interno de las empresas que trabajan en este sector. Existe una amplia gama de cauchos con una variedad muy extensa de propiedades, por lo que dependiendo de la combinación de cauchos que se haga, se alcanzarán unas propiedades u otras. Por ello, existen muchas líneas de investigación a nivel empresarial en esta área, pero no a nivel científico.

Sin embargo, observando los productos que existen ahora en el mercado, se puede comprobar que las losetas multicapa de caucho granular constan de dos capas claramente diferenciadas fabricadas de distinto modo: La parte superior que queda expuesta y la parte inferior (o relleno) que queda oculta y en contacto con el suelo o forjado una vez se instala. La parte superior puede estar fabricada por una lámina uniforme de caucho vulcanizado o una lámina compuesta por restos de caucho vulcanizado. Mientras que la parte inferior es la que está formada por caucho granular reciclado de los NFU. Ésta última se ejecuta aglomerando los granos con una matriz de resina polimérica y curando la mezcla bajo presión y temperatura. En la Figura 5.1.1, se puede identificar claramente ambas partes.

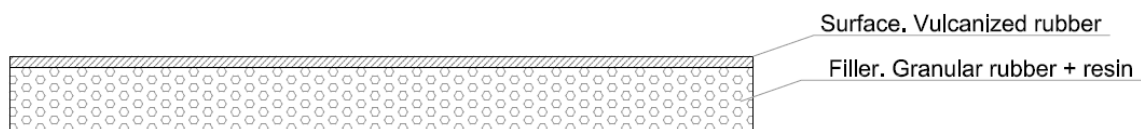


Figura 5.1.1. Sección del materia bicapa de caucho reciclado con las partes diferenciadas.

Los materiales más comunes que se utilizan como matriz ligante de la capa de relleno son:

- Resinas de poliuretano, como se ha mencionado anteriormente.
- Resinas fenólicas: Se utilizan estas resinas por ser compatibles con el caucho [59] y además, por aumentar el amortiguamiento al mezclarse con él [60].

5.1.2 Propiedades de materiales compuestos de caucho reciclado

A lo largo del tiempo se han ido estudiando las propiedades que ofrecen los materiales fabricados con reciclado de caucho, tanto las mecánicas como las acústicas dado su interés en el campo de la ingeniería y la acústica.

5.1.2.1 Propiedades dinámicas

Las propiedades dinámicas de un material son aquellas que definen su comportamiento frente a cargas cíclicas, repentinas o de intensidad variable. Bajo esta clase de cargas el caucho presenta un comportamiento viscoelástico. Un polímero se considera viscoelástico cuando a bajas temperaturas se comporta como un elástico cumpliendo con la ley de Hook y a temperaturas elevadas se comporta como un líquido viscoso. La deformación es instantánea y el material recupera su forma inicial tras cesar la carga en su estado elástico; mientras que durante el comportamiento viscoso la deformación no es instantánea sino que depende del tiempo y de la temperatura y además, no existe una recuperación total de la forma original.

Teniendo en cuenta este comportamiento viscoelástico del caucho, se puede asumir que la curva tensión-deformación del caucho no es lineal. Además, el módulo dinámico expresará la constante elástica y el amortiguamiento o pérdida de energía durante la deformación cíclica. Estas características son de gran importancia para aquellos artículos que están sometidos a repetidas deformaciones, especialmente si estas deformaciones son frecuentes y suficientemente grandes como para afectar a la durabilidad del material.

Los métodos desarrollados más comunes para medir las propiedades dinámicas de un material viscoelástico se basan en ensayos de reometría, análisis térmico mecánico dinámico (DMTA), ensayos mecánicos uniaxiales o triaxiales con cargas cíclicas (tipo compresión, tracción, cizalla o fatiga), mediante vibraciones o impactos y ensayos de transmisión de ondas, como se puede comprobar con las publicaciones que se han realizado a lo largo del tiempo [61, 62]. Con estos ensayos se pueden determinar los siguientes parámetros dinámicos, con los cuales se puede definir el comportamiento dinámico del caucho:

- Módulos de elasticidad y módulo viscoso (energía disipada) y resiliencia.
- Rigidez dinámica
- Amortiguamiento
- Frecuencia natural de vibración
- Absorción de ruido al impacto

En la mayoría de los ensayos mecánicos, los parámetros más relevantes son las dimensiones del material en la dirección del esfuerzo así como las características físicas tipo densidad y porosidad. La porosidad es uno de los factores que más influye en las propiedades dinámicas de los materiales si éstos son porosos, por lo tanto será una característica a la que prestar especial atención dada la estructura anisotrópica y granular de los materiales que se estudian en este trabajo.

El volumen de porosidad y el tamaño de poro condicionan el modo de vibración, el amortiguamiento, la absorción acústica y la transmisión térmica del material al someterlo a determinados esfuerzos y vibraciones. Además hay que recordar que el caucho es un material cuyo comportamiento varía considerablemente al cambiar la temperatura [63] y la frecuencia de vibración, así que, la porosidad junto con estas dos características serán valores determinantes en cada resultado.

En cuanto a los ensayos con los que se trabaja con ondas, es la longitud de onda enviada dentro de un determinado rango de frecuencias, el parámetro más determinante. Existen 3 casos distintos dependiendo de si la dimensión es mayor, menor o igual a la longitud de la onda. El ensayo más común es el que utiliza bajas frecuencias (sobre 10 ciclos por segundo o menos) [64]. Sin embargo, los ensayos en los cuales se utilizan altas frecuencias son también utilizados, sobre todo para inspeccionar materiales compuestos, ya que el comportamiento de cada material frente a una misma frecuencia varía. Se trata de ensayos útiles para materiales compuestos multicapa. Además, hay estudios realizados en materiales compuestos donde se considera el material a ensayar un conjunto y a continuación, se aplican los correspondientes conocimientos matemáticos para conocer el comportamiento de cada una de las distintas partes. Esta es una manera de predecir el comportamiento anisotrópico y único de un material como es el caucho.

5.1.2.2 Propiedades acústicas

El fenómeno de absorción y acondicionamiento acústico en materiales porosos son consecuencia de las características físicas del material es decir, la microestructura interna. En el caso del caucho granular reciclado, las características que condicionan la propiedad acústica son el volumen de poros, el tamaño, la distribución de ellos dentro de la matriz, la granulometría, la tortuosidad y la resistividad al flujo de aire. Además, el espesor del material condiciona también de forma directa el grado de absorción acústica.

En cuanto a los parámetros que definen las propiedades acústicas de un material poroso, los más determinantes son: El coeficiente de absorción acústica, la frecuencia crítica, las pérdidas por transmisión, la rigidez dinámica y la resistividad al paso de flujo de aire. El coeficiente de absorción acústica indica la cantidad de sonido que absorbe un material en relación con la onda incidente que le llega (es un valor adimensional), la frecuencia crítica es aquella a partir de la cual un elemento rígido empieza a absorber parte de la energía de las ondas incidentes (se expresa en Hz), la pérdida por transmisión es la capacidad de un material para no transmitir las ondas de un lado a otro (se expresa en dB), la rigidez dinámica expresa el comportamiento elástico de un material frente a impactos (sus unidades son los MN/m³) y la resistividad al paso de flujo de aire es un valor que mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor (sus unidades son rayl/m). De estos parámetros, aquel que más información da a la hora de caracterizar un pavimento (como es el que se estudia en esta tesina) es la rigidez dinámica, dado que demuestra el comportamiento frente a los impactos.

A lo largo del tiempo, se han realizado modelos fisicomatemáticos que pueden predecir la absorción acústica de un material en función de todos estos parámetros mencionados y en función del rango de frecuencias que se quiere aislar. Cada sonido o ruido se encuentra en una determinada banda de frecuencias, por lo tanto un material puede absorber un rango específico de frecuencias pero dejar pasar todos los demás. Entonces, un material se considera bueno acústicamente si absorbe las frecuencias deseadas para su utilidad.

Existen estudios y modelos acústicos básicos de materiales granulares desde hace más de 6 décadas, como son los de Biot [65] sin embargo, desde hace tan solo alrededor de una década que ya se ha empezado a estudiar más concretamente el caucho granular reciclado para elementos acústicos dado que da buenos resultados en cuanto a aislamiento. Además, es una manera de darle otra salida a los NFU, reduciendo así el impacto ambiental producido por su stock. En el gráfico que se muestra a continuación (Figura 5.1.2), se puede ver la tendencia creciente respecto a la investigación en materiales reciclados de caucho para aplicaciones acústicas, desde hace 20 años, exactamente desde el 1996 hasta ahora. Como se observa, a partir del 2005 es cuando se produce el salto más grande y más número de artículos se publican.

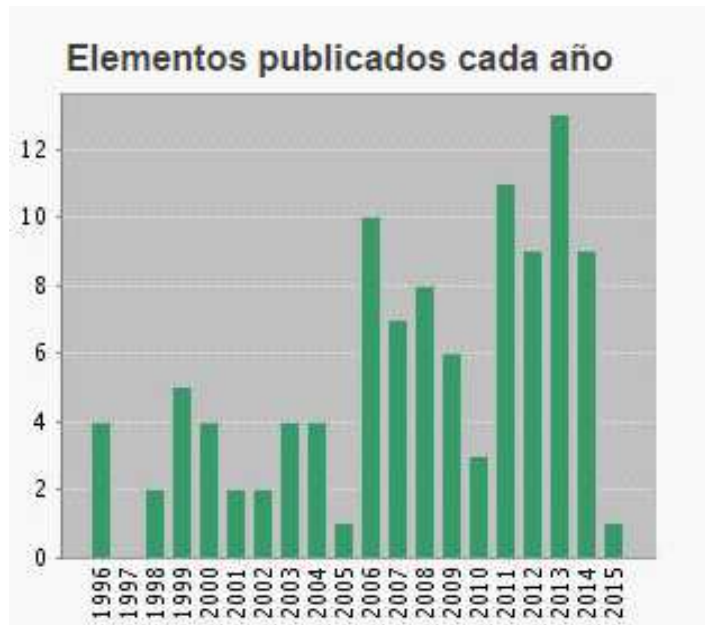


Figura 5.1.2. Publicaciones de caucho reciclado con aplicaciones acústicas entre el 1996 y el 2015.

El caucho granular reciclado se utiliza normalmente mezclándolo con otros materiales para mejorar las propiedades acústicas. Cuando los granos se mezclan con un adhesivo las propiedades acústicas mejoran como resultado de la reducción del tamaño de poro, ya que significa un aumento de la resistividad del flujo y la tortuosidad. La principal aplicación acústica de los granos de caucho reciclado se centra en la construcción de pavimentos de asfalto para reducir el nivel de propagación acústica en la superficie de la carretera, y en la construcción de pantallas

acústicas de hormigón. Trabajos anteriores han demostrado que el coeficiente de absorción acústica de materiales que contienen granos de caucho se mantiene entre un 0,3 y un 0,7, hecho que lo categoriza como un buen aislante acústico [66] [67].

Aparte de las dos aplicaciones más importantes recién aludidas, hay otras donde también se utiliza el caucho granular reciclado como aditivo. Los compuestos poliméricos de estructura bifásica, donde un elastómero es dispersado en una matriz termoplástica, son mezclas poliméricas que se usan para la absorción de impactos. Una de ellas es por ejemplo, el polietileno de alta densidad (HDPE) con caucho micronizado (entre 400 y 600 μm) [68]. Los datos mecánicos resultantes muestran que la adición de un 5% de caucho reciclado micronizado a la matriz polimérica de polietileno de alta densidad mejora la rigidez y aumenta la fragilidad del material. Estudios similares pero con otros polímeros como matriz ligante tipo cloruro de polivinilo (PVC) y otros tamaños de grano de caucho se han llevado a cabo realizando además ensayos acústicos.[69]. Los resultados de ellos se pueden resumir afirmando que la presencia de poros y espacios afecta más que la cantidad de contenido de caucho. Aquí se puede observar la gran importancia de la porosidad en el proceso acústico, valor que viene determinado por el tamaño y forma de los granos de caucho y el grado de compactación durante el proceso de prensado o moldeado. Con menor tamaño de poro, la tortuosidad y la resistividad al flujo de aire aumentan con lo que la absorción acústica es mayor.

Habiendo visto que los granos de caucho reciclado dan buenos resultados acústicos cuando se usan como aditivos en la fabricación de otros materiales, uno de los objetivos de este proyecto se dirige al estudio del comportamiento que muestra un producto multicapa fabricado principalmente con este tipo de granos. Como ya se ha mencionado anteriormente, no existen muchos antecedentes bibliográficos científicos respecto a este tipo de material. Tan solo algunos grupos de investigación o laboratorios a nivel interno empresarial están desarrollando y estudiando este tipo de material. A modo de ejemplo, J. Segura et al. [70] evaluaron paneles multicapa de fibra-caucho-fibra de distinto espesor y fabricados por sinterizado para la insonorización de maquinaria, equipos industriales, etc., Para ello utilizaron granulometrías entre 0,7 y 2,2-4 mm y sus resultados muestran que en un rango que va de 400 a 3500 Hz de frecuencia, las mayores granulometrías son las que dan

mayores coeficientes de absorción acústica y por lo tanto una mayor absorción acústica.

Otros productos multicapa cuya capa más significativa es también de caucho granular reciclado de varias formas y tamaño, se encuentran en la industria automovilística. Algunas de las partes que cubren el motor de los vehículos se componen de este tipo de caucho el cual reduce el ruido del funcionamiento del motor a distintas frecuencias y longitudes de onda. Algunas empresas como Toyota Gosei Corporation, poseen patentes de este tipo de productos [71, 72].

Productos multicapa que estén compuestos tanto de caucho de nuevo uso como de caucho granular reciclado se orientan hacia el mercado de los pavimentos técnicos que requieren de propiedades acústicas. La mayor cantidad de información de la que se dispone de este tema son patentes como es la de C. Wang [73, 74] donde describe un material compuesto por una capa superior de caucho rígido y una inferior de caucho granular reciclado en una matriz aglomerante que se comporta de manera más elástica (Figura 5.1.3). En ocasiones ambas capas unidas por una lámina de caucho vulcanizado, como se describe en la patente de A. Paulsson. Las propiedades mecánicas, acústicas y económicas se ven beneficiadas con la implantación de estos pavimentos.

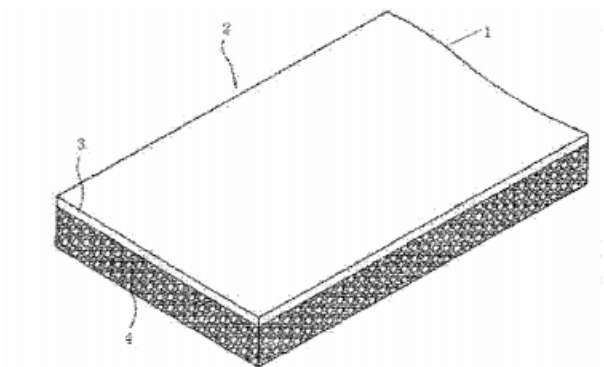


Figura 5.1.3. Esquema de pavimento bicapa de caucho [73].

Otro prototipo de pavimento similar utiliza caucho reciclado en ambas capas. La capa externa es prensada y curada con calor para darle rigidez, densidad, uniformidad y continuidad, mientras que la interior se mantiene como un aglomerado con resina [75]. Las propiedades acústicas de este tipo de material se ven mayormente afectadas por el espesor y la densidad del conjunto [76]

5.2 Investigación en métodos de procesado

El moldeado del caucho como tal (sin ser mezclado con cualquier otro tipo de material de distinta naturaleza) siempre se realiza bajo condiciones de alta temperatura y alta presión. Independientemente de si se trata de un caucho reciclado o un caucho de nueva producción, siempre se aplicará presión y temperatura para darle la forma deseada. Si se trata de caucho granular, el proceso por el que se fabrica es el de compresión, ya que de gránulos sueltos de caucho se quieren obtener materiales compactos y densos. El moldeado por prensa es el más común de ellos, dado que los productos que se quieren obtener son mayormente en forma de placa. En el caso de los pavimentos, el molde debe de tener una geometría que permita que las baldosas encajen unas con otras posteriormente.

En el caso de la fabricación de materiales multicapa, el proceso de fabricación de aglomerados de caucho granular reciclado es sencillo. Para un mejor entendimiento se explica la fabricación de cada capa por separado: La fabricación de la capa exterior y fabricación de la capa interior.

La capa exterior suele ser de caucho vulcanizado o caucho reciclado previamente prensado sin necesidad de ningún tipo de resina, además de las capas adicionales que el producto pueda tener. El caucho granular (provenga del NFU o de restos de otros productos de caucho como pueden ser los retales que generan las mismas empresas que trabajan con el caucho) se puede unificar y formar una lámina de caucho continua tan solo aplicando calor y presión. Debe de ser un caucho rígido pero flexible, con resiliencia, con resistencia a la abrasión, con resistencia al desgaste, con buena dureza superficial para que no se queden marcas, antideslizante, impermeable, que ofrezca un buen acabado y de fácil limpieza. Según su aplicación, tendrán más prioridad unas propiedades u otras.

En cuanto a la capa exterior, una vez escogida la granulometría adecuada del caucho granular, éste se mezcla con resina de poliuretano y se amasa hasta que cada uno de los granos está totalmente recubierto por este ligante. Entonces la mezcla está preparada para ser curada. Para ello, primeramente se coloca la capa externa, en la base del molde. A continuación, se reparte la mezcla de aglomerado de caucho

granular más resina sobre esta capa y se coloca en la prensa (si se le quiere también añadir presión) u horno (si tan solo se quiere aplicar calor) a una temperatura y un tiempo en el que la resina pueda curar sin dañar al caucho. Esta temperatura depende del tipo de resina de poliuretano utilizada, normalmente entre las más utilizadas, la temperatura se encuentra entre los 70°C y 100°C para un tiempo de curado entre 30 minutos y una hora. Una vez pasado este tiempo, se deja enfriar y se desmolda. Este tipo de resina sigue curando a temperatura ambiente hasta que alcanza el 100% de curado pero después de 30 minutos/1 hora ya posee suficientemente consistencia y resistencia para ser desmoldada sin problema.

Para que el paso de desmoldeo se pueda llevar a cabo sin dificultades, conviene utilizar un antiadherente por todo el molde antes de colocar las piezas. El desmoldante puede ser un aceite de silicona o un agente orgánico que contenga sales de ácidos grasos (tipo jabones), tensoactivos (alcanos sulfonados) entre otros.

Este proceso de fabricación sigue siendo muy manual en muchas de las empresas de hoy en día, por lo que el tiempo de fabricación es considerablemente alto. Por esta razón, algunas empiezan a utilizar barriles y mezcladores mecánicos para reducir el tiempo empleado.

La información expuesta en este apartado proviene principalmente de la experiencia y el conocimiento adquirido sobre el proceso de fabricación y manejo del caucho durante el período de prácticas en PEMARSA, S.A. y de algunas patentes ya publicadas como es de Jörg Heinz Hüneke y Michael Dr. Schöler [77].

6 Experimental

En el presente capítulo se describen las características del material objeto de este proyecto y los ensayos que se han efectuado para su caracterización dinámica y acústica.

6.1 Materiales

En este apartado se detallan las características físicas de cada uno de los materiales de caucho reciclado estudiados en este proyecto y suministrados por PEMARSA, S.A. Se trata de compuestos bicapa de dos distintos tipos de caucho: La parte externa (superior) está compuesta de caucho procesado en fábrica (de 3 mm de espesor) tras someterlo a 165°C durante 12 minutos a una presión de 100 kg/cm² (9,8 MPa) y la parte interna (inferior) está compuesta por un conglomerado de granos de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso en una matriz de resina de poliuretano, concretamente Voramer MR 1101. En la Imagen 5.1.2.1, se pueden distinguir cada una de las partes:

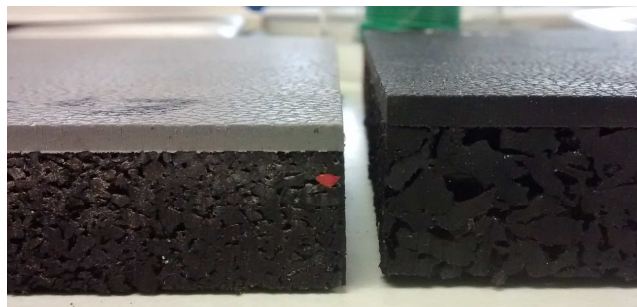


Imagen 5.1.2.1. Ejemplo de dos muestras de distinto espesor, granulometría y densidad.

La capa externa superior está constituida por la siguiente composición:

- Caucho Sintético SBR (Estireno-Butadieno) 1502: Copolímero obtenido por copolimerización en frío. Sus propiedades dependen de la temperatura de reacción y del contenido de estireno y emulsificante
- Agentes de vulcanización : Azufre (S) y acelerantes
- Cargas: Sílica (SiO₂) y Silicato de Alúmina
- SBR reciclado en polvo
- Plastificantes
- Pigmentos

Por otro lado, la composición de la capa interna varía en función del espesor que se quiere obtener, de la cantidad de caucho en granza que se usa y de su granulometría. Cambiando cada vez uno de estos parámetros, se pueden obtener diferentes series de muestras a ensayar. En este trabajo de investigación se han utilizado dos espesores distintos (denominados como E1 y E2), tres densidades (D1, D2 y D3) y dos granulometrías (G1 y G2), parámetros que quedan establecidos en la Tabla 6.1.1.

