



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE MATERIALES

TESIS DOCTORAL

**“Caracterización mecánico-acústica de
nuevos materiales Eco-Composites para
soluciones constructivas”**

Autor

Jorge Fontoba Ferrándiz

Director

Dr. José Enrique Crespo Amorós

Codirector

Dr. Ernesto Juliá Sanchis

Junio 2019

Agradecimientos

Llegado el momento en el que finalizan tres años de esfuerzo e ilusión para la consecución del título de Doctor. Quisiera expresar mi agradecimiento a todas las personas que han compartido conmigo cada momento de este camino.

Agradecer a toda mi familia: mi mujer y mis hijos por haberme ayudado y apoyado en todo momento.

Mención especial merecen mis profesores Dr. José Enrique Crespo Amorós como Director y tutor de tesis doctoral y al Codirector Dr. Ernesto Juliá Sanchis, por sus ayudas incondicionales para poder realizar esta tesis doctoral, a su vez que les agradezco su dedicación durante todo este periodo académico.

Por último, quiero agradecer a todos los profesores de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA), por su trato y dedicación durante estos años. Francamente, puedo decir que la elección de esta Universidad ha sido enormemente acertada y espero poder seguir manteniendo el contacto con la misma en un futuro.

A todos ellos, muchas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Justificación.....	12
I. INTRODUCCIÓN	20
1. Antecedentes y estado actual.....	22
2. Generalidades	24
3. Materiales compuestos	25
3.1 Definición de material compuesto.....	25
3.2 Componentes de un material compuesto	27
3.2.1 Fibras de refuerzo.....	27
3.2.2 Materiales reforzados con partículas.....	29
3.2.3 Materiales reforzados con fibras.....	29
3.2.4 Material Sándwich.....	31
3.3 Matriz	33
3.3.1 Resina biodegradable	35
3.3.2 Resinas de poliéster.....	39
3.4 Interfase	46
4. Fibras de naturales	50
4.1 Biocomposites de fibras naturales.....	54
4.2 Características y clasificación de fibras naturales.....	58
4.2.1 Definición.....	58
4.2.2 Evolución histórica de las fibras naturales	61
5. Materia de residuos textiles	65
6. Inicio de los composites	66
6.1 Auge de los composites.....	67
6.2 Actualidad	70
7. Propiedades acústicas de los composites	73
7.1 Introducción	73
7.2 Aislamiento acústico a ruido aéreo.....	82
7.3 Aislamiento acústico de una partición simple y de capa múltiples.....	86
7.4 Ley de masas	89
7.5 Paredes dobles	90

7.6	Estructura de los materiales acústicos.....	99
7.8	Cámara de transmisión a ruido aéreo.....	111
7.9	Velocidad de propagación del sonido en el aire	116
7.10	Impedancia acústica.....	126
8.	Análisis Modal.....	128
8.1	Medios Continuos	128
8.2	Ecuaciones del movimiento: Formulación matricial.....	132
8.3	Vibraciones libres no amortiguadas. Modos de vibración.....	133
8.4	Técnicas no destructivas	136
8.5	Métodos acústicos: análisis de vibraciones	137
8.6	Técnica utilizada en los ensayos	143
9.	Cálculo de laminados.....	146
9.1	Conceptos generales sobre laminados	146
9.2	Micromecánica y macromecánica.....	148
9.3	Laminas.....	153
9.4	Análisis micromecánico de una lámina	154
9.4.1	Introducción	154
9.4.2	Fracción volumétrica	155
9.4.3	Fracción másica.	157
9.4.4	Densidad de la lámina	158
9.4.5	Relaciones entre propiedades.....	159
9.4.6	Porosidad.....	160
9.4.7	Gramaje de la fibra y de la matriz	162
9.4.8	Análisis de una lámina de material ortótropo compuesto en las direcciones locales	166
9.4.9	Relaciones tensión – deformación en las direcciones globales	199
9.4.10	Análisis de laminados	207
9.4.11	Características mecánicas del modelo de un laminado	210
9.4.12	Cálculo de tensiones y deformaciones.....	214
9.4.13	Análisis de fuerzas y deformaciones	216
9.4.14	Análisis de momentos	218
9.4.15	Matriz de rigidez a flexión (D)	220
9.4.16	Matriz plana normalizada.....	221
9.4.17	Matriz de acoplamiento [B].....	223
9.4.18	Tipos de laminados.....	224
9.4.19	Trabajo de un laminado en tensión plana y flexión	231

II. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO	236
1. Introducción	238
2. Revisión bibliográfica	238
3. Palabras clave de búsqueda	240
4. Patentes	244
4.1 Tipo de patentes	245
4.1.1 Protección a las creaciones estéticas. Diseño Industrial.....	245
4.1.2 Propiedad intelectual	247
4.2 Resumen de patentabilidad	247
4.3 Resumen de patentes obtenido tras la búsqueda en la base de datos INVENES.....	249
4.4 Búsqueda de patentes a nivel nacional con la base de datos de Google ..	250
4.5 Esp@cenet.....	250
4.6 PatentScope	252
5. Resultado y conclusiones.....	253
III. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN.....	254
1. Objetivos.....	256
2. Planificación de la investigación	257
2.1 Estado del arte. Estudio Bibliográfico	257
3. Resultados y conclusiones	260
IV. EQUIPAMIENTO	264
1. Fabricación	266
1.1 Bomba de vacío	267
1.2 Cubo de evacuación de resina Airtech.....	267
1.3 Máquina de corte	269
2. Caracterización física. Densidad - porosidad.....	270
3. Caracterización mecánica y dinámica	271
3.1 Ensayo de tracción	271

3.2	Ensayo de flexión	276
3.3	Péndulo de charpy.....	279
3.4	Dureza Shore D.....	282
4.	Caracterización dinámica.....	283
4.1	Shaker.....	283
4.2	Método de análisis modal impulso-respuesta	284
4.3	Método de vibración libre.....	285
5.	Caracterización acústica	286
5.1	Cámara de transmisión	286
5.2	Cámara de reverberación.....	288
V.	MATERIALES.....	290
1.	Materiales fungibles.....	292
2.	Resinas	297
2.1	Resina biodegradable.....	297
2.2	Resina de poliéster	300
3.	Tipo de fibras y/o tejidos.....	302
3.1	Características generales de las fibras utilizadas	304
3.1.1	Fibra de yute.....	306
3.1.2	Fibra de lino	308
3.1.3	Fibra de Materia Textil Borra.....	310
3.1.4	Fibra de coco	311
3.1.5	Fibra de cáñamo	313
3.1.6	Lana de oveja	315
3.1.7	Yeso laminado	317
VI.	PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	320
1.	Fabricación	322
1.1	Metodología de fabricación	322
1.2	Preparación de los tejidos y/o fibras	322
1.3	Acondicionamiento de la superficie de trabajo	323
1.4	Colocación de los tejidos y/o fibras	324
1.5	Colocación de los canales de vacío	325
1.6	Colocación de los canales de entrada de resina	326

1.7	Colocación de la bolsa de vacío.....	327
1.8	Colocación de las canalizaciones.....	328
1.9	Infusionado de la resina	329
2.	Caracterización física: densidad - porosidad	330
2.1	Metodología de medida de la densidad	330
2.2	Nivel de porosidad de lámina.....	332
2.3	Proceso operativo del ensayo densidad	334
3.	Caracterización mecánica y dinámica	336
3.1	Ensayos máquina de tracción.....	336
3.2	Coefficiente de poisson y módulo de elasticidad.....	339
3.3	Resistencia máxima a la flexión	342
3.4	Impacto	345
3.5	Dureza shore D.....	347
3.6	Métodos dinámicos.....	350
3.6.1.	Ensayo por medio de vibración libre	351
3.6.2.	Método de vibración forzada (Shaker).....	355
3.6.3.	Método de análisis modal impulso-respuesta	356
3.6.4.	Obtención del módulo de elasticidad.....	359
4.	Caracterización acústica	361
4.1	Cámara de transmisión	361
4.2	Cámara de reverberación.....	367
5.	Simulación numérica	370
5.1	Análisis modal	370
5.1.1	Programa Ansys Workbench	370
5.1.2	Análisis ortotrópico	371
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	384
1.	Composición de los composites fabricados.....	386
1.1	Composites de fibra de yute	386
1.2	Composites de lino biaxial.....	388
1.3	Materia textil borra	390
1.4	Composites de Coco.....	393
1.5	Composites de Cáñamo.....	395

2. Caracterización física	397
2.1 Densidad hidrostática	397
2.2 Porosidad.....	397
2.3 Representación gráfica de los resultados de densidad	402
3. Caracterización mecánica	403
3.1 Composites yute.....	403
3.2 Composites de lino biaxial.....	407
3.3 Composites de Materia Textil Borra	412
3.4 Composites de coco	417
3.5 Composites de cáñamo	421
3.6 Módulos de elasticidad de los composites con extensómetros	426
3.6.1. Obtención de parámetros en la máquina universal con extensómetros ..	426
3.6.2. Valores de los módulos de elasticidad	431
3.7 Representaciones gráficas de las propiedades mecánicas	432
3.7.1. Resistencia máxima a la tracción.....	432
3.7.2. Resistencia máxima a la flexión.....	433
3.7.3. Dureza tipo D	434
3.7.4. Impacto.....	435
3.7.5. Módulos de elasticidad con extensómetros	435
4. Caracterización dinámica y acústica.....	437
4.1 Frecuencia natural de vibración.....	437
4.2 Módulos de elasticidad	437
4.3 Resultados comparativos ensayo dinámico versus ensayo estático	440
4.3.1 Módulo elasticidad biocomposites.....	440
4.3.2 Módulos de elasticidad composites resina de poliéster	442
4.4 Aislamiento acústico en cámara de transmisión	443
4.4.1 Frecuencias críticas y rango de frecuencia cámara transmisión.....	443
4.4.2 Aislamiento acústico de láminas	443
4.4.3 Valores ponderados del aislamiento acústico al ruido aéreo	449
4.4.4 Comparativas entre láminas.....	452
4.4.5 Valores acústicos frente al ruido aéreo de la lámina de yeso laminado.	458
4.4.6 Valores ponderados de la placa yeso laminado	458
4.4.7 Comparativas láminas “green composite” - yeso laminado	459
4.4.8 Recopilación de resultados.....	463
4.4.9 Elección de materiales para placas sándwich	465
4.4.10 Apilamientos multicapa.....	468

4.4.11	Sándwich con composites y lana de oveja	468
4.4.12	Combinaciones de láminas de yeso laminado con composites - biocomposites y lana de oveja	480
4.4.13	Comparativa entre apilamientos	488
4.4.14	Cálculo de la velocidad de propagación del sonido en los materiales compuestos con bioresina – resina de poliéster y placa de yeso laminado	492
4.4.15	Cálculo de las impedancias acústicas de los composites- PYL- Lana.....	496
4.4.16	Cálculo teórico del aislamientos en paredes simples y dobles.....	497
5.	Cálculos de los laminados.....	507
5.1	Cálculo del composite lino con resina de poliéster	508
5.1.1	Datos de partida	508
5.1.2	Regla de las mezclas	509
5.1.3	Cálculo de las constantes locales	510
5.1.4	Cálculo de las matrices de rigidez locales y globales del laminado	513
5.1.5	Cálculo de las matrices de flexibilidad local y global.....	519
5.2	Cálculo del apilamiento del composite con resina de poliéster	523
5.2.1	Cálculo de la matriz de rigidez extensional	523
5.2.2	Calculo de la matriz normalizada	524
5.2.3	Cálculo de la inversa de la matriz plana normalizada	524
5.2.4	Cálculo de las constantes ingenieriles globales.....	525
5.2.5	Cálculo de la matriz de rigidez flexibilidad	525
5.2.6	Cálculo de las tensiones – deformaciones	529
5.3	Recopilación de resultados teóricos de los “green composites”	530
5.4	Resultados teóricos de los composites con resina de poliéster	531
5.5	Recopilación de resultados en forma gráfica de los composites con resina de poliéster	532
5.6	Recopilación de resultados de forma gráfica de “green composites” con bioresina.....	536
6.	Simulación numérica	541
6.1	Programa informático eLamX2	541
6.2	Criterio de Tsai – Hill	543
6.3	Introducción de los laminados del material tipo sándwich	547
6.4	Valores obtenidos a través del programa informático eLam x ²	550
6.4.1.	Composite de yute con resina de poliéster	551
6.4.2.	Biocomposite de yute	554
6.4.3.	Composite de lino con resina de poliéster.....	556

6.4.4.	Biocomposite de lino	558
6.4.5.	Materia de residuo textil borra con resina de poliéster.....	560
6.4.6.	Materia de residuo textil borra con bioresina.....	562
6.4.7.	Composite cáñamo con resina de poliéster	564
6.4.8.	Biocomposite de cáñamo	566
6.4.9.	Composite coco con resina de poliéster.....	568
6.4.10.	Biocomposite de coco	570
6.5	Ansys Workbench.....	572
6.5.1	Obtención de las frecuencias de los primeros modos de vibración	572
6.6	Diseño con Solidwoks Premium.....	575
6.6.1	Análisis estático.....	575
6.6.2	Resultados obtenidos tras el análisis.....	582
6.6.3	Correlación entre valores calculados por análisis matemático y de diseño	596
VIII. CÁLCULO DEL COSTE DE LAS PLACAS.....		600
1.	Introducción	602
2.	Cálculo del coste de la resina.....	602
3.	Cálculo del coste de las fibras y/o tejidos	603
4.	Cálculo del coste de los materiales fungibles.....	604
5.	Cálculo del coste de la energía.....	605
6.	Cálculo del coste de la mano de obra	605
7.	Coste de cada placa	606
IX. CONCLUSIONES.....		626
1.	Conclusiones del aspecto práctico	628
2.	Conclusiones de los resultados obtenidos	629
3.	Propiedades mecánicas	631
4.	Aislamiento al ruido aéreo	633
5.	Métodos dinámicos.....	637

6. Costes.....	639
7. Alternativa	640
X. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS.....	642
1. Investigación	644
XI. REFERENCIAS	645
1. Citas bibliográficas	647
2. Páginas Web.....	667
3. Bibliografía	668
XII. ANEXOS.....	669

Justificación

La utilización de materiales sostenibles con el medio ambiente en el sector industrial de la construcción, va aumentando poco a poco. Las posibilidades que hoy en día existen en el mercado sobre este tipo de materiales es cada vez mayor.

La necesidad de la búsqueda de nuevos materiales acústicos que sean amigables con el medio ambiente y posteriormente reciclables, han llevado a cabo diversos estudios en la obtención de una solución a los problemas del efecto del ruido o de reverberación acústica, en definitiva, a buscar soluciones en la acústica arquitectónica con materiales que sean procedentes de fuentes de origen natural o renovable. Lo que refleja una gran importancia de este sector industrial.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el objeto de este trabajo va encaminado a mejorarlo con el estudio de nuevos materiales compuestos para la obtención de materiales novedosos como son los eco- composites, además para que se mantenga una buena relación con el medioambiente y puedan ser materiales reciclables después de su vida útil.

En este trabajo se lleva a cabo el diseño de nuevos materiales compuestos “eco-composites” que están formados por fibras naturales lignocelulósicas y por una resina biodegradable que formará la matriz. A partir de la elaboración de estos materiales, se llevará a cabo las caracterizaciones, tanto mecánicas como acústicas, para que cumplan con las propiedades que se les exige, y sobre todo se optará con la solución más óptima en función de las propiedades requeridas según el tipo de aplicación constructiva.

“Caracterización mecánico-acústica de nuevos materiales eco-composites para soluciones constructivas”

Resumen

Se realiza un estudio de materiales innovadores elaborados a partir de refuerzos de fibras celulósicas y matriz biodegradable denominados “green composites”. Estos materiales compuestos suponen un impacto mínimo al medio ambiente, pudiendo ser reciclados o biodegradables al final de su vida útil. Los materiales compuestos elaborados están formados por fibras de refuerzo de yute, cáñamo, lino y coco junto con una resina biodegradable que formará la matriz del composite. Los estudios se realizan a nivel de láminas y de laminados en forma de multicapas tipo sándwich, obteniendo sus principales propiedades mecánicas. El proceso de fabricación para la obtención de las diferentes láminas y laminados de material compuesto se realiza por el proceso de infusión de resina. También se realiza un estudio paralelo con materiales composites elaborados con los mismos refuerzos, pero empleando como fase matriz resina de poliéster. Este estudio tiene la finalidad de comparar los resultados obtenidos con la matriz termoestable más utilizada a nivel industrial.

Los composites obtenidos tras el proceso de infusión y curado se analizarán de forma experimental mediante análisis estáticos y dinámicos con la finalidad de obtener las principales características mecánicas, físicas, y las frecuencias naturales de resonancia. Se realizan análisis con diversos programas informáticos con el fin de verificar los resultados obtenidos.

Se analizan los composites acústicamente mediante la cámara de transmisión a escala que permitirá obtener valores de absorción sonora y pérdidas por transmisión. Para que los composites se consideren materiales absorbentes acústicos a ruido aéreo, será necesario añadir como material absorbente una lámina de lana de oveja que presente una alternativa medioambiental a las lanas de roca. Se analizarán las combinaciones tipo sándwich formadas por diferentes capas de fibra y tejido con los diferentes tipos de matrices. En una segunda fase del análisis se realizará una comparativa entre las distintas combinaciones tipo sándwich (materiales compuestos con bioresina – resina de poliéster) y placas de yeso laminado, con el fin de obtener las combinaciones con mayor aislamiento acústico al ruido aéreo. Para finalizar se realiza un estudio de costes y comparativas de rigidez entre las láminas de composite y las placas de yeso laminado.

Los materiales elaborados en este estudio tienen la finalidad de convertirse en futuros materiales acústicos con aplicaciones en edificación o para barreras acústicas en la construcción.

“Mechanic and acoustic characterization of new eco-composite materials for constructive solutions”

Abstract

A study of innovative materials made from cellulose fiber reinforcements and biodegradable matrix has been conducted; these materials are called “green composites”. These composite materials reduce the environmental impact and can be recycled or biodegraded at the end of their life span. The composite materials are constituted by reinforcing fibers of jute, hemp, linen and coconut with a biodegradable resin that will form the matrix of the composite. The analyses have been carried out at the level of layers and laminates in the form of multilayer sandwiches, obtaining their main mechanical properties. The manufacturing process for the different layers and laminates of composite material is the resin infusion process. A parallel study with composite materials made with the same reinforcements but using a matrix of polyester resin is also conducted. The purpose of this study is to compare the results obtained with the thermostable matrix mostly used in industry.

The composites obtained after the infusion process are analyzed experimentally by static and dynamic analysis in order to obtain their mechanical and physical properties and their natural resonant frequencies. The results are verified through different numerical software.

The composites are analyzed acoustically by the transmission chamber at scale that allows obtaining the sound absorption and transmission loss values. For the composites to be considered sound absorbing materials to airborne noise, it will be necessary to add an absorbent material, like a layer of sheep wool that presents an environmental alternative to rockwool. The sandwich combinations formed by different layers of fiber and fabric with the two types of matrices have been analyzed. In a second stage of the analysis, a comparison will be made between the different sandwich combinations (composite materials with bioresin and polyester resin) and laminated plaster boards, in order to know which material presents the highest acoustic insulation to airborne noise. Finally, a study of the cost and an evaluation of the stiffness between composite layers and laminated plaster boards is carried out.

The materials analyzed in this study are intended to become future acoustic materials with applications in buildings or as acoustic barriers.

“Caracterització mecànica i acústica de nous materials eco-composites per a solucions constructives”

Resum

Es realitza un estudi de materials innovadors elaborats a partir de reforços de fibres cel·lulòsiques i matriu biodegradable denominats “green composites”. Aquests materials compostos suposen un impacte mínim per al medi ambient, podent ser reciclats o biodegradables al final de la seva vida útil. Els materials compostos elaborats estan formats per fibres de reforç de jute, cànem, lli i coco juntament amb una resina biodegradable que formarà la matriu del composite. Els estudis es realitzen a nivell de làmines i de laminats en forma de multicapes tipus sandvitx, obtenint les seues principals propietats mecàniques. El procés de fabricació per a l'obtenció de les diferents làmines i laminats de material compost es realitza pel procés d'infusió de resina. També es realitza un estudi paral·lel amb materials composites elaborats amb els mateixos reforços, però emprant com a fase matriu resina de polièster. Aquest estudi té la finalitat de comparar els resultats obtinguts amb la matriu termostable més utilitzada a nivell industrial.

Els composites obtinguts després del procés d'infusió i curat s'analitzaran de forma experimental mitjançant anàlisi estàtics i dinàmics amb la finalitat d'obtenir les principals característiques mecàniques i físiques, així com les freqüències naturals de vibració. Es realitzen anàlisis amb diversos programes informàtics per tal de verificar els resultats obtinguts.

S'analitzen els composites acústicament mitjançant les càmbres de transmissió a escala que permetrà obtenir els valors d'absorció acústica i de pèrdues per transmissió. Perquè els composites es considerin materials absorbents acústics a soroll aeri, caldrà afegir com a material absorbent una làmina de llana d'ovella que presenti una alternativa mediambiental a les llanes de roca. S'analitzaran les combinacions tipus sandwich formades per diferents capes de fibra i teixit amb els diferents tipus de matrius. En una segona fase de l'anàlisi es realitzarà una comparativa entre les diferents combinacions tipus sandvitx (materials compostos amb bioresina - resina de polièster) i plaques de guix laminat, amb la finalitat d'obtenir les combinacions amb major aïllament acústic al soroll aeri. Per finalitzar es realitza un estudi de costos i comparatives de rigidesa entre les làmines de composite i les plaques de guix laminat.