Tabla 6.1.1. Valores de cada parámetro variable en los materiales a ensayar

ESPESOR (mm)	DENSIDAD (g/cm³)	GRANULOMETRÍA (mm)
E1 = 20	D1 = 0,85	G1 = 1-3
E2 = 22	D2 = 0,90	G2 = 4-8
	D3 = 0,95	

Como material ligante se opta por el uso de Voramer MR 1101 porque se trata de una resina de poliuretano específicamente diseñada para la adhesión de productos de caucho para pavimentos. Se trata de un adhesivo de un solo componente de curado, el calor, así que necesita unas condiciones de temperatura sobre los 100 y 200 °C, con objeto de desbloquear el grupo isocianato necesario para formar el poliuretano termoestable. Algunas de las características mecánicas de este tipo de resina son: Una resistencia a esfuerzo normal de 15 MPa, una elongación máxima del 20 % y una alta resistencia a la fatiga [78].

Respecto al proceso de fabricación del material bicapa, se realiza mediante prensado, a 125°C de temperatura durante 20 minutos sin aplicar ningún tipo de presión (se usa la prensa a modo de horno). De modo que la variación de la densidad depende de la cantidad de caucho granular y resina utilizada en cada caso ya que el molde es siempre el mismo, cuyas dimensiones son 1 x 1 m, y el peso de la capa superficial es siempre de 4 kg. La cantidad de caucho más resina es el que se detalla a continuación (

Tabla 6.1.2):

Tabla 6.1.2. Cantidades en peso de cada material.

ESPESOR MUESTRA (cm)	ESPESOR RELLENO (cm)	PESO CAPA SUPERFICIAL (kg)	TRITURADO NEUMÁTICO + VORAMER (kg)	PESO TOTAL (kg)	DENSIDAD (g/cm ³)
2,0	1,7	4	14,5	18,5	0,85
			15,5	19,5	0,90
			16,5	20,5	0,95
2,2	1,9		14,5	18,5	0,85
			15,5	19,5	0,90
			16,5	20,5	0,95

Los 12 combinaciones posibles de espesor, densidad y granulometría son las que aparecen en la Tabla 6.1.3. Así es como quedan denominados todos los materiales.

Tabla 6.1.3. Distintas series de material de caucho reciclado a estudiar.

POSIBLES COMBINACIONES		
E1	D1	G1
E1	D1	G2
E1	D2	G1
E1	D2	G2
E1	D3	G1
E1	D3	G2
E2	D1	G1
E2	D1	G2
E2	D2	G1
E2	D2	G2
E2	D3	G1
E2	D3	G2

Las muestras de cada uno de estos materiales poseían distintas dimensiones y forma dependiendo del ensayo al que se sometieron. Para la realización de este proyecto fueron necesarias las siguientes probetas:

- Cuadradas de 200 x 200 mm
- Rectangulares de 20 x 200 mm
- Circulares de 40 mm de diámetro

Dado que tanto la capa superficial como la de relleno se fabricaron en moldes de 100 x 100 cm (tamaño de molde adecuado para la prensa de la empresa) fue necesario cortar las placas. Para cortar estos materiales en la forma requerida se utilizó el corte por chorro de agua ya que se trata de un método que no daña al material, no importa la geometría que tenga la pieza y deja como resultado un corte limpio y preciso.

6.2 Ensayos previos

La caracterización mecánica y dinámica de cada una de las series de pavimentos de cauchos reciclado mencionados en el apartado anterior se realizó mediante ensayos cíclicos, de impacto y ensayos de transmisión de ondas. Pero antes de llevar a cabo cada uno de ellos, se calculó la gravedad específica de las probetas y la porosidad, dos valores importantes para la caracterización de suelos.

6.2.1 Cálculo de la gravedad específica

La gravedad específica o densidad relativa (G_s) es la relación entre la masa de una porción impermeable de material a 23°C y la masa de un mismo volumen de agua destilada a la misma temperatura. Se trata de un valor adimensional que indica cuánto más pesado es el material comparado con un mismo volumen de agua, dando así la relación de vacíos que contiene el material. Es un parámetro que se utiliza comúnmente en el estudio de suelos. La normativa que determina cómo realizar el cálculo de este valor es la ASTM D792-13 [79]. Según este estándar, los aparatos necesarios para poder calcular la gravedad específica son:

- Una balanza con un soporte fijo donde poder sujetar el recipiente de inmersión.
- Un cable que sujete el recipiente
- Un recipiente que sea resistente a la corrosión y abierto para facilitar la colocación de la muestra.
- Un vaso donde contener el agua donde realizar las inmersiones
- Un termómetro



Imagen 6.2.1.1. Fotografía de la medición de los valores necesarios para calcular la gravedad específica

Visto esto, los pasos a seguir para el cálculo de la gravedad específica de una pieza de plástica de entre 1 a 50 g son:

- Determinar la masa de la muestra junto con el recipiente donde se contiene en aire.
- Determinar la masa de la muestra saturada junto con el recipiente. Para ello, hay que sumergir la pieza en agua a una temperatura de 23 ± 2 °C y aplicarle el vacío hasta que no contenga aire en su interior.
- Calcular la gravedad específica con la siguiente fórmula:
-

$$G_s = \frac{a}{(a + w + b)} \quad (\text{ec. 1})$$

Siendo: a = masa aparente de la muestra sin recipiente al aire

w = masa aparente del recipiente sumergido en agua

b = masa aparente de la muestra saturada con recipiente sumergido en agua

Una vez obtenida la gravedad específica, la densidad del plástico queda definida como:

$$D = G_s \times 995,5 \quad (\text{ec. 2})$$

Donde 997,5 es la densidad del agua a 23°C. Las unidades de la densidad van kg/m^3 .

6.2.2 Cálculo del porcentaje de porosidad

La porosidad es el volumen de espacio que hay entre los granos de caucho del relleno respecto al volumen total del material. Es un parámetro muy importante a la hora de caracterizar materiales dado que condiciona de manera directa las propiedades mecánicas.

Una vez obtenida la gravedad específica (ec.1), el porcentaje de poros puede ser obtenido mediante la siguiente expresión:

$$\text{Porosidad (\%)} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{(G_s \times \rho_{agua})} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde : ρ_{ap} = densidad aparente del material (kg/m^3)

ρ_{agua} = densidad del agua (kg/m^3)

G_s = gravedad específica (adimensional)

6.3 Ensayos dinámicos de caracterización de los materiales

Los ensayos dinámicos son importantes a la hora de caracterizar un material elastómero dado su comportamiento viscoelástico. A continuación se describe cada uno de los ensayos dinámicos que se han llevado a cabo para comprender las características de cada serie de material de caucho reciclado y conocer las diferencias que existen entre ellos.

6.3.1 Ensayo de velocidad de ondas-P

Las ondas P también conocidas como ondas longitudinales u ondas de compresión, son aquellas en las que cada componente del medio por el que la onda viaja se mueve en la misma dirección que la onda. La velocidad a la que estas ondas viajan a través de un medio es un parámetro a través del cual se pueden conocer las propiedades elásticas del material que hace de medio, de ahí su importancia para el estudio de materiales.

El ensayo de velocidad de ondas P, también llamado ensayo de ultrasonidos, es un ensayo no destructivo que se usa mayormente en ingeniería civil y geotécnica para averiguar el desgaste y caracterizar la masa de la roca o suelos porosos, pero también puede realizarse para analizar otros tipos de materiales que presenten características similares como son los pavimentos de caucho granular. El ensayo se realiza de la siguiente manera de acuerdo con la norma ASTM D2845-08 [80]. Según esta norma el equipamiento necesario para ejecutar el ensayo es:

- Un generador de impulsos y un amplificador si es necesario con un voltaje máximo de salida de 50V con una amplitud de pulso entre 1 y 10 microsegundos . Debe de utilizarse una velocidad de repetición de pulsos entre un rango de 20 a 100 repeticiones por segundo. Debe de haber también un retardo variable de la salida principal de impulsos con respecto a la salida de activación de pulso, con un rango mínimo de 0 a 20 microsegundos.
- Transductores, es decir, un transmisor que convierta señales eléctricas en señales mecánicas y un receptor que haga el proceso inverso. Pueden ser piezoeléctricos o elementos magnetostrictivos.
- Preamplificador si el voltaje de salida del transductor receptor es baja.

- Un osciloscopio para visualizar la onda. Deberá tener una respuesta esencialmente plana entre una frecuencia de 5 kHz y 4 veces la frecuencia de resonancia de los transductores.

En cuanto al procedimiento a seguir, los pasos son los que se detallan a continuación:

- Primero, hay que observar que la superficie de contacto entre los transductores y el material a ensayar sea total y completamente plana. Para ello, se recomienda la utilización de un gel lubricante tipo vaselina.
- A continuación, se debe de determinar el espesor de la muestra midiendo la distancia recorrida por un pulso eléctrico entre los transductores.
- Determinar el tiempo de viaje del impulso eléctrico y realizar las modificaciones necesarias y correcciones adecuadas para poder obtener la forma de onda deseada en el osciloscopio.

Para la realización de este ensayo se utilizó un equipo portable de ultrasonidos PUNDIT Plus Kit de CNS FARNELL con unos transductores piezoeléctricos de 54 kHz [81].

A continuación se muestra un esquema con la colocación de cada elemento y los puntos a ensayar en cada una de las muestras (Figura 6.3.1 y Figura 6.3.2). Como se puede ver, se ensayaron 5 puntos de una misma muestra y a continuación se realizó la moda estadística de esos 5 puntos dado que no se poseía de suficientes valores como para poder sacar la media aritmética. En este caso la moda estadística definía de mayor manera la distribución de valores.

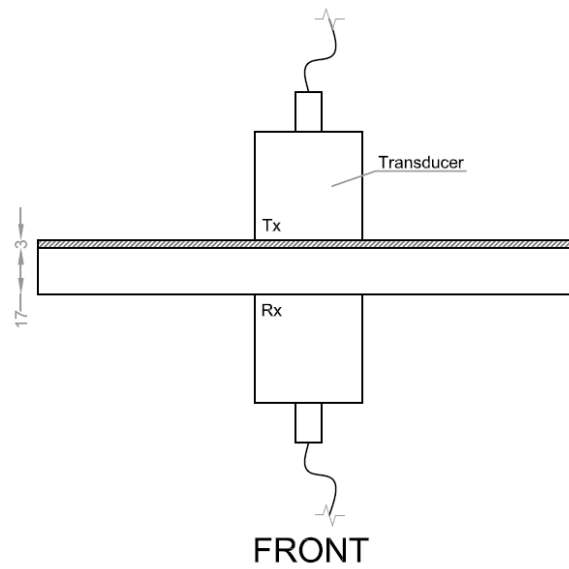


Figura 6.3.1. Esquema de perspectiva en alzado del ensayo de ultrasonidos.

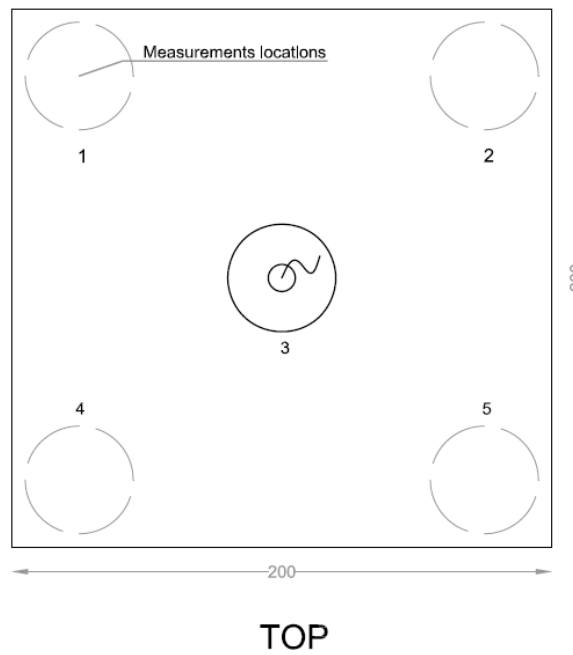


Figura 6.3.2. Esquema de perspectiva en planta del ensayo de ultrasonidos con las zonas de colocación del palpador numeradas por orden de ejecución.

La velocidad de las ondas P depende tanto de los factores internos del material por donde viaja tipo, isotropía, densidad, porosidad, tamaño de grano, grado de saturación, orientación de la estructura, fisuras,... como de factores externos tipo temperatura y humedad. Estudios anteriores demuestran que la velocidad de ondas P

están relacionadas con la resistencia a compresión uniaxial, dureza, densidad y durabilidad [82-85]. Es por ello que se trata de un ensayo conveniente para examinar y conocer el módulo de Young de los materiales de este proyecto. Sin embargo hay que tener en cuenta que además de ser materiales granulares porosos, los materiales que se estudian en esta tesina están compuestos de dos capas claramente diferenciadas, por lo tanto, dependiendo de si la longitud de la onda enviada es mayor o menor al espesor de cada capa de material, la velocidad de propagación se obtiene por una ecuación u otra [86].

Si la longitud de onda enviada es menor que el espesor de las capas, tal y como ocurre con los materiales estudiados es esta tesina, la ecuación que determina la velocidad de propagación del material compuesto es la siguiente:

$$V_c = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2}} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (\text{ec. 4})$$

Siendo: L_1 = Espesor de la capa 1 (espesor de la capa superficial de 0.003 m)

L_2 = Espesor de la capa 2 (espesor de la capa de relleno que puede ser de 0.017m o 0.019 m dependiendo de la muestra)

v_1 = Velocidad de propagación de la onda en la capa 1

v_2 = Velocidad de propagación de la onda en la capa 2

Para conocer la velocidad de propagación en cada una de las distintas capas se realizó este mismo ensayo a cada capa por separado y su valor se obtuvo conociendo el tiempo de propagación y el espesor recorrido.

$$V = \frac{e}{\Delta T} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (\text{ec. 5})$$

Donde: e = Distancia recorrida por la onda que es igual al espesor de la capa (m)

ΔT = El tiempo que tarda en recorrer el espesor de la muestra (s)

Una vez obtenida la velocidad de propagación, se pudo obtener el módulo de Young de cada uno de los materiales y del conjunto. Para ello, fue necesario obtener antes el

módulo elástico restringido o también conocido como módulo de onda-P (M) que queda definido de la siguiente manera:

$$M = V^2 \times \rho \text{ (Pa)} \quad (\text{ec. 6})$$

Donde: V^2 = Velocidad de propagación (m/s)

ρ = Densidad del material por el que se propaga la onda (kg/m^3)

Con el valor del módulo restringido (ec.6), el módulo de Young se puede obtener aplicando la siguiente ecuación según las teorías de la elasticidad:

$$E = \frac{M(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \text{ (Pa)} \quad (\text{ec. 7})$$

Siendo: M = Módulo restringido o módulo de onda-P (Pa)

ν = Coeficiente de Poisson (adimensional) $\approx 0,2 - 0,5$ según el tipo de caucho

Normalmente el coeficiente de Poisson para un caucho común se encuentra alrededor de los 0,5 ya que cuando es sometido a tensión, por ejemplo tracción, su volumen total no cambia pero la deformación longitudinal es mayor que la transversal. Así que, se consideró que el coeficiente de Poisson de la capa de caucho superficial era 0,5, dado que se trataba de un caucho compacto, homogéneo e isotrópico, mientras que la capa de relleno de caucho granular se consideró que tenía un coeficiente de Poisson de 0,2 porque poseía un alto volumen de porosidad y el comportamiento de este material era más similar al de un suelo granular que al de un caucho compacto. El tamaño de grano de caucho que poseían las muestras (entre 1-3 mm y 4-8 mm) era igual al tamaño que podría tener una grava, de modo que el coeficiente de Poisson estaba entre 0,15 y 0,35. Para estos materiales se consideró un coeficiente de Poisson de 0,2 [87]. Por otro lado, se consideró que el coeficiente de Poisson del material en su conjunto (ambas capas) era de 0,3.

6.3.2 Ensayo de frecuencia de vibración de viga en voladizo

En el ensayo de determinación de la vibración de viga en voladizo se calcula la frecuencia del primer modo de vibración del sistema con distinta longitud de voladizo.

Cuando un elemento entra en estado de vibración debido a un impacto, esta vibración no sigue únicamente un modo de vibración sino que tienen lugar muchos modos a la vez. Para este proyecto tan solo se tiene en cuenta el primer modo, ya que es el modo fundamental también conocido como frecuencia natural que es la frecuencia a la que un sistema sigue vibrando, después que se elimine la señal de excitación. Además, conocido este dato se puede calcular el amortiguamiento.

Este ensayo consiste en golpear una viga semiempotrada por el extremo que está en voladizo mientras un acelerómetro, instalado en un punto del mismo extremo de la viga, recoge la señal de vibración y la envía a un osciloscopio donde se realiza un análisis espectral FFT (Fast Fourier Transform). De este modo se puede visualizar la forma de onda y detectar la frecuencia natural de vibración. La viabilidad y precisión de este ensayo quedan demostradas con el artículo de R.M. Digilov [88].

En el caso de los materiales a estudiar, el ensayo se realizó colocando las vigas en dos posiciones distintas: Una, tal y como el material está diseñado como pavimento, es decir con el relleno de caucho abajo y aplicando la fuerza de manera transversal a la superficie externa (Posición 1) y otra, girando la viga 90° a la izquierda aplicando la fuerza de manera paralela a la superficie externa (Posición 2) En las siguientes dos figuras se puede diferenciar de manera más clara cada una de las posiciones (Figura 6.3.3 y Figura 6.3.4).

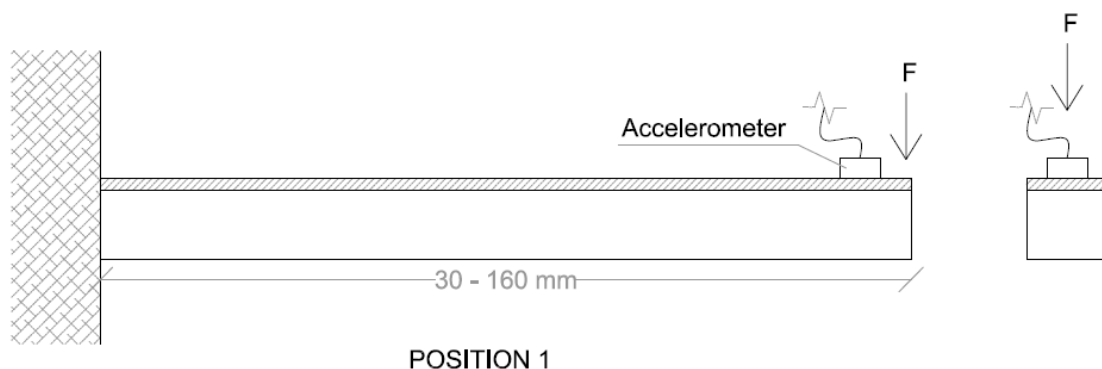


Figura 6.3.3. Esquema de vistas en lateral y de frente de la viga en Posición 1.

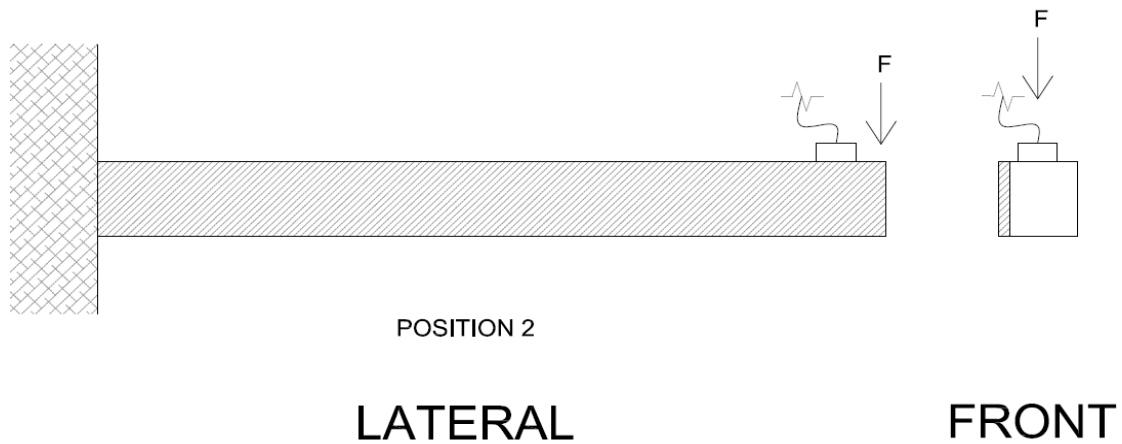


Figura 6.3.4. Esquema de vistas en lateral y de frente de la viga en Posición 2.

No existe ninguna limitación establecida para la longitud del voladizo, de manera que se estableció un rango entre 30 y 160 mm en cada una de ellas.

6.3.2.1 Parámetros derivados del ensayo de viga en voladizo

Tras obtener la frecuencia natural de vibración con el ensayo de la viga semiempotrada en voladizo se puede derivar otro parámetro importante para la caracterización de este material.

6.3.2.1.1 Amortiguamiento

Uno de los parámetros que se puede obtener por medio de este ensayo, es el amortiguamiento (ζ) de las distintas longitudes de la viga en voladizo. Existen varios métodos de cálculo para conocer su valor, tal y como se explica en el artículo de F. Simón [89]. Uno de ellos se basa en el cómputo del ancho de banda de semi amplitud de la frecuencia de resonancia (la máxima obtenida) de la respuesta cuadrática. Es decir, el amortiguamiento queda definido de la siguiente manera:

$$\zeta = \frac{(f_b^2 - f_a^2)}{4 \times f_0^2} \quad (\text{ec. 8})$$

Siendo: f_0 = la frecuencia de resonancia

f_a , f_b = la semi amplitud respecto a la f_0

Estos valores quedan especificados de manera clara en la Figura 6.3.5:

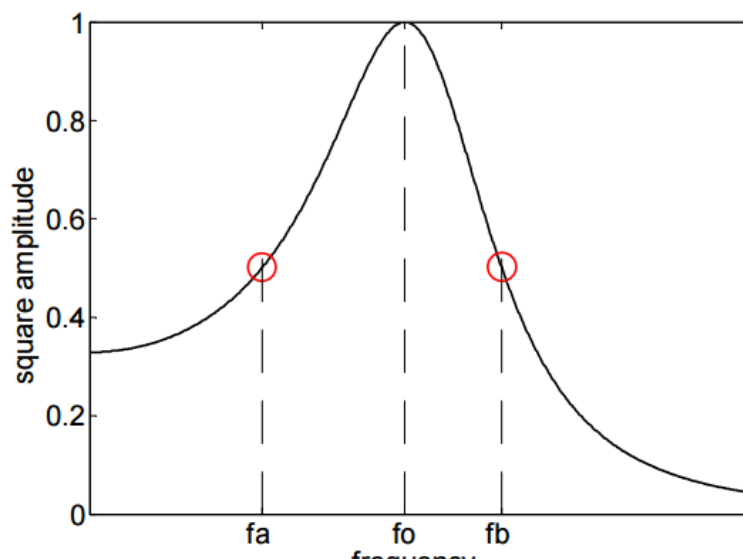


Figura 6.3.5. Gráfico frecuencia-amplitud al cuadrado para determinar el amortiguamiento [89].

Con el objetivo de obtener unos valores más exactos de f_a y f_b , se graficaron los datos procedentes del osciloscopio con el software Matlab y se determinó su valor.

6.3.3 Ensayo de determinación de la Rigidez Dinámica

El ensayo de determinación de la rigidez dinámica se realiza en base a la norma europea UNE EN 29052-1:1994 "Determinación de la rigidez dinámica. Parte 1" [7]. El método utilizado fue el de excitación de la masa de carga por medio del impacto de un martillo normalizado. Se trata de una norma que está destinada principalmente a la comparación de muestras de producción de materiales similares con especificaciones de calidad conocidas.

La rigidez dinámica indica la capacidad del material a conducir la energía de vibración y consecuentemente, la atenuación sonora que puede proporcionar. Es uno de los parámetros que determina el aislamiento acústico de suelos flotantes en viviendas. Desde el punto de vista práctico para los pavimentos, cuánto más elástico es un material, más bajo será el valor de rigidez dinámica y, por lo tanto, mayor será el aislamiento a los ruidos de impacto. Anteriores estudios demuestran que este parámetro no tan solo se usa en la caracterización acústica de suelos flotantes, sino

que también en la caracterización acústica de otros elementos estructurales y no-estructurales. Por ejemplo, paredes de mampostería [90] o pavimentos de mezclas bituminosas con relleno de caucho reciclado [91].

Según la norma UNE EN 29052-1:1994, [7] el equipamiento utilizado para llevar a cabo este ensayo se describe a continuación:

- Placa de carga de acero de forma cuadrada cuyas dimensiones no sobrepasen los 200 ± 3 mm de ancho y 200 ± 3 de largo. El peso total de los equipos de medida y de excitación no debe de superar los $8 \pm 0,5$ kg.
- Un dispositivo de excitación que tan solo produzca oscilaciones verticales con cada golpe. Por ejemplo, un martillo normalizado de impactos.
- Dispositivos de detección de señales como son los acelerómetros.
- Una tarjeta y analizador de espectros.

La ejecución del ensayo debe de realizarse sobre una base llana y rígida de tal magnitud que durante la vibración por el impacto la velocidad de transmisión resulte depreciable comparada con la placa de carga. El elemento a ensayar se coloca sobre la base y a continuación, la placa de carga sobre él. Mediante el martillo de impactos se golpea la placa (un mínimo de 5 veces para el material de este proyecto), y se obtiene la frecuencia resonancia de cada uno de los puntos, de los cuales se obtiene la media aritmética. En los siguientes esquemas (Figura 6.3.6 y Figura 6.3.7) se puede ver cada uno de los elementos que se utilizó y cada uno de los puntos de impacto donde se golpeó.

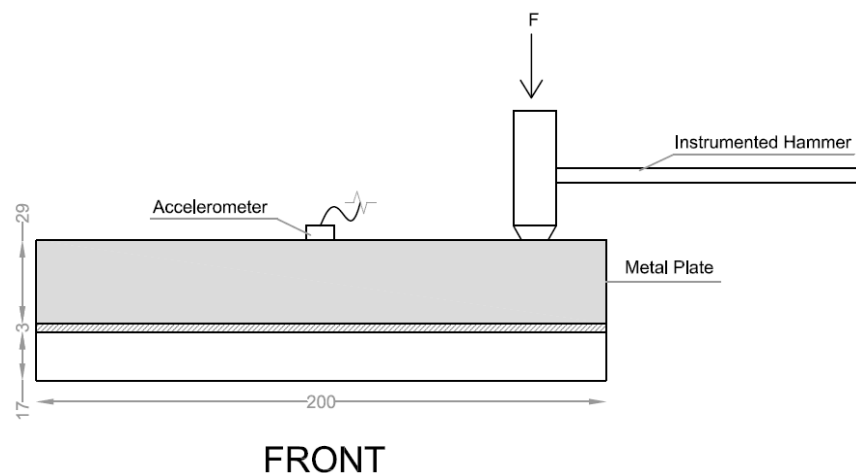


Figura 6.3.6. Esquema de perspectiva en alzado del ensayo de rigidez dinámica.

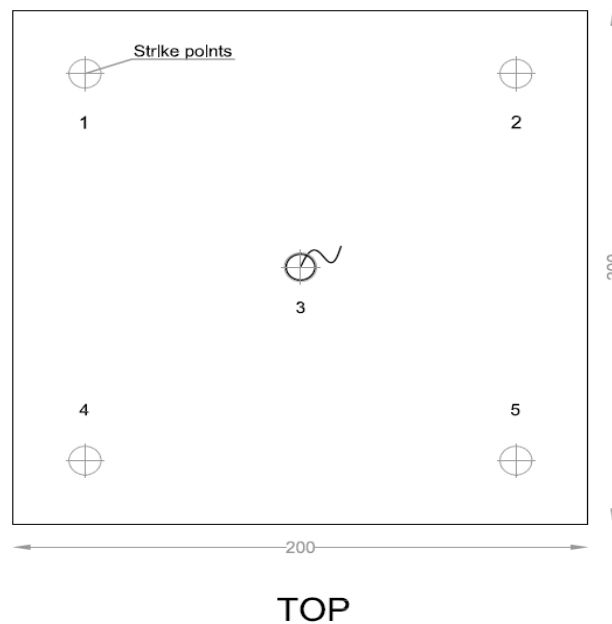


Figura 6.3.7. Esquema de perspectiva en planta del ensayo de rigidez dinámica con los 5 puntos destacados donde golpear.

La determinación de la rigidez dinámica por unidad de superficie se realiza a partir de la frecuencia de resonancia de la vibración vertical fundamental de un sistema masa-muelle, en el que la masa es la placa de carga y el muelle es una muestra objeto del ensayo. De manera que con los resultados obtenidos de la frecuencia de resonancia, la rigidez dinámica por unidad de superficie (s_t) queda definida por la siguiente expresión:

$$S_t = 4\pi^2 m_t f_r^2 \left(\frac{MN}{m^3} \right) \quad (\text{ec. 9})$$

Siendo: m_t = masa total por unidad de superficie (kg/m^2)

f_r = frecuencia de resonancia (Hz)

El valor de la frecuencia de resonancia se obtiene directamente de la gráfica que muestra el osciloscopio para el primer ciclo de onda. Pero también se puede obtener realizando un análisis FFT con los datos importados a un software matemático adecuado.

En cuanto a la aplicación de este ensayo para el material objeto de este proyecto, la muestra se colocó tal y como queda descrito en la Figura 6.3.8.

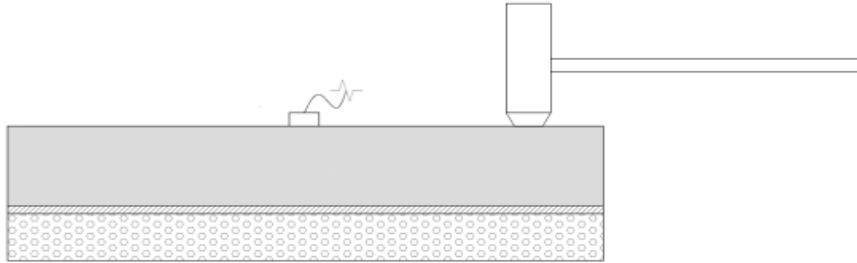


Figura 6.3.8. Esquema de colocación del material para el ensayo de rigidez dinámica.

6.3.3.1 Parámetro derivado del ensayo de rigidez dinámica

Con el valor de la rigidez dinámica se pudo obtener también la reducción de sonido al impacto, propiedad valiosa para caracterizar materiales que se van a estar colocados en interiores y van a recibir continuamente impactos.

6.3.3.1.1 Módulo de Young

El coeficiente dinámico de elasticidad (Módulo de Young = E) es uno de los parámetros que está directamente relacionado con la rigidez dinámica ya que depende de las propiedades elásticas y de la densidad del material. Según las normas de acústica [92] y tal y como ha quedado comprobado con anteriores estudios [93] se sabe que el E en un sistema masa-muelle-masa es el valor obtenido de la relación entre la rigidez dinámica y el espesor :

$$E = S' \times d \text{ (MPa)} \quad (\text{ec. 10})$$

Siendo : S' = rigidez dinámica (MN/m³)

d = espesor del material (m)

6.3.3.1.2 Reducción de sonido al impacto

La reducción del nivel de presión de ruido a impactos (ΔL_W) se puede estimar también conociendo el valor de la rigidez dinámica a través de la siguiente ecuación (ec.11) validada por la norma vigente UNE-EN 12354-2:2001 en su anexo C [92] y los estudios realizados por E. Brosio [94] :

$$\Delta L_W = 18 + 15 \log \left(\frac{m'}{S'} \right) (\text{dB}) \quad (\text{ec. 11})$$

Donde : m' = masa del pavimento (kg/m^2)

S' = la rigidez dinámica (MN/m^3)

Conocer este valor permitió saber cuál era la atenuación de sonido que proporcionaba el material que se estudiaba si se coloca entre dos recintos distintos. A mayor ΔL_W , mayor atenuación, mayor aislamiento acústico.

6.3.4 Ensayo de Compresión Dinámica Uniaxial (Cargas Cíclicas)

El ensayo de Compresión Dinámica Uniaxial consiste en someter un material a una serie de cargas cíclicas de compresión en una única dirección para conocer cuál es su comportamiento frente a esfuerzos repetitivos a lo largo del tiempo. Es un test que se suele utilizar para ensayar materiales plásticos rígidos y semirígidos tanto termoplásticos como termoestables. Además, es conveniente en aquellos plásticos que recuperan su forma original tras una carga, pudiendo conocer así su capacidad amortiguadora.

La norma que rige este ensayo es la ASTM D695-10, [95] que equivale a la ISO 604 [96]. Esta norma está focalizada a ensayos de compresión estática definida. Sin embargo se tomó como estándar a seguir para realizar esfuerzos repetitivos de compresión.

El equipamiento necesario para llevar a término este ensayo es el que se especifica seguidamente:

- Una máquina de ensayo con un mecanismo capaz de controlar el movimiento uniforme de un cabezal a una velocidad constante.
- Un soporte fijo donde colocar la muestra a ensayar.
- Un software que recoja la información de la tensión y deformación que sufre el material.

En cuanto a las muestras, deben de haber sido fabricadas por compresión o inyección y no deben de poseer ningún tipo de imperfección superficial para evitar puntos críticos durante el desarrollo del ensayo. Pueden ser muestras cilíndricas o prismáticas. En este caso se utilizaron muestras cilíndricas de 40 mm de diámetro y se ensayaron en la posición en la que están diseñadas, con la capa superficial arriba.

Para ensayar los materiales de esta tesina se decidió someterlos a 25 y 250 ciclos de carga y descarga aplicando unas velocidades de deformación de 1% y 40 % por minuto para los 25 ciclos y tan solo 40% por minuto para los 250 ciclos. Con los gráficos de tensión-deformación de cada ciclo se pudo conocer el amortiguamiento dado que presentaba una tendencia de histéresis, tal y como ocurre con los materiales viscoelásticos. En este caso el amortiguamiento es igual al área encerrada por cada ciclo de carga y descarga.

A continuación se muestra una gráfica ejemplo (Figura 6.3.9) de uno de los 25 ciclos que describe uno de los materiales ensayados, el E1D2G2 a un 1% de velocidad de deformación. Como se puede ver, se describe perfectamente un ciclo de histéresis, curva típica de materiales visco-elásticos cuando se someten a este tipo de ensayo.

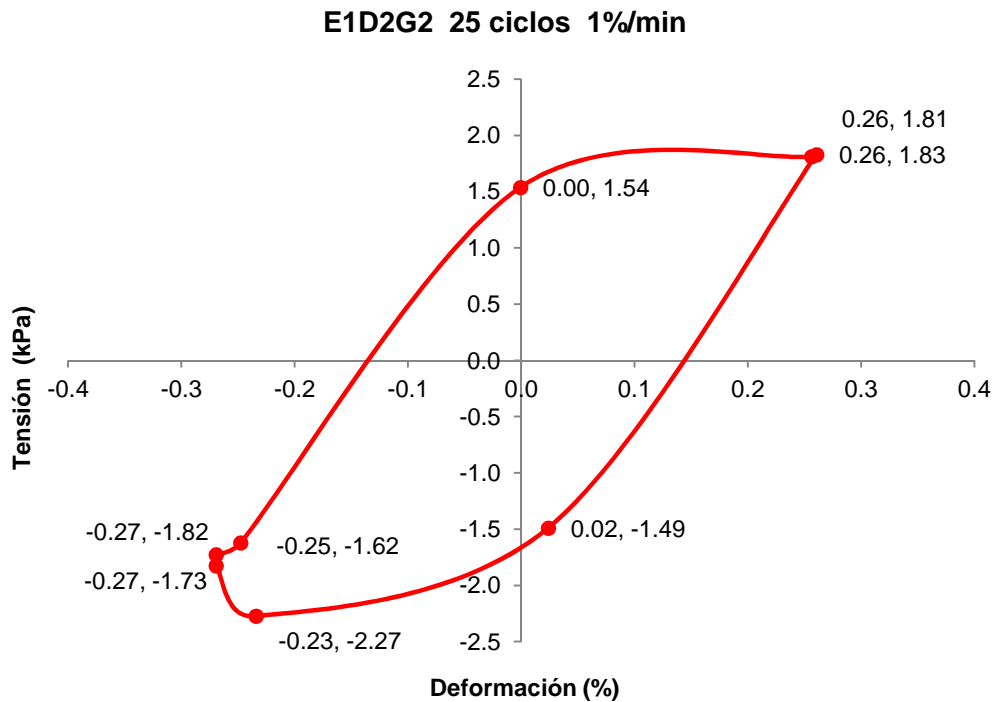


Figura 6.3.9. Ejemplo de un ciclo de histéresis de uno de los materiales al someterlo a esfuerzos cíclicos de compresión.

6.4 Ensayo mecánico de flexión de viga en voladizo

Por las leyes de resistencia de materiales se sabe que la flecha de una viga empotrada en un extremo y sometida a una fuerza vertical (F) en el extremo libre, queda definida por la siguiente ecuación:

$$y = \frac{L^3 F}{3 I E} \quad (\text{m}) \quad (\text{ec. 12})$$

Donde: L = Longitud del voladizo (m)

F = Fuerza aplicada en el extremo (N)

I = Momento de inercia de la sección transversal respecto la fibra neutra (m⁴)

E= Módulo de Young del material de la viga

De modo que el módulo de Young puede definirse como:

$$E = \frac{L^3 F}{3 I y} \text{ (MPa)} \quad \text{(ec. 13)}$$

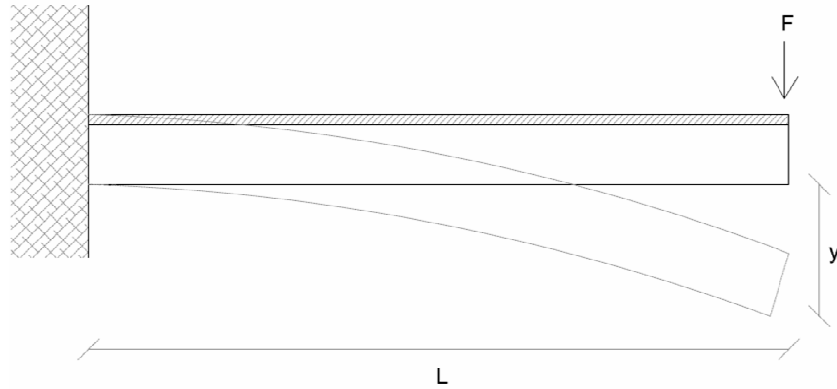


Figura 6.4.1. Esquema representativo del ensayo de viga en voladizo.

Se trata de un ensayo mecánico muy común en ingeniería por su sencillez y precisión en los resultados. Por ello, se decidió llevarlo a cabo para encontrar el módulo elástico de los materiales multicapa de caucho reciclado. Para la realización de este ensayo se utilizaron probetas de 20 x 2 x 2 cm, una carga de 50 g y un empotramiento de 2 cm de longitud. Por lo tanto los parámetros del ensayo quedaron:

- $L = 0.18 \text{ m}$
- $F = 0.05 \times 9.8 = 4,9 \text{ N}$

La medición del desplazamiento vertical del extremo en voladizo antes y después de someterlo a la carga se realizó mediante un calibre de gran precisión.

7 Resultados

Una vez realizada toda la parte experimental del proyecto, en el siguiente apartado se exponen los resultados de cada ensayo.

7.1 Gravedad específica y porosidad

Los resultados de la gravedad específica de las distintas muestras de caucho son los que se detallan a continuación en la Tabla 7.1.1, donde se resaltan los dos valores más grandes en color gris.

Tabla 7.1.1. Resultados de gravedad específica.

GRAVEDAD ESPECÍFICA					
MUESTRAS	MASA VASO AIRE (g)	MASA VASO AGUA (g)	MASA VASO + MUESTRA AIRE (g)	MASA VASO + MUESTRA SATURADA E INMERSA (g)	Gs
E1D1G1	141,03	123,35	162,47	126,6	1,18
E1D1G2	141,03	123,35	162,86	126,89	1,19
E1D2G1	141,03	123,35	160,49	126,63	1,20
E1D2G2	141,03	123,35	161,42	126,2	1,16
E1D3G1	141,03	123,35	162,34	127,28	1,23
E1D3G2	141,03	123,35	162,78	126,72	1,18
E2D1G1	141,03	123,35	164,18	127,52	1,22
E2D1G2	141,03	123,35	163,56	126,71	1,18
E2D2G1	141,03	123,35	165,5	127,28	1,19
E2D2G2	141,03	123,35	162,22	126,64	1,18
E2D3G1	141,03	123,35	164,43	124,2	1,04
E2D3G2	141,03	123,35	163,7	126,47	1,16

Con estos resultados de gravedad específica se obtuvo la porosidad, característica muy relevante para el estudio del comportamiento de este material granular. La Tabla 7.1.2 recoge cada una de las porosidades donde quedan también destacados los valores mayores.

Tabla 7.1.2. Resultados de porosidad calculados a partir de la gravedad específica.

POROSIDAD				
MUESTRAS	DENSIDAD APARENTE (kg/m³)	DENSIDAD AGUA (kg/m³)	Gs	POROSIDAD (%)
E1D1G1	850	1000	1,18	28
E1D1G2	850	1000	1,19	29
E1D2G1	900	1000	1,20	25
E1D2G2	900	1000	1,16	23
E1D3G1	950	1000	1,23	23
E1D3G2	950	1000	1,18	20
E2D1G1	850	1000	1,22	30
E2D1G2	850	1000	1,18	28
E2D2G1	900	1000	1,19	24
E2D2G2	900	1000	1,18	24
E2D3G1	950	1000	1,04	8
E2D3G2	950	1000	1,16	18

7.2 Velocidad de ondas- P

La velocidad de propagación de las ondas - P a través de cada una de las muestras de caucho reciclado son las que se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de a referencia..** y en la Tabla 7.2.2. Los tiempos de propagación de donde se deduce la velocidad de propagación se muestran en la Tabla 12.1.1 del apartado de Anexos de este proyecto.