Els materials elaborats en aquest estudi tenen la finalitat de convertir-se en futurs materials acústics per a aplicacions en edificació o per a barreres acústiques en la construcció.

I. Introducción

1. Antecedentes y estado actual

Los materiales de origen polimérico han supuesto un considerable avance para la sociedad, por la elaboración de una elevada cantidad de productos de bajo coste y enorme utilidad. Tradicionalmente se emplean los composites fabricados a partir de una matriz termoplástica o termoestable y fibras de vidrio [1,2]. Sin embargo, debido a su resistencia a la biodegradación que es causante de generar graves problemas medioambientales, derivados de la gestión de sus residuos. Su reciclaje mecánico así como la incineración no son soluciones óptimas para solucionar los problemas anteriormente citados [1]. Sin embargo, el desarrollo de materiales biodegradables presenta una opción eficaz e innovadora para la gestión de los residuos plásticos [2-6]. Los materiales biodegradables suponen una alternativa a la utilización de los recursos fósiles procedentes del petróleo, permitiendo el cierre del ciclo de vida del producto, al mismo tiempo que potencian el desarrollo del sector agrícola; concretamente el sector de la industria no alimentaria [7, 8].

Para la elaboración de composites de matriz termoestable, que empleen fibras naturales largas o telas como refuerzo [9], no existen muchos trabajos científicos que utilicen procesos de laminado manual con infusión de resina por vacío. En general, se utilizan composites con fibras cortas (mats) como refuerzo, y resinas convencionales [10-14], y sólo algunas con bioresinas de origen natural [15-18].

Para incrementar las propiedades mecánicas de un composite, tradicionalmente se ha utilizado refuerzo de fibra larga en forma de tejido, con fibra alineada en direcciones determinadas. Los trabajos publicados de tejido de fibras naturales son escasos [19], debido a que estos tejidos técnicos comercialmente no se encontraban disponibles hasta hace muy poco tiempo, en torno a los últimos cinco años. Por consiguiente, si a la utilización de tejidos de fibra larga natural se añade una matriz biodegradable de bioresina termoestable [20,22] termoestable de origen renovable o natural, nos encontraremos en un campo todavía por desarrollar.

Desde el punto de vista de absorbentes acústicos y modelos, la entrada en vigor de la parte de ruido (DB – HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE), supuso importantes cambios al ahora de abordar la acústica en la edificación [11], además, el desarrollo de esta parte final del CTE ha ido unida a la ejecución de un catálogo de elementos constructivos que sirve como referencia a la hora de diseñar una determinada solución constructiva. Este catálogo contempla actualmente el resultado de un análisis detallado de las soluciones que, hasta la fecha, se han ido utilizando, y validando buena parte de éstas. No obstante, existen materiales menos conocidos que también podrían utilizarse en este tipo de soluciones constructivas [23,24].

En los últimos años se ha incrementado la conciencia sobre la necesidad de utilizar materiales reciclados [25] cuyas bases sean materiales de desecho y/o la utilización de nuevos materiales biodegradables a partir de elementos naturales [26].

Tradicionalmente las soluciones acústicas utilizadas usan de forma mayoritaria lanas minerales (de roca y de vidrio) con grandes dificultades de reciclaje y con gran dependencia del petróleo [27]. Sin embargo, el uso de otras fibras naturales o de base reciclada es minoritario.

Se abre así una importante línea de investigación basada en el estudio del comportamiento de este tipo de materiales desde el punto de vista mecánico – acústico y de fabricación por el método de infusión de resina [28], para su utilización en acústica arquitectónica.

Será necesario, revisar, optimizar y/o adaptar los procedimientos clásicos de ensayos de caracterización mecánico – acústica a estos nuevos tipos de materiales y a las soluciones elaboradas a partir de éstos.

En lo que a acústica medioambiental se refiere, un diseño correcto y preciso de las barreras acústicas es cada vez más importante, debido a los altos niveles de ruido generado alrededor de las autopistas y vías férreas. El desarrollo legislativo producido en los últimos años a nivel europeo, estatal y autonómico, que tratan el tema de la contaminación acústica propone la redacción de planes de acción con medidas correctoras concretas.

2. Generalidades

El mercado de los productos naturales ha establecido en las últimas décadas la aplicación de procedimientos amigables con el medio ambiente [20-31], lo que ha originado el incremento de las normas de calidad y la optimización de los ensayos de laboratorio.

Muchos años de investigación han sido dirigidos hacia el uso de compuestos reforzados con fibras naturales derivados de las plantas [32-34], para tener el éxito, se debe tener conocimiento de las propiedades de los materiales y las técnicas industriales para satisfacer las necesidades de la aplicación a la cual se va a destinar.

Las fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica han recibido mucha atención en las últimas décadas debido a propiedades como su baja dureza; la cual minimiza el nivel de desgaste en los equipos de procesado, también por su costo competitivo; baja densidad, buenas propiedades mecánicas específicas, a su capacidad de actuar como aislante térmico y acústico [35]; biodegradabilidad y renovabilidad con la menor huella medioambiental posible [36].

Así mismo, además de representar un interés económico para el sector agrícola, suponen un ahorro en recursos energéticos, de los cuales no se puede prescindir en la obtención de fibras sintéticas como las de vidrio o carbono.

En el sector de la automoción, las fibras naturales han ido ganando terreno especialmente en su empleo como elemento reforzante en aplicaciones para el interior de los vehículos, debido a sus propiedades específicas y a que su resistencia al ambiente de servicio les permite cumplir con los requerimientos que se exigen en este tipo de piezas.

El conocimiento que se tiene respecto a los biocomposites reforzados con fibras naturales es muy poco, y sus ventajas son grandes, como son su peso ligero, la producción de energía de baja potencia y la retención de dióxido de carbono (reduciendo el efecto invernadero), además, las fibras naturales tienen unas excelentes propiedades mecánicas intrínsecas, una baja densidad en comparación con las fibras de vidrio y un precio menor [37], lo que hace importante su continuo estudio e investigación, y de ésta manera su aplicabilidad en diversos sectores y aspectos de la vida cotidiana.

3. Materiales compuestos

El material compuesto, es distinto a los materiales convencionales (metales, polímeros y cerámicos), no es fácil de definir resumiendo en una única frase todas las características que le definen.

Está formado por combinación de las distintas familias de materiales, con el objetivo de conseguir un nuevo material con mejores propiedades que los materiales tradicionales por sí solos no pueden proporcionar.

Esto da lugar a una extensa y compleja familia de materiales en la cual el catálogo de propiedades resulta casi ilimitado y ha proporcionado a las distintas ramas de la ingeniería la posibilidad del diseño específico de un material para cada aplicación.

Es por ello que los materiales compuestos se han de definir como materiales que cumplen una serie de requisitos relativos a su obtención o procesado, estructura y composición que permiten diferenciarlos del resto de familias de materiales.

3.1 Definición de material compuesto

Un sistema formado por dos o más componentes de diferente composición, que son insolubles entre sí, que se pueda distinguir físicamente y se puedan separar mecánicamente, con unos constituyentes distribuidos de forma dispersa por la mezcla física con el objetivo de obtener unas propiedades únicas y mejoradas definidos para una determinada aplicación, que no tienen los materiales que lo componen individualmente, Figura 1.

Su naturaleza permite generar una anisotropía macroscópica y microscópica para optimizar el comportamiento y propiedades del material en unas direcciones o en otras, según sea conveniente su uso en cada caso específico.

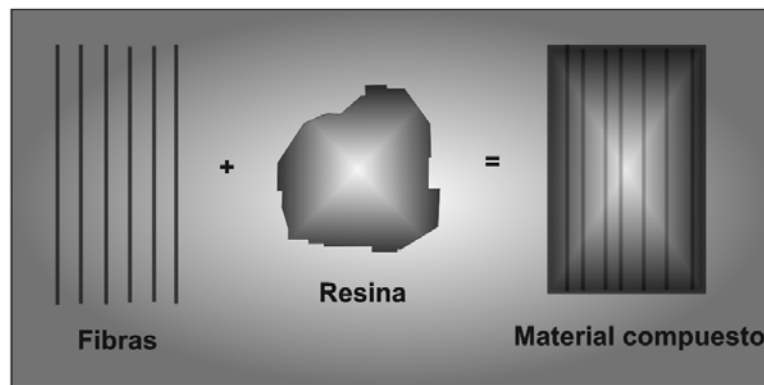


Figura 1. Estructura de un material compuesto.

Según esta definición de las características constitutivas fundamentales de un material compuesto, al menos se deben encontrar dos constituyentes básicos, matriz y refuerzo, y como la consecuencia de esta interacción, surge un tercer factor, la interfase.

Los materiales compuestos, Figura 2 se clasifican en tres categorías de acuerdo a sus formas:

- Materiales particulados. Formados o reforzados por agregados de partículas.
- Fibras. Materiales reforzados por fibras.
- Materiales estructurales. Laminares o tipo sándwich.

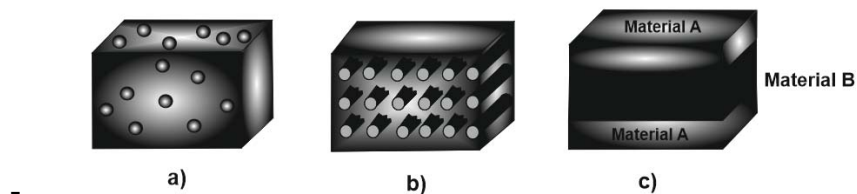


Figura 2. Comparación de los tres tipos de materiales compuestos (a) con partículas, (b) con fibras y (c) laminar.

Los materiales compuestos, además deben de cumplir otros requisitos para poder ser considerado como composites. Ambos constituyentes tanto, fibra como matriz, deben estar presentes en proporciones razonables, al menos un 5% del total. Sus fases constituyentes deben presentar propiedades distintas y las propiedades del material compuesto deben de ser notablemente diferentes de sus constituyentes.

Por ejemplo, si se compara las propiedades mecánicas de la matriz y el refuerzo, se obtienen pendientes distintas, por lo tanto, módulos de elasticidad diferentes Figura 3.

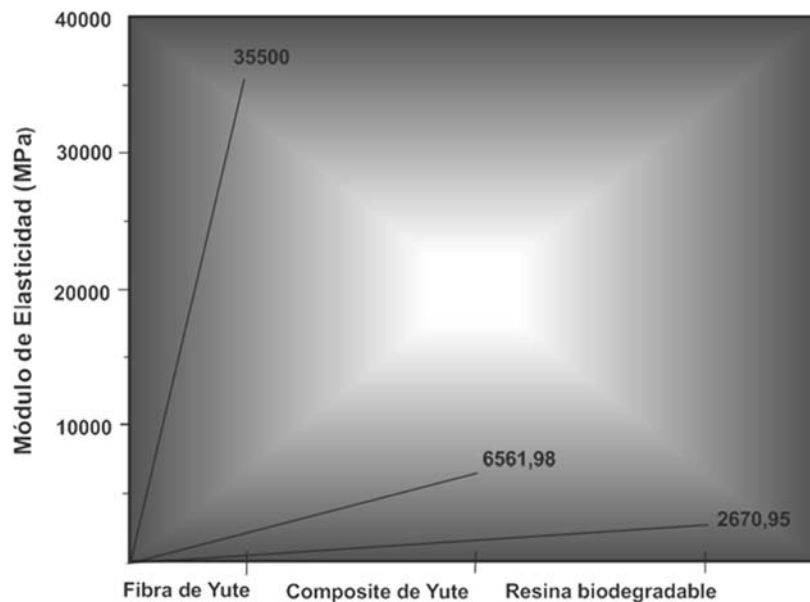


Figura 3. Propiedades mecánicas de la matriz, compuesto y el refuerzo.

La propiedad más importante de las fibras está basada en que su módulo elástico, tiene una mayor rigidez que el de la matriz. Con lo que se permite un aumento en el esfuerzo aplicado en el material compuesto [38].

3.2 Componentes de un material compuesto

Los elementos que constituyen un material compuesto, son el refuerzo y la matriz. Las fibras se consideran un refuerzo por excelencia y la matriz es el componente que aloja el refuerzo.

3.2.1 Fibras de refuerzo

Es el componente discontinuo del material. Su misión principal es mejorar y/o complementar las propiedades de la matriz en determinadas direcciones prefijadas o de forma aleatoria dependiendo de las distintas necesidades. La propiedad más importante de las fibras es su módulo elástico, este debe ser significativamente más rígido que la matriz.

Esto permite que aumente el esfuerzo aplicado sobre el material compuesto.

La naturaleza de los refuerzos también puede ser metálica, cerámica o polimérica, pero normalmente se clasifican en función de su geometría:

- Refuerzos fibrosos: el refuerzo es una fibra, es decir, un material con una relación longitud-diámetro muy alta. Las fibras pueden ser continuas (fibra larga y tejidos) o discontinuas (fibra corta y monofilamentos), estas últimas pueden ser orientadas o distribuidas aleatoriamente. Ejemplo: epoxi con fibra de vidrio Figura 4.

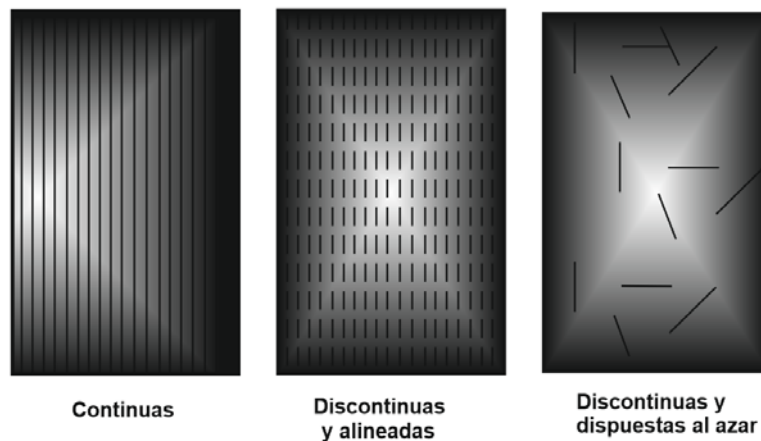


Figura 4. Distintos tipos de refuerzos de origen fibroso.

- Refuerzos articulados: el refuerzo son partículas equiaxiales (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente iguales en todas las direcciones). Ejemplo: caucho reforzado con negro de humo.
- Refuerzos estructurales: son materiales constituidos por la combinación de materiales compuestos y materiales homogéneos. Se clasifican a su vez en continuas discontinuas y alineadas discontinuas y orientadas al azar materiales laminados (constituidos por apilamiento de láminas paralelas) o paneles sándwich (compuestos de núcleo y tapas) Figura 5.

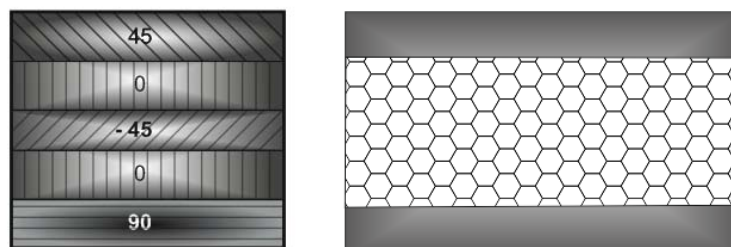


Figura 5. Refuerzos estructurales.

3.2.2 Materiales reforzados con partículas

La adición de partículas a una determinada matriz, es un recurso utilizado habitualmente para obtener materiales más resistentes. Las partículas de refuerzo suelen ser más resistentes que la propia matriz, cohesionándose fuertemente con ella mejorando sus propiedades mecánicas Figura 6.

En la Figura 6 se muestran distintas imágenes de matrices reforzadas con fibras.

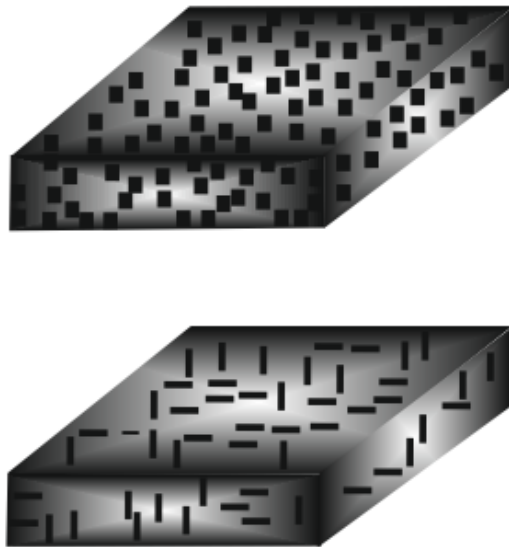


Figura 6. Matriz reforzada con partículas.

Un ejemplo de este tipo de material es el hormigón, material particulado donde su matriz (cemento) como las partículas (grava y arena) son materiales cerámicos.

Su empleo como material de construcción se basa en su dureza, bajo coste, resistencia al fuego y la posibilidad de prepararlo in situ con la forma deseada.

3.2.3 Materiales reforzados con fibras

Este tipo de materiales tienen siglos de antigüedad, (utilización de paja para mejorar los ladrillos de barro), sin embargo, actualmente son los composites más importantes desde el punto de vista tecnológico ya que se trata de obtener materiales con una elevada resistencia y rigidez y que posean una baja densidad siendo resistentes tanto a altas como a bajas temperaturas. Ejemplo de este tipo de materiales son la fibra de vidrio, y la fibra de carbono principalmente.

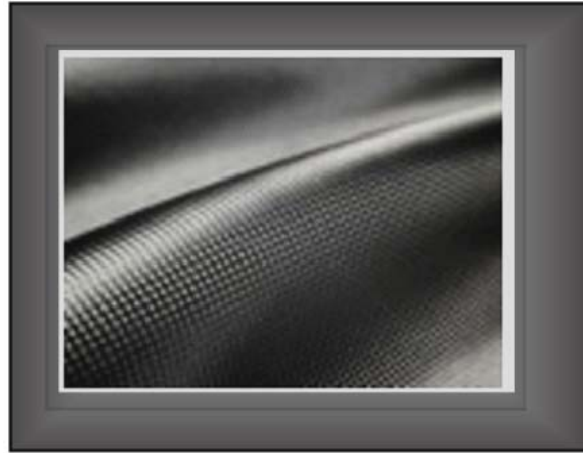


Figura 7. Material reforzado con fibras.

Los composites laminares se caracterizan por su elevada resistencia en todas las direcciones, siendo ligeros y de bajo coste. Están formados por láminas de materiales con elevada resistencia en una determinada dirección. Las láminas se apilan y se pegan entre sí alternando la dirección principal consiguiendo de esta manera que el material resultante tenga una elevada resistencia en todas las direcciones. Para la unión de las láminas se emplea un polímero que endurece por calentamiento y presión.

En la Figura 8 se muestra la imagen de un apilamiento laminar.

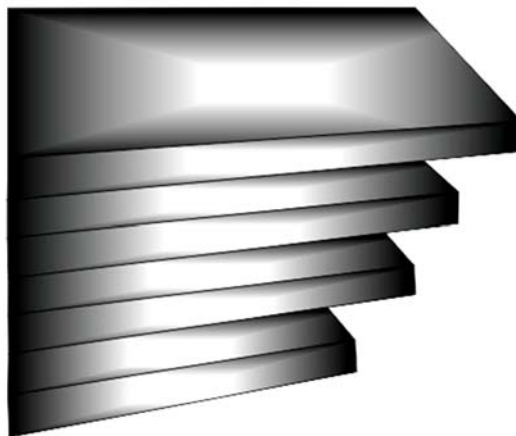


Figura 8. Composites laminares.

Un ejemplo de estos materiales laminares son los vidrios de seguridad.

3.2.4 Material Sándwich

Estas estructuras están formadas por dos láminas externas resistentes, llamadas caras o pieles, separadas por una capa de material menos denso y resistente, denominado núcleo [39]. Estos materiales están concebidos para resistir esfuerzos de flexión transversal. Un ejemplo de este tipo de materiales es el cartón corrugado que se utiliza como embalaje protector.

En definitiva, la apuesta por estos materiales, se basa en sus ventajas:

- Peso reducido.
- Rápida instalación.
- Gran Resistencia específica.
- Mantenimiento escaso o nulo.
- Durabilidad en ambientes agresivos:
 - Inexistencia de corrosión.
 - Resistencia al ataque químico.
 - Resistencia al ataque hielo-deshielo.
 - Permeabilidad a las ondas electromagnéticas.

En la Figura 9 se muestra la imagen de las partes componentes de un laminado con una estructura de sándwich.

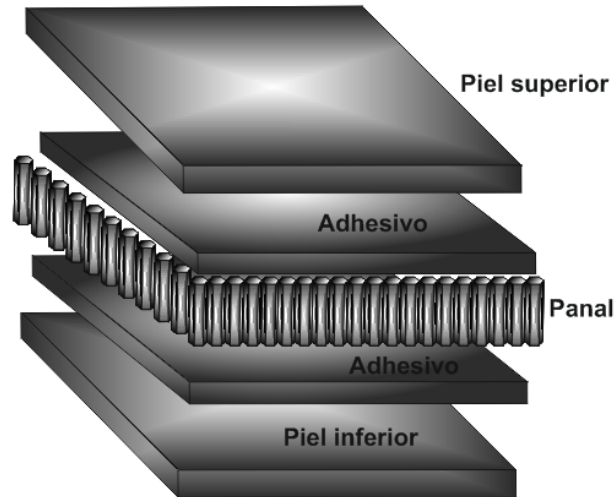


Figura 9. Material en forma de sándwich.

Debido a las propiedades que se proporcionan, los refuerzos más usados son de las fibras cerámicas (fibras de vidrio, carbono, boro, carburo de silicio, alúmina, nitruros...) y las fibras poliméricas (fibras de aramida, polietileno...).