Tabla 7.2.1 Velocidad de propagación de las ondas P en la capa de superficie y en el relleno.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m/s)												
MUESTRAS	SUPERFICIE					MODA (m/s)	RELLENO					MODA (m/s)
E1D1G1	1429	1667	1667	1765	1500	1667	230	224	230	227	218	230
E1D1G2	1111	1111	1111	1200	1200	1111	250	327	304	283	250	250
E1D2G1	1364	1250	1250	1429	1250	1250	239	227	236	243	243	243
E1D2G2	1200	1034	1304	1364	1364	1364	333	288	262	283	250	283
E1D3G1	1200	1250	1304	1304	1500	1304	250	236	236	224	224	236
E1D3G2	1429	1304	1364	1250	1364	1364	327	266	283	304	283	283
E2D1G1	1667	1579	1429	1500	1500	1500	238	229	211	264	207	229
E2D1G2	1304	1304	1429	1304	1364	1304	250	226	250	238	226	250
E2D2G1	1579	1500	1500	750	1500	1500	235	232	244	244	238	244
E2D2G2	1034	1250	1250	1154	1304	1250	241	250	264	224	271	250
E2D3G1	1111	1250	1111	1111	1250	1111	235	250	232	229	238	235
E2D3G2	1500	1500	1154	1304	1364	1500	216	226	247	226	241	226

En la siguiente tabla, Tabla 7.2.2, aparecen la velocidad de propagación de las ondas en el material compuesto, tanto los valores medidos directamente en el ensayo como los valores calculados mediante la fórmula de Wyllie M. R. J.(ec.4)

$$V_c = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2}} \left(\frac{m}{s} \right)$$

Tabla 7.2.2 Velocidad de propagación de las ondas P en el material compuesto.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN											
(m/s)											
MUESTRAS	COMPUESTO				MODA	COMPUESTO					MODA
	(Medido)					(m/s)	(Calculado)				
E1D1G1	250	278	256	256	256	263	257	264	261	250	261
E1D1G2	278	286	286	294	286	283	366	341	320	284	320
E1D2G1	263	263	263	263	263	273	258	269	277	276	273
E1D2G2	303	323	286	286	286	374	323	297	322	285	297
E1D3G1	270	263	270	263	270	284	269	269	255	256	269
E1D3G2	294	303	323	323	323	370	302	322	342	322	322
E2D1G1	262	250	262	250	262	269	259	239	297	234	259
E2D1G2	268	262	262	282	282	281	255	282	267	255	267
E2D2G1	268	250	262	262	262	265	262	275	268	268	268
E2D2G2	268	275	282	282	282	269	281	296	251	304	281
E2D3G1	275	268	262	275	275	263	281	260	257	267	263
E2D3G2	275	306	289	275	275	244	256	276	255	271	256

Con los valores de la velocidad se obtuvieron los siguientes valores del módulo restringido (ec.6).

Tabla 7.2.3. Valores del módulo restringido de la superficie y del relleno

M = MÓDULO RESTRINGIDO (MPa)				
MUESTRAS	SUPERFICIE	VELOCIDAD MODA (m/s)	RELLENO	VELOCIDAD MODA (m/s)
E1D1G1	3536,78	1666,67	38,04	229,73
E1D1G2	1899,38	1111,11	46,81	250,00
E1D2G1	2362,46	1250,00	37,82	242,86
E1D2G2	2712,87	1363,64	55,24	283,33
E1D3G1	2752,87	1304,35	41,23	236,11
E1D3G2	2466,24	1363,64	59,37	283,33
E2D1G1	3043,84	1500,00	38,85	228,92
E2D1G2	2527,22	1304,35	43,98	250,00
E2D2G1	3342,25	1500,00	45,23	243,59
E2D2G2	2279,56	1250,00	42,93	250,00
E2D3G1	1899,38	1111,11	37,79	234,57
E2D3G2	3043,84	1500,00	37,71	226,19

Tabla 7.2.4. Valores del módulo restringido del compuesto, el medido y el calculado.

M = MÓDULO RESTRINGIDO (MPa)				
MUESTRAS	COMPUESTO (Medido)	VELOCIDAD MODA (m/s)	COMPUESTO (Calculado)	VELOCIDAD MODA (m/s)
E1D1G1	55,88	256,41	57,79	260,76
E1D1G2	69,39	285,71	87,04	320,00
E1D2G1	62,33	263,16	67,19	273,22
E1D2G2	73,47	285,71	79,48	297,18
E1D3G1	69,39	270,27	68,65	268,82
E1D3G2	98,86	322,58	98,22	321,54
E2D1G1	58,30	261,90	57,08	259,13
E2D1G2	67,62	282,05	60,74	267,31
E2D2G1	61,73	261,90	64,78	268,29
E2D2G2	71,60	282,05	70,87	280,61
E2D3G1	71,84	275,00	65,63	262,84
E2D3G2	71,84	275,00	62,17	255,81

Tras obtener el módulo restringido, se dedujo el módulo de Young (ec.7). Los valores se recogen en las siguientes tablas, Tabla 7.2.5 y

Tabla 7.2.6: En estas tablas se puede observar la diferencia de magnitud entre los valores de las capas por separado y del material en conjunto. El módulo de Young es más alto en el caucho de la capa de la superficie. La capa de caucho del relleno da valores mucho más bajos. Y en cuanto al conjunto, los valores se aproximan a los valores del relleno. Así se puede ver que la influencia de la capa de relleno sobre todo el conjunto es mayor que la influencia de la capa superficial.

Tabla 7.2.5. Valores del módulo de Young de la superficie y del relleno

E = MÓDULO DE YOUNG (MPa)		
MUESTRAS	SUPERFICIE	RELLENO
E1D1G1	206,66	34,24
E1D1G2	110,98	42,13
E1D2G1	138,04	34,04
E1D2G2	158,52	49,72
E1D3G1	160,85	37,11
E1D3G2	144,11	53,44
E2D1G1	177,86	34,96
E2D1G2	147,67	39,58
E2D2G1	195,29	40,71
E2D2G2	133,20	38,64
E2D3G1	110,98	34,01
E2D3G2	177,86	33,94

Tabla 7.2.6. Valores del módulo de Young del compuesto, el medido y el calculado.

E = MÓDULO DE YOUNG (MPa)		
MUESTRAS	COMPUESTO (Medido)	COMPUESTO (Calculado)
E1D1G1	41,51	42,93
E1D1G2	51,55	64,66
E1D2G1	46,30	49,91
E1D2G2	54,58	59,04
E1D3G1	51,55	51,00
E1D3G2	73,44	72,96
E2D1G1	43,31	42,40
E2D1G2	50,23	45,12
E2D2G1	45,86	48,12
E2D2G2	53,19	52,65
E2D3G1	53,37	48,76
E2D3G2	53,37	46,18

7.3 Frecuencia natural de vibración y amortiguamiento obtenidos por el ensayo de viga en voladizo bajo impacto

La frecuencia natural a la que vibró cada probeta de distinta composición y distinta longitud de voladizo cuando se sometía a un impacto, fue la que se detalla en la Tabla 7.3.1. para la posición 1 y en la Tabla 7.3.2. para la posición 2

Tabla 7.3.1. Frecuencia natural de vibración de cada material en posición 1, según la longitud de voladizo.

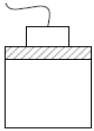
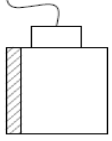
	POSICIÓN 1 FRECUENCIA NATURAL (Hz) - 					
LONGITUD VOLADIZO (mm)	E1					
	E1 D1 G1	E1 D1 G2	E1 D2 G1	E1 D2 G2	E1 D3 G1	E1 D3 G2
160-165	12	12	9,5	11	11,5	12
120-124	23,5	20,5	15,5	18,5	20	20
99-125	35	28,5	23	25,5	31	31
79-85	50	42	39	39	48	47
30-35	150	155	150	155	170	180
LONGITUD VOLADIZO (mm)	E2					
	E2 D1 G1	E2 D1 G2	E2 D2 G1	E2 D2 G2	E2 D3 G1	E2 D3 G2
160-165	13	13	12.5	12	11	13
120-128	19	24	20	19	18	19
93-125	31	34	32	27	28	30
65-85	50	50	66	48	38	44
30-35	230	200	205	21	160	175

Tabla 7.3.2. Frecuencia natural de vibración de cada material en posición 2, según la longitud de voladizo.

	POSICIÓN 2 FRECUENCIA NATURAL (Hz) 					
LONGITUD VOLADIZO (mm)	E1					
	E1 D1 G1	E1 D1 G2	E1 D2 G1	E1 D2 G2	E1 D3 G1	E1 D3 G2
160-165	11,5	12	11	12	12,5	12,5
120-124	20	23	17,5	20,5	20	23
91-125	42	32	27	31	32	32
79-85	48	45	43	44	45	46
30-35	190	180	180	185	190	195
LONGITUD VOLADIZO (mm)	E2					
	E2 D1 G1	E2 D1 G2	E2 D2 G1	E2 D2 G2	E2 D3 G1	E2 D3 G2
160-165	10,5	12	11,5	12	10,5	11,5
120-128	17	21	17,5	19,5	18,5	18,5
93-125	28	31	29	29	28	24
65-85	41	46	42	48	40	41
30-35	180	190	160	190	190	195

Como se puede observar, la frecuencia va creciendo a medida que se acortan las longitudes de voladizo. Entre espesores no existen grandes diferencias de vibración y entre posiciones sí que cabe destacar un comportamiento distinto entre las muestras de espesor E1 y las muestras de espesor E2, hecho que se discute en el siguiente capítulo de forma más detallada.

Por otro lado, el amortiguamiento calculado es el que se especifica en la Tabla 7.3.3. y en la Tabla 7.3.4. Los valores de amortiguamiento más alto en cada longitud de voladizo quedan destacados en color gris.

Tabla 7.3.3. Amortiguamiento en % de cada material en posición 1 según la longitud de voladizo.

POSICIÓN 1						
AMORTIGUAMIENTO						
(%)						
	E1					
LONGITUD (mm)	E1 D1 G1	E1 D1 G2	E1 D2 G1	E1 D2 G2	E1 D3 G1	E1 D3 G2
160-165	2	1	1	7	2	2
120-124	11	8	6	5	5	8
99-125	5	7	10	6	11	8
79-85	7	5	12	14	12	9
30-35	50	35	45	73	42	23
	E2					
LONGITUD (mm)	E2 D1 G1	E2 D1 G2	E2 D2 G1	E2 D2 G2	E2 D3 G1	E2 D3 G2
160-165	3	2	3	2	2	1
120-128	2	5	11	2	5	2
93-125	7	6	13	0	6	3
65-85	6	6	12	8	10	6
30-35	64	85	38	21	58	49

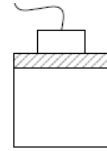
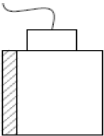


Tabla 7.3.4, Amortiguamiento en % de cada material en posición 2 según la longitud de voladizo.

	POSICIÓN 2 AMORTIGUAMIENTO (%) 					
LONGITUD (mm)	E1					
	E1 D1 G1	E1 D1 G2	E1 D2 G1	E1 D2 G2	E1 D3 G1	E1 D3 G2
160-165	6	6	2	6	4	3
119-124	9	9	6	12	3	8
91-125	7	13	3	5	6	5
79-85	4	8	8	8	15	9
30-36	32	47	36	76	41	52
LONGITUD (mm)	E2					
	E2 D1 G1	E2 D1 G2	E2 D2 G1	E2 D2 G2	E2 D3 G1	E2 D3 G2
160-165	2	3	2	2	3	2
120-128	5	4	7	9	6	7
93-125	5	5	6	4	6	3
65-85	9	4	10	9	6	6
30-35	52	32	42	48	33	65

Estas dos últimas tablas, Tabla 7.3.1 y Tabla 7.3.2, muestran el comportamiento en aumento del amortiguamiento cuando aumenta la frecuencia de vibración y disminuye el voladizo. Las diferencias que se ven entre los materiales de distinto espesor y posición no son relevantes, de modo que se considerará el material más bueno aquel que más amortigüe en más longitudes de voladizo.

7.4 Rigidez dinámica

Los valores obtenidos de la rigidez dinámica (S') de cada uno de los materiales fueron los que se indican en la Tabla 7.4.1. P son los cinco puntos de impacto y los valores destacados en color gris son los más bajos obtenidos.

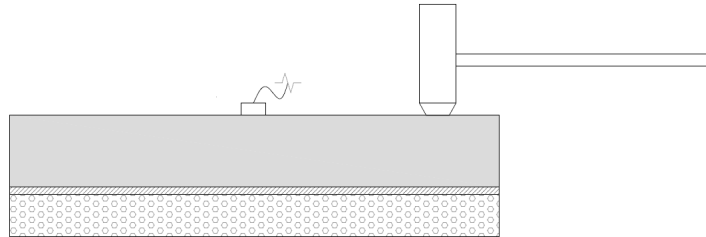


Figura 7.4.1. Esquema de la muestra durante el ensayo.

Tabla 7.4.1. Valores de rigidez dinámica de todos los materiales.

MUESTRAS	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	F. Media (Hz)	S' (MN/m ³)
E1D1G1	76	69	71	71	81	73,6	36,93
E1D1G2	74	66	86	100	64	78	41,48
E1D2G1	86	81	86	86	81	84	48,10
E1D2G2	63	83	83	69	74	74,4	37,74
E1D3G1	74	74	81	76	83	77,6	41,05
E1D3G2	66	68	66	63	69	66,4	30,06
E2D1G1	71	96	66	69	69	74,2	37,53
E2D1G2	60	68	69	64	66	65,4	29,16
E2D2G1	62	69	63	69	69	66,4	30,06
E2D2G2	89	71	66	96	74	79,2	42,76
E2D3G1	76	66	66	89	68	73	36,33
E2D3G2	71	71	78	100	96	83,2	47,19

7.4.1 Módulo de Young

El módulo de Young de los materiales, calculado mediante la relación entre el espesor y la rigidez dinámica (ec.10) fue el que se especifica en la siguiente tabla (Tabla 7.4.2).

Tabla 7.4.2. Valores de módulo de Young obtenido por la rigidez dinámica.

MÓDULO DE YOUNG (MPa)			
MUESTRAS	ESPESOR (m)	RIGIDEZ DINÁMICA (MN/m³)	E (MPa)
E1D1G1	0,02	36,93	0,74
E1D1G2		41,48	0,83
E1D2G1		48,10	0,96
E1D2G2		37,74	0,75
E1D3G1		41,05	0,82
E1D3G2		30,06	0,60
E2D1G1		0,022	37,53
E2D1G2	29,16		0,64
E2D2G1	30,06		0,66
E2D2G2	42,76		0,94
E2D3G1	36,33		0,80
E2D3G2	47,19		1,04

Como se puede comprobar el módulo de Young se encuentra entre valores próximos a 0,60 y 1 MPa en ambos espesores. Los valores más bajos de cada espesor son los que quedan remarcados en color.

7.4.2 Reducción de sonido al impacto

Con los datos obtenidos de la rigidez dinámica la reducción del nivel de presión de ruido a impactos (ΔL_w), dio el siguiente resultado (Tabla 7.4.3 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

Tabla 7.4.3. Valores de reducción de sonido al impacto calculada por la rigidez dinámica.

MUESTRAS	DENSIDAD APARENTE (kg/m ³)	ESPESOR (m)	m' (kg/m ²)	S' (MN/m ³)	ΔL_w (dB)
E1D1G1	850	0,02	17	36,93	12,95
E1D1G2	850	0,02	17	41,48	12,19
E1D2G1	900	0,02	18	48,10	11,60
E1D2G2	900	0,02	18	37,74	13,18
E1D3G1	950	0,02	19	41,05	12,98
E1D3G2	950	0,02	19	30,06	15,01
E2D1G1	850	0,022	18,7	37,53	13,46
E2D1G2	850	0,022	18,7	29,16	15,11
E2D2G1	900	0,022	19,8	30,06	15,28
E2D2G2	900	0,022	19,8	42,76	12,98
E2D3G1	950	0,022	20,9	36,33	14,40
E2D3G2	950	0,022	20,9	47,19	12,69

Los valores resaltados en color son los de mayor reducción sonora que coinciden con los de menor módulo de Young. Menor módulo de elasticidad significa menor rigidez y por lo tanto mayor reducción de sonido.

7.5 Ensayo de argas cíclicas. Compresión Uniaxial Dinámica

Los resultados de amortiguamiento de cada una de las muestras obtenidos por el ensayo de compresión uniaxial dinámica, fueron los que se recopilan en las tablas que hay a continuación (Tabla 7.5.1 y Tabla 7.5.2). Los resultados demuestran que el amortiguamiento es mayor a velocidades bajas de deformación y que el efecto de la fatiga también influye en él. Esta conducta se comentará más detalladamente en el apartado de discusión.

Tabla 7.5.1. Amortiguamiento materiales de espesor E1 bajo ciclos de 25 y 250 y distintas velocidades de deformación.

AMORTIGUAMIENTO MUESTRAS E1			
(%)			
	25 CICLOS		250 CICLOS
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN (%/MIN)	1	40	40
E1D1G1	4	22	13
E1D1G2	5	12	10
E1D2G1	27	15	10
E1D2G2	28	14	14
E1D3G1	18	14	9
E1D3G2	25	13	19
MODA	25	14	10

Tabla 7.5.2. Amortiguamiento materiales de espesor E2 bajo ciclos de 25 y 250 y distintas velocidades de deformación.

AMORTIGUAMIENTO MUESTRAS E2			
(%)			
	25 CICLOS		250 CICLOS
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN (%/MIN)	1	40	40
E2D1G1	18	16	15
E2D1G2	15	13	14
E2D2G1	16	17	19
E2D2G2	26	24	14
E2D3G1	19	20	15
E2D3G2	13	14	14
MODA	18	17	14

7.6 Ensayo mecánico de flexión de viga en voladizo

Los resultados del módulo de Young obtenidos mediante el cálculo de la flecha de una viga en voladizo bajo un esfuerzo constante fueron los que se especifican en la siguiente tabla (Tabla 7.6.1). A modo de recordatorio:

$L = 0,18 \text{ m}$

$F = 0,49 \text{ N}$

$I =$ Según el espesor del relleno granular (datos adjuntos en la Tabla 12.2.2)

$y =$ Desplazamiento vertical bajo la carga (datos adjuntos en la Tabla 12.2.2)

$$E = \frac{L^3 F}{3 I y} \text{ (MPa)} \quad (\text{ec. 13})$$

Tabla 7.6.1. Módulo de Young calculado por flexión de viga en voladizo.

MUESTRAS	E (MPa)
E1D1G1	0,008
E1D1G2	0,079
E1D2G1	0,037
E1D2G2	0,063
E1D3G1	0,050
E1D3G2	0,083
E2D1G1	0,057
E2D1G2	0,071
E2D2G1	0,060
E2D2G2	0,073
E2D3G1	0,167
E2D3G2	0,065

8 Discusión

En el siguiente apartado se realiza un análisis de los resultados de cada uno de los ensayos llevados a cabo.

8.1 Gravedad específica y porosidad

Mediante el valor de la gravedad específica se calcula la porosidad que presenta el material. Entre materiales de igual densidad, cuanto mayor es el valor de G_s mayor es la porosidad. Sin embargo, dado que se dispone de materiales con distinta densidad, el porcentaje de poros de un material queda definido por la relación entre la densidad y la G_s . Tras observar los resultados obtenidos, entre las muestras cuyo espesor es E1, aquella que presenta mayor porcentaje de poros es la E1D1G2 con un 29%, mientras que entre las muestras de espesor E2 es la E1D1G1 la de mayor porosidad con un valor del 30% tal y como se ve en los siguientes gráficos (Figura 8.1.1 y Figura 8.1.2). En ambos espesores, los materiales que contienen mayor porcentaje de porosidad son los de densidad D1, seguidos de la densidad D2 y D3, consecutivamente. Con el espesor E2, la diferencia entre las tres densidad es más grande.

En cuanto a la relación granulometría-porosidad, se ve que la diferencia de tamaño de grano no es un parámetro que afecte en gran medida al porcentaje total de porosidad.

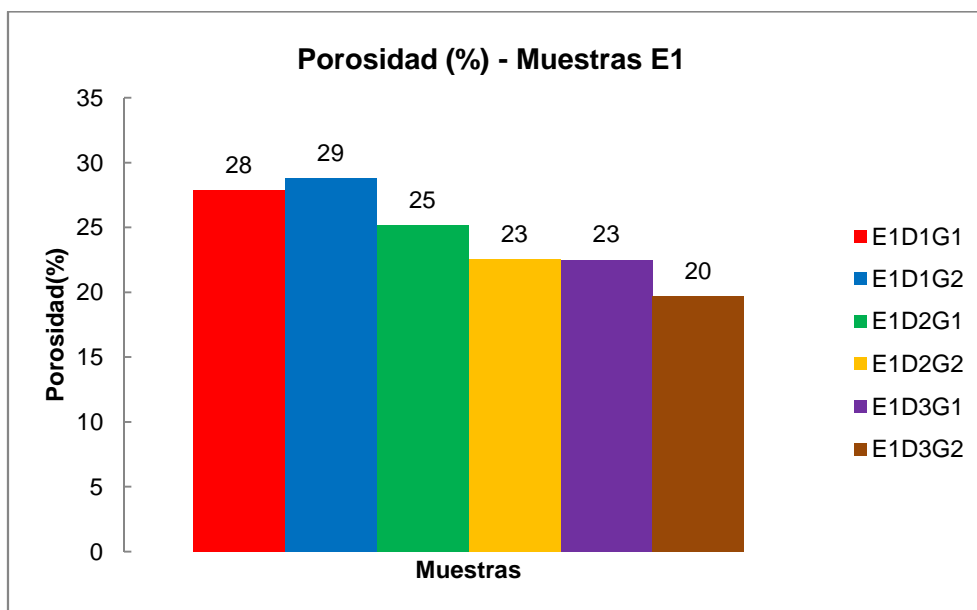


Figura 8.1.1. Gráfico comparativo de porcentaje de porosidad de los materiales con espesor E1.