La forma de presentación del refuerzo, es decir, fibra corta, larga o tejido es clave para lograr las sollicitaciones estructurales de la pieza final.

En cuanto a los tejidos, el tipo de trenzado y su dirección (unidireccional, bidireccional, 45°, etc.) proporciona las propiedades requeridas a la pieza final de acuerdo a sus especificaciones Figura 10.

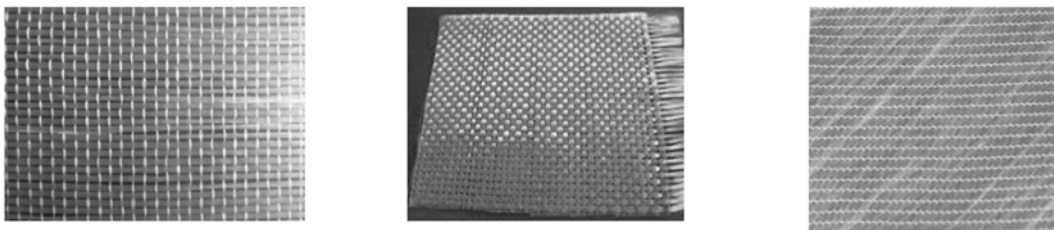


Figura 10. Tipos de Trenzados: Unidireccional - Bidireccional 0/90° - 45°.

3.3 Matriz

Es el componente continuo del material compuesto que rodea a los refuerzos y los mantiene en su posición protegiéndolos de las agresiones exteriores.

La matriz se encarga de transferir los esfuerzos mecánicos a través de la interfaz y suele ser el constituyente que determina el comportamiento a fractura ante los esfuerzos de compresión y de cizalladura.

En los materiales compuestos diseñados para las direcciones preferentes, las propiedades mecánicas de la matriz condicionan las propiedades mecánicas de aquellas direcciones no preferentes. Además, en una gran mayoría, la matriz es la responsable de las propiedades químicas y de la limitación de temperatura de trabajo del material compuesto.

Existe tres grandes familias de materiales compuestos en función de las distintas naturalezas de la matriz, tanto metales como polímeros o cerámicas. Es precisamente, la naturaleza de la matriz la que condiciona el objeto de la incorporación de un refuerzo.

- **Materiales compuestos de matriz polimérica (PMCs):** Los materiales poliméricos se caracterizan por sus buenas propiedades elásticas y alta resistencia, así como por una excelente relación entre la resistencia a la fatiga y el peso. Presentan en general una baja conductividad térmica y eléctrica junto con una buena resistencia química. La incorporación de refuerzos de carácter cerámico, tales como la fibra de vidrio (muy usada por su bajo coste) o de carbono (la comercialización del producto es debido a su alta dureza), o incluso poliméricas (Kevlar o polietileno, muy resistentes). permite notables incrementos de las propiedades mecánicas globales, sin un incremento importante de la densidad media del material [40-44].

Los materiales de matriz polimérica presentan una amplia gama de ventajas frente a los materiales convencionales, como el aluminio y el acero. Entre sus ventajas se destacan una mejor relación resistencia/peso, mayor rigidez específica, mejor resistencia a la corrosión así como a la fatiga, y posibilidad de fabricar piezas de distintas dimensiones y diseños a medida [45].

Por lo que, los materiales composites con fibras van tomando cada vez una mayor importancia en sectores tan importantes como: automoción, eólico, aeroespacial y naval [46-49].

- **Materiales compuestos de matriz metálica (MMCs):** Los materiales metálicos se caracterizan por sus buenas propiedades elásticas y resistentes, además de presentar una elevada tenacidad a la fractura. Sin embargo, presentan temperaturas de trabajo relativamente bajas (especialmente aquellos metales de mayor uso y menor costo) para determinadas aplicaciones en las que su uso es interesante (en comparación con las cerámicas).
- La incorporación de refuerzos de naturaleza cerámica (tales como partículas o fibras cerámicas) mejora notablemente el comportamiento a alta temperatura de los metales, posibilitando su uso en aplicaciones donde la exigencia térmica sea mayor.
- **Materiales compuestos de matriz cerámica (CMCs):** Los materiales cerámicos se caracterizan por ser resistente a altas temperaturas. Presentan una resistencia química elevada y una conductividad térmica baja. Sin embargo, su tenacidad de fractura es muy baja, esa fragilidad limita enormemente su uso en aplicaciones de responsabilidad mecánica elevada. La incorporación de refuerzos de otra naturaleza (fibras o partículas con transformaciones de fase inducidas por estados de tensión) incrementa su tenacidad de fractura de forma notable.

Dentro de estos tipos, los materiales compuestos de matriz polimérica (PMCs) son los más usados.

En la Figura 11 se muestra una gráfica recopilativa de la producción anual de los composites.

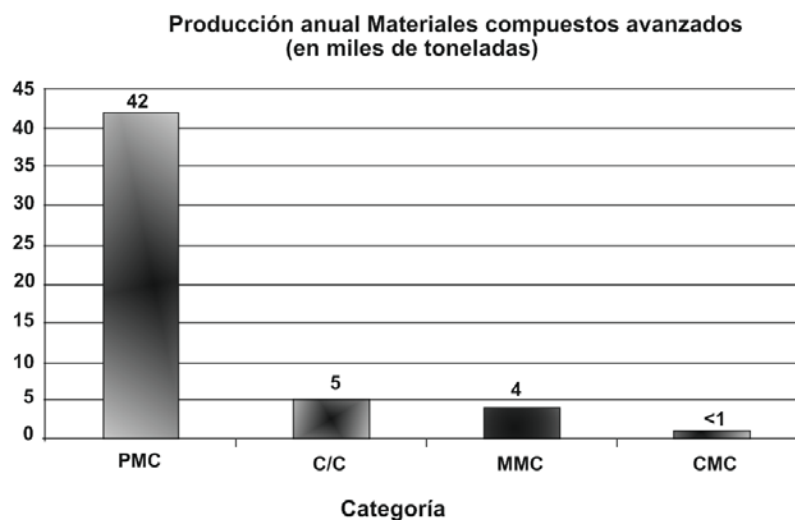


Figura 11. Producción anual de los materiales compuestos avanzados.

Un material compuesto de matriz polimérica (PMCs) está formado por un componente que actúa como refuerzo, soportado por otra que actúa como material aglutinante, conocido como matriz o resina.

La matriz o resina es el material aglutinante que permite a las fibras trabajar de forma conjunta, transmitiendo los esfuerzos de unas a otras. Las matrices poliméricas pueden ser divididas en dos grupos:

- Termoplásticas.
- Termoestables.

Los termoplásticos se reblandecen con la aplicación de calor y pueden ser remodelados con la temperatura y presión adecuadas [50,51].

Aunque su proceso de producción limita su uso en composites de fibras largas y trenzadas, debido a su elevada viscosidad, son especialmente indicadas para ser utilizadas en aplicaciones donde es necesario mucho volumen a bajo coste [52-54].

En cuanto a los termoestables polimerizan (proceso de curado) [55] en el mismo momento de la fabricación y no se reblandecen con el calor. Su estado líquido antes del curado los hace idóneos para la producción de laminados con fibras largas y tejidos. Los termoestables más usados para la producción de laminados como matriz son el poliéster, el epoxi y las poliamidas. El poliéster se usa principalmente con fibras de vidrio y permite aplicaciones hasta los 100°C. Los epoxis resultan más caros, pero tienen mejor resistencia a la humedad, menos variaciones dimensionales durante el curado y pueden aguantar temperaturas de uso hasta 175°C.

La poliamida permite aplicaciones en temperaturas elevadas, hasta 300°C, pero requiere un proceso de producción más complicado.

3.3.1 Resina biodegradable

El desarrollo de los “green composites” junto con su sostenibilidad y prestaciones mecánicas, puedan ser considerado como un sustituto económico y competitivo de los compuestos poliméricos reforzados de fibra de vidrio convirtiéndolos en una importante área de estudio. Sin embargo, para que un “green composite” pueda ser catalogado como una alternativa sostenible, será necesario considerar todas las etapas a lo largo de su ciclo de vida, partiendo desde el proceso de su fabricación, su uso y retirada del mercado. El desarrollo en los últimos años de los composites de fibras naturales ha sufrido un gran auge, empleando una gran variedad de fibras naturales de origen vegetal, se destinan a la fabricación de composites que son percibidos como “green”, a partir de fibras cortas y matrices termoplásticas, con gran implantación en sectores como la industria del automóvil.

En la literatura, es posible encontrarlos también bajo la denominación de biocomposites que incluye a “WoodPlastic Composites” y Natural Fibre “Composite”, por el origen natural y renovable de la materia prima empleada como refuerzo. Puesto que las fibras naturales tienen una baja densidad, inferior a la de la fibra de vidrio, las propiedades mecánicas específicas de estos composites los hacen adecuados para aplicaciones en automoción [56-58].

Para que los composites de fibra natural puedan sustituir a los composites de matriz termoestable reforzados con fibras de vidrio, en aplicaciones de componentes estructurales, será necesario el desarrollo de una combinación de un refuerzo de fibra natural de fibras largas (tejido textil), con los procesos de fabricación bien establecidos

Además de la opción del uso de fibras naturales, en los últimos años, ha sido considerable la investigación dedicada, hacia el uso de materias primas de origen renovable para la síntesis de polímeros “green”, tanto en la producción de termoplásticos como termoestables, que permita sustituir a los tradicionales polímeros derivados del petróleo, contribuyendo a aumentar la sostenibilidad de los mismos.

Para la mayoría de composites, la contribución más importante es el impacto medioambiental de su fabricación, se basa en el sistema de resina/polímero empleado, especialmente en los composites de matriz termoestable, donde no es posible su reciclado y su biodegradabilidad.

En este último caso, por tanto, implantar cambios sostenibles al sistema de resina lograría el mayor impacto positivo en la sostenibilidad del composite final.

Para que el cambio sostenible en el sistema de resina sea comercialmente viable, la bioresinas, necesitarán alcanzar unas propiedades semejantes tanto físicas como en prestaciones mecánicas, similares a las resinas sintéticas tradicionales, además de ser económicamente competitivas.

Para hacer efectivo este cambio sostenible, se requerirá la reformulación de la resina base con materias primas sostenibles. En este sentido, los aceites vegetales o procedentes de plantas son prometedoras materias primas para la síntesis de polímeros [59], y especialmente para la síntesis de resinas termoestables [60] conocidas en la literatura como “bio-based thermosetting resin”. Los aceites vegetales, que contienen largas cadenas de ácidos grasos, están disponibles ampliamente a partir de varios recursos naturales. Es el caso de las resinas.

Las resinas termostables furánicas, de poliéster o las epoxídicas procedentes de la síntesis de recursos naturales tales como los subproductos agrícolas (bagazo, cáscaras de avena, mazorcas de maíz, etc.) o procedentes de aceites naturales cultivados y cosechados industrialmente, tales como aceite de pino [61-65]. El aceite de soja y de linaza son los aceites más comunes utilizados hoy en día, debido a su disponibilidad y bajo coste [66].

El material compuesto, no estaría completamente formado si solo se utilizaría la fibra, por lo tanto, hay que añadir un elemento que distribuya las fibras y al mismo tiempo sea un adhesivo entre ellas. La matriz es el componente que realiza estas funciones, donde los materiales más utilizados son los polímeros.

En general las fibras pueden añadirse a termoplásticos en el proceso de conformado de piezas, como agentes aleantes o de carga, que mejoran notablemente las propiedades mecánicas. Sin embargo, como la finalidad de esta tesina, es reducir el impacto medioambiental, por lo que se utiliza resinas termoestables biodegradables en la fabricación de placas de materiales compuestos.

Los polímeros termoestables biodegradables, se encuentran formados por dos componentes, uno de los componentes es un material sintetizado procedente del principalmente del petróleo; y un segundo componente con unos porcentajes considerables de materiales bio-renovables, obtenidos a través de residuos procedentes de otros procesos industriales, tales como la madera o aceites vegetales.

El componente sintetizado del petróleo es la resina epoxi, su nombre técnico es Poliepóxido, y es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor.

Las resinas epoxi más frecuentes son producto de una reacción entre bisfenol-A y la epíclorohidrina. El bisfenol-A se obtiene de fenol y acetona.

Las resinas epoxi están constituidas comúnmente de dos componentes que se mezclan previamente antes de ser usados; al mezclarse reaccionan causando la solidificación de la resina, su curado se realiza a temperatura ambiente, durante el curado se produce la formación de enlaces cruzados lo que hace que su peso molecular sea elevado. El tiempo del curado o secado disminuye al aumentar la cantidad de catalizador [67].

La resina epoxi presenta una buena humectación y adherencia óptima. Permitiendo un buen empapado de las mismas en el proceso de fabricación de las placas de composite. A su vez tiene buenas propiedades mecánicas, siendo un buen aislante eléctrico y resistente a las temperaturas elevadas. La composición de las resinas bio-degradables, en la mayoría de las ocasiones son de carácter confidencial.

Existen diversos estudios de la creación de nuevos materiales compuestos a base de resinas biodegradables, pero manteniendo siempre la privacidad sobre sus porcentajes y materiales utilizados.

Ventajas e inconvenientes de resina epoxi

En la Tabla 1 se ponen de manifiesto el resumen de ventajas e inconvenientes de las resinas de epoxi.

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes de la resina de epoxi.

Ventajas	Inconvenientes
Excelente adhesión a cualquier fibra	Alta reticulación que induce falta de tenacidad
Excelente resistencia estática y a fatiga	Procesabilidad compleja debido a la alta resistencia al flujo de resina (alta viscosidad)
Contracción baja de curado	Alto costo
Tiempo de trabajo largo	
Alta resistencia al agua y al medio ambiente	

Se la puede considerar como una matriz de altas prestaciones para ser añadida a la fibra de carbono.

3.3.2 Resinas de poliéster

Existen matrices de muy diversa naturaleza, las más comunes son matrices poliméricas (resinas), de metal o cerámicas. Dentro del campo de la construcción, las matrices más empleadas son las termoestables, y, dentro de éstas, las de poliéster, viniléster, fenólicas y epoxi [68,69].

Las matrices de naturaleza polimérica se tienen las matrices termoplásticas, las termoestables y elastómeras. Las matrices termoestables más comunes son de resina de poliéster.

Existen en el mercado dos grandes grupos de materiales plásticos:

- Termoestables.
- Termoplásticos.

Entre los termoplásticos más conocidos están el PVC, el Nylon, el Polietileno y el ABS, los que son procesados por inyección, extrusión o soplado.

Estas resinas tienen una excelente resistencia química, pero requieren una gran inversión en moldes, lo que hace imposible utilizarlos en bajos volúmenes de producción.

Algunas resinas termo fijas tienen las mismas limitaciones de procesamiento que las termoplásticas y también exigen altas inversiones en moldes y equipos.

Las resinas que son la excepción a estas limitaciones son las de poliéster insaturado, éster vinílicas y epóxicas. Estas resinas son líquidas y procesadas al adicionar sustancias especiales (catalizadores y acelerantes) que las transforman en sólidos a temperatura ambiente.

Todas las resinas de poliéster son termoestables, es decir: que son maleables hasta que se calientan, entonces quedan permanentemente endurecidas y no cambian su estado incluso si se las somete al mismo calor una segunda vez.

Las resinas de poliéster se suministran en forma de líquido viscoso, que con la adición de productos químicos adecuados se transforman de un estado líquido a un estado sólido. Una vez la resina ha obtenido su estado sólido, no podrá ser transformado de nuevo a estado líquido

El poliéster está formado por un grupo éster Figura 12.

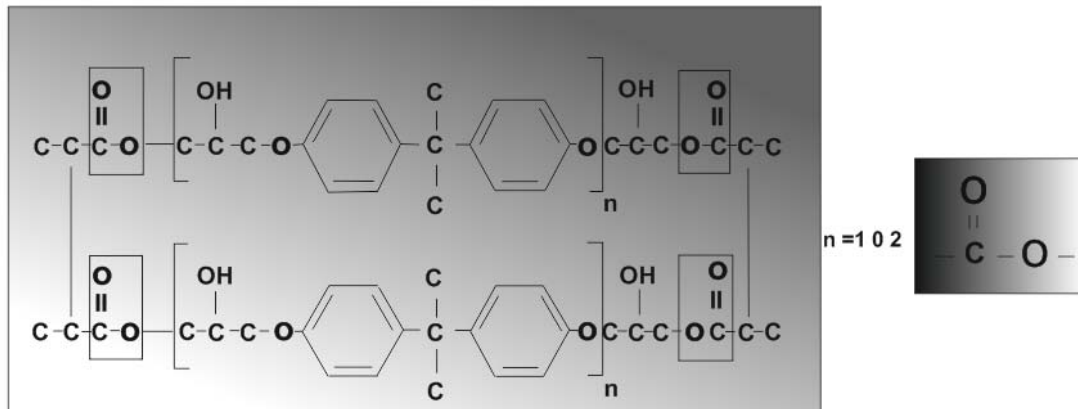


Figura 12. Fórmula química del grupo éster.

El grupo éster, como se observa en la imagen de la izquierda de la Figura 12, se encuentre ubicado dentro de la cadena polimérica. Este se encuentra formado por enlaces dobles que se descomponen produciendo un cambio del enlace doble al enlace simple. Este cambio va a generar un entrecruzamiento que a producirá la transición del estado líquido al estado sólido.

Las propiedades de la resina de poliéster se recopilan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de la resina de poliéster.

Propiedad	Resina poliéster
Módulo de tracción (GPa)	2,10 – 3,45
Resistencia a la tracción (MPa)	34,5 – 103,50
Deformación de rotura (%)	1 – 5
Contracción de curado (%)	5,0 – 12 %
Máxima temperatura de trabajo °C	60 – 205
Densidad (g/ cm ³)	1,10 – 1,43

La resina de poliéster, presenta una contracción de curado muy elevada entorno al 5,0 – 12,0 %. Lo que constituye un inconveniente presentando una contracción mucho más elevada que la de las resinas de epoxi.

Las resinas de poliéster, son las más utilizadas debido a su buena relación calidad-precio, pueden combinarse con cualquier tipo de refuerzo. Generalmente, se utilizan fibras de vidrio, de carbono, de boro, de polímero sintético, de cerámica, de sisal, de algodón, etc., en forma tejida o no tejida. También se utilizan en núcleos: parte central de una construcción de tipo "sándwich" formada por una piel interior y una piel exterior. Los materiales comúnmente utilizados son la espuma, las estructuras alveolares (panel de abeja), el papel o la madera.

Se puede personalizar el tiempo de reacción de las resinas de poliéster, adecuándolas a sus sistemas de producción ajustando los porcentajes de catalizador: sustancia que se añade a las resinas o al gel coats en cantidades controladas para provocar su gelificación y reticulación. El catalizador reacciona con el acelerador, creando así unos radicales libres que, a su vez, inician la polimerización o acelerantes, o la temperatura de curado: temperatura a la cual un producto alcanza su endurecimiento final.

La Figura 13 muestra la reacción exotérmica que se produce en la resina de poliéster por la acción de los catalizadores o aceleradores.

La resina de poliéster, en su origen, es similar a un trozo de vidrio. Por ello, se le añade para un mejor manejo una proporción de "Estireno", un disolvente que la convierte en un fluido.

Al añadirle el catalizador, la combinación crea una serie de radicales libres que provocan que los elementos químicos de la resina se enlacen, formando una red cada vez más tupida que, en una primera fase, hace que se gelifique, y, finalmente, se endurezca.

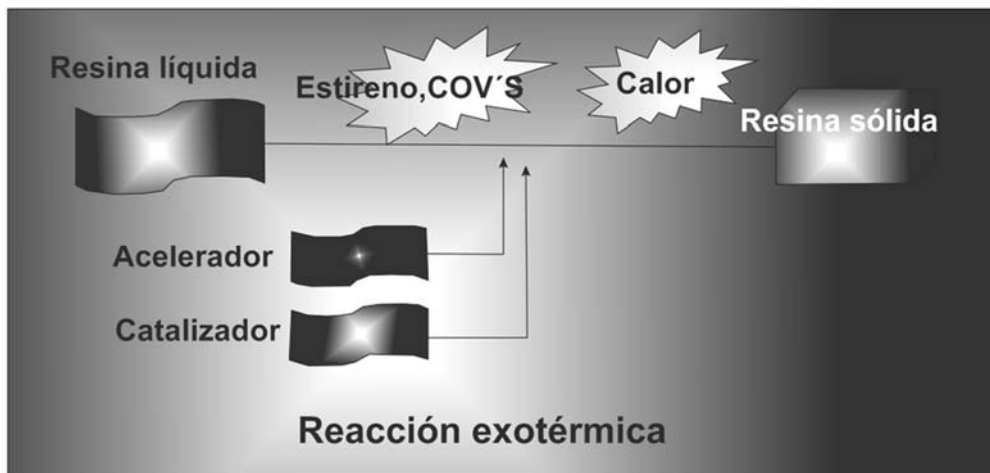


Figura 13. Procedimiento del proceso de curado de una resina de poliéster.

El proceso de curado (polimerización o transformación irreversible del estado líquido al estado sólido, con obtención de propiedades físicas máximas, incluyendo la dureza, cuando la reacción ha finalizado completamente) de la resina de poliéster se representa en la Figura 14.

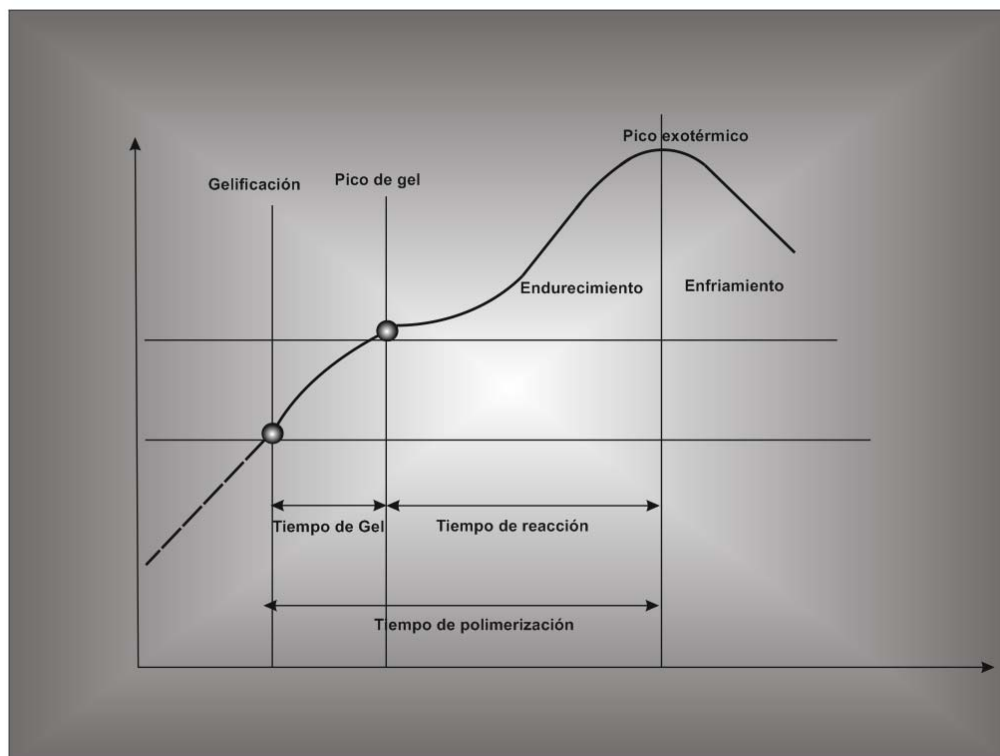


Figura 14. Fases del proceso de curado.

Tras añadir los catalizadores y acelerantes, en su caso, comienza el proceso de gelificación (transición de un líquido a un sólido blando), hasta llegar al punto de gel, momento en el que la resina pasa de estado líquido a estado viscoso, una vez pasado el tiempo de gel comienza la reacción exotérmica de curado.

La transformación de estas resinas en un estado sólido se conoce como polimerización o curado. Esta reacción no ocurre instantáneamente después de la adición de los promotores de curado. Además, después de activadas, ellas también permanecen inalteradas durante algunos minutos (5, 10, 15 o más minutos, dependiendo de las cantidades de catalizador y acelerador y de las condiciones ambientales), luego pasan por una etapa gelatinosa antes de endurecer.

Una vez ocurrida la gelatinización el curado prosigue con gran desprendimiento de calor (reacción exotérmica) hasta que la resina presenta, después del enfriamiento, las características físicas de un sólido rígido que ya no puede ser transformado en líquido.

Fases del proceso de curado de la resina epoxi

Cuando la resina de epoxi se encuentra en estado líquido viscoso, sus cadenas moleculares son lineales Figura 15.

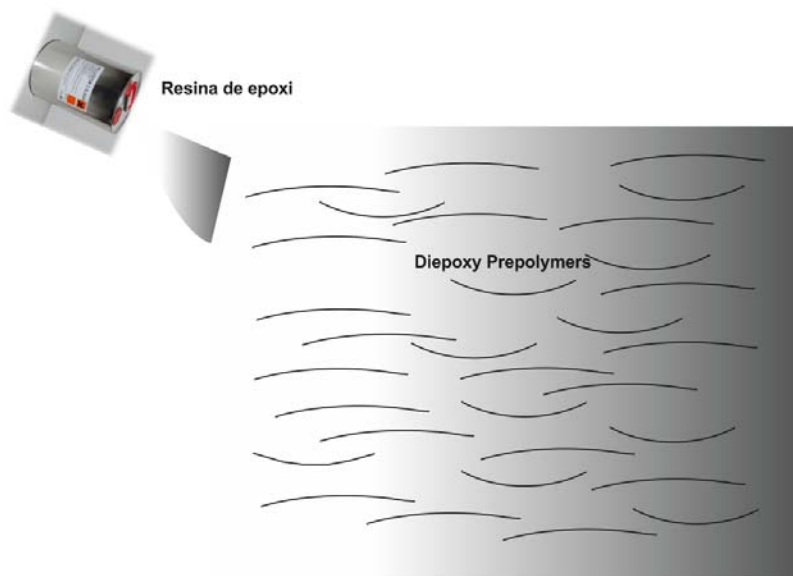


Figura 15. Imagen del estado líquido de la resina de epoxi.

Cuando se introduce un endurecedor, como puede ser la diamina, las aminas se van posicionando y conectándose para formar una red molecular en 3D (estado sólido) Figura 16.

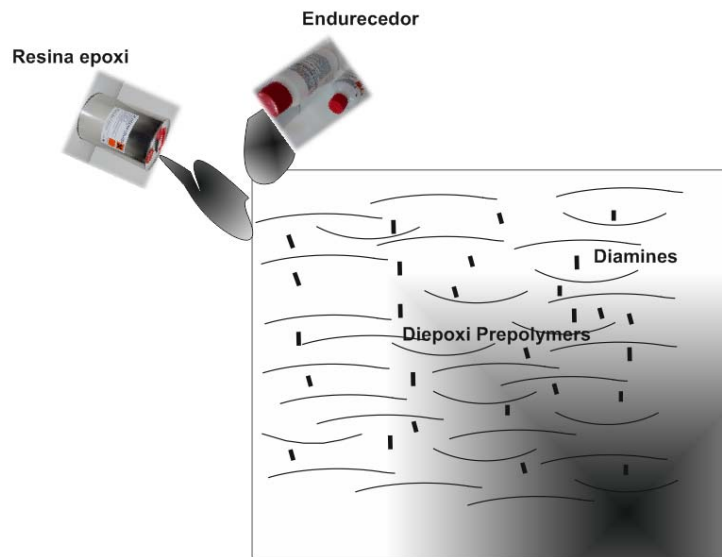


Figura 16. Imagen de la transición de cadenas lineales a 3D (sólido).

Al finalizar el proceso de curado se ha creado una nueva sustancia. Formándose una red molecular en 3D (estado sólido) Figura 17.

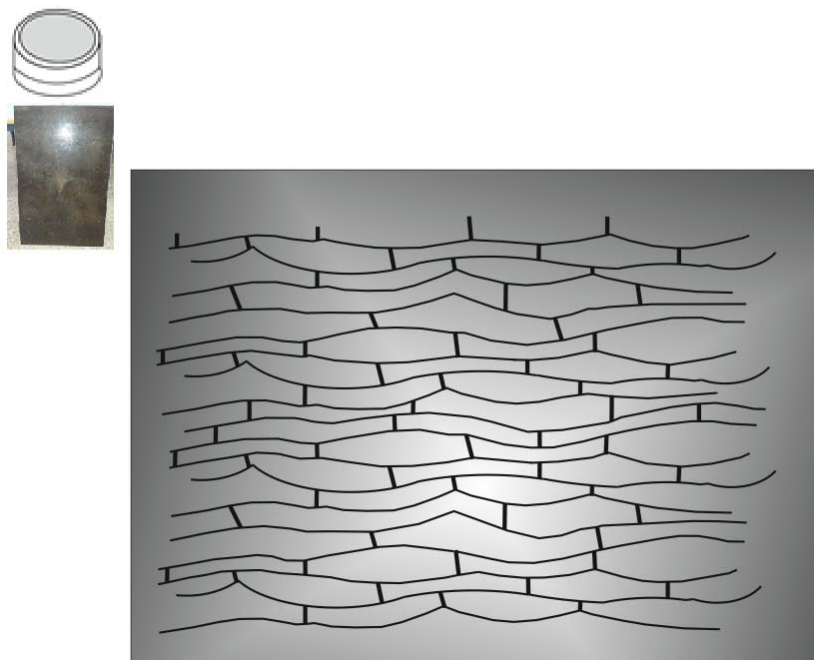


Figura 17. Finalización del proceso de curado.

Como se puede observar en la Figura 17, la amina ha ido trazando puentes que han unido las cadenas lineales en tres dimensiones formándose una red molecular con entrecruzamientos por medio de una reacción química que ha permitido pasar a la resina de un estado líquido viscoso a un estado sólido.

A diferencia de las resinas de poliéster y vinilésteres (de muy pocos minutos), la resina de epoxi tiene un tiempo de trabajo largo > 1 hora. Y los tiempos de curado son bajos alrededor de los 5 minutos.

Ventajas e inconvenientes de la resina de poliéster

En la Tabla 3 se ponen de manifiesto el resumen de ventajas e inconvenientes de las resinas de poliéster.

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de la resina de poliéster

Ventajas	Inconvenientes
Procesado sencillo	Baja resistencia a tracción y fatiga
Capacidad para aceptar Una amplia variedad de aditivos.	Unión pobre a las fibras de carbono y aramida
Baja viscosidad	Emisiones de estireno y alta contracción en el curado
Bajo costo	Tiempo de trabajo limitado

Esta resina se la puede considerar como una matriz de bajas prestaciones. La Tabla 4 muestra la clasificación de las distintas resinas de poliéster que se comercializan en el mercado actual.

Tabla 4. Clasificación resinas de poliéster.

Tipos	Aplicaciones
Orto ftálicas	Semirrígidas: placas onduladas. Rígidas: barnices, preimpregnados
Isoftálicas	Gel coats, depósitos, ingeniería química
Resinas flexibles	Laminados
Vinil éster	El campo de aplicación de estos materiales se encuentra en la fabricación de cañerías y estanques para el manejo o depósito de sustancias altamente corrosivas.

3.4 Interfase

Al ser insolubles los distintos componentes del material compuesto hacen que surja una región de interacción física y/o química, que se denomina interfase

Normalmente a la interfase se la considera, por su importancia, como el tercer constituyente básico de todo material compuesto [70-75].

Su papel es fundamental en la constitución de un material compuesto, ya que sus propiedades van a condicionar fuertemente las propiedades finales del material compuesto, porque será quien proporcionará la continuidad de las propiedades y la responsabilidad total de las sinergias que surgen de la combinación de dos materiales.

Por lo tanto, es imprescindible el control de las propiedades de la interfase para conseguir en el material compuesto unas propiedades globales deseadas. Pero hay que tener en cuenta que este control puede provocar una modificación de la superficie del refuerzo, ya sea físicamente o químicamente. Con lo cual, hay que tener especial cuidado con la propiedad de la interfase a la hora de desarrollar el material compuesto.

Como consecuencia de que el refuerzo se dispersa en la matriz, se pueden conseguir distintas propiedades, obteniendo así distintos tipos de materiales según la disposición (orientación y distribución) del refuerzo en la matriz. Esa dispersión en la mayoría de casos, se realiza de forma controlada en función de los distintos sistemas de fabricación utilizados para obtener las propiedades óptimas deseadas.

Normalmente, el control de las propiedades de la interfase refuerzo-matriz como su orientación y distribución de los refuerzos, requieren de complejos y costosos procesos de fabricación que aumentan de forma considerable su coste final, lo que se traduce en una reducción competitiva económica. Los factores que influyen en el comportamiento se deben fundamentalmente al: tipo de matriz, de refuerzo así como a su disposición, en el sistema de fabricación, la adhesión fibra-matriz y el tipo de carga al cual está sometido [76-79].

Se pueden encontrar en bibliografía una gran cantidad de estudios que analizan el comportamiento físico-mecánico de los composites con matriz polimérica con fibras de refuerzos.

Reacciones que ocurren en la resina epoxi durante el curado

Durante el proceso del curado los enlaces diamina N – H son muy reactivos y actúan como puentes entre el pre polímero diepoxi lineal.

Como los anillos de los extremos de cadena de los polímeros de la resina epoxi son muy reactivos se abren estos puentes y junto con los enlaces diamina N – H se unen formando el mecanismo de reticulación del anillo de apertura Figura 18.

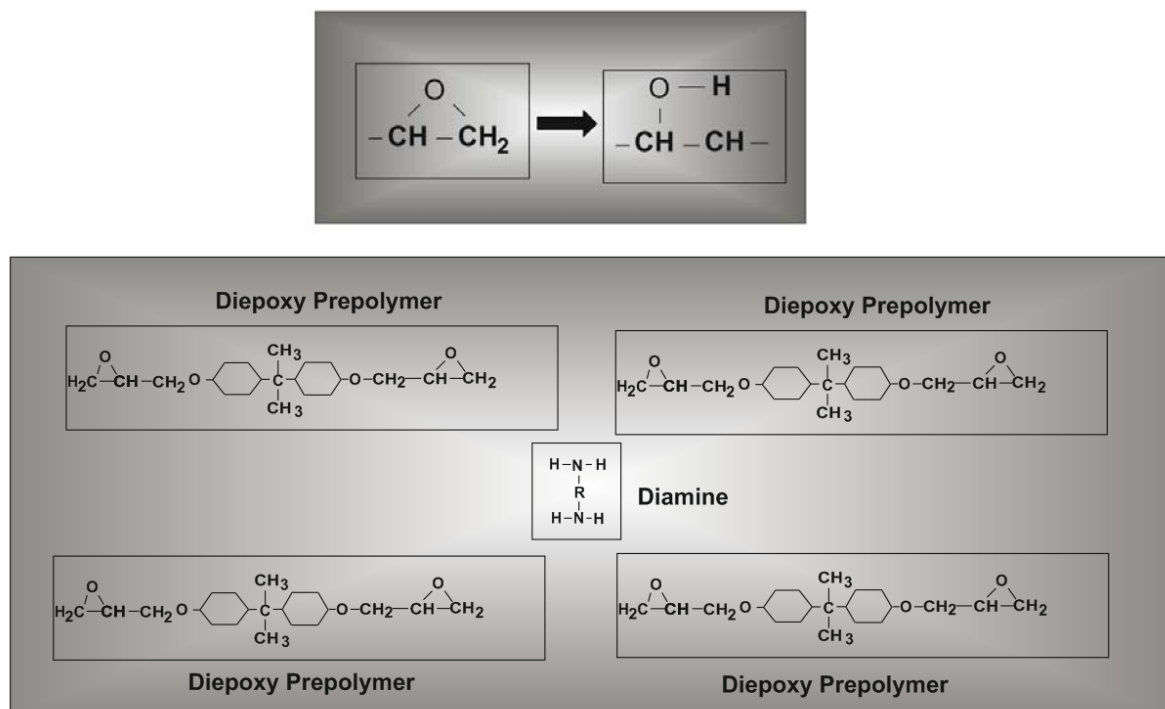


Figura 18. Apertura de los puentes de extremo de cadena

Después del proceso del curado se ha obtenido un material sólido con una alta densidad de reticulación, no hay ningún elemento en el que se pueda disolver la resina, como ocurre con el poliéster y con el viniléster.

Es una resina viscosa y tiene una gran rigidez y resistencia (estática y a fatiga) y baja tenacidad, es frágil.

Debido a su rigidez y resistencia que son proporcionadas por la densidad elevada de reticulación, las resinas de epoxi son el complemento ideal para las fibras de carbono en la formación de materiales compuestos, sin olvidar que es la única resina que se une bien con las fibras de aramida.

Los compuestos de vidrio / epoxi se utilizan de forma usual en aplicaciones estructurales como las palas eólicas.

La elevada densidad y su baja tenacidad son consecuencia del alto grado de entrecruzamiento molecular (alta densidad de reticulación).

Mecanismo de curado

En el curado la reticulación se produce a través del estireno que actúa como puente entre cadenas. Cuando se desdoble el doble enlace queda en un enlace simple funcional que actúa como puente, generando un cambio de cadenas lineales a cadenas en redes tridimensionales.

El estireno es el agente de reticulación, lo que va a producir problemas de índole medioambientales, por ser un agente muy perseguido y hace que las empresas que trabajen con poliéster en molde abierto, tienen constantes chequeos de máximos niveles permitidos.

El iniciador que se requiere normalmente es un peróxido para la realización de la iniciación entre el poliéster y el estireno.

Su procesado es bastante sencillo. Se carece del oxígeno en el extremo de la cadena polimérica que se tenía en la cadena de resina epoxi y que desempeñaba un papel fundamental en la unión entre cadenas poliméricas, de tal manera que la resina de poliéster no posee una buena adherencia. Por lo que, la unión de la resina de poliéster con las fibras de carbono y de aramida no son efectivas (adhesión pobre). Con la fibra de vidrio sí que tiene una unión aceptable, y es debida a que esta fibra posee unas propiedades superficiales extraordinarias.

Por lo tanto, se deduce que la resina de poliéster es una resina que tiene problemas de adhesión.

La contracción durante el proceso de curado es otro inconveniente, con una limitación de tiempos de trabajo (unos pocos minutos) lo que va a producir una dificultad en la impregnación y la compactación.

La reacción de curado de los poliésteres es irreversible, esto es, una vez transformados de líquidos a sólidos, ya no pueden ser reprocesados de sólidos en líquidos. Las fibras de vidrio son incorporadas a la resina, mientras que la resina permanece líquida, inmediatamente después de la adición del catalizador y el acelerador.

La caducidad aproximada de la resina de poliéster es de 6 meses. Si se ha abierto el envase la vida del producto será mucho menor. Para su conservación se debe evitar la humedad, la alta temperatura y la luz.

Tiene una ebullición inferior a los 60° C (Su disolvente que es el estireno tiene un punto de inflamación de 33°C por ello es muy recomendable guardar las resinas lejos de cualquier foco inflamable).

Reacciones en la resina de poliéster durante el curado

Como se ha indicado las cadenas de poliéster tienen unos dobles enlaces que se encuentran ubicados dentro de la cadena, así como unos grupos esteres y dobles enlaces. Al encontrarse estos esteres dentro de la cadena produce la generación de una estructura con muchos puntos reactivos químicamente, convirtiéndola en frágil y susceptible a hidrólisis por agua, convirtiéndose los esteres y los dobles enlaces en dos inconvenientes en este tipo de resinas Figura 19.

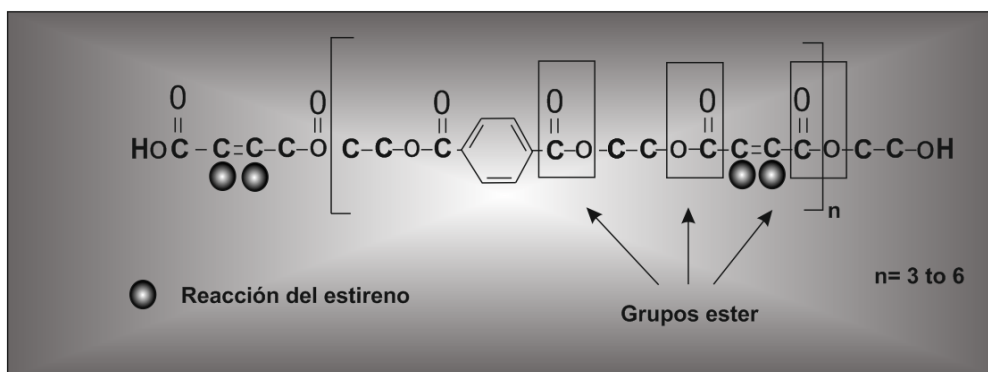


Figura 19. Los grupos esteres y los dobles enlaces crean dos inconvenientes importantes en las resinas de poliéster.

El catalizador es el estireno, al ser soluble en el estireno se convierte en una resina poco viscosa (mucho menos viscosa que la resina de epoxi) lo que presenta una ventaja para determinados procesos.

Otro punto favorable es que es una resina muy versátil, a la que se le puede añadir una gran variedad de aditivos (peróxido de antimonio para la abrasión)

4. Fibras de naturales

Fibra natural se denomina a las fracciones, hebras o filamentos cuyo origen están en la naturaleza y que pueden hilarse para dar lugar a cuerdas. Estos hilos o cuerdas obtenidos con las fibras pueden tejerse para crear tejidos o agruparse para formar no tejidos.

El término fibra natural se aplica de forma indistinta a los elementos naturales de origen mineral como el asbesto, al animal como las fibras de cuero o al vegetal yute, sisal.

Sin embargo, en este trabajo, el término de fibras naturales va a hacer referencia exclusivamente a las fibras vegetales, puesto que son las que presentan una mayor diversidad y ofrecen las mejores características tanto a nivel técnico como medioambiental. Los trabajos relacionados con composites con tejidos de fibras naturales son relativamente novedosos [80], inicialmente por la falta de disponibilidad de estos tejidos técnicos en el mercado, prácticamente en los últimos cinco años.

Tras una época en la que la aparición de los refuerzos sintéticos de fibra de vidrio, carbono o aramida, desplazó a las fibras naturales debido a las mejores prestaciones mecánicas, eléctricas o térmicas, en las últimas décadas las fibras vegetales vuelven a despertar el interés de los investigadores y diseñadores, por las ventajas técnicas, económicas, ecológicas y ambientales como pueden ser el relleno de matrices termoplásticas.

Los primeros materiales compuestos formulados con maderas, eran termoestables. Se comercializaron con el nombre de Baquelita y se basan en resinas fenol- formaldehído y serrín.

Además de ser materiales denominados “eco-friendly”, los materiales compuestos formados por fibras naturales tienen propiedades mecánicas interesantes que les permiten competir con los materiales no sintéticos en distintos campos de aplicación [81,82].

Las fibras vegetales están compuestas principalmente a base de lignina y celulosa, que se convierten en condiciones ambientales en compuestos naturales y biodegradables

- Ligninas: impermeabilizan y proporcionan dureza y resistencia.
- Celulosa: elemento esencial que aporta resistencia a tracción y flexibilidad.