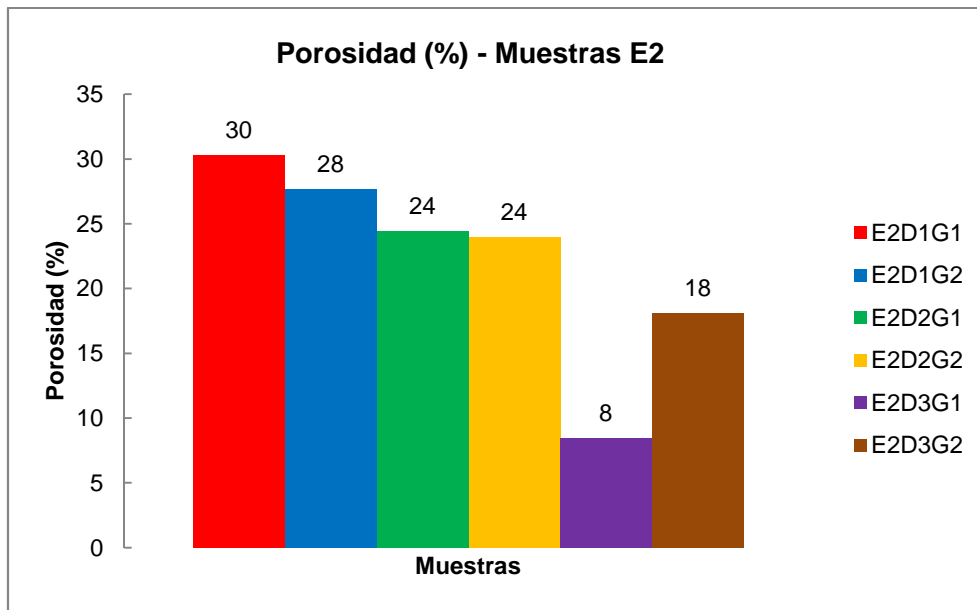


Figura 8.1.2. Gráfico comparativo de porcentaje de porosidad de los materiales con espesor E2.

8.2 Velocidad de propagación de ondas

La velocidad con la que se propaga una onda varía en función de la elasticidad del medio. Cuanto más elástico y más denso es el medio, mayor es la velocidad de propagación de la onda, tal y como queda establecido por las leyes de la elasticidad. El módulo de Young es directamente proporcional al módulo restringido el cual es también directamente proporcional a la densidad.

$$E = \frac{M(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{ec. 7})$$

$$M = V^2 \times \rho \quad (\text{ec. 6})$$

Con los resultados obtenidos se puede ver que esta ley se cumple. La velocidad de propagación y el módulo de elasticidad (E) tiende a aumentar a medida que aumenta la densidad ($D3 > D2 > D1$), hecho que se puede contrastar en la Figura 8.2.1, Figura 8.2.2., Figura 8.2.3 y en la Figura 8.2.4 Tan solo los valores de la velocidad para las muestras de densidad D3 y espesor E2 bajan respecto a las demás, hecho a tener en cuenta para las conclusiones.

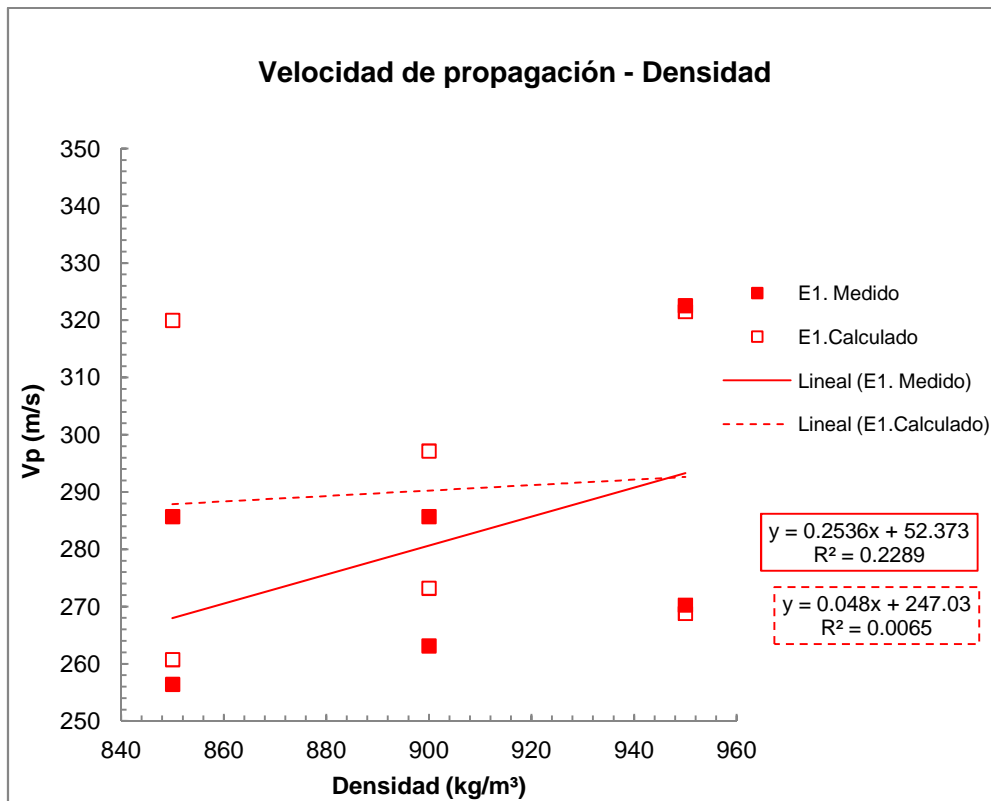


Figura 8.2.1. Gráfico de velocidad de propagación en función de la densidad de las muestras E1

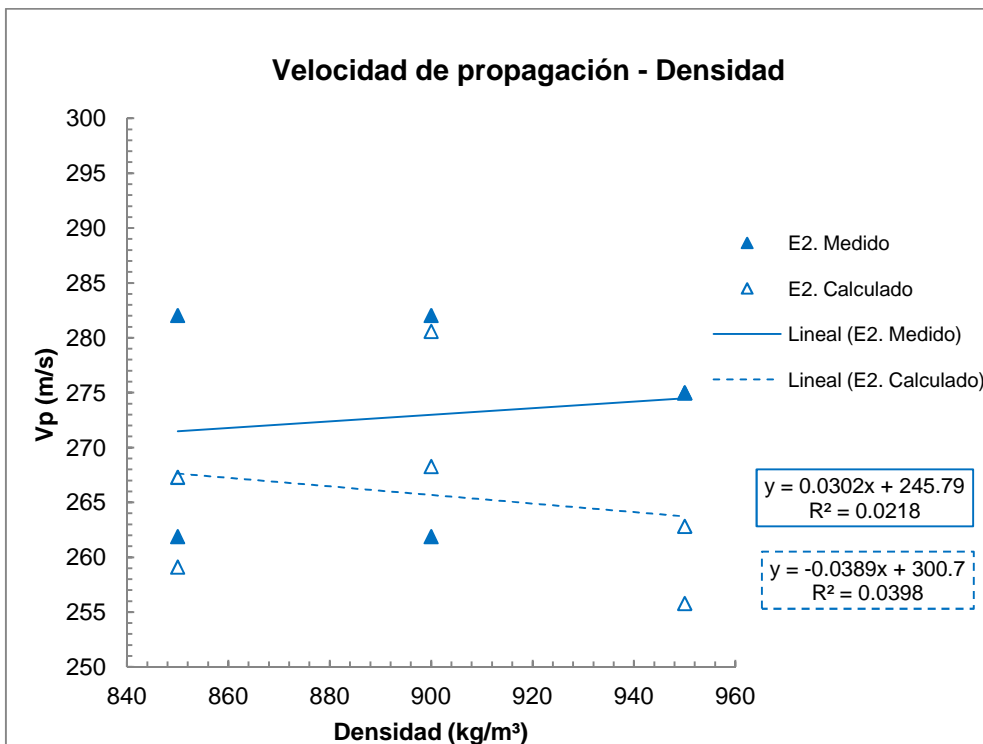


Figura 8.2.2. Gráfico de velocidad de propagación en función de la densidad de las muestras E2

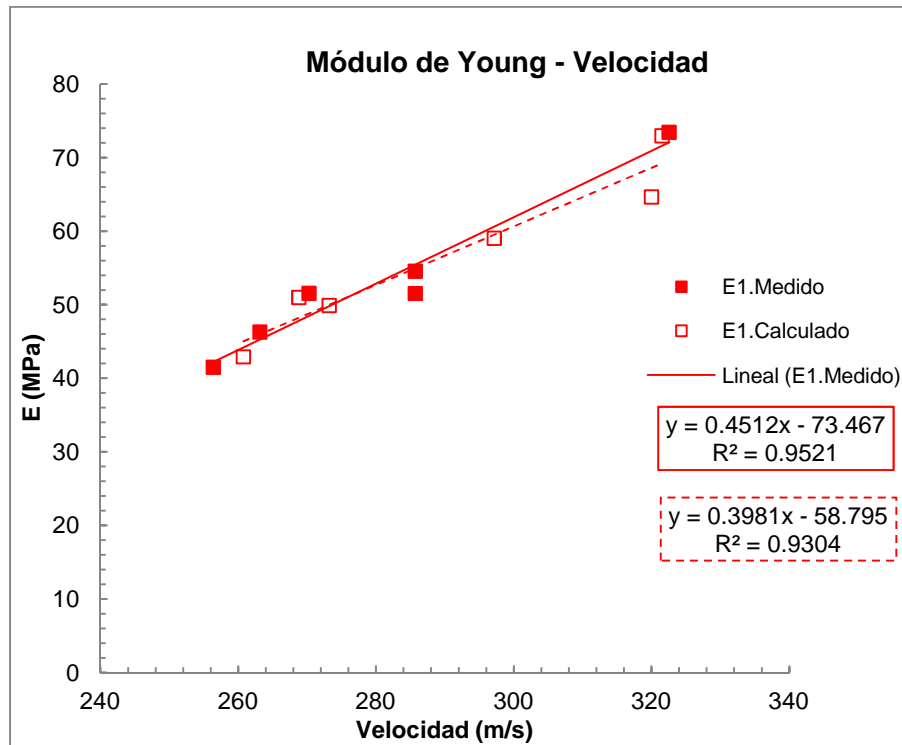


Figura 8.2.3. Módulo de Young en función de la velocidad de propagación de onda para espesor E1.

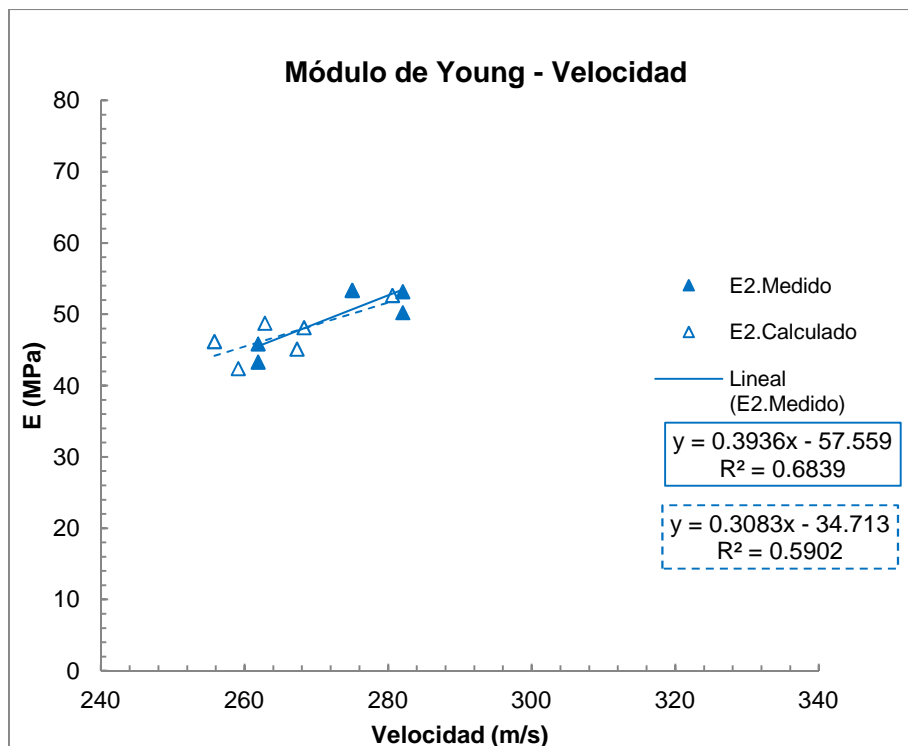


Figura 8.2.4. Módulo de Young en función de la velocidad de propagación de onda para espesor E2.

Los resultados del módulo de Young de estos materiales se calcularon de manera directa (midiendo el tiempo de propagación de la onda cuando viaja a través de las dos capas y aplicando la ecuación 5) y de manera teórica (midiendo el tiempo de propagación de la onda por cada del material individualmente y aplicando las ecuaciones 4, 6 y 7). Se denominan módulo de Young "Medido" y módulo de Young "Calculado" respectivamente.

Entre los materiales de la misma densidad, la onda se propaga de manera más rápida en aquellos cuyo tamaño de grano de reciclado de caucho es mayor, es decir con granulometría G2 (4-8 mm). Tan solo existe desviación en los resultados de las muestras E2D3G1 y E2D3G2, donde ya anteriormente varían en respeto a las tendencias generales. Estos valores se pueden comprobar en los gráficos de las Figuras Figura 8.2.5 y Figura 8.2.6. donde se ve que las muestras de G2 tienen mayor E (con lo cual mayor velocidad).

Por lo que respecta al espesor, no se ve que afecte a la velocidad de propagación.

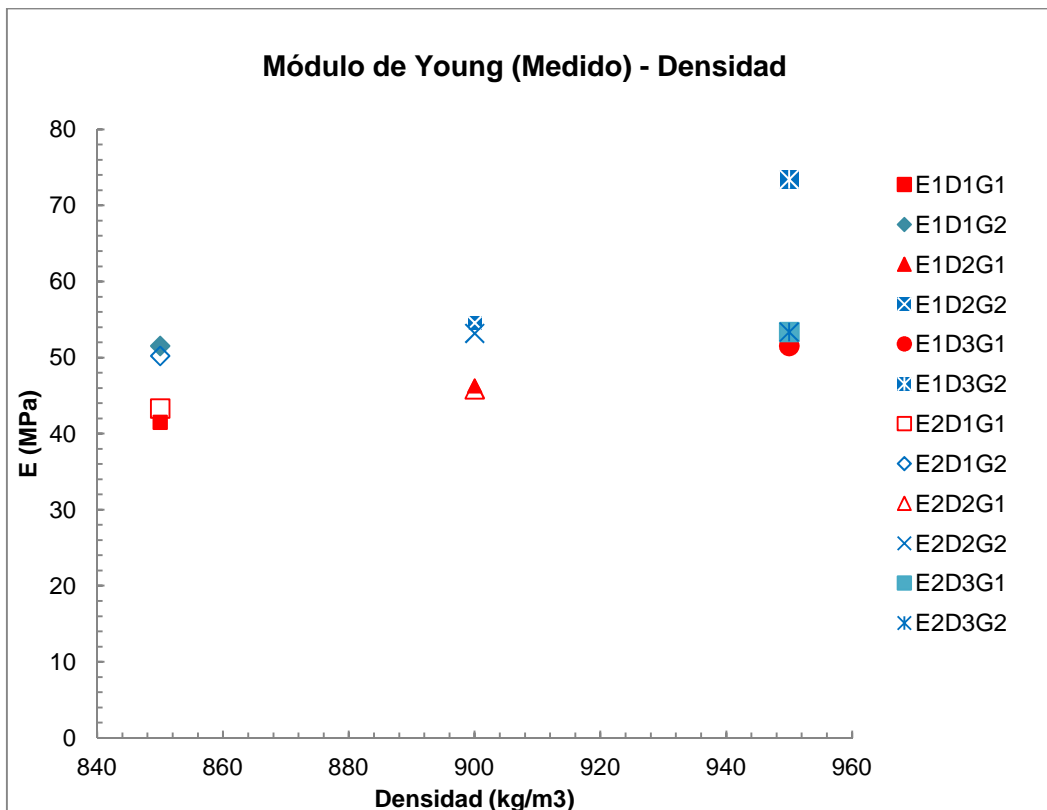


Figura 8.2.5. Módulo de Young Medido en función de la densidad.

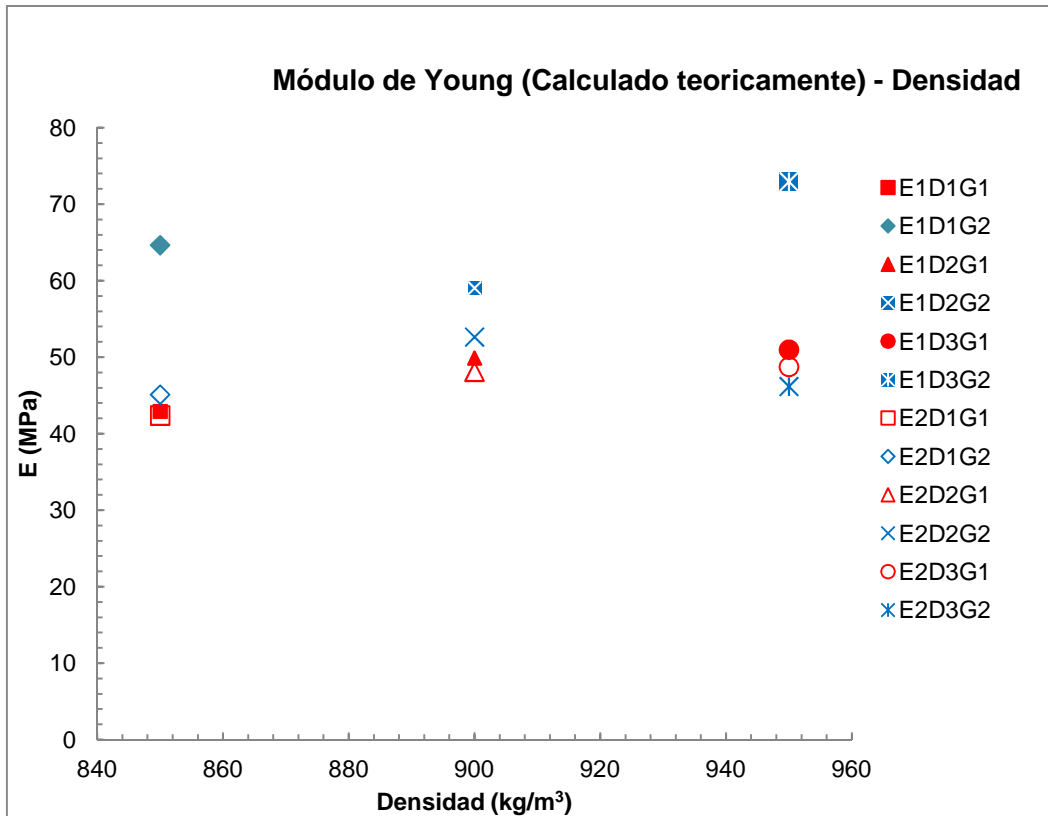


Figura 8.2.6. Módulo de Young Calculado en función de la densidad.

8.3 Frecuencia natural de vibración y amortiguamiento obtenidos por el ensayo de viga en voladizo

Respecto a la frecuencia natural de vibración, se comprueba que en todas las muestras la frecuencia natural de vibración va aumentando a medida que disminuye la longitud del voladizo, es decir, el número de ciclos por segundo es mayor ya que la amplitud disminuye si se tiene una menor longitud de viga.

Asimismo, cabe destacar que existe una clara diferencia entre la frecuencia de vibración de las vigas que se encuentran en la posición 1 y las que se encuentran en la posición 2 de este ensayo. Esta diferencia se puede observar en los dos siguientes gráficos (Figura 8.3.2 y Figura 8.3.3) donde la posición 1 queda definida como -1 y la posición 2 queda definida como-2.

Se puede observar que en las probetas de menor espesor (E1) la frecuencia natural de vibración aumenta en la posición 2 respecto a la posición 1 cuando la longitud de voladizo va de 30 a 50 mm. En mayores longitudes los valores empiezan a igualarse. Sin embargo, esta tendencia no ocurre con las probetas de espesor E2. Dada que la única diferencia entre los materiales es su colocación a la hora de realizar el ensayo, una posible causa de este comportamiento puede ser la posición del centro de gravedad. Al poseer dos materiales distintos, el centro de gravedad de la sección de la muestra en la posición 2 se encuentra desplazado hacia la izquierda respecto a la dirección de la fuerza de impacto, de modo que el momento de inercia es mayor y la estabilidad es menor. Sin embargo, en la posición 1, el centro de gravedad se encuentra en la misma línea de dirección de la fuerza tal y como se demuestra en la siguiente figura, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En la posición 2 (donde la fuerza de impacto es paralela a la capa superficial de caucho) el material muestra un comportamiento menos rígido y es capaz de vibrar de manera más rápida. En caso contrario, en la posición 1, la viga vibra con menos intensidad.