Fibras vegetales leñosas y no leñosas, se diferencian básicamente por su procedencia y en la proporción contenida de lignina y celulosa.

Las plantas: Adaptadas a geografías y climas donde la flexibilidad es necesaria.

Crecen rápidamente, desarrollan hojas y tallos largos y resistentes.

Las fibras vegetales, como su propio nombre indica, son fibras que se encuentran de forma abundante en la naturaleza y pueden obtenerse de la paja, tallos, hojas, frutos, semillas y hierbas [83].

Además, no requieren de tratamientos químicos ni de un consumo masivo de recursos para su producción.

Diversos estudios han demostrado que las fibras vegetales tienen las propiedades mecánicas adecuadas para ser usadas como refuerzos en matrices de diferentes tipos, especialmente las poliméricas, en diversas aplicaciones; por lo que se consideran una alternativa a considerar en la búsqueda de fibras sustitutas para las fibras convencionales, y especialmente para las de vidrio tipo E [84].

Sin embargo, sus propiedades en general, y en particular, las mecánicas varían según el origen de su procedencia, pues su contenido en humedad y otros factores, presentan una gran influencia en dichas propiedades.

Por lo tanto, es importante determinar el comportamiento mecánico, en su papel de refuerzo en materiales compuestos, de las fibras procedentes de vegetales.

Para ello se requiere de la obtención de datos experimentales que aporten el valor de dichas propiedades mecánicas, a partir de ensayos normalizados de resistencia de materiales, objetivo principal de este estudio.

Las fibras naturales poseen grandes ventajas sobre los materiales de refuerzo convencionales.

Las principales características de estos materiales es que tienen baja densidad, elevada rigidez, resistencias específicas permisibles, buenas propiedades térmicas y especialmente que son biodegradables y de bajo costo, lo que los hace excelentes para aplicaciones específicas y amigables con el medio ambiente.

Las fibras presentan diferentes composiciones y propiedades físicas que producen una elevada influencia en las matrices y por lo tanto en las propiedades finales del compuesto

Existen alrededor de 50 tipos de especies de plantas conocidas como fuentes de fibras vegetales útiles para la construcción.

Las principales fibras empleadas son celulósicas conocidas por su baja densidad y por ser renovables Figura 20.

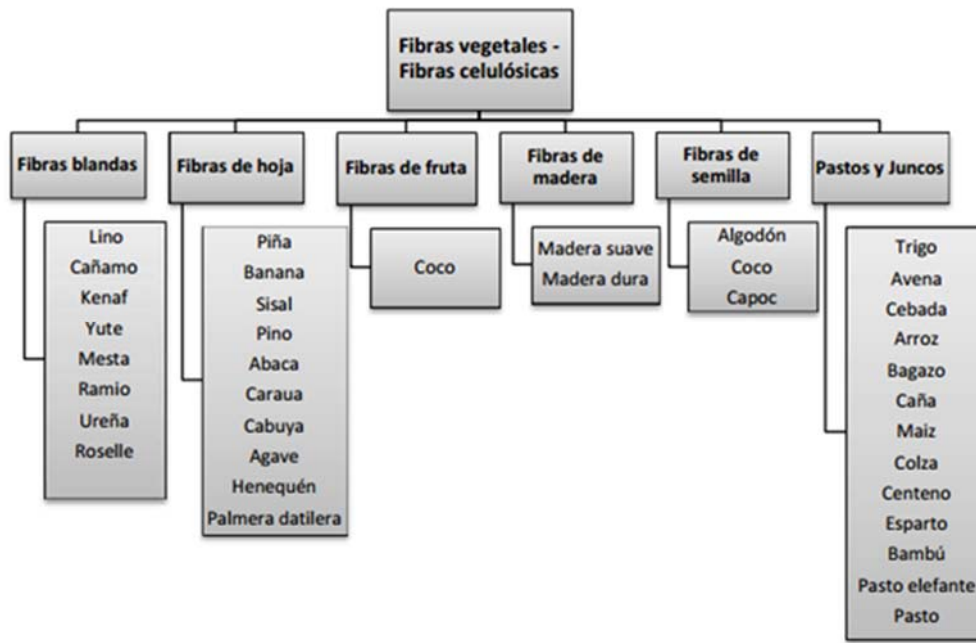


Figura 20. Principales fibras vegetales utilizadas.

Fibras blandas:

- Lino.
- Cáñamo.
- Yute.

Fibras de fruta:

- Coco.

Las fibras blandas se caracterizan por ser suaves y tener una densidad comprendida entre los 310 y 1500 kg/m³ lo cual demuestra que son materiales ligeros.

El módulo específico que estos poseen es alto, el desempeño elástico más representativo está dado por las fibras de lino, cáñamo y ramio [85-90].

La fibra de coco se extrae del cocotero [91], planta originaria de las regiones tropicales de oriente, y que actualmente se cultiva en el continente Asiático (India, Ceylán, Indonesia), en América central y meridional (Méjico, Brasil), en África (Mozambique, Tanzania y Ghana). Las fibras se extraen del mesocarpio de los frutos.

La Figura 21 muestra la comparativa entre los materiales utilizados en ingeniería y los materiales de origen natural, en función de sus procesos de obtención y las especificaciones del producto [92].

El método Ashby, permite la comparativa y selección de distintos materiales para una determinada aplicación.

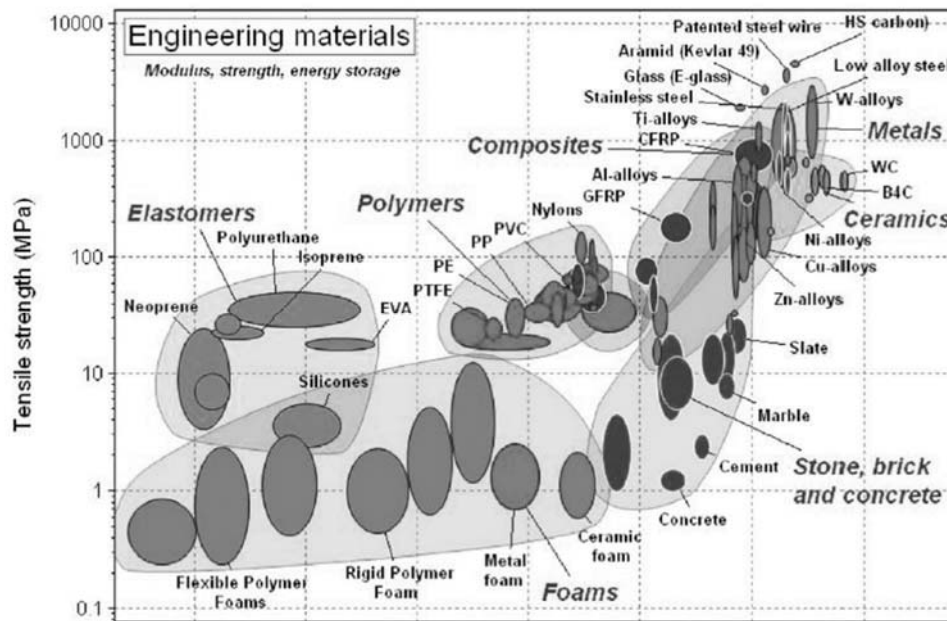


Figura 21. Diagrama de Ashby del módulo de elasticidad y la resistencia mecánica de los materiales naturales y de ingeniería.

Fuente: Michael F. Ashby 1999.

Dentro de las revistas relativas a materiales compuestos también se ha producido un incremento de publicaciones relativas a materiales reforzados con fibras naturales. Igualmente, muchos review de revistas científicas y de divulgación dedicados a aplicaciones de las fibras naturales, básicamente en aplicaciones materiales compuestos.

Como ejemplo sirva la edición del magazín JEC Composites, en que se presenta un especial relativo a las “Fibras naturales y medio ambiente”.

Por otra parte, se constata un importante aumento de los congresos u conferencias científicas que incluyen o están específicamente centrados en esta temática.

Concretamente en el sector de los textiles técnicos, Techtextil, una de las ferias de mayor importancia a nivel mundial, incluyó en su edición de 2009 en Frankfurt un congreso dedicado íntegramente a las fibras naturales. En dicho congreso se presentaron conferencias relacionadas con aplicaciones de funciones innovadoras de las fibras naturales, así como su uso en aplicaciones en automóviles, arquitectura y construcción. Igualmente, en el simposio que se celebró en el año 2010 en la feria de Techtextil North América una de las sesiones fue íntegramente dedicada a las aplicaciones de las fibras naturales y materiales sostenibles en los textiles técnicos.

También la conferencia TEXCOMP, dedicada a los materiales compuestos con estructuras textiles laminares y 3D como refuerzo incluyen en su edición del 2010 uno de los temas dedicados a las fibras naturales. Por último, el prestigioso instituto londinense "Institute of Materials, Minerals & Mining (IOM) celebró un congreso dedicado a las aplicaciones industriales de las fibras naturales con una importante asistencia de académicos y industriales.

Esta tendencia viene impulsada por los esfuerzos de investigación e innovación que se están realizando conjuntamente desde los centros tecnológicos, industria y universidad y, acompañados en algunos casos por políticas de mercado que favorecen la revitalización del uso de las fibras naturales transformando estos materiales provenientes de fuentes naturales en "nuevos materiales.

4.1 Biocomposites de fibras naturales

Desde tiempos ancestrales, las fibras naturales se han venido utilizando, en una gran variedad de aplicaciones artesanales e industriales

Estas han sido utilizadas en la fabricación de hilos, textiles, cuerdas, bramantes, redes de pesca, productos de papel, embalajes, materiales para la construcción [48] y geotextiles.

Muy a menudo, los materiales compuestos se hacen usando ya sea la matriz o refuerzo derivados de recursos renovables conocidos como biocomposites [93, 94].

Entre las diversas matrices de biopolímeros utilizados, se encuentran las matrices a base de soja que se estudian ampliamente debido a su abundante disponibilidad y bajo coste del producto.

Las fibras naturales cuya microestructura es celulosa son hidrófilas [95,96] por naturaleza presentan una gran tendencia a la absorción de humedad y/o agua que puede causar cambios dimensionales en el material por la hinchazón de las fibras y debilitar la adhesión de la interfase fibra – matriz.

Paralelamente la industria química ha apostado por el desarrollo de polímeros procedentes de recursos naturales bio- based thermoplastic or thermoset Polymers. Polímeros derivados de recursos naturales renovables, directamente a partir de vegetales y biomasa, o a través de procesos de síntesis química o fermentación bacteriana de monómeros naturales. En el campo de los termoplásticos, son muchos los biopolímeros biodegradables naturales o sinterizados que están disponibles comercialmente para la fabricación de “green composite”, algunos de ellos son el ácido polylactico (PLA) poliéster procedente de maíz, starch o polisacáridos (PHA), o en base a proteínas especialmente de soja. Los composites reforzados con fibras naturales que se usan en estos biopolímeros son refuerzos referidos frecuentemente en la literatura con el término biocomposite. Son muchas las referencias que se han publicado en “green composites” totalmente biodegradables por serlo tanto la fibra natural como el biopolímero [97].

Otras líneas de investigación apuestan por la utilización de aceites extraídos de productos cítricos, según varios artículos se estudia las propiedades de la resina termoestable epoxi, por ejemplo, de base biodegradable a partir de aceite de karanja (aceite no comestible) [63].

Actualmente, las fibras naturales, se han convertido en material de estudio y han adquirido gran importancia como consecuencia de la crisis del petróleo, de las nuevas reglamentaciones ambientales, del desarrollo sostenible, de los productos verdes y de la reducción del gasto energético. Los composites de matriz polimérica con fibras de origen no renovable tienen unas ventajas elevadas. Pero plantean una problemática doble; debido a su elevada dependencia del petróleo y por, la generación de residuos al finalizar su ciclo de vida [98,99]. Como consecuencia, la comunidad científica investiga nuevas alternativas de origen renovable. Desarrollando nuevas resinas de origen renovable reforzadas con fibras naturales como pueden ser el yute, el kenaf, el lino o el cáñamo [100-103].

En general, las fibras naturales cuentan con una serie de propiedades que las convierten en una excelente alternativa para ser utilizadas como refuerzo en materiales compuestos con matriz polimérica.

Estas fibras se caracterizan por:

- Ser un recurso renovable y biodegradable, por lo tanto, su impacto ambiental es bajo.
- Tener un costo considerablemente bajo comparado con otras fibras de ingeniería como el Kevlar o la fibra de vidrio.
- Tener bajo peso.
- Tienen buen desempeño como aislante térmico y acústico.

- Presentar alta resistencia a la tensión.

Los refuerzos pueden ser fibras naturales como el algodón, el lino, el cáñamo o fibras procedentes del reciclado de la madera o del papel o incluso subproductos procedentes de cultivos agrícolas y las matrices pueden ser polímeros de origen renovable como los aceites vegetales o almidones.

Estos componentes pueden ser de dos tipos: los de cohesión y los de refuerzo. Los componentes de cohesión envuelven y unen los componentes de refuerzo (o simplemente refuerzos) manteniendo la rigidez y la posición de éstos. Los refuerzos confieren unas propiedades físicas al conjunto tal que mejoran las propiedades de cohesión y rigidez.

Así, esta combinación de materiales le da al compuesto unas propiedades mecánicas notablemente superiores a las materias primas del que procede [104-107].

En la Tabla 5 se indican las ventajas e inconvenientes de los materiales eco composites.

Tabla 5. Ventajas e inconveniente de los ecos composites.

Eco - composites	
Ventajas e inconvenientes de las fibras naturales como refuerzo en los composites	
Ventajas	Inconvenientes
Menor coste	Baja estabilidad dimensional
Buenas propiedades específicas	Absorción de agua
Biodegradable	Baja resistencia térmica
Renovable	Calidad variable
Buen aislamiento térmico y acústico	Baja adhesión a polímeros
Menor desgaste de herramienta	
Bajo requerimiento de energía para su producción	
Sin residuos tras incineración	

Sin embargo, la alta dependencia del petróleo y la baja reciclabilidad de estos composites reforzados con fibras sintéticas, está llevando a la comunidad científica y a la industria textil a buscar tanto matrices como tejidos de origen natural alternativos, capaces de competir en prestaciones y en precio con los sintéticos: son los denominados biocomposites [108-111].

Las bioresinas son resinas 100% biodegradables que, por su origen, son consideradas ecológicas y protectoras del medio ambiente.

Se elaboran principalmente de glucosas y almidones de materias primas naturales.

De estas resinas se pueden obtener plásticos rígidos y blandos, utilizados entre otras aplicaciones para la fabricación de: Film, Bolsas de todo tipo, envases, botellas, vajilla, film agrícola, etc.

Aparte de la fabricación de plásticos, las bioresinas se utilizan para la fabricación de Biopolímeros o Bioplásticos, así como para la fabricación de Biocomposites de matriz termoplástica.

Como se ha indicado anteriormente, el uso de composites en los distintos sectores industriales ha aumentado considerablemente en la última década.

La Tabla 6 muestra algunos de los proveedores de bioresinas a nivel mundial para envases y embalajes.

Tabla 6. Proveedores de envases y embalajes de bioresina a nivel mundial.

Proveedor de materia prima	País	Biopolímero
Nature Works LLC	EEUU	LLC
Telles	EEUU	Mirel
Novamont	Italia	Mater-Bi
Biop	Alemania	Biopar
Basf	Alemania	Ecovio
Biopearls	Holanda	Biopearls
Plantic	Australia	Plantic resin
Dupont	EEUU	Sorona
Cereplast Inc	EEUU	Cereplast resin

4.2 Características y clasificación de fibras naturales

Las fibras son estructuras unidimensionales:

- Largas y delgadas.

Se doblan con facilidad y su propósito principal es la creación de tejidos.

En la naturaleza, y con la única excepción de la seda, las fibras tienen una longitud limitada, que puede variar desde 1 mm, en el caso de los asbestos, hasta los 350 mm de algunas clases de lanas, y se llaman fibras discontinuas.

Químicamente se pueden fabricar fibras de longitud indefinida, que resultarían similares al hilo producido en el capullo del gusano de seda y que se denominan filamentos; estos filamentos son susceptibles de ser cortados para asemejarse a las fibras naturales (fibra cortada).

4.2.1 Definición

Las fibras naturales son aquellas fibras se encuentran en estado natural y no exigen más que una ligera adecuación para ser hiladas y utilizadas como materia textil.

En cuanto a su clasificación, cabe hacer una subdivisión según el reino natural del que proceden: animales, procedentes del reino animal; vegetales, procedentes del reino vegetal; minerales, procedentes del reino mineral.

Tabla 7. Clasificación de las fibras naturales.

CLASIFICACION DE LAS FIBRAS NATURALES			
DE ORIGEN ANIMAL	De glándulas Sedosas	Seda	Un filamento de seda es un hilo continuo de gran fuerza tensora que mide entre 500 y 1 500 metros de longitud, con un diámetro de 10 a 13 micras. En la seda tejida, la estructura triangular de la fibra actúa como un prisma que refracta la luz, dando al paño de seda su altamente estimado "brillo natural". Tiene buena absorción, baja conductividad y tiñe fácilmente.
	De	Lana	Pura lana virgen La lana tiene un ondulado natural y patrones de escala que la hacen fácil de hilar. Las telas hechas de lana tienen mayor grosor que otros textiles, proveen mejor aislamiento y son resilientes, elásticas y durables. El diámetro de la fibra está

			Rica lana virgen	entre las 16 micras en la lana superfina del merino (similar a la cachemira) a más de 40 micras en lanas de pelos bastos.
			Lana regenerada	
			Lana peinada	
			Lana cardada	
			Lana clorada	
		Pelo	Alpaca	La fibra de alpaca es parcialmente hueca, de 20 a 70 micras en diámetro y viene en 22 colores naturales. Es ligera, más fuerte que la lana de oveja y provee excelente aislamiento. Las alpacas Huacayo producen fibras suaves, densas y cortas, mientras que el vellón de la rara suri es brillante, sedoso y liso. La alpaca se mezcla bien con la lana, el mohair y la seda.
			Angora	El sedoso pelo blanco del angora es una fibra hueca clasificada como lana. Con un diámetro de 14 a 16 micras, es una de las fibras animales más sedosas.
			Camello	La fina fibra que cae de un camello Bactriano, tiene un promedio de cerca de 20 micras de diámetro y su longitud varía de 2.5 a 12.5 cm. El pelo de la cría de camello, el cual puede medir tan poco como 16 micras (a la par con la fina cachemira), es el más suave y más valioso. Por su calidad y escasez, el pelo de camello se utiliza en textiles de lujo.
			Cachemira	Tiene un rizado natural, que permite que sea hilada en finos tejidos ligeros. La cachemira tiene pequeños espacios de aire entre las fibras, lo que la hace cálida y liviana, mientras que las células delgadas de la cutícula superficial la hacen más lisa y brillante.
			Yak	El diámetro del yak está entre las 23 micras en la primera esquila hasta las 38 micras en los animales más viejos. Luminosa y aislante, su fuerza de tensión es significativamente más alta que aquella de la lana de merino.
DE ORIGN VEGETAL	De semilla	Algodón	El algodón es casi celulosa pura, con suavidad y permeabilidad al aire que lo han hecho la fibra natural más popular del mundo. El largo de la fibra varía de 10 a 65 milímetros y el diámetro de 1 a 22 micras.	

	De tallo	Lino	Como el algodón, la fibra de lino es un polímero de celulosa, pero su estructura es más cristalina haciéndola más fuerte, rizada y rígida para manejar, y más fácilmente arrugable. El rango de las fibras de lino en longitud es de hasta 90 cm y de un promedio de 12 a 16 micras de diámetro.
		Cáñamo	Largas, fuertes y durables, las fibras de cáñamo son cerca del 70% de celulosa y contienen bajos niveles de lignina (alrededor de 8 a 10%). El diámetro de la fibra está entre 16 y 50 micras.
		Yute	Llamada la "fibra dorada", el yute es larga, suave y brillante, con una longitud de 1 a 4 metros y un diámetro de entre 17 a 20 micras. Es una de las fibras naturales vegetales más fuertes y sólo está en segundo lugar con el algodón en términos de cantidad de producción.
		Ramio	La fibra de ramio es blanca con un brillo sedoso, similar al lino en absorción y densidad, pero más basta (25 a 30 micras). Una de las fibras naturales más Fuertes, tiene baja elasticidad y tiñe fácilmente. Las virutas de ramio están cerca de los 190 centímetros de longitud, con células individuales tan largas como de 40 centímetros.
	De hoja	Abacá	Abacá es una fibra de hoja, compuesta por células largas y delgadas que forman parte de la estructura de soporte de la hoja. El contenido de lignina está por encima del 15%. El abacá es valorado por su gran resistencia mecánica, flotabilidad, resistencia al daño por agua salada, y por el largo de su fibra - más de 3 metros.
		Sisal	Brillante y de un blanco cremoso, la fibra de sisal mide cerca de 1 metro de longitud, con un diámetro de 200 a 400 micras. Es una fibra basta, dura e inadecuada para textiles o telas. Pero es fuerte, durable y alargable, no absorbe humedad fácilmente, resiste el deterioro del agua salada, y tiene una textura superficial fina que acepta una amplia gama de teñidos.

Las fibras que se van a analizar en la tesina son las fibras de coco, de lino, de yute, de cáñamo y fibra de residuo textil borra.

Tabla 8. Propiedades físicas de las fibras naturales.

Nombre de la fibra	Diámetro (µm)	Longitud(mm)	Densidad (kg/cm ³)	Incremento de humedad
Yute	18,4	2,55	1.400	17
Lino	20,0	31,75	1.250	12
Coco	17,5	1,25	1.250	13
Cáñamo	19,9	11,2	1.450	12

Tabla 9. Propiedades mecánicas de las fibras.

Fibra	Densidad (g / cm³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Yute	1,3	393 – 773	26.500
Coco	1,2	175 – 220	4.000 – 6.000
Lino	1,5	345 – 1035	27.600
Cáñamo	1,4	690	1.600

Actualmente, las fibras naturales, se han convertido en material de estudio y han adquirido gran importancia como consecuencia de la crisis del petróleo, de las nuevas reglamentaciones ambientales, del desarrollo sostenible, de los productos verdes y de la reducción del gasto energético.

En general, las fibras naturales cuentan con una serie de propiedades que las convierten en una excelente alternativa para ser utilizadas como refuerzo en materiales compuestos con matriz polimérica.

Estas fibras se caracterizan por:

- Ser un recurso renovable y biodegradable, por lo tanto, su impacto ambiental es bajo.
- Tener un costo considerablemente bajo comparado con otras fibras de ingeniería como el Kevlar o la fibra de vidrio.
- Tener bajo peso.
- Tienen buen desempeño como aislante térmico y acústico.
- Presentar alta resistencia a la tensión.

Y en general, destacan sus elevadas propiedades específicas de resistencia y de rigidez, resistencia al impacto y flexibilidad [112,113].

4.2.2 Evolución histórica de las fibras naturales

Las fibras naturales son sustancias muy alargadas producidas por plantas y animales, que se pueden hilar para obtener hebras, hilos o cordelería.

En tejidos, en géneros de punto, en esteras o unidas, forman telas esenciales para la sociedad. Las fibras, dependiendo de su longitud pueden ser cortas, largas o incluso continuas [114].

Como la agricultura, los textiles han sido parte fundamental de la vida humana desde los albores de la civilización. En México y en Pakistán se han encontrado vestigios de artículos de algodón de 5.000 a C. Según la tradición china, la historia de la seda se inicia en el siglo XVII a C.

El tejido de lana más antiguo, descubierto en Dinamarca, data de 1 500 a C, y el tapete de lana más antiguo, de Siberia, es del año 500 a C. El cultivo de fibras como el yute y el bonote se realiza desde la antigüedad.

Si bien desde entonces han evolucionado mucho los métodos para fabricar textiles, sus funciones han cambiado muy poco: hoy, casi todas las fibras naturales se usan para la fabricación de vestido y contenedores, así como para aislar, suavizar y decorar los ambientes donde vivimos. Sin embargo, los textiles tradicionales se usan también cada vez más con propósitos industriales: como elementos de materiales compuestos, en implantes médicos y en geotextiles y agro textiles.

Es probable que la segunda mitad del siglo XX y el siglo XXI sean conocidos como la época de los productos sintéticos:

- De los plásticos.
- De las fibras artificiales.
- Los cauchos sintéticos.
- Los materiales compuestos
- Los adhesivos sintéticos.

Desde hace aproximadamente 100 años se ha ido creando una industria masiva que simboliza al siglo XX del mismo modo que el hierro y el acero caracterizaron al siglo XIX. Así pues, se ha registrado una clara tendencia a elevar el uso de esta clase de materiales y se prevé un mayor aumento para los próximos años.

Diversos autores coinciden en asegurar que la era de los materiales compuestos se acerca. Los materiales compuestos o “composites” se han convertido en un elemento muy común en nuestras vidas sin apenas darnos cuenta. En el sector aeronáutico y de la automoción la utilización de materiales compuestos está muy expandida. Es muy usual encontrar elementos aeronáuticos y de otros medios de transporte fabricados con estos materiales, y esto es una señal clara del aporte de propiedades mejoradas de los “composites” respecto de los considerados materiales tradicionales.

La base de los materiales compuestos modernos son los polímeros sintéticos. La baquelita fue el primer polímero completamente sintético, fabricado por primera vez en 1909. Partiendo de esta primera invención, es posible en nuestros días adaptar y crear nuevos polímeros que pueden ser diseñados para funciones específicas. Se ha desarrollado por ejemplo un tipo de polímeros que no sufren corrosión. Se pueden diseñar polímeros sintéticos con propiedades de rigidez o flexibilidad, transparencia u opacidad, dureza o fragilidad.

Las propiedades de los polímeros sintéticos pueden ser incrementadas en gran medida adaptando técnicas utilizadas por la Naturaleza. Muy pocos materiales naturales consisten en una sola sustancia; la mayoría consisten en una mezcla de componentes diferentes que, al encontrarse unidos, producen un material más capaz de desempeñar su función que una sustancia simple.

El hueso, por ejemplo, adquiere su combinación de ligereza y resistencia (o sea, alta resistencia específica) combinando cristales de apatita (un componente del calcio) con fibras de la proteína colágeno. Tales materiales son conocidos como compuestos.

Para aplicaciones resistentes, en las que tanto la resistencia como la rigidez del material son críticas, es necesario combinar el polímero con otros materiales para obtener materiales compuestos cuyas propiedades superen las de sus constituyentes.

Los componentes más comúnmente utilizados están formados por, partículas. Las partículas de un material o materiales específicos están embebidas o adheridas entre sí mediante una matriz continua (el polímero) con un bajo módulo de elasticidad.

En forma de compuestos fibrosos: son fibras con alta resistencia y rigidez las que están embebidas o adheridas entre sí por la matriz continua de bajo módulo.

El refuerzo fibroso puede orientarse en la dirección que sea necesaria para proporcionar la mayor resistencia y rigidez, y gracias a la moldeabilidad del material pueden seleccionarse las formas estructurales que se consideren más efectivas.

Para aumentar todavía más la rigidez del material, las unidades estructurales que forman la estructura completa pueden apilarse de manera que la rigidez de la estructura se deriva tanto de su configuración como del material mismo.

Así pues, durante el siglo XX la ciencia de los materiales ha avanzado con la incorporación de productos sintéticos al mercado industrial. Estos avances han sido bien aprovechados por sectores tradicionalmente innovadores como la automoción o la aeronáutica, pasando muchos de los considerados nuevos materiales a formar parte de objetos cotidianos de nuestras vidas.

Esta inmersión y substitución, más o menos progresiva, de materiales tradicionales por nuevos materiales con mejores prestaciones, como los materiales compuestos, no se ha efectuado de forma pronunciada en el sector de la construcción.

En la Figura 22 se muestra una comparativa de la evolución de los cuatro tipos de materiales fundamentales a lo largo del tiempo.

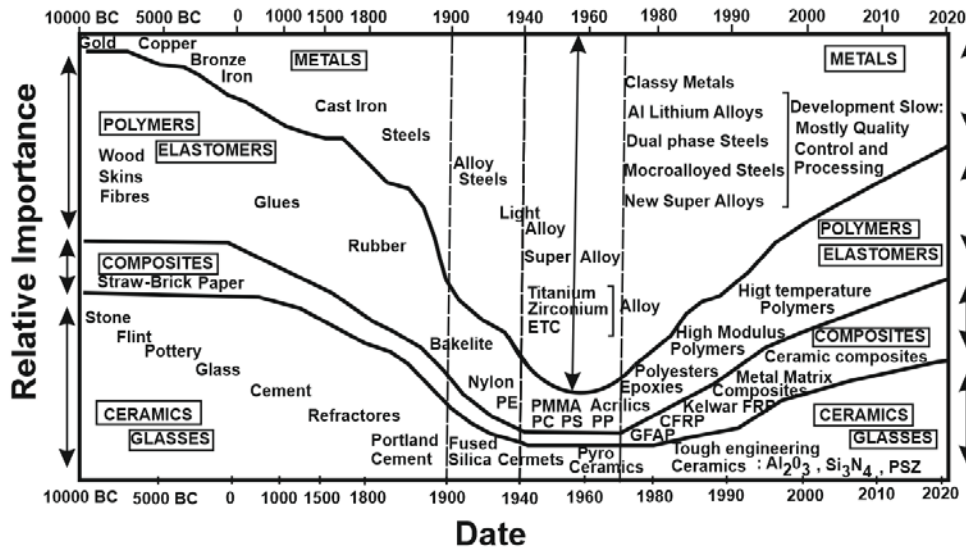


Figura 22. Importancia de la evolución de los cuatro tipos de materiales durante el transcurso del tiempo.

Fuente: Escuela Politécnica Superior de Alcoy. Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales. David García Sanoguera. Video de Polimedia.

5. Materia de residuos textiles

La industria textil de la Comunidad Valenciana es uno de los sectores industriales con mayor importancia en el cómputo global de las industrias de la comunidad. Estando el sector textil y de confección centralizado en las comarcas alicantinas del Alcoyà y el Comtat y en la valenciana del valle de Albaida.

Los residuos de los materiales textiles acabados, o bien de los desperdicios de confección, se pueden triturar obteniéndose la borra, a partir de la cual se puede obtener hilo de nuevo, o bien se utilizarla para la fabricación y obtención de distintos productos de menor calidad, o como elementos de relleno en el sector de la automoción.

Del procesado de los residuos procedentes de los desperdicios de la confección se obtienen dos tipos de materias:

- Borra: Se obtiene del triturado y posterior cardado de materiales textiles de procedentes de la lana.
- Floca: Constituido por una masa de fibras discontinuas presentadas sin orden aparente, antes de entrar en manufactura, obtenida de forma artificial o sintética. Siendo los residuos procedentes del algodón y del poliéster los más utilizados en la formación de la mezcla de floca.

Ambos productos, son continuos y abundantes, de fácil obtención y de bajo coste económico.

6. Inicio de los composites

La historia de la utilización de polímeros y materiales compuestos para la construcción se inicia de forma muy esporádica y concreta durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se produjo un rápido progreso con la fabricación de las primeras casetas para equipos de radares electrónicos. Se utilizó el poliéster reforzado con fibra de vidrio debido a su transparencia ante las ondas electromagnéticas. A finales de la década de los 40 se continuó utilizando este material, pero era un material caro. No obstante, el atractivo del material compuesto por su facilidad para tomar formas complejas en su moldeo, fue reconocido rápidamente por los diseñadores y a comienzos de los cincuenta se utilizaba para fabricar láminas translúcidas. De todas maneras, su producción era muy limitada porque su uso también lo era.

El principal crecimiento en interés e investigación con respecto al material compuesto de fibra de vidrio y poliéster para la industria de la edificación y la construcción comenzó en los 60.

Se realizaron estudios de procesos para construir paneles grandes de fachadas y sistemas de placas onduladas. Aún y así su producción siguió siendo muy limitada y su uso considerado como secundario y minoritario.

Esta situación se ha mantenido hasta la actualidad. Hoy día, el uso de materiales compuestos en la construcción en general se centra sobre todo en algunas aplicaciones en la ingeniería civil para la construcción de puentes, y elementos secundarios de la edificación.

Aún y así, cabe reconocer que el uso en la construcción de estos materiales en las dos últimas décadas ha crecido de forma considerable, aunque también es cierto que se partía de una situación muy retrasada. El uso del hormigón armado y del acero para elementos principales resistentes críticos, se encuentra muy arraigado entre la mayoría de los distintos agentes participantes en la construcción [115].

Esta situación se agrava cuando se focaliza el estudio en la construcción industrial. Esta no presenta grandes volúmenes ni cantidades de materiales como la ingeniería civil de puentes, ni tampoco se les da tanta importancia a las construcciones como en la edificación para viviendas, y, además, en muchas ocasiones la construcción en sí pierde importancia en frente del proceso productivo que debe albergar en su interior. Por todo ello, es un subsector del sector construcción, en general, en el que se invierten más bien pocos recursos destinados a investigación, aprovechándose normalmente de forma indirecta de las nuevas aplicaciones del resto del sector.

Ello motiva que la introducción de los materiales compuestos en la construcción industrial se encuentre más retrasada que por ejemplo en la ingeniería civil para la construcción de puentes.

Todo ello deriva en que se ha detectado una falta de estudios e investigación sobre el uso de materiales compuestos avanzados en elementos estructurales de edificios industriales. Evidentemente la base teórica práctica para estructuras de puentes es aplicable a las estructuras de edificios industriales, aunque es necesaria una adaptación y estudios concretos debido a la diferencia de casuísticas del entorno de la obra, la forma de trabajar de los elementos estructurales y la forma de construir. Todo ello puede conllevar un cambio en el sistema constructivo de los edificios industriales debido a la incorporación de materiales compuestos avanzados.

6.1 Auge de los composites

Desde la década de 1990, los composites de fibras naturales se están convirtiendo en alternativas realistas a composites reforzados con fibra de vidrio en muchas aplicaciones. Los composites de fibra natural como el cáñamo de fibra-epoxi, fibra de lino [116, 117] de polipropileno (PP), y la caña china de fibra-PP son particularmente atractivos en aplicaciones automotrices debido a su menor costo y densidad.

Las fibras de vidrio utilizadas para los compuestos tienen una densidad de, 2,6 g/cm³ y cuestan entre 1,15 € y 1,74 €/ kg. En comparación, las fibras de lino tienen una densidad de, 1,5 g / cm³ y cuestan entre ,19 € y 0,95 €/ kg.

Mientras las fibras naturales han sido tradicionalmente utilizadas para rellenar y reforzar termoestables, los termoplásticos reforzados con fibra natural, especialmente composites de polipropileno, han atraído una mayor atención debido a su ventaja de reciclado.

Los composites de fibra natural también son requeridos por ofrecer ventajas medioambientales, como una menor dependencia de las fuentes de energías y material no renovables, reducción de las emisiones contaminantes, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la recuperación de energía, y el fin de la biodegradabilidad de los componentes de la vida [31].

Dado que, tener un desempeño ambiental superior constituye un factor importante del aumento del uso futuro de composites de fibra natural, se justifica un amplio análisis en profundidad de los impactos medioambientales relativos de los composites de fibras naturales y los composites convencionales, que abarca el ciclo de vida [118].

Los grandes fabricantes de materiales, fibras y resinas, que son quienes marcan las direcciones de desarrollo, apostaron en su momento por volcarse en el del SMC, con el que se intentaba obtener un material competitivo en precio para un amplio espectro de aplicaciones de gran serie.

Para ello se incorporaron grandes cantidades de cargas y se usaron fibras cortadas, reduciendo el coste, pero también considerablemente las características mecánicas posibles para los composites de fibras continuas.

Desde el 16 de julio de 2001 el vertido de los materiales compuestos basados en polímeros y refuerzo de fibras de vidrio ha quedado prohibido en todos los países de la UE, quedando como única alternativa viable para estos materiales la recuperación energética, ahora bien, la presencia de fibra de vidrio en los refuerzos hace incluso limitada esta posibilidad.

Dada esta problemática, las industrias fabricantes de materiales de composite se han empeñado en la búsqueda de nuevos materiales alternativos con prestaciones similares a las existentes, y en este sentido las fibras naturales son un claro vector de desarrollo, incluso con ciertas ventajas en ciertos campos de aplicación como en el del aislamiento acústico [119] (en construcción) ya que presentan mejores propiedades acústicas, disminuyen la vibración, contribuyen a la seguridad pasiva, pueden ser triturados, reutilizados y incinerados produciendo un menor contenido de cenizas [120].

Además, el tacto que presentan es tacto agradable durante la fase de elaboración y procesado como en el producto final. La tendencia actual está basada en la reducción de la contaminación del medio ambiente a nivel mundial, buscando de forma continua soluciones que ayuden a disminuir la contaminación de alguna manera [116].

Esto requiere que el hombre administre mejor los recursos y reduzca el impacto ambiental, porque, de lo contrario, continuará la generación masiva de residuos contaminantes.

Entre estos residuos, se encuentran englobados en un alto porcentaje los materiales poliméricos, derivados de los petroquímicos, que siguen empeorando el problema medioambiental.

Tanto la industria aeroespacial como el sector del transporte terrestre y la aviación han buscado solucionar problemas basados en la reducción del peso de las estructuras y en consecuencia, en reducciones del consumo de combustible, en materiales diseñados a partir de los grupos básicos tradicionales (polímeros, metales y cerámicos).

Por lo tanto, la industria de los plásticos y otros materiales reforzados con fibras o partículas ha sido motivo de un amplio estudio y desarrollo, sobre todo en las grandes potencias mundiales. Estos materiales, conocidos como materiales compuestos, son pues de gran utilidad en el diseño ingenieril e industrial en este siglo, usando ampliamente como material de refuerzo la fibra de vidrio y otras fibras convencionales.

El impacto y la contaminación aportada por la producción y depósito final (como desecho) de la fibra de vidrio, se reducirían si se cambiara su proceso de producción, o bien, se sustituyera por fibras de origen vegetal o biodegradable [121].

Tradicionalmente se emplean con normalidad composites fabricados a partir de una matriz termoplástica o termoestable y fibras de vidrio. Estos materiales compuestos se emplean en diversos sectores industriales.

- Náutico.
- Transporte.
- Automoción.

La tendencia que sigue el mercado relacionado con la fabricación de piezas y componentes consiste básicamente en ir sustituyendo a los materiales utilizados en los composites actuales por otros de fuentes renovables [120].

Actualmente, los plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV) han demostrado las propiedades estructurales y de durabilidad requeridas para piezas tanto exteriores como interiores en vehículos. Su procesado, así como las buenas propiedades mecánicas han facilitado su introducción en la industria de la automoción [122].

Sin embargo, los PRFVs manifiestan algunas limitaciones debido a la elevada densidad de la fibra (aproximadamente un 40% superior al de las fibras naturales), las dificultades del reciclado y aspectos de salud y seguridad relacionados con el uso de fibras de vidrio. Por otra parte, desde un punto de vista medioambiental, por ejemplo, el consumo de energía en la producción de un mat de fibra de lino 9.55 MJ/kg [123], incluyendo cultivo, cosecha y separación de la fibra, supone aproximadamente un 17% de la energía necesaria para producir un mat de fibra de vidrio 54.7 MJ/kg [124].

Para justificar la implementación de una fibra sustitutiva es necesario determinar la capacidad que tiene dicha fibra para sustituir a la de vidrio, especialmente en sus propiedades mecánicas, y en las aplicaciones estructurales.

La incorporación de fibras vegetales, principalmente residuos de la agricultura y agroindustria, permite ofrecer una valorización de estos desechos y una solución parcial a los daños ambientales ocasionados por ellos.

Los elementos que constituyen un material compuesto, son el refuerzo y la matriz. Las fibras se consideran un refuerzo por excelencia. La matriz es el componente que aloja el refuerzo.

6.2 Actualidad

En la actualidad predominan los polímeros sintéticos o procedentes del petróleo que pueden ser termoplásticos “vírgenes” o reciclados como el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, el poli cloruro de vinilo.

Dentro de esta categoría también se encuentran las resinas termoestables como las de poliéster insaturado, las de fenol formaldehído, los isocianatos y resinas epoxi.

Hoy en día existe un gran interés comercial por el desarrollo y mejora de estos productos, no solo por el agotamiento de las fuentes petroquímicas sino por una mayor concienciación medioambiental y social.

Las fibras naturales se están convirtiendo en una alternativa de bajo costo, ligero y al parecer ambientalmente mejor a la fibra de vidrio en los composites [125].

Es probable que los composites de fibra natural sean ambientalmente superiores a los composites de fibra de vidrio en la mayoría de los casos por las siguientes razones:

- La producción de fibras naturales tiene menores impactos ambientales en comparación con la producción de fibra de vidrio.
- Los composites de fibras naturales tienen un mayor contenido de fibra para un rendimiento equivalente, reduciendo más los contaminantes basados en el contenido de polímero
- El peso ligero de los composites de fibras naturales mejora la eficiencia de combustible y reduce las emisiones en la fase de utilización del componente, especialmente en aplicaciones de automóviles.
- El final de la vida de incineración de las fibras naturales da como resultado energía recuperada y créditos de carbono. [126].

En ingeniería de tejidos, los biocomposites que contienen polímeros naturales y hidroxiapatita son una estrategia alternativa para generar huesos utilizando una combinación de biomateriales y células.

Los biomateriales imitan la estructura y la composición de los tejidos óseos en la nanoescala son importantes para el desarrollo de aplicaciones de ingeniería de tejidos óseos.

Los biocomposites naturales y basados en biopolímeros- compuestos que contienen quitina, quitosan, o colágeno tienen ventajas tales como la biocompatibilidad, la biodegradabilidad que son esenciales para la ingeniería de tejido óseo. La inclusión de nanopartículas de hidroxiapatita (uno de los materiales más utilizados en biocerámicos) en la matriz de biopolímeros mejora las propiedades mecánicas e incorpora las características nanotopográficas que imitan la nanoestructura de los huesos.

Los composites termoplásticos reforzados con fibras naturales han pasado de ser materiales muy prometedores a convertirse en una realidad. Son varias las aplicaciones en las industrias ya citadas del automóvil, transporte y construcciones (mobiliario, paredes) donde es habitual su utilización.

En composites de matriz termoestable reforzados con fibras naturales, no son muchas las referencias que se pueden encontrar en la literatura.

El 2010 marca el inicio de una nueva era para los materiales compuestos de fibra natural. El sector se ha estructurado a lo largo de la cadena de valor.

En la última década, el uso de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales se ha triplicado en 45.000 toneladas. En la industria de la automoción se usan compuestos fabricados por infusión de vacío de resina y utilizando fibras naturales tejidas bidireccionalmente mayoritariamente (95%) como refuerzo, se utilizan en componentes para interiores de coches que no precisen de altas prestaciones estructurales.