Otra posible causa de que el material muestre mayor frecuencia de vibración en la posición 2 puede ser el factor humano. La fuerza aplicada no es totalmente constante ya que se trata de un impacto manual. Esta misma razón podría explicar que en los materiales de espesor E2 el comportamiento sea distinto.

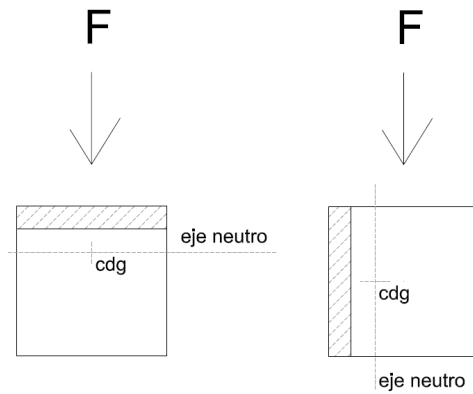


Figura 8.3.1. Situación del centro de gravedad respecto a la fuerza aplicada en las probetas.

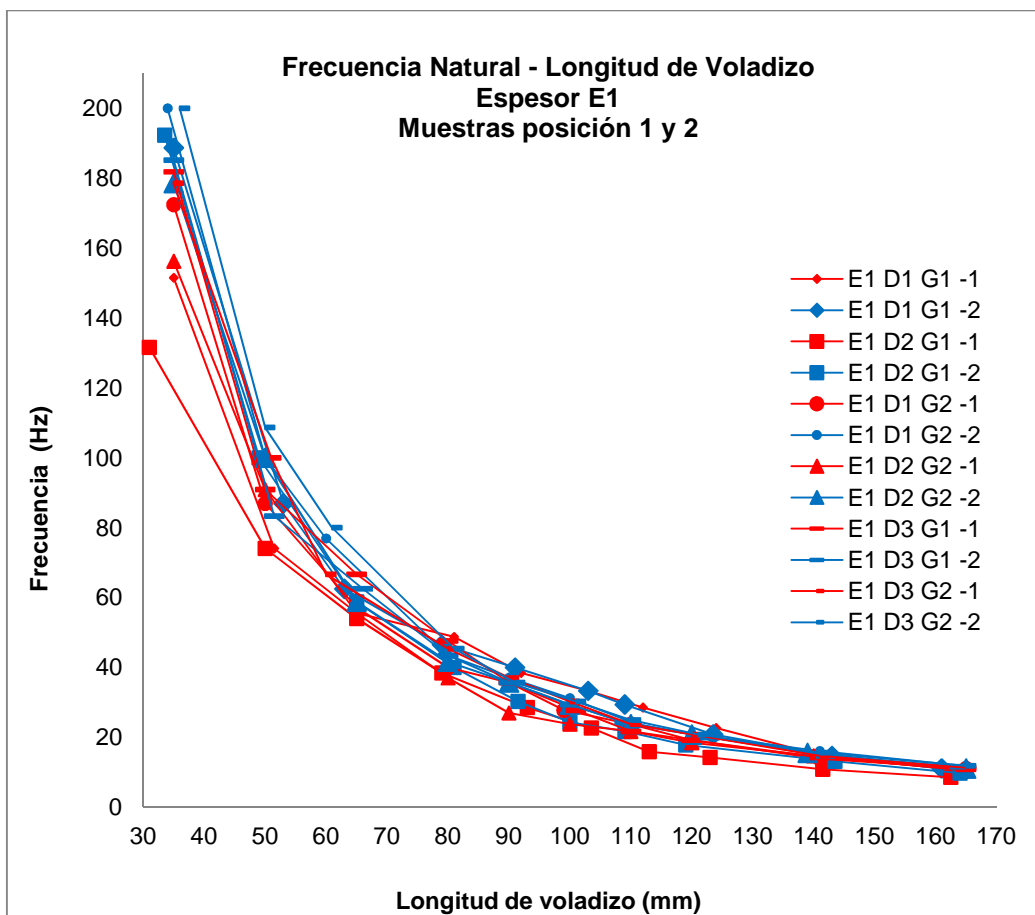


Figura 8.3.2. Frecuencia natural de vibración en función de la longitud del voladizo para muestras de espesor E1 en ambas posiciones, 1 y 2.

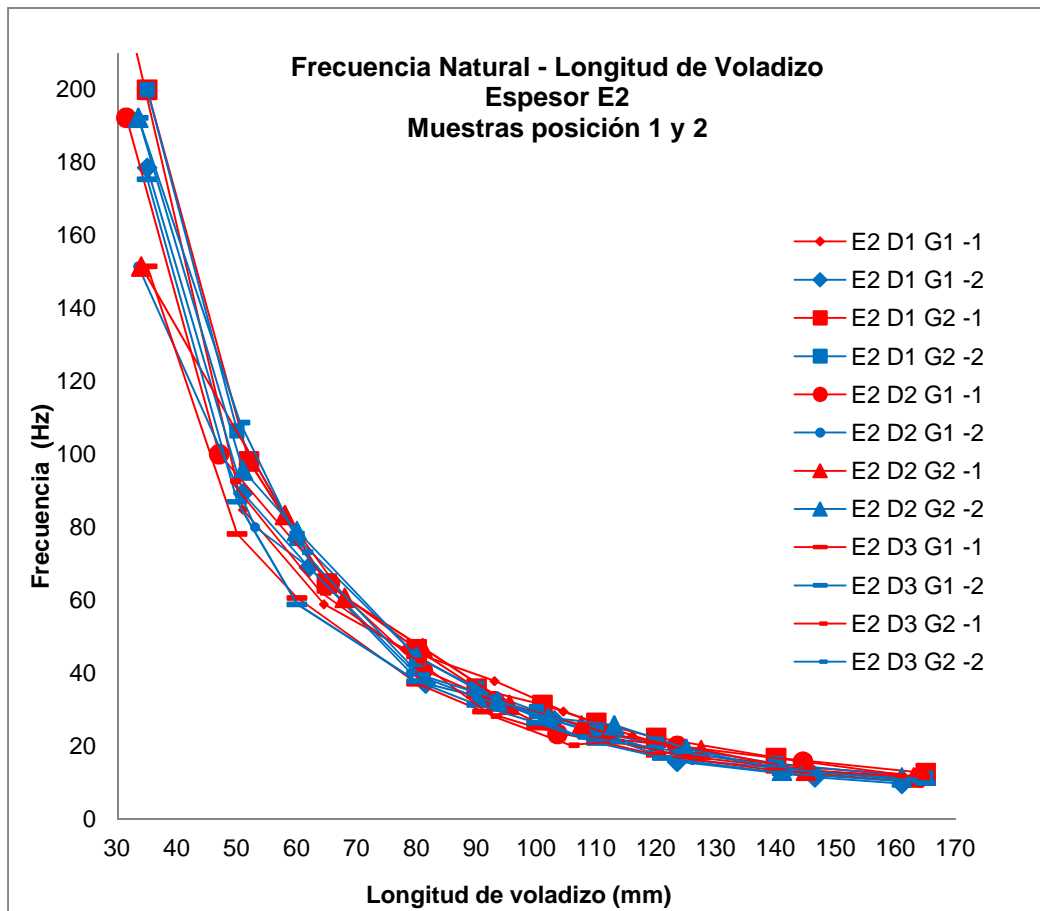


Figura 8.3.3 Frecuencia natural de vibración en función de la longitud del voladizo para muestras de espesor E2 en ambas posiciones, 1 y 2.

Respecto al amortiguamiento obtenido mediante la ecuación 8 ($\zeta = \frac{(f_b^2 - f_a^2)}{4 \times f_0^2}$) se puede observar que a medida que la longitud de voladizo disminuye, el amortiguamiento tiende a aumentar ya que se comporta como una fuerza opuesta a la velocidad de propagación de la onda y por lo tanto provoca la disminución de la energía y amplitud de la onda con el tiempo. Tan solo en algunos casos el amortiguamiento disminuye o se mantiene al incrementar el voladizo, pero esto se debe a las pequeñas variaciones de la fuerza de impacto. Además, según define la ecuación ya mencionada, el amortiguamiento es menor a medida que la frecuencia natural es mayor (situada en el denominador) hecho que influye también en $(f_b - f_a)$ porque las bajas frecuencias tienen mayor longitud de onda y por lo tanto la distancia entre f_b y f_a es mayor.

Entre todas las muestras, aquellas que mayor amortiguamiento muestran en todas las longitudes de voladizo tanto en posición 1 como en posición 2, son la E1D2G2 y la E2D2G1.

Respecto a las posiciones 1 y 2, que la muestra esté colocada de una forma u otra no afecta en gran medida al amortiguamiento. En las muestras de espesor E1 cuya longitud de voladizo está entre 30 y 35 mm , el porcentaje medio de amortiguamiento aumenta un poco en la posición 2, mientras que en las muestras de espesor E2, el porcentaje de amortiguamiento disminuye en la posición 2.

8.4 Rigidez dinámica y parámetros derivados de ella

El valor de la rigidez dinámica indica la atenuación sonora al impacto que proporciona un material. Cuanto menor es su valor, mayor es el aislamiento acústico al impacto. De modo que interesa conocer cuál de los materiales ofrece una rigidez dinámica (s') más baja.

Con los valores obtenidos, se ve que el valor más bajo lo poseen el material E1D3G2 (con 30,06 MN/m³) y el E2D1G2 (con 29,16 MN/m³) como así se ve en la Figura 8.4.1. Gráfico de rigidez dinámica en función de la densidad los materiales. Figura 8.4.1. Como se observa, la posición afecta al resultado.

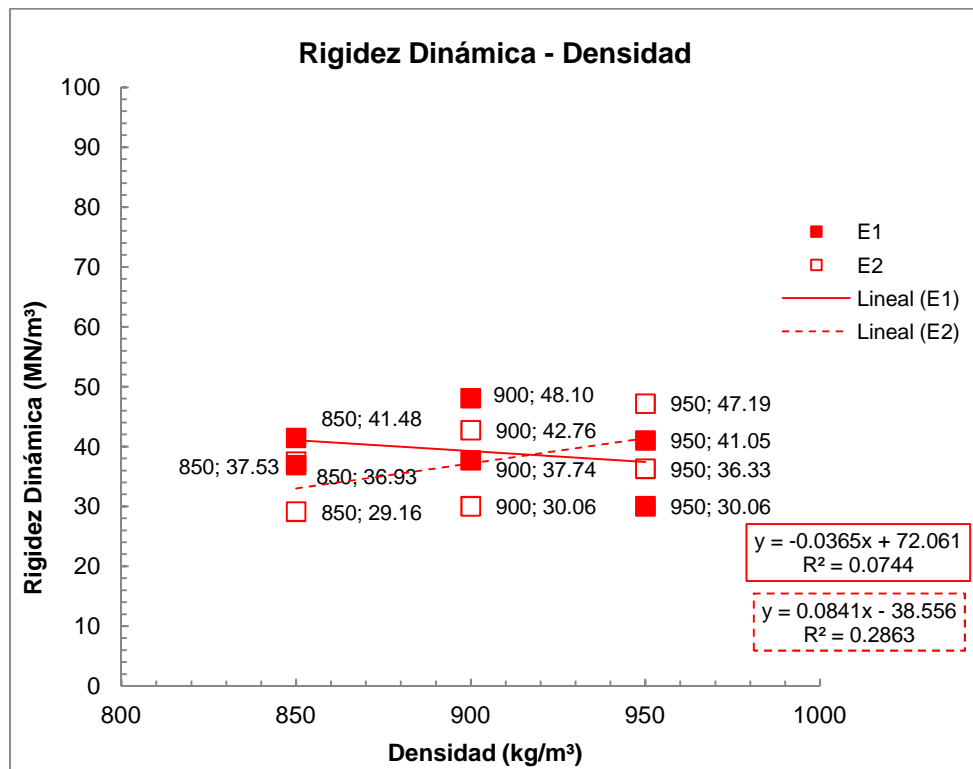


Figura 8.4.1. Gráfico de rigidez dinámica en función de la densidad los materiales.

Respecto al espesor, se sabe de antemano que con materiales de iguales características, la S' es menor con mayor espesor tal y como ocurre en la mayoría de los materiales ensayados. Algunos no cumplen esta condición debido a la anisotropía del material.

Cabe destacar que los menores valores de s' se obtienen con las densidades D1 y D3 y con la granulometría G2. La razón que explica que ocurra con la G2 está directamente relacionada con el tamaño de poros, con poros más grandes, las zonas de amortiguamiento son más grandes también. Respecto a las densidades, cuanto más denso es el material más alta es la S' , dos de los valores más bajos de S' tienen lugar con D3 ($0,95 \text{ g/cm}^3$). La razón de ello se puede establecer más adelante al comparar los resultados de amortiguamiento y módulo elástico.

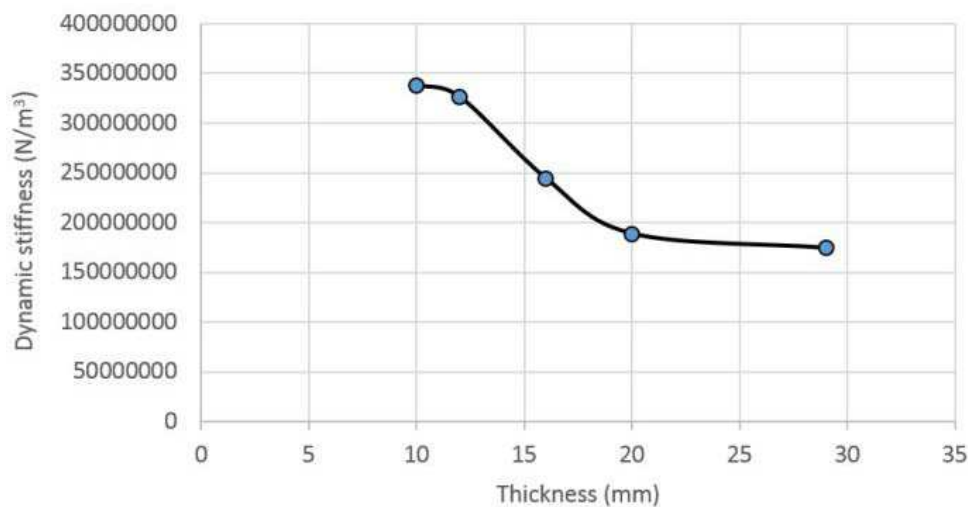


Figura 8.4.2. Rigidez dinámica en función del espesor de placas de EVA [34].

Realizando una comparativa con Etilvinilacetato (EVA), material habitualmente colocado en instalaciones deportivas o zonas anti-impacto, como se ve en la Figura 8.4.2, con espesores de 20 mm y 300 kg/m^3 de densidad se obtiene una rigidez dinámica de alrededor de los 200 MN/m^3 [34], valor mucho más alto que todos los obtenidos con las muestras de caucho, donde los valores más altos (y por lo tanto peores en cuanto a comportamiento acústico) son $48,10 \text{ MN/m}^3$ para una densidad de 900 kg/m^3 y $43,63 \text{ MN/m}^3$ para una densidad de 850 kg/m^3 , respectivamente. Con estos datos se puede ver que para un mismo espesor, los mejores resultados se obtienen con el caucho, a pesar de tener mayor densidad. El porqué de este comportamiento se debe a las diferencias de la estructura interna de cada material. El EVA es un material poroso de célula pequeña cerrada (microporos), mientras que los compuestos de caucho granular poseen tanto poros cerrados como abiertos de mayor

tamaño (de milímetros), hecho que condiciona en gran medida al comportamiento al impacto.

8.4.1 Módulo de Young

Los resultados obtenidos del módulo de Young por la rigidez dinámica son mucho más pequeños que los que se obtienen por flexión de viga en voladizo, viga en voladizo bajo impacto y ultrasonidos, aspecto que se comenta más adelante en el apartado 8.6.

8.4.2 Reducción del sonido al impacto

La reducción del nivel de presión de ruido a impacto indica la diferencia de presión sonora que existe entre dos recintos separados por un material con características de reducción de nivel de impacto. Este valor es significativo para conocer en decibelios la cantidad de ruido que es absorbido por el material.

A mayor diferencia de presión, mayor absorción acústica. Tal y como se aprecia en la Tabla 7.4.3, los materiales de mayor espesor E2 son los que en general mayor reducción acústica ofrecen, como queda de manifiesto en la gráfica Figura 8.4.3.

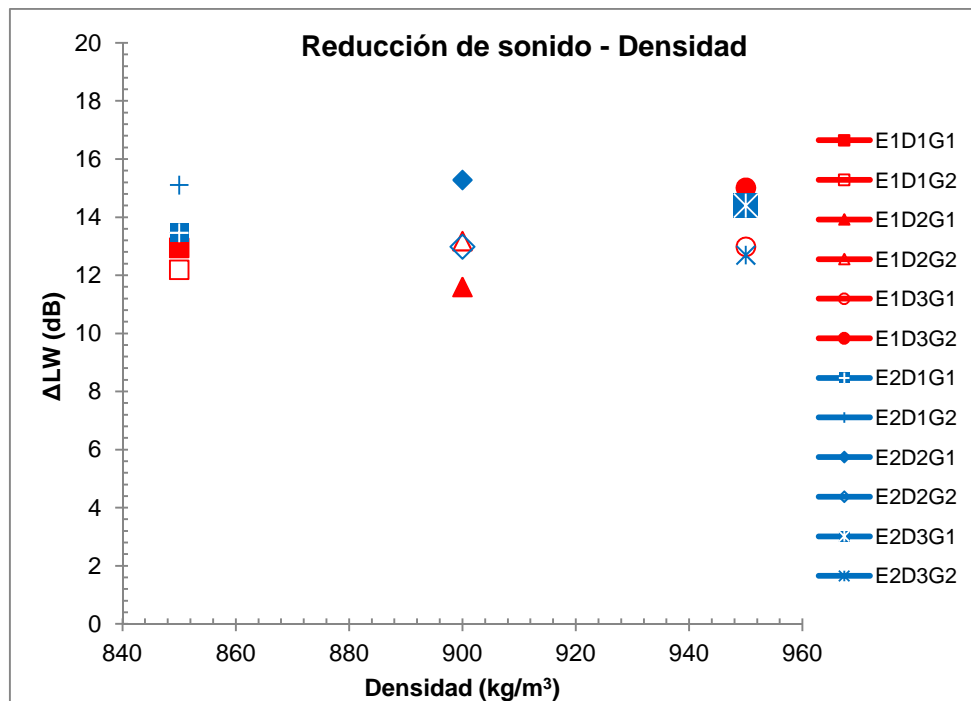


Figura 8.4.3. Gráfico reducción de sonido según la densidad de los materiales.

Entre todos los materiales el E2D1G2 y el E1D3G2 son los que mayor reducción acústica muestran con 15,11 y 15,01 dB.

8.5 Ensayo de cargas cíclicas. Compresión Uniaxial Dinámica

Los resultados obtenidos por el ensayo de cargas cíclicas demuestran el comportamiento amortiguador de cada material frente compresión uniaxial dinámica. Como se puede ver en los siguientes gráficos, **¡Error! No se encuentra el origen de a referencia.** y Figura 8.5.3, los materiales de espesor E1 manifiestan mayor amortiguamiento a velocidad 1%/min que 40%/min, efecto que no tiene lugar en los de espesor E2.

En el caso de 250 ciclos, Figura 8.5.2 y Figura 8.5.4, con espesor E1 el amortiguamiento tiende a bajar respecto a 25 ciclos a la misma velocidad. El material a 40%/min no tiene suficiente tiempo para recuperarse por completo (efecto de la fluencia en los viscoelásticos) y va perdiendo la capacidad amortiguadora. Este fenómeno también se ve menos pronunciado con espesor E2.

Respecto a los valores más altos, los materiales E1D2G2 y E2D2G2 son los que más amortiguan a 1%/min. Por otro lado, a 40%/min los mayores valores se encuentran entre los materiales de densidad D2.

Por último, respecto a las diferencias entre los espesores, vistas las modas de porcentaje de amortiguamiento, el E2 es el que da un valor moda más elevado a velocidad 40%/min. Existe una pequeña tendencia a aumentar el amortiguamiento si se aumenta el espesor y si se usa la densidad D2, suposiciones que deber de ser estudiadas con más profundidad en posibles estudios posteriores.