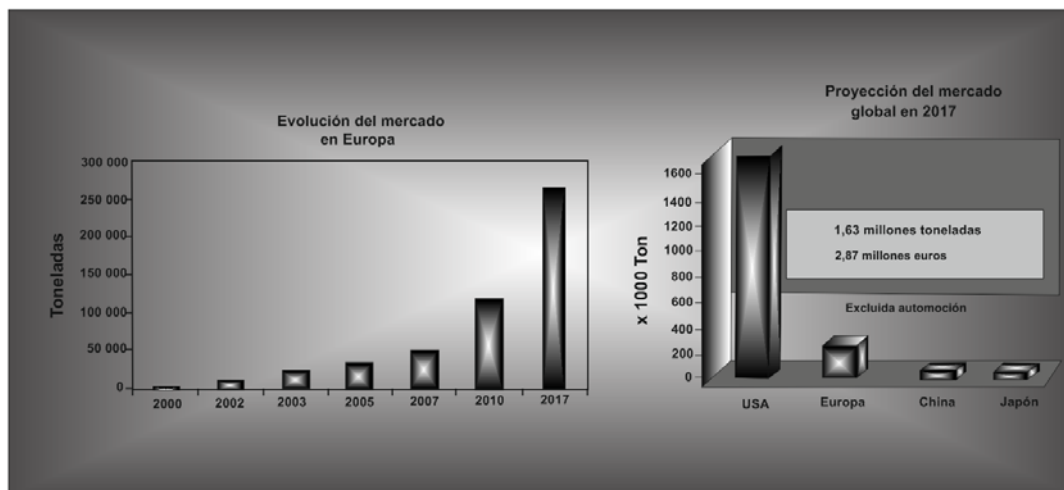
Para estas aplicaciones, las fibras naturales presentan ventajas como: grandes producciones en masa con un bajo costo, reciclado de las mismas y fabricación de formas complejas.

El perímetro de base constituido por sociedades pioneras se ha ido concentrando progresivamente. En el segmento de las materias primas, se ha visto como se han constituido grupos que dedican presupuestos considerables a la I+D de las nuevas materias (resinas termoplásticas, fibras de carbono y vidrio de nueva generación, refuerzos naturales resultantes del vegetal).

Así mismo, las disposiciones ambientales que regulan este sector, en particular la normativa europea que exige para el año 2018 que los vehículos producidos en la región deben ser reciclables en un 95%, han motivado el estudio y desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales, que buscan cumplir con los aspectos tanto técnicos como ambientales.

En la Tabla 10 se muestra la evolución del mercado europeo.

Tabla 10. Fuentes: four “The Wood Fibre Polymer Composites International Sumposium”, Bourdeax.



7. Propiedades acústicas de los composites

7.1 Introducción

Dentro del grupo de los composites innovadores se incluyen los Ecomateriales.

Estos se fabrican a partir de residuos o desechos procedentes de otros procesos de fabricación, de fibras naturales o de materiales reciclados. Todos ellos deben de ser susceptibles a convertirse en futuros materiales acústicos con aplicaciones a la construcción, al medioambiente, la industria y al transporte.

Para que los ecomateriales tengan aplicación en el campo de la acústica, deberán de poseer propiedades acústicas como son:

- Absorción.
- Aislamiento.

Estas propiedades serán comparadas con las propiedades acústicas que presentan los materiales tradicionales actuales implantados en los mercados para poder corroborar su uso en tales aplicaciones.

El Documento Básico HR protección frente al ruido, es de obligado cumplimiento a partir del día 24 de abril de 2009. La entrada en vigor de este documento, supone cambios importantes a la hora de abordar el estudio acústico en la edificación.

El objeto y contenido de este documento es limitar dentro de los edificios, y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

Los edificios se deberán de proyectar construir y mantener de forma que los elementos constructivos tengan las características acústicas adecuadas para poder reducir la transmisión del ruido aéreo, de impactos, y vibracional, así como el ruido reverberante de los propios recintos.

En la actualidad la necesidad de la búsqueda de nuevos materiales que sean amigables con el medio ambiente y reciclables, han llevado a cabo los estudio de diversas líneas de investigación como por ejemplo, neumáticos fuera de uso [71], materiales de construcción, restos de procesos de fabricación en industria textil, etc.

Otros productos que se utilizan en la fabricación de los “eco-materiales” son las fibras naturales como el Kenaf (planta tropical de la familia de las malváceas), el cáñamo, el algodón o el yute.

Otros estudios de investigación se han basado en los productos elaborados con materiales de poliéster reciclado o lanas de poliéster fabricadas a través del proceso de reciclaje de botellas de plástico PET, así como las espumas procedentes de residuos textiles y aplicados a láminas anti-impacto en suelos flotantes.

En los últimos años el mundo de la construcción está cambiando. En la construcción se utilizan fibras cortas de origen natural como rellenos para la fabricación de perfiles por proceso de pultrusión, donde las fibras aportan propiedades de amortiguación de vibraciones y aislamiento térmico [127,128].

En la India, se están fabricando viviendas rurales con materiales biocomposites reforzados con fibras de bambú y de yute, generando nuevas fuentes de empleo y produciendo una mejorando de la calidad de vida [129-131].

Si hasta ahora se utilizaban materiales y materia prima teniendo en cuenta sólo los costes de los mismos; para construir de la forma más rápida y económica posible, en la actualidad se tienen en cuenta otros parámetros como son las prestaciones medioambientales y sanitarias de estos materiales y materias primas.

Los aislantes ecológicos están tomando cada vez una mayor importancia en el sector de la construcción gracias a una serie de ventajas que los convierten como únicos.

Cabe destacar las siguientes ventajas:

- Son aislantes reciclables, biodegradables.
- La energía prima consumida en su fabricación es muy baja.
- Producen una disminución de la huella ecológica.
- Permiten que las viviendas transpiren, siendo a su vez estancas a las corrientes de aire.
- Proporcionan un gran aislamiento acústico al ruido aéreo como al de impacto, por estar elaborados con elevadas densidades.
- Poseen una gran capacidad térmica específica de casi tres veces superior a otros aislantes convencionales con lo que se consigue mantener las viviendas más frescas durante los periodos más calurosos del año.
- Aislantes reciclables, biodegradables y la energía prima consumida en su fabricación es muy baja, disminuyendo la huella ecológica.
- No contienen elementos procedentes del petróleo o bien los contienen en proporciones mínimas.
- Como se fabrican con altas densidades, proporcionan un gran aislamiento acústico, para los ruidos aéreos como para los ruidos de impacto.

- Son saludables no son tóxicos, ni poseen ningún tipo de aditivos o sustancias que puedan ser nocivas para la salud, son amigables con el medio ambiente. No producen irritaciones en la piel, no son agresivos por lo que son considerados como materiales inofensivos.
- Absorber la humedad sin pérdidas de sus propiedades aislantes, que en las instancias creen un microclima confortable gracias a su actuación como reguladores medioambientales.
- Su ciclo de vida es indefinido, sin perder ninguna de sus propiedades.

Dentro de estos materiales se pueden distinguir un grupo de aislantes ecológicos y un conjunto de productos que, pese a tener buenas propiedades aislantes, resultan cuestionables ambientalmente.

A continuación, se realiza una lista de los aislantes existentes.

Su capacidad de aislamiento viene definida por el coeficiente de conductividad térmica (k). Los aislantes sanos y aconsejables ambientalmente son:

- **Corcho:** entre los aislantes ecológicos es el que goza de una mayor aceptación. Proviene de la corteza de los alcornoques, es totalmente renovable y reciclable. Existe en forma de virutas para rellenar cavidades, en forma de paneles de corcho pretensado para cubiertas o revestimientos de superficies. (Coeficiente k 0,045 w / m·K. Energía incorporada para su elaboración 837 wh / kg).



Figura 23. Imagen del corcho.

- **Cáñamo** [132]. Cifra de crecimiento rápido y de fácil cultivo con la que se produce la elaboración de mantas aislantes, naturales y transpirables. (Coeficiente k: 0,041 w / m k. Energía incorporada para su elaboración 252 wh / kg).



Figura 24. Imagen de la manta aislante del cáñamo.

- **Lino** [133,134]. Planta de cultivo fácil y de bajo impacto, que permite obtener fibras aptas como aislantes (se comercializa en mantas de lino) y fibras para la elaboración de textiles. (Coeficiente k 0,040 w / m·K. Energía incorporada 252 wh / kg) [123]

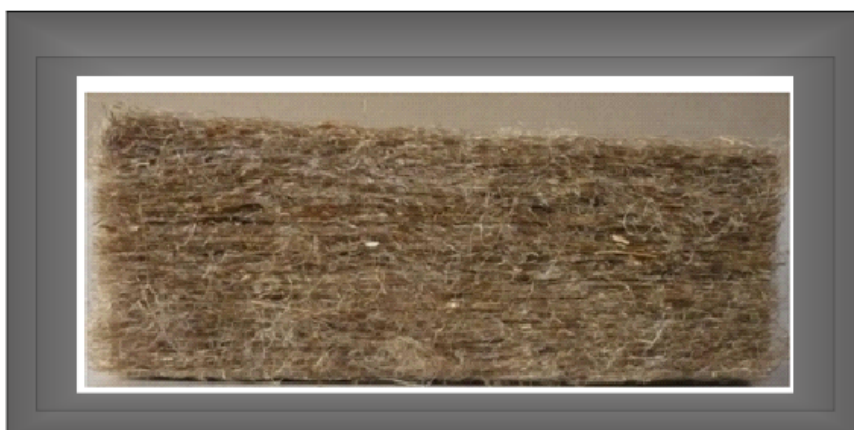


Figura 25. Imagen de fibras de Lino.

- **Madera.** Los paneles de fibras de madera suelen estar formados por residuos obtenidos del procesamiento de la madera o por pequeñas ramas, siendo pues unos productos respetuosos de los bosques. Existen paneles con fibras gruesas de madera resinosa aglomeradas con yeso o cemento blanco (Coeficiente k 0,05 $w / m \cdot K$. Energía incorporada 957 wh / kg) o paneles ligeros de pequeñas fibras (Coeficiente k 0,05 $w / m \cdot K$. Energía incorporada 492 wh / kg).

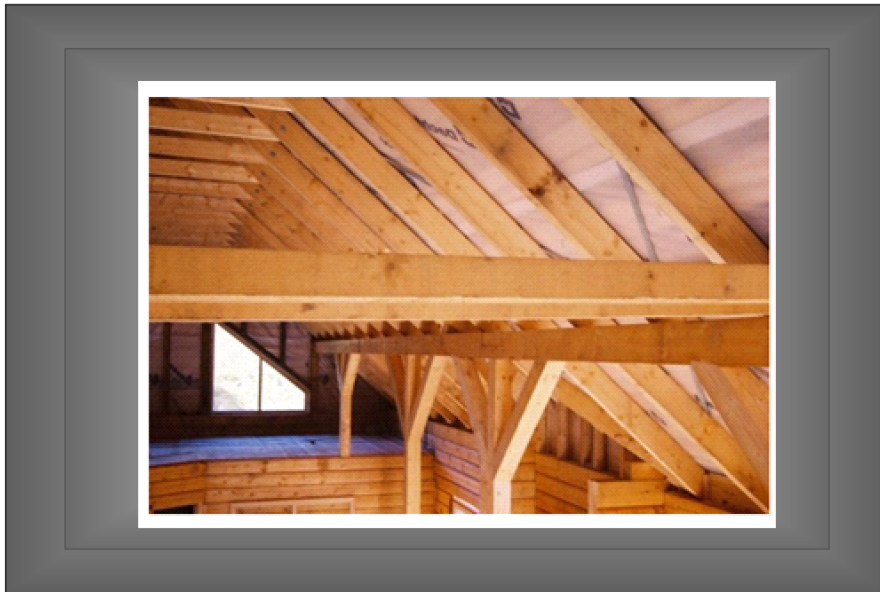


Figura 26. Imagen de paneles de madera.

- **Celulosa.** Elaborada por residuos de papel reciclado en forma de aislante y utilizada para el aislamiento de cámaras de aire. Requiere ser tratada con sustancias químicas para evitar que se produzca el moho y protegerla de la acción del fuego, tiene muy buenas propiedades aislantes, siendo ligera y requiriendo para su elaboración de muy poca energía. Se suele utilizar suelta. (Coeficiente k 0,042 $w / m \cdot K$. Energía incorporada 292 wh / kg). O inyectada con manguera (Coeficiente k 0,039 $w / m \cdot K$. Energía incorporada 173 wh / kg).
- Lana. Material natural que se obtiene de las ovejas, tiene la ventaja de aumentar su capacidad de aislamiento cuando se encuentra húmeda [135]

Se utiliza en las construcciones de alto nivel. (Coeficiente k 0,04 $w / m \cdot K$).

Energía incorporada 664 wh / kg).



Figura 27. Imagen de lana natural.

- **Arlita (arcilla expandida), perlita y vermiculita (feldespatos y rocas expandidas).** Aislantes minerales que requieren de más energía para su proceso de manufacturación, pero que son totalmente naturales e inertes, sin ningún tipo de componente tóxico añadido. La perlita con un k más adecuado para el aislamiento de edificios, se utiliza para el llenado de cámaras de aire. Arlita (Coeficiente k 0,1 w / m K. Energía incorporada 266 wh / kg). Perlita (Coeficiente k 0,05 w / m K. Energía incorporada 531 wh / kg).
- **Fibra de coco.** Una fibra residual con la que, además de otros productos, se realizan mantas aislantes, siendo más adecuada en los lugares en los que sea un producto local.
- **El algodón.** Se realizan mantas aislantes, aunque en muchas ocasiones las condiciones de cultivo no son tan respetuosos con el medioambiente como en el caso de las fibras naturales.
- **La paja.** Tradicionalmente, son conocidas sus características de confort pasivo y aislamiento de las casas de paja o de las de adobe (realizadas con bloques de barro y paja). Actualmente existen paneles manufacturados de paja y yeso para interiores.

En definitiva, se intenta introducir materiales amigables con el medioambiente como solución a los problemas de ruido o reverberación acústica.

Para ello, es necesario caracterizarlos acústicamente, conociendo su comportamiento frente a la incidencia de una onda acústica, bien de forma experimental, bien mediante modelos predictivos, que evalúan el comportamiento acústico de materiales porosos a partir de magnitudes conocidas, como la resistencia específica al flujo o el coeficiente de absorción en incidencia normal.

La contaminación acústica ambiental se está convirtiendo en un importante problema de salud en las zonas urbanas tanto para las personas como para el medioambiente. Se trata pues de un contaminante ambiental al igual que la radiación y los productos químicos orgánicos e inorgánicos tales como metales pesados y pesticidas.

En la actualidad, considerando la cantidad de personas que habitan una ciudad, principalmente en aquellas zonas donde existe una alta densidad demográfica. El ruido proviene de una gran variedad de fuentes, pero principalmente las podemos englobar en cuatro categorías:

- Circulación de vehículos, transporte **80%**.
- Obras y construcciones industriales **10%**.
- Ferrocarriles **6%**.
- Bares, música, lugares de entretenimiento **4%**.

Donde (%) es el porcentaje del ruido total en la ciudad.

Destacan como zonas de mayor contaminación acústica, aquellas que se encuentran ubicadas cerca de las vías del tren, autopistas, aeropuertos, vías rápidas o zonas industriales. Por lo cual es de vital importancia que se tenga una buena planificación y se evite que estas zonas se encuentren cerca de zonas habitacionales y de oficinas.

El sonido ha existido desde el principio de la humanidad, y ha evolucionado convirtiéndose en ruido. Por lo que ha sido asumido en la sociedad, aceptándolo como algo normal. No existe conciencia de que es un problema, y que es controlable. Por tanto, el ruido no se debe destruir sino controlar.

Para protegerse contra los efectos causados por el ruido ambiental la solución más idónea es la de aislarse físicamente del exterior, pero a la hora de plantearse el problema del control del ruido ambiental, habrá que tener en cuenta el ruido producido por el ambiente exterior como por el producido interiormente.

El aislamiento de sonido consiste en impedir la propagación del ruido por medio de obstáculos más o menos reflectores. En cambio, la absorción es la disipación de energía en el interior del medio de propagación.

Por eso el aislamiento acústico consiste en conseguir que la energía que atraviesa una barrera sea lo más baja posible.

Cada local tiene características acústicas diferentes y particulares. Una de ellas es el tiempo de Reverberación que es el tiempo que se necesita en un sitio cerrado, para que un sonido de una frecuencia específica, decaiga en su nivel de presión sonora unos 60 (dB) después de haber cesado la fuente.

Los materiales, en el tema de la acústica, son utilizados para reducir el tiempo de reverberación de un recinto y también como barrera para reducir la intensidad del sonido que viaja de un punto a otro.

Existen distintos tipos de materiales artificiales, uno de ellos son los materiales absorbentes. Los más importantes son los materiales porosos, que están compuestos por una estructura sólida dentro de la cual existen una serie de cavidades o poros intercomunicados entre sí y en el interior. Entre los materiales porosos se encuentran: las lanas de roca, espumas de poliestireno, moquetas etc.

En este sentido, uno de los elementos más utilizados para combatir el ruido son las barreras acústicas, que reducen los niveles sonoros que llegan a la población, procedentes de los grandes ejes viarios, ferroviarios y aglomeraciones.

Las barreras o pantallas acústicas se sitúan entre el foco emisor de ruidos y el receptor para poder reflejar el ruido amortiguándolo.

Las pantallas proporcionan diferentes atenuaciones dependiendo del espectro de frecuencias de la fuente sonora, y de la absorción del recinto donde se coloca la barrera.

Los parámetros que intervienen en la atenuación de una pantalla son:

- Dimensiones de la barrera;
- Situación de la pantalla entre el foco y el receptor.
- Espectro de frecuencias del ruido.
- Características aislantes de la barrera.
- Características absorbentes del recinto.
- La atenuación es mayor para frecuencias elevadas.

En España, la Ley 37/2003 de 17 de noviembre del ruido, tiene como finalidad determinar la exposición de la población al ruido ambiental, y poner a su disposición la información sobre dicha exposición y sus consecuencias, adoptando planes de acción con vistas a prevenir y reducir el ruido ambiental.

En un intento de reducir la contaminación acústica, se ha hecho necesario revisar y optimizar las funciones de las barreras acústicas, puesto que es uno de los elementos reductores de ruido más utilizados para paliar este problema.

Además, debido a la puesta en marcha de la norma ISO 3382- 3:2012, referente a la medida de los parámetros de calidad acústica en oficinas diáfanas, el uso de las barreras acústicas se puede implementar en estos ámbitos para mejorar las condiciones acústicas en los puestos de trabajo, adaptándolas como elementos reductores de ruido en exteriores, a paneles de separación acústica empleados interiores o en elementos unitarios de absorción acústica.

Algunas barreras acústicas incorporan materiales absorbentes fabricados en muchos casos con base mineral y una carcasa, habitualmente de acero o plástico. Sin embargo, las tendencias actuales, conducen a utilizar materiales absorbentes reciclados y reciclables como parte componente de barreras acústicas [136,137], para exteriores y paneles de separación acústica en oficinas o elementos de absorción acústica para interiores y materiales tipo composite como estructura de dichas barreras o elementos de separación.

Últimamente, han realizado prototipos de pantallas antirruido cuyo objetivo es demostrar la utilidad del componente de caucho de los neumáticos fuera de uso en la fabricación de pantallas acústicas de absorción media alta, pero con mejores características de absorción acústicas y menor gasto energético en su construcción que las estándar. El material que constituye el relleno de la pantalla está constituido por grana de caucho de neumáticos de desecho, que es muy absorbente.

Esta solución supone el uso de una tecnología limpia aprovechar los productos de desecho de materiales no reciclables, así como una reducción económica en la fabricación de las pantallas y sustituyendo en este proceso al árido del hormigón fono absorbente por un tipo de goma procedente de la división y machaqueo de neumáticos usados. De esta forma, no solo estamos utilizando materiales más ecológicos, sino que se está dando solución a otro problema ambiental, que es la acumulación de residuos y la necesidad de gestión de los mismos, dándoles una nueva vida útil.

7.2 Aislamiento acústico a ruido aéreo

Ruido aéreo [138-140]: es el sonido que se transmite a través del aire y se propaga en los edificios por medio de los cerramientos (tabiques, forjados, fachadas, cubiertas, etc.)

El método más eficaz frente al ruido aéreo, consiste en interponer una masa suficiente entre la fuente emisora del sonido y el recinto receptor. Cuanto más pesadas son estas particiones, más difícil le resulta al ruido hacerlas vibrar. El inconveniente es que la masa se encuentra limitada por el espesor de los tabiques y distintos paramentos. Si no fuera factible obtener una masa suficiente, será conveniente la utilización complementaria de un aislamiento acústico que aporte absorción. Las paredes divisorias protegen de los ruidos internos. En la Figura 28 se representa el fenómeno del aislamiento.

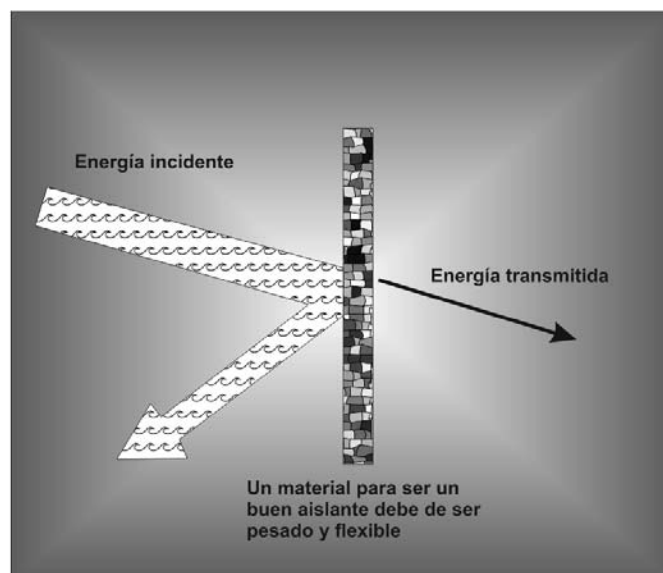


Figura 28. Esquema de Aislamiento.