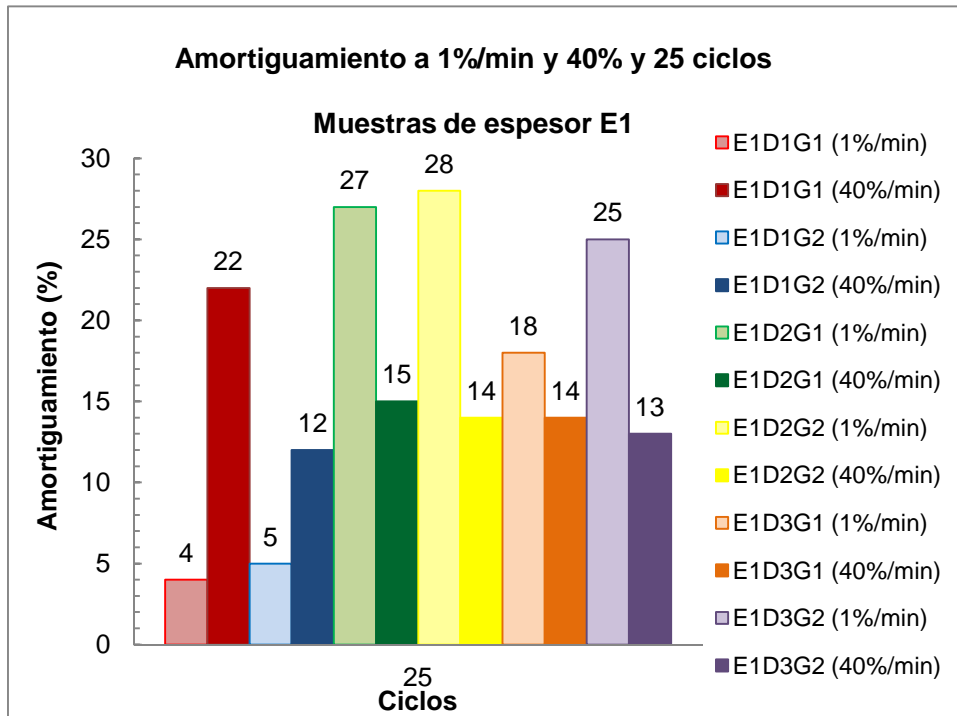


Figura 8.5.1. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 25 ciclos a 1%/min y 40%/min para muestras de espesor E1.

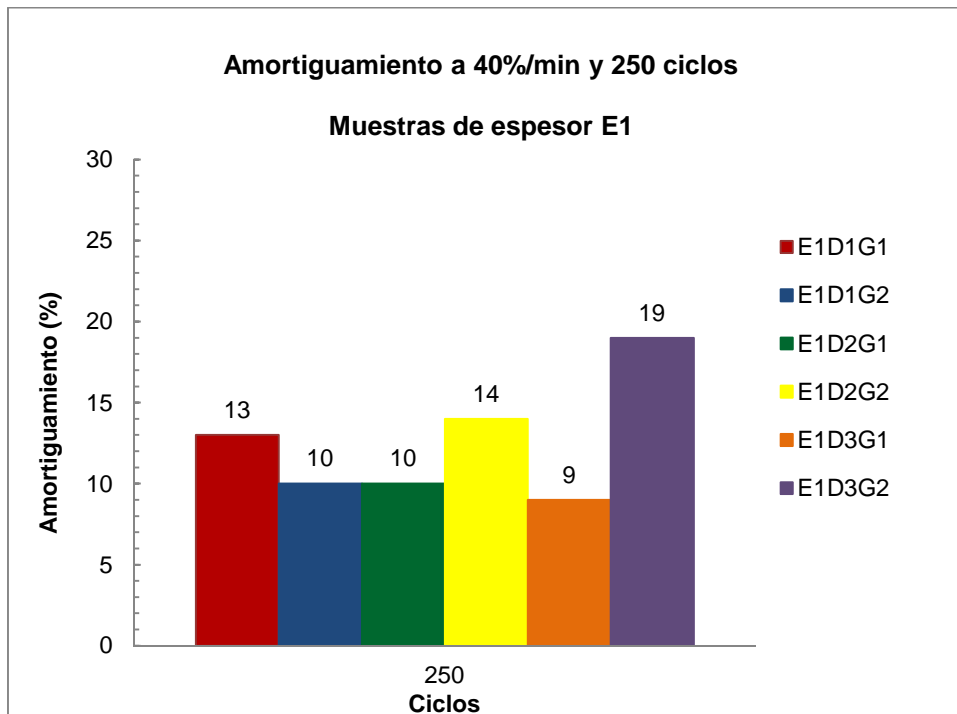


Figura 8.5.2. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 250 ciclos a 40%/min para muestras de espesor E1.

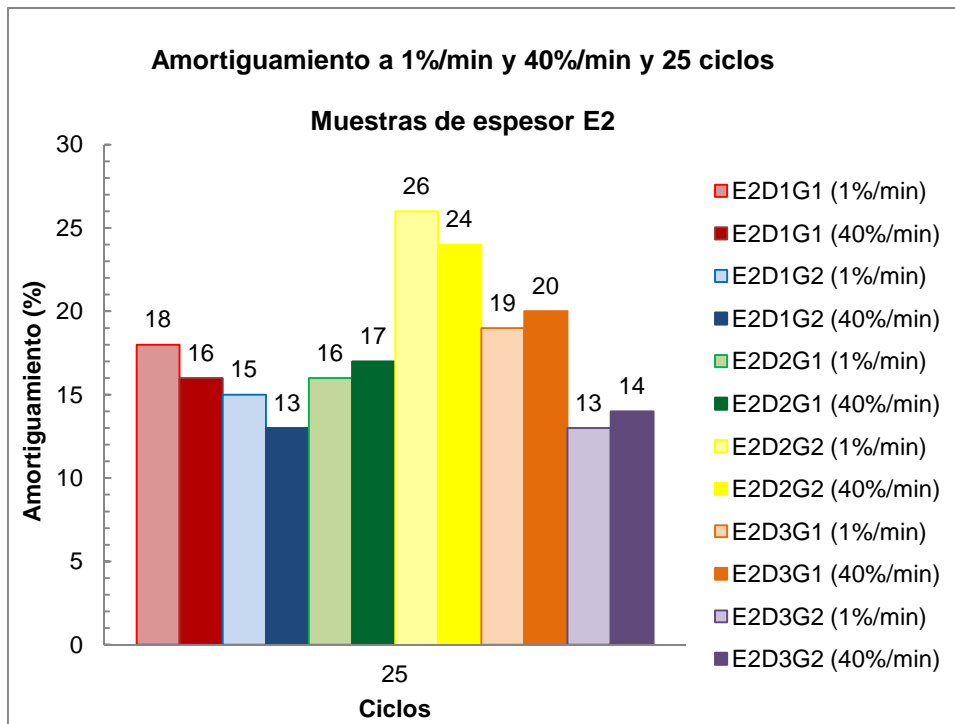


Figura 8.5.3. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 25 ciclos a 1%/min y 40%/min para muestras de espesor E2.

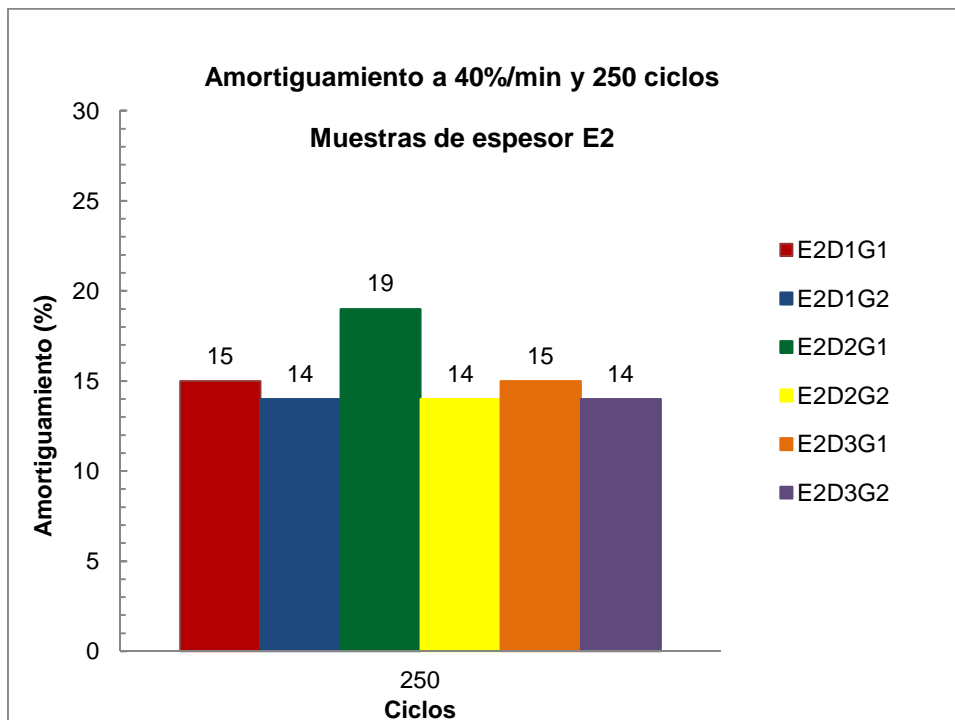


Figura 8.5.4. Amortiguamiento a ciclos de compresión uniaxial dinámica: 250 ciclos a 40%/min para muestras de espesor E2.

8.6 Ensayo mecánico de flexión de viga en voladizo

Tras obtener el módulo de Young por flexión de la viga en voladizo (ensayo pseudoestático), se observa que el valor es mucho menor que el que se ha obtenido anteriormente por rigidez dinámica, flexión de viga en voladizo bajo un impacto o ultrasonidos. A continuación se muestra una gráfica (**¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia.**) donde se comparan todos estos resultados. Se adjunta también dos tablas (Tabla 8.6.1 y Tabla 8.6.2) donde aparecen los valores en forma numérica del módulo de Young y la frecuencia de excitación en cada uno de los ensayos. De esta manera se pretende mostrar el orden de magnitud de cada resultado.

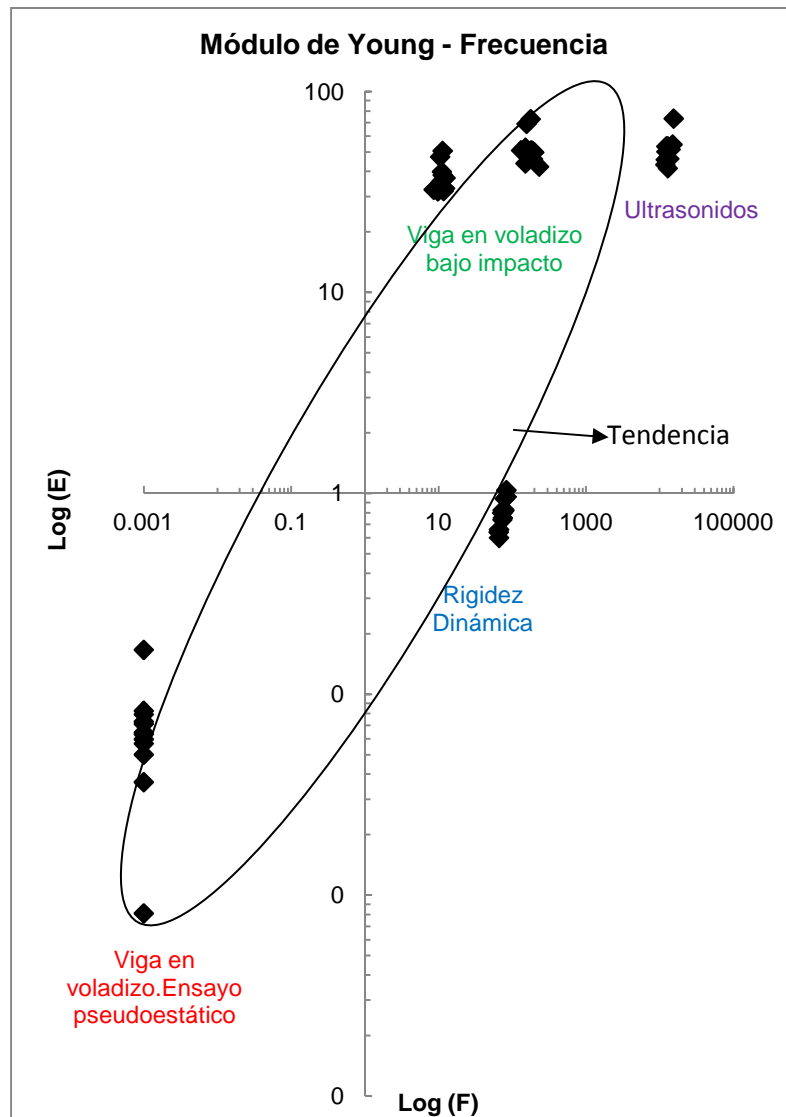


Figura 8.6.1. Módulo de Young según la frecuencia de excitación del ensayo.

Tabla 8.6.1. Comparativa numérica del módulo de Young en función de la frecuencia de excitación. Ensayo pseudoestático y rigidez dinámica.

MUESTRAS	TEST PSEUDOESTÁTICO		RIGIDEZ DINÁMICA	
	F (Hz)	E (MPa)	F (Hz)	E (MPa)
E1D1G1	10 ⁻³	0,01	73,6	0,74
E1D1G2	10 ⁻³	0,08	78	0,83
E1D2G1	10 ⁻³	0,04	84	0,96

E1D2G2	10^{-3}	0,06	74,4	0,75
E1D3G1	10^{-3}	0,05	77,6	0,82
E1D3G2	10^{-3}	0,08	66,4	0,60
E2D1G1	10^{-3}	0,06	74,2	0,83
E2D1G2	10^{-3}	0,07	65,4	0,64
E2D2G1	10^{-3}	0,06	66,4	0,66
E2D2G2	10^{-3}	0,07	79,2	0,94
E2D3G1	10^{-3}	0,17	73	0,80
E2D3G2	10^{-3}	0,06	83,2	1,04

Tabla 8.6.2. Comparativa numérica del módulo de Young en función de la frecuencia de excitación. Ensayo de viga en voladizo bajo un impacto y ultrasonidos..

MUESTRAS	VIGA EN VOLADIZO BAJO IMPACTO				ULTRASONIDOS	
	F (Hz)	E (MPa)	F (Hz)	E (MPa)	F (Hz)	E (MPa)
E1D1G1	11,11	43,96	151,52	32,90	12953,37	41,51
E1D1G2	11,11	50,53	172,41	39,93	14124,29	51,55
E1D2G1	8,62	51,02	131,58	32,54	13513,51	46,30
E1D2G2	10,53	69,12	156,25	47,31	15060,24	54,58
E1D3G1	10,87	51,13	181,82	35,50	13513,51	51,55
E1D3G2	11,36	72,96	178,57	50,67	15527,95	73,44
E2D1G1	12,19	42,30	232,56	32,99	11961,72	43,31
E2D1G2	12,50	49,85	200,00	37,18	12315,27	50,23
E2D2G1	11,36	50,56	192,31	38,39	12077,29	45,86
E2D2G2	11,36	52,65	151,52	36,24	12755,1	53,19
E2D3G1	9,80	48,76	151,51	31,87	12315,2709	53,37
E2D3G2	11,74	46,18	192,31	32,04	12886,5979	53,37

Tal y como se puede ver, el material se comporta diferente según el grado de excitación al que se somete. Bajo cargas pseudoestáticas el módulo de Young da una magnitud de 10^{-2} y bajo cargas dinámicas, dependiendo de la frecuencia de excitación puede dar resultados del orden de 10^{-1} (como resulta con el ensayo de rigidez dinámica), puede dar valores que rondan generalmente los 32 MPa o 50 MPa (como ocurre con la viga en voladizo con distintas longitudes bajo un impacto) o puede alcanzar los 73 MPa con frecuencias altas de ultrasonidos.

Esto significa que los materiales multicapa de distintos tipo de caucho, entre ellos uno reciclado granular, no tienen un módulo elástico de Young totalmente definido. Su

estructura interna y su composición hacen que el material en su conjunto reaccione de distinto modo si se le aplican cargas estáticas o dinámicas. Y en el caso de cargas dinámicas varía si son frecuencias altas o bajas. Este es un comportamiento típico de materiales viscoelásticos lineales o también conocidos como materiales de "corta memoria". El modelo Kelvin-Voigt define este comportamiento. Este modelo se representa con un muelle y un amortiguador de manera que al ejercer una carga la energía suministrada se almacena en el muelle y el resto se disipa a través del amortiguador. Al cesar la carga la energía almacenada en el muelle hace que recupere la forma original pero no total ya que parte se pierde por el amortiguador [97]. Así es como actúan los materiales que trata este proyecto, bajo tensiones constantes no muy elevadas el material se deforma de manera lenta y progresiva y cuando se eliminan las tensiones, el material se relaja volviendo a su estado original no deformado.

La ecuación que define el modelo de Kelvin Voigt es la siguiente:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{ec. 14})$$

Donde: σ = Tensión

E = Módulo de Young del muelle

ε = Deformación

η = Viscosidad del amortiguador

t = Tiempo

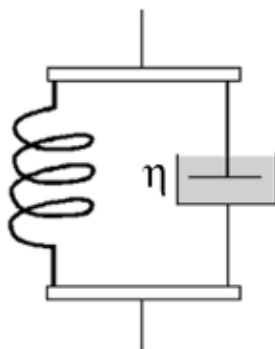


Figura 8.6.2. Representación esquemática del modelo de Kelvin Voigt [98].

Con la tendencia que describen los datos de cada ensayo, queda de manifiesto que a mayores frecuencias de excitación, mayor es el módulo de Young tal y como ocurre con los materiales típicos viscoelásticos definidos por Kelvin-Voigt. En otras palabras, menor elasticidad ofrece el material y por lo tanto menor amortiguamiento, hecho que se puede contrastar en la Tabla 7.5.1. donde el amortiguamiento es menor cuando se aplica una velocidad de deformación mayor (más ciclos por minuto, frecuencia más alta).

9 Conclusiones

Para finalizar este trabajo Fin de Máster este apartado se destina a las conclusiones. Tras el desarrollo de una serie de ensayos de caracterización dinámica de los 12 materiales distintos que se estudiaron, se obtuvo un gran abanico de resultados los cuales permiten conocer cuál es el material más adecuado para ser instalado como pavimento en una sala de *fitness*. Además, se pueden conocer cuáles son las ventajas de este material frente a otro tipo de pavimento comúnmente utilizado en el mismo tipo de instalación deportiva, el EVA. Por último, puede establecerse también un modelo de comportamiento dinámico para pavimentos multicapa compuestos principalmente de caucho granular reciclado.

Entre los 12 distintos tipos de pavimento de caucho que se estudian, las características que diferencian un material de otro son el espesor (E1, E2), la densidad (D1, D2, D3) y la granulometría (G1, G2). De entre todos ellos, aquel que está compuesto por E2D2G2 es el que mejores prestaciones ofrece para aislar al impacto y amortiguarlo, requisito principal en una sala de *fitness*. El E2D2G2 no es el material que ha mostrado el mejor resultado en cada uno de los ensayos realizados por separado, pero sí es el que mejor cumple considerando todos los ensayos.

El espesor E2 resultó ser el que mayor reducción de presión sonora demostraba, así como el espesor que más amortiguaba en el ensayo de cargas uniaxiales cíclicas. Por otro lado, la densidad D2 fue la densidad que más amortiguaba en el ensayo de viga en voladizo y el de cargas cíclicas a altas velocidades de deformación. Y en cuanto a la granulometría, la G2 es la que menor rigidez dinámica mostró y con ello mayor reducción sonora al impacto, además de un mayor amortiguamiento a velocidades bajas de deformación bajo esfuerzos cíclicos. La combinación de todos estos parámetros da lugar a la elección del E2D2G2 como el material que cumple con el objetivo principal de esta tesina.

Satisfaciendo el segundo de los objetivos de este trabajo a continuación se realiza una comparativa entre el comportamiento dinámico al impacto del EVA y el material de caucho granular reciclado seleccionado como el más adecuado para suelo de *fitness*. Se ha podido comprobar que con planchas del mismo espesor, la rigidez dinámica es más baja en todos los materiales de caucho a pesar de tener mayor densidad. En el caso de E2D2G2, con una densidad de 900 kg/m^3 y una rigidez dinámica de 42,76

MN/m^3 , hay una diferencia de $157,24 \text{ MN/m}^3$ ya que el EVA alcanza los 200 MN/m^3 para una densidad 3 veces menor (300 kg/m^3). Esto supone una gran ventaja para los materiales de caucho frente al EVA tradicional, de modo que se podría considerar como un futuro sustituto en pavimentos técnicos que requieren de aislamiento acústico al impacto.

Llegado a este punto, tras todo el proceso de caracterización de los materiales multicapa de caucho granular reciclado se puede ver que se trata de un material que elásticamente varía con la frecuencia a la que se excita. No tiene un comportamiento uniforme. A mayores frecuencias se comporta de forma más rígida y por consiguiente, a menores frecuencias se comporta de manera más elástica.

El comportamiento bajo distintas frecuencias se puede predecir con el gráfico modelo de tipo Kelvin- Voigt desarrollado en el apartado 8.6 de este proyecto (Figura 8.6.1). En él se relaciona la frecuencia de vibración con el módulo de Young. Mediante este gráfico se puede deducir de manera aproximativa cómo se comportará elásticamente otro material de iguales características en un rango de frecuencias que va desde 0 a 15.500 Hz es decir, prácticamente dentro del espectro audible el cual va de los 20 Hz a los 20.000 Hz .

Conclusions

In order to finish this Master's Thesis, this section is allocated to conclusions. After some dynamical characterization tests carried out in all 12 different materials studied a wide range of results were obtained. These results reveal the most suitable material to be installed as a fitness room pavement. Furthermore, advantages of this material over another pavement commonly used in the same type of exercising room (the EVA), can be known. Finally, it can be established the pattern of the dynamical behavior of bilayer pavements mainly composed by granular recycled rubber.

Among the 12 different types of rubber pavements studied, the characteristics that define each one are thickness (E1, E2), density (D1, D2, D3) and granulometry (G1, G2). Amongst all of them, the material composed by E2D2G2 is the one that better performances shows for impact and sound isolation, fundamental requirement for a fitness room. E2D2G2 has not shown the best result in every independent test, but it is the one that best meets the requirements taking into consideration all of them.

E2 thickness exhibited the higher sound pressure reduction and the one of higher damping in the cyclic uniaxial loading test. On the other side, density D2 damped more in the cantilever beam test as well as in high strain rate during the cyclic loads test. Regarding to granulometry, G2 had the lowest results in dynamic stiffness and consequently, a higher impact sound reduction. In addition to it, it showed higher damping in low strain rates during cyclic loads test. The combination of all these parameters turns out to choose E2D2G2 as the material that best satisfies the main objective of this thesis.

Fulfilling the second objective of this project, it is done a comparison of the impact behavior between EVA and the granular rubber composite material chosen as the most appropriate for fitness flooring. This comparison demonstrates that using plates of the same thickness, dynamic stiffness is lower in every rubber material, despite of having higher density. In the case of E2D2G2, with a density of 900 kg/m^3 and a dynamic stiffness of $42,76 \text{ MN/m}^3$, there is a dynamic stiffness difference of $157,24 \text{ MN/m}^3$ because EVA reaches 200 MN/m^3 with a density 3 times smaller (300 kg/m^3). This implies a big advantage for rubber materials composites against the traditional EVA. So, they could be considered as a future substitutes in technical floors that require impact sound isolation.

At this point, after the characterization of granular recycled rubber bilayer materials, it can be seen that they are composites that elastically vary with the frequency of excitation. They do not have a uniform behavior. They entail higher stiffness in higher frequencies and therefore, they are more elastic in lower frequencies.

Under different frequencies, the elastic performance can be predicted with the Kelvin-Voigt model graph that appears in the section 8.6 of this project (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). This graph shows a relation between Young's modulus and the vibration frequency. The deduction of the elastic behavior of another material with the same characteristics between a frequency range that goes from 0 Hz to 15.500 Hz (nearly within the audible spectrum that is 20 Hz - 20.000Hz), is possible.

10 Líneas de Trabajo Futuras

Los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se han llegado tras desarrollar la presente tesina de máster, dan pie a un amplio abanico de posibles futuras líneas de investigación. En este apartado se presentan algunas de ellas:

Tras conocer cómo afectan los parámetros de espesor, densidad y granulometría a las propiedades dinámicas y acústicas de un pavimento de caucho mayormente reciclado e instalado en una sala de *fitness*, donde coexisten muchas ondas de distintas frecuencias debido a la música, los golpes, el movimiento de las máquinas, el movimiento de los usuarios, las voces, etc., y conociendo también que el mejor resultado de todas las series ensayadas lo ofrece el material de mayor espesor, densidad media y mayor granulometría, el siguiente paso sería profundizar en el estudio de un mismo material que fuese lo más ligero posible para facilitar su transporte y colocación, aspecto que no se ha tenido en cuenta en este trabajo de investigación. La ligereza es un parámetro que al añadirlo daría como resulta un producto de mayor calidad y por tanto un producto más competitivo en el mercado, aspecto que aporta beneficios a nivel empresarial.

A nivel científico, este proyecto deja líneas abiertas para futuras investigaciones en la realización y mejora de modelos de predicción del comportamiento elástico-dinámico de materiales multicapa de caucho, tanto reciclado como de primer uso. Un conocimiento más detallado del comportamiento de estos materiales a distintas frecuencias, más altas y más bajas que las que se estudiaron en este proyecto, aumentaría la posibilidad de poder diseñar de manera más específica pavimentos u otro tipo de revestimientos que absorbiesen determinados rangos de frecuencias. De esta manera el uso de estos materiales podría expandirse a otros sectores y a otras aplicaciones que requieren unas características acústicas más concretas.

11 Referencias

- [1] **C. Albano, N. Camacho, M. Hernandez, A. J. Bravo, and H. Guevara.** (2008) **Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamanos de particulas.** *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela.*
- [2] R. Siddique and T. R. Naik, "Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview," *Waste Management*, vol. 24, pp. 563-569, 2004.
- [3] R. M. Rodríguez Montejano. (1998) Reciclado de neumáticos usados para su utilización como materiales acústicos. *MAFRE SEGURIDAD.* 13.
- [4] *REAL DECRETO 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso,* 1619, 2006.
- [5] *Documento Básico HR. Protección frente al Ruido. Código Técnico de la Edificación.,* M. d. F. España, 2009.
- [6] ASTM, "ASTM E2611 – 09. Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method " vol. E2611, ed: ASTM, 2009, p. 14.
- [7] AENOR, "UNE EN 29052-1:1994. Acústica. Determinación de la rigidez dinámica. Parte 1: materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas. (ISO 9052-1:1989). (Versión oficial EN 29052-1:1992)." vol. 29052-1, ed. España: AENOR, 1994.
- [8] *DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas,* D. O. d. I. U. Europea, 2008.
- [9] O. U. Onokpise, "Natural rubber, *Hevea brasiliensis* (Willd. Ex A. Juss.) Mull. Arg., germplasm collection in the Amazon basin, Brazil: A retrospective," *Economic Botany*, vol. 58, pp. 544-555, Win 2004.
- [10] B. C.V., "The Chemistry of Rubber Vulcanization and Acceleration," *THE JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, vol. 14, p. 1, 1922.
- [11] P. M. Goldbart, H. E. Castillo, and A. Zippelius, "Randomly crosslinked macromolecular systems: Vulcanization transition to and properties of the amorphous solid state," *Advances in Physics*, vol. 45, pp. 393-468, Sep-Oct 1996.
- [12] L. R. G. Treolar, *The Physics of Rubber Elasticity*, 3ª ed., 2005.
- [13] F. Billmeyer, *Ciencia de los polímeros*, Reimpresa ed. España: Reverté S.A., 1975, 2004.
- [14] B. R. Cal Cruz, E. A. Belkis F, and R. A. B. Álvarez García. (2012) Evaluación de elastómeros vulcanizados. *Afinidad.* 131-136.
- [15] L. I. Lyubchanskaya and A. S. Kuzminski, "The Degradation of Main Chains and Crosslinks in the Aging of Vulcanizates," *Doklady Akad. Nauk SSSR*, vol. 135, p. 1, 1960.
- [16] G. Milani, E. Leroy, F. Milani, and R. Deterre, "Mechanistic modeling of reversion phenomenon in sulphur cured natural rubber vulcanization kinetics," *Polymer Testing*, vol. 32, pp. 1052-1063, Sep 2013.

- [17] L. Treolar, "The Elasticity and Related Properties of Rubber," *Reports on Progress in Physics*, vol. 36, pp. 755-826, 1973.
- [18] B. E. Eichinger, "Rubber elasticity: Solution of the James-Guth model," *Physical Review E*, vol. 91, May 2015.
- [19] E. Burak and M. James E., *Structures and Properties of Rubberlike Networks*. United States: Oxford University Press, Inc., 1997.
- [20] A. M. Kucherskii, "New characteristic of tensile stress-strain properties in rubbers," *Polymer Testing*, vol. 22, pp. 503-507, Aug 2003.
- [21] A. N. Gent, *Engineering with Rubber. How to Design Rubber Components*, 3rd ed. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2012.
- [22] M. Morton, *Rubber Technology*, 3rd ed.: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., 1959.
- [23] R. Simpson, *Rubber Basics*: Smithers Rapra, 2002.
- [24] R. N. Datta and B. V. Flexsys, *Rubber Curing Systems* Smithers Rapra, 2002.
- [25] P. Freakley K., *Rubber Processing and Production Organization*. New York: Springer US, 1985.
- [26] J. Royo, *Manual de Tecnología del Caucho*, 2 ed. Barcelona.
- [27] G. Heideman, R. N. Datta, J. W. M. Noordermeer, and B. Van Baarle, "Activators in accelerated sulfur vulcanization," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 77, pp. 512-541, Jul-Aug 2004.
- [28] H. Gary R., "Materials and Compounds.," in *Engineering with Rubber. How to design Rubber Components.*, A. N. Gent, Ed., ed, 1992.
- [29] J. Kumar and R. Singh, "INVESTIGATING THE EFFECT OF VULCANIZATION IN TREAD RUBBER APPLICATIONS," *Recent Advancement in Manufacturing Processes*, vol. 751, pp. 1-7, 2013 2013.
- [30] R. Mukhopadhyay, S. K. De, and S. N. Chakraborty, "EFFECT OF VULCANIZATION TEMPERATURE AND VULCANIZATION SYSTEMS ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF NATURAL-RUBBER VULCANIZATES," *Polymer*, vol. 18, pp. 1243-1249, 1977 1977.
- [31] M. Andre and P. Wriggers, "Thermo-mechanical behaviour of rubber materials during vulcanization," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 42, pp. 4758-4778, Aug 2005.
- [32] A. El Labban, P. Mousseau, R. Deterre, and J. L. Bailleul, "CURING CYCLE OPTIMIZATION OF A THICK-SECTION RUBBER PART," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 83, pp. 331-348, Oct-Dec 2010.
- [33] D. Juárez Varón, R. Balart Gimeno, S. Ferrándiz Bou, and D. García Sanoguera. (2012) Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos. *3Ciencias*. 22.

- [34] J. Gabriel Segura, E. Julia Sanchis, and J. M. Gades, "Impact acoustic isolation of ethylene vinil acetate panels," presented at the ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY Fascicle of Management and Technological Engineering, Romania, 2015.
- [35] C. N. d. I. d. Caucho, "Encuesta empresarial del Caucho. Adaptado a las Ventas Totales del Sector del Caucho según el I.N.E.," ed, 2004.
- [36] *Presentaciones sectoriales de la Industria española*, E. y. T. Subsecretaría de Industria, 2015.
- [37] B. Adhikari, D. De, and S. Maiti, "Reclamation and recycling of waste rubber," *Progress in Polymer Science*, vol. 25, pp. 909-948, Sep 2000.
- [38] M. Myhre, S. Saiwari, W. Dierkes, and J. Noordermeer, "RUBBER RECYCLING: CHEMISTRY, PROCESSING, AND APPLICATIONS," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 85, pp. 408-449, Jul-Sep 2012.
- [39] C. D. S.L. *Desvulcanización*.
- [40] SIGNUS. (2012). *SIGNUS. Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados*. Available: <http://www.signus.es/es/sobre-signus/info/empresas-adheridas>
- [41] TNU. *TNU. Tratamiento de Neumáticos Usados*. Available: <http://www.tnu.es/>
- [42] E. Cagno and A. Trianni, "Analysis of the Most Effective Energy Efficiency Opportunities in Manufacturing Primary Metals, Plastics, and Textiles Small- and Medium-Sized Enterprises," *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme*, vol. 134, Jun 2012.
- [43] Z.-w. Niu, H. Gao, and B. Zuo, "Research and Design for Tire Logistics Management Based on Manufacturing of Things," *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, pp. 151-3, 20 July 2014.
- [44] *ISO 14001. Sistemas de gestión ambiental*, 2004.
- [45] Y. Huang, R. N. Bird, and O. Heidrich, "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements," *Resources Conservation and Recycling*, vol. 52, pp. 58-73, Nov 2007.
- [46] N. S. Mashaan and M. R. Karim, "Waste tyre rubber in asphalt pavement modification," *Materials Research Innovations*, vol. 18, pp. 6-9, Dec 2014.
- [47] K. H. Asli and A. K. Haghi, "POTENTIALS FOR USE OF RECYCLED RUBBER-TIRE PARTICLES AS CONCRETE AGGREGATE," *Journal of the Balkan Tribological Association*, vol. 17, pp. 319-326, 2011.
- [48] M. Nehdi and A. Khan, "Cementitious composites containing recycled tire rubber: An overview of engineering properties and potential applications," *Cement Concrete and Aggregates*, vol. 23, pp. 3-10, Jun 2001.
- [49] J.-H. Xu, X.-T. Feng, S.-L. Chen, and C.-Y. Shi, "Fundamental Mechanical Performances of Rubber Concrete," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 193-194, pp. 1401-1404, 2012 2012.

- [50] X. Elías, *Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora* España, 2009.
- [51] J. Kendall, "Turf wars scrap tires recycling," *Recycling Today*, vol. 48, pp. 110, 112, 114-16, April 2010.
- [52] C. Li-Tung, T. Kuen-Horng, and S. Jin-Shan, "Experimental evaluation of the impact-absorption properties of rubber tiles for the playground," *Biomedical Engineering, Applications Basis Communications*, vol. 16, pp. 244-250, 25 2004.
- [53] T. J. Huang and L. T. Chang, "Design and evaluation of shock-absorbing rubber tile for playground safety," *Materials & Design*, vol. 30, pp. 3819-3823, Oct 2009.
- [54] C. De la Colina, R. Rodríguez, J. Pfrezschner, S. Santiago, F. Simón, and A. Moreno. (2000) Investigaciones en materiales acústicos. Instituto de Acústica CSIC. *Revista de Acústica*. 5.
- [55] C. A. Murray, K. S. Snyder, and B. A. Marion, "Characterization of permeable pavement materials based on recycled rubber and chitosan," *Construction and Building Materials*, vol. 69, pp. 221-231, Oct 30 2014.
- [56] L. Piszczyk, A. Hejna, K. Formela, M. Danowska, and M. Strankowski, "Effect of ground tire rubber on structural, mechanical and thermal properties of flexible polyurethane foams," *Iranian Polymer Journal*, vol. 24, pp. 75-84, Jan 2015.
- [57] "Cellular elastomer crumbs bonded with foamed liquid," FR1568838-A; DE1767993-A.
- [58] H. S. Ahmad, H. Ismail, and A. R. Azura, "Comparison properties of natural rubber/virgin acrylonitrile-butadiene rubber and natural rubber/recycled acrylonitrile-butadiene rubber blends," *Iranian Polymer Journal*, vol. 24, pp. 185-195, Mar 2015.
- [59] P. Novakov, Konstant.C, and P. Mitinov, "STUDY OF COMPATIBILITY OF SYNTHETIC RUBBERS WITH PHENOLIC RESINS," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 16, pp. 1827-&, 1972.
- [60] C. Y. Wu, C. Y. Wei, W. H. Guo, and C. F. Wu, "Dynamic mechanical properties of acrylic rubber blended with phenolic resin," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 109, pp. 2065-2070, Aug 2008.
- [61] J. M. Funt, "DYNAMIC TESTING AND REINFORCEMENT OF RUBBER," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 61, pp. 842-865, Nov-Dec 1988.
- [62] G. Ramorino, D. Vetturi, D. Cambiaghi, A. Pegoretti, and T. Ricco, "Developments in dynamic testing of rubber compounds: Assessment of non-linear effects," *Polymer Testing*, vol. 22, pp. 681-687, Sep 2003.
- [63] V. Hauk and W. Neumann, "Temperature dependence of tension in rubber," *Zeitschrift fur Physikalische Chemie A*, vol. 182, pp. 285-294, 1938.
- [64] R. S. Marvin, "Measurement of dynamic properties of rubber," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 44, pp. 696-702, 1952.

- [65] M. A. Biot, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range," *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, vol. 28, pp. 168-178, 1956.
- [66] N. Holmes, A. Browne, and C. Montague, "Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 195-204, Dec 30 2014.
- [67] J. Pfretschner and R. M. Rodriguez, "Acoustic properties of rubber crumbs," *Polymer Testing*, vol. 18, pp. 81-92, 1999 1999.
- [68] X. Colom, J. Canavate, F. Carrillo, J. I. Velasco, P. Pages, R. Mujal, *et al.*, "Structural and mechanical studies on modified reused tyres composites," *European Polymer Journal*, vol. 42, pp. 2369-2378, Oct 2006.
- [69] X. Colom, J. Canavate, F. Carrillo, and M. J. Lis, "Acoustic and mechanical properties of recycled polyvinyl chloride/ground tyre rubber composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 48, pp. 1061-1069, Apr 2014.
- [70] J. Segura, J. E. Crespo, E. Juliá, A. Nadal, J. M. Gadea, and A. Delgado, "Propiedades Acústicas de Láminas Multicapa a partir de Residuos de Neumático," presented at the I Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias, Alcoi.
- [71] Y. Ogasawara, M. Kokawa, K. Watanabe, Z. Yasuda, F. Ninomiya, and T. Iwasa, "Sound proofing material for hood, roof and floor panels of motor vehicle|has granular elastic body layers consisting of rubber crushings covered by coating layer," JP8185188-A; US5744763-A.
- [72] "Soundproofing material for vehicle engine cover of hood panel, roof panel, floor panel|uses multiple granular elastic bodies to constitute rubber layer, covered by covering layer having pores," JP8314468-A.
- [73] C. Wang, "Rubber floor board comprises top layer made of rubber, elastic bottom layer made from recycled rubber and adhesive layer," CN203373947-U.
- [74] A. Paulsson, "Laminate for use on floor, has material layer joined to another material layer, where former material layer comprises vulcanizable material such as rubber, and latter material layer comprising recycled vulcanized rubber," SE201100638-A1.
- [75] L. P. Gomes, "Fabrication of flooring based on recycled tire rubber consists of controlled moulding and curing of the rubber, with superposition of a correspondingly processed mix containing colored agglutinating elastomer," BR9804203-A.
- [76] E. o. Juliá Sanchis, J. Segura Alcaraz, J. M. Gadea Borrell, V. Sanz Buades, and A. Pacetti, "Analysis of impact sound insulation properties of recycled rubbers for technical flooring in fitness facilities.," Rumanía, 2015.
- [77] J. Heinz Hüneke and M. Dr. Schöler, "Method for producing rubber sheets, rubber mats o. the like rubber products, rubber granules, preferable scrap tire rubber granules," 2009.
- [78] Dow. *Dow Polyurethane Systems*. Available: <http://www.dow.com/pusystems/index.htm>

- [79] ASTM, "ASTM D792-13 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity(Relative Density) of Plastics by Displacement," vol. 792, ed: ASTM, 2013, p. 6.
- [80] ASTM, "ASTM D2845-08 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock," vol. 2845-08, ed. USA: ASTM, 2005.
- [81] C. FARNELL, "PUNDIT PLUS BOOKLET," in *Online*, ed.
- [82] S. Yagiz, "Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer," *BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT*, vol. 68, pp. 55-63, 2009.
- [83] P. K. Sharme and T. N. Singh, "A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength," *The Bulletin of Engineering Geology and Environment*, vol. 67, pp. 17-22, 2008.
- [84] E. Vasanelli, D. Colangiuli, A. Calia, M. Sileo, and M. A. Aiello, "Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone," *Ultrasonics*, vol. 60, pp. 33-40, Jul 2015.
- [85] A. Azimian and R. Ajalloeian, "Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with P wave velocity," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 8, pp. 2069-2079, Apr 2015.
- [86] W. M. R. J., G. A. R., and G. L. W., "ELASTIC WAVE VELOCITIES IN HETEROGENEOUS AND POROUS MEDIA," *Geophysics*, vol. 21, pp. 41-70, 1956.
- [87] M. J. Ryllan, G. A. R. Parker, and J. E. Harding, *Manual of Bridge Engineering*. London: Thomas Telford Publishing, 2002,2003.
- [88] R. M. Digilov and H. Abramovich, "Flexural Vibration Test of a Beam Elastically Restrained at One End: A New Approach for Young's Modulus Determination," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, p. 6, 2013.
- [89] F. Simón, D. K. Anthony, and M. J. Fernández, "ESTUDIO DE CINCO MÉTODOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE CAPAS ELÁSTICAS PARA LA MEJORA DEL AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTOS," presented at the Tecniacústica, Gandía, 2006.
- [90] C. Hopkins, R. Wilson, and R. J. M. Craik, "Dynamic stiffness as an acoustic specification parameter for wall ties used in masonry cavity walls," *Applied Acoustics*, vol. 58, pp. 51-68, Sep 1999.
- [91] V. F. Vazquez, J. Luong, and S. E. Paje, "Non-destructive technique for dynamic stiffness and acoustic assessment: study of gap graded mixtures with different content in bitumen," *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (Isma2014) and International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (Usd2014)*, pp. 1769-1779, 2014.

- [92] AENOR, "UNE-EN 12354-2:2001. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 2: Aislamiento acústico a ruido de impactos entre recintos.," ed: AENOR, 2001.
- [93] E. Escuder Silla, "EFECTO DE LA RIGIDEZ DINÁMICA DE BANDAS ELÁSTICAS EN EL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL EN UN MODELO A ESCALA MEDIANTE HOLOGRAFÍA ACÚSTICA DE CAMPO CERCANO," presented at the Tecnicacústica, Cádiz, 2009.
- [94] E. Brosio, "Le Prestazioni dei Pavimenti nella Protezione dai rumori di Calpestio. Confronto tra Previsioni Teoriche e Dati Reali.," in *Proceedings of the Conference of the Italian Acoustic Association*, Siena, Italy, 1979.
- [95] ASTM, "ASTM D695 – 10. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics," vol. D695 – 10. , ed: ASTM, 2010, p. 7.
- [96] AENOR, "UNE-EN ISO 604:2003. Plásticos. Determinación de las propiedades en compresión. (ISO 604:2002)," vol. ISO 604:2002, ed. España: AENOR, 2003.
- [97] M. P. y. C. U. d. Oviedo., "Tema 4.- VISCOELASTICIDAD Y PROPIEDADES MECÁNICAS," ed.
- [98] A. Y. Malkin and A. I. Isayev, *Rheology: Concepts, Methods & Applications*. Toronto: Chemtech Publishing, 2006.