Por lo tanto, cuando se desea contener el ruido o bien evitar que salga de una estancia, se utilizarán los materiales aislantes acústicos. No hay que confundir los términos de aislamiento acústico y absorción [141].

Cuando se desee dentro de una estancia absorber el ruido por ser excesivo, se emplearán materiales absorbentes. La característica fundamental de los materiales absorbentes es transformar gran parte de la energía sonora que los atraviesa. Su misión, es que se refleje la mínima cantidad de sonido, de forma que la mayor parte posible de la energía sonora incidente sea susceptible de ser transformada en calor por efecto Joule, dado que la absorción es la transformación de parte de la energía incidente en forma de calor.

En la Figura 29 se muestra el esquema básico de la absorción.

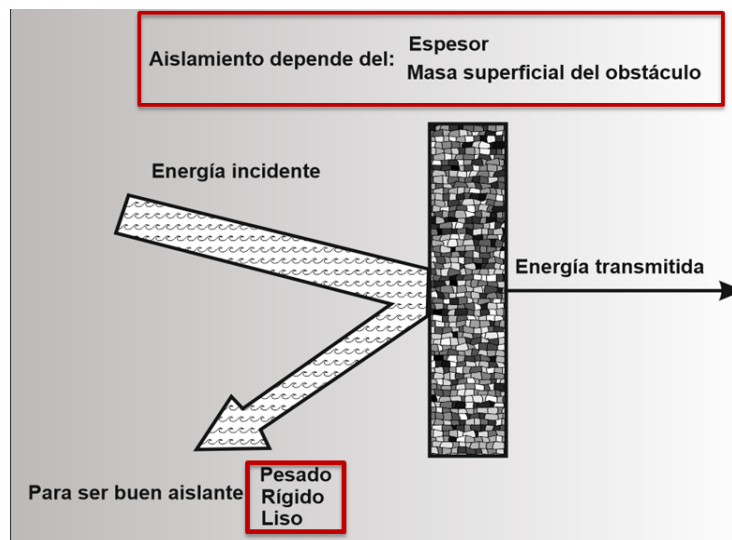


Figura 29. Esquema de la absorción.

Se define como aislamiento acústico a ruido aéreo de una pared o paramento, a la pérdida de energía que experimentan las ondas sonoras cuando atraviesan la pared Figura 30.

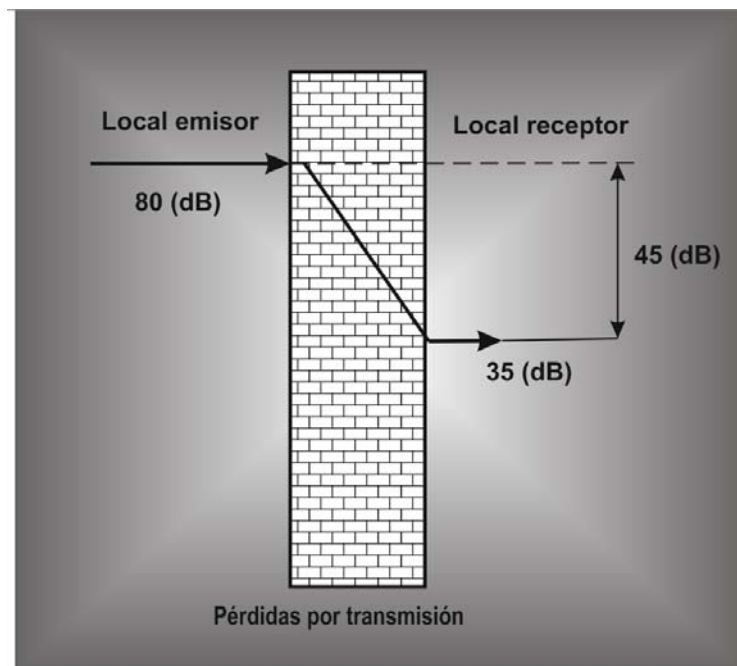


Figura 30. Aislamiento acústico específico de un elemento constructivo.

Por lo tanto, una partícula de aire ubicada infinitamente próxima a la superficie de una pared, se verá obligada a desplazarse cuando llegue la onda sonora.

La energía transmitida hace que se desplacen las partículas del sólido, mientras la perturbación se propaga, u otra parte de la energía se disipa absorbida por el material, debido al efecto de las fuerzas intermoleculares.

La perturbación del sonido en el interior del sólido alcanza la superficie opuesta a la de la superficie que la recibe inicialmente y por un procedimiento análogo se radia nuevamente en forma de sonido aéreo. Es decir, al incidir sobre una pared una onda, se transmitirá parte de la energía de esta, originando una vibración mecánica en la pared, que a su vez se transforma en ondas sonoras con una pérdida de energía debido a las reflexiones y absorciones internas del material.

Si se ubica una barrera [142] entre dos recintos para conseguir un aislamiento al ruido aéreo, la transmisión del ruido de un recinto a otro se puede llevar a cabo por distintos caminos, tal como se indica en la Figura 31.

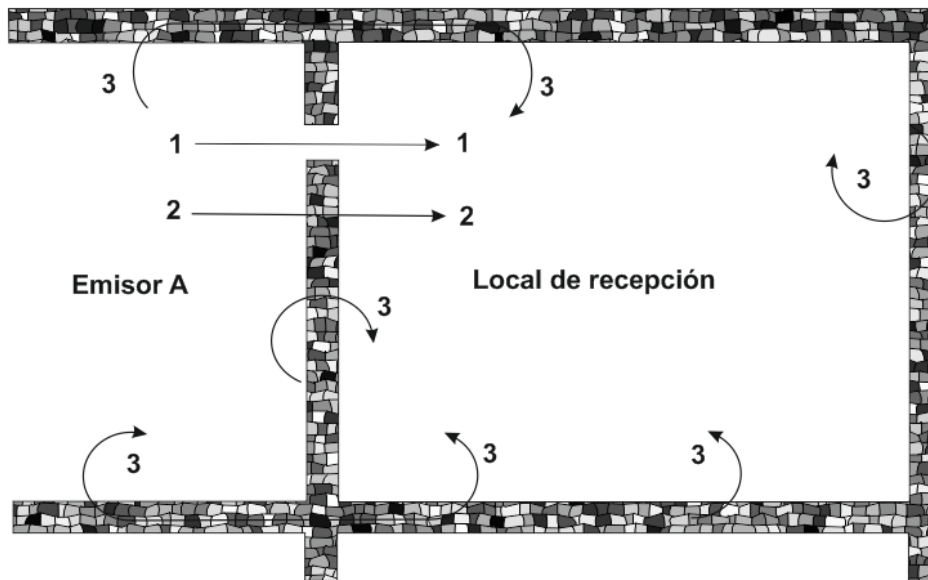


Figura 31. Caminos para la transmisión del ruido aéreo de un recinto a otro.

Con el aislamiento, se pretende impedir la propagación de la energía acústica incidente.

El aislamiento acústico bruto (D): es la diferencia en decibelios entre el nivel de presión sonora medio exterior (L_1) y el valor medio del nivel de presión sonora (L_2) en el interior del local receptor (ISO 140 – 5: 1998). Los cálculos se realizan para cada banda de frecuencia, en este caso en tercios de octava (EN 20140-3).

$$D = L_1 - L_2 \quad (\text{dB}) .$$

El aislamiento acústico normalizado (D_{nT}) es la diferencia de niveles, en decibelios correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación ($T_R = 0,55$ s) en el local de la recepción (ISO 140 – 5: 1998).

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{0,5} \text{ (dB) .}$$

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{10}{A} \text{ (dB) .}$$

Donde:

- T: tiempo de reverberación del local receptor para la frecuencia considerada.
- A: área de absorción equivalente del local receptor para la frecuencia considerada.
- D: aislamiento acústico.
- D_n : aislamiento acústico normalizado.

La reverberación ayuda a la cantidad de ruido existente en una estancia a lo largo de un periodo de tiempo, ya que se produce una prolongación audible del ruido durante aquellos intervalos que no se está emitiendo realmente ningún ruido por la fuente [143].

Cuando este fenómeno ocurre, las ondas sonoras se propaguen de igual manera en todas las direcciones y entonces se dice que el campo acústico es perfectamente difuso.

El aislamiento acústico aparente (R') es la medida del aislamiento a ruido aéreo de un elemento de la edificación cuando se usa como fuente sonora un altavoz para un ángulo de incidencia de 45° . El ángulo de incidencia sonora es el ángulo que se forma entre el eje del altavoz dirigido hacia el centro de la muestra de ensayo y la dirección normal a la superficie de la fachada (ISO 140 – 5: 1998).

Como se ha indicado el aislamiento acústico a ruido aéreo tiene como objetivo que las ondas sonoras pierdan la mayor cantidad de energía posible cuando atraviesan un cerramiento. Cuanto mayor sea la energía perdida, mayor será el aislamiento del cerramiento. El aislamiento acústico a ruido aéreo de un elemento constructivo se puede expresar de tres formas distintas.

- En forma gráfica: representando el aislamiento (R en dB) en función de la frecuencia (F en Hz).
- En forma tabulada: dando valores de frecuencia y aislamiento.
- En forma de un único valor (R_w en dB).

Los parámetros que definen el aislamiento a ruido aéreo expresados en (dBA) son:

- R_A índice global de reducción acústica de un elemento (valor medido en laboratorio). A mayor valor de R_A , mejor aislamiento.
- D_{ntA} diferencia de presión acústica entre recintos interiores (valor medido in situ). A mayor valor de D_{ntA} , mejor aislamiento.
- $D_{2m, n, T, Atr}$ diferencia de presión acústica en fachadas y cubiertas a ruido exterior de tráfico y aeronaves (valor medido in situ). A mayor valor de $D_{2m, n, T, Atr}$, mejor aislamiento.

7.3 Aislamiento acústico de una partición simple y de capa múltiples

Los elementos constructivos pueden ser de partición simple o de capas múltiples. Se denomina partición simple a la es homogénea o está formada por una sola capa, los puntos de la masa se encuentran sobre la normal, no se modifica su distancia mutua cuando la partición está sometida a vibraciones [144]. Su pérdida de transmisión se muestra en la Figura 32.

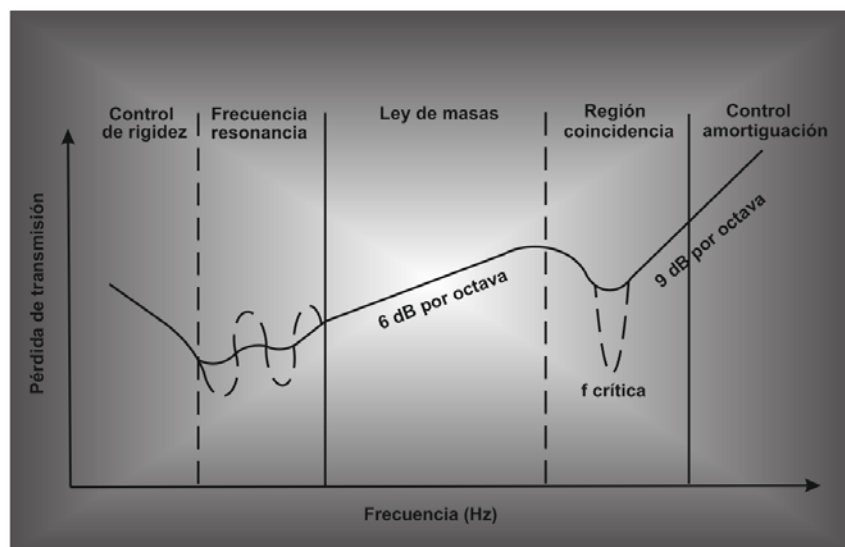


Figura 32. Conducta de la pérdida de transmisión de una partición simple.

Para las bajas frecuencia, la pérdida de la transmisión (TL) se controla por la rigidez del panel. En las frecuencias de resonancia la transmisión del sonido es elevada y se mantiene en forma constante, la pérdida de transmisión viene determinada en parte por la flexibilidad del sistema. Posteriormente, se encuentra un recorrido amplio de frecuencias conocido como el recorrido de la ley de masa, en el cual la pérdida de la transmisión aumenta con la frecuencia con una proporción de 6 (dB) por octava [97], y se controla por la densidad de la superficie del panel.

Las particiones homogéneas, tienen valores de TL. Éste aumenta con el incremento de la frecuencia sonora, excepto con un declive de la curvatura de la onda conocida como frecuencia crítica. Este efecto es conocido como efecto de coincidencia y se produce cuando la longitud de la onda de flexión en el panel coincide con la longitud de la onda en el aire [98], dando lugar a una disminución importante del aislamiento. El valor de esta disminución depende de las vibraciones del panel y las frecuencias a las que ocurre este declive dependerán de la densidad y del espesor del material de que este formado el panel o partición.

La frecuencia crítica, como ya se ha mencionado anteriormente, depende exclusivamente del material de la pared y de su espesor, según la expresión:

Para la obtención de la frecuencia crítica se utiliza la norma Estándar E756-98:

$$f_c = \frac{H C_1}{l^2} \sqrt{\frac{E}{12 \rho_0}} .$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad del material de la viga, expresado en (Pa).
- C_1 : Constante = 0,55959.
- H: espesor de la barra (m).
- l: longitud de la barra (m).
- ρ_0 : densidad (kg/m^3).

Básicamente, el efecto que produce la frecuencia crítica, es que la pared es capaz de vibrar en sintonía con el sonido a una frecuencia determinada y con un ángulo de incidencia determinado. Teóricamente para el ángulo de incidencia y para la frecuencia crítica, el aislamiento de la pared sería nulo, es decir, es como si no existiera pared para esa frecuencia.

Debido que el ángulo de incidencia en acústica no es siempre el mismo, este efecto se suavizará y se obtendrá una curva como la de la zona central de la Figura 32. En el punto de la frecuencia crítica, se produce una caída abrupta alrededor de 10 o 20 (dB). A esta caída le sigue una recuperación, que hace que el aislamiento no sea nulo, siendo la sección de esta curva la que más se asemeja a la curva real de los materiales de construcción. En resumen, se observa que existen tres zonas donde el aislamiento acústico está gobernado por diferentes factores, tal como se representa esquemáticamente en la Figura 33 y se distinguen tres zonas.

Zona 1: dominio de la elasticidad. Zona 2: dominio de la masa. Zona 3: dominio del amortiguamiento interno.

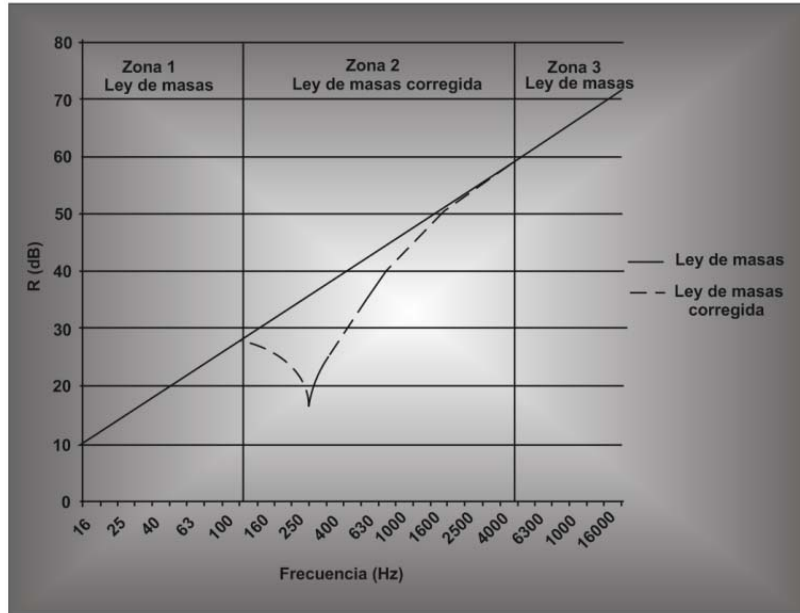


Figura 33. Ley de masas paredes simples.

Zona 1: zona de «dominio de la elasticidad» ($f < f_0$), que corresponde en general a muy bajas frecuencias y con un aislamiento descendente hasta « f_0 », donde es casi nulo.

Zona 2: zona de «dominio de la masa», que sí está gobernada por la ley de masas, caracterizada por $f_0 < f < f_c$ aproximadamente, donde:

- $R \text{ (dB)} = 20 \text{ Log (m. f)} - 42 .$

Zona 3: zona de «dominio del amortiguamiento interno», que corresponde a $f_0 > f_c$, en la cual el aislamiento baja de modo considerable hasta f_c y aumenta desde ese valor de un modo progresivo.

En la zona 3, el factor que gobierna las variaciones del aislamiento es el amortiguamiento interno (Γ) del material, la capacidad del material para absorber energía de vibración a las ondas de flexión.

7.4 Ley de masas

Para conseguir grandes aislamientos es importante incrementar la masa del paramento o pared de separación [145]. A mayor masa, mayor aislamiento se conseguirá.

Su componente principal es la reducción acústica de la pared de separación, expresada por el factor R, definido por:

$$\blacksquare R \text{ (dB)} = \frac{10 \text{ Log } W_i}{W_t}.$$

Dónde.

- W_i = es la potencia acústica incidente en la pared
- W_t = es la potencia acústica transmitida.

Tal como indica la ley de masas simple [146], el aislamiento de una pared simple es diez veces el logaritmo decimal del cuadrado del cociente entre el producto de la densidad superficial de masa por la pulsación, dividido por el doble de la impedancia característica del medio (en el aire la velocidad es $c = 345$ m/s y la densidad volumétrica = $1,19$ kg/m³).

De aquí se deduce que, para una frecuencia fija, el aislamiento aumenta en 6 (dB) cuando se duplica la masa. Análogamente para una masa dada, el aislamiento crece al duplicarse la frecuencia. Esta ley es experimental y por tanto aproximada, se cumple dentro de un margen denominado como Zona de Control por Masa.

La mayoría de veces no es suficiente con sustituir paredes más delgadas por otras de mayor espesor. Esto se debe principalmente a la existencia del comportamiento que presentan las paredes a la flexión. A menor frecuencia, mayor longitud de onda y, por tanto, mayor efecto diafragma.

El valor R_w (R_w valor ponderado de R) es un valor numérico que describe la capacidad de los sistemas constructivos como muros, pisos, cubiertas, puertas o ventanas de minimizar la transmisión de ruido de un área a otra. La pérdida real de transmisión de sonido depende de la frecuencia específica y de las características del ambiente. El factor R (ASTM E 90-90) puede medirse directamente en laboratorio, donde se evitan las transmisiones laterales y accidentales, o indirectamente y de manera aproximada, en condiciones reales, con evaluación anterior de las mismas. También puede evaluarse por cálculo, conociendo las dimensiones de los locales y la masa volúmica del material, de la cual puede deducirse la masa superficial de la pared.

La Tabla 11 muestra los valores de los niveles recomendados de R_w .

Tabla 11. Valores recomendables de R_w .

Valor R_w	Audición de conversación	Grado de control de sonido
15 – 25	Voz normal, de fácil comprensión	Malo
25 – 35	Voz alta, de fácil comprensión	Regular
35 – 45	Voz normal, apenas audible e ininteligible	Bueno
45 – 55	Voz alta apenas audible e ininteligible	Muy bueno
55 o más	Voz generalmente inaudible	Excelente

Control de ruido

Para poder realizar un control sobre el ruido se puede:

1. Aumentando la masa sólida:

- Con un mayor número de capas de hojas de yeso.
- Aumentando el espesor de las hojas de yeso 12,7(mm) a 15,9 (mm).

2. Romper la trayectoria directa del sonido.

- Usando bastidores ligeros (Acero en lugar de madera).
- Usando perfiles resilientes.
- Sistemas de doble bastidor.

3. Absorción en cavidad de sistema

- Instalando fibra de vidrio dentro del bastidor.

La densidad del aislamiento por sí sola no cambia el R_w de manera significativa en un sistema. La resistencia de flujo de aire es un factor que contribuye a la pérdida de transmisión, y depende de:

- Diámetro de fibra (Cuando el diámetro de fibra es menor, mejor es la absorción).
- Densidad (Cuando la densidad es mayor, mejor es la absorción).

7.5 Paredes dobles

Una alternativa a las paredes simples, son los muros de dos hojas con cámara de aire o rellenos de absorbentes acústicos [147]

Estas soluciones permiten una cierta reducción en los espesores y masas, así como una considerable disminución de la transmisión del ruido de impacto.

Para aumentar su eficacia acústica, se recomienda que las dos hojas tengan distinto espesor o sean de distinto material, evitando así el acoplamiento de frecuencias, y que el espesor de la cavidad sea proporcional a la masa del cerramiento y que se rellene con un material absorbente acústico para atenuar la reverberación en su interior.

Además, es fundamental evitar cualquier unión mecánica entre las hojas, puesto que producirían un puente acústico.

Hay que evitar la mínima existencia de comunicación aérea entre recintos, ya sea por rendijas (holguras en tabiques por flechas de forjado o asentamientos) o por conductos (canales de ventilación o tubos entre cajas de electricidad).

Las paredes dobles son aquellas que están formadas por dos materiales, o por dos paredes simples (ladrillo – Pladur, o dos ladrillos) Figura 34, que podrán ser iguales o distintos, pero que además tienen en común que están separados por un espacio.

Este espacio puede estar relleno de un material absorbente como puede ser la lana de roca, o puede ser un espacio que se encuentre lleno de aire (espacio vacío).

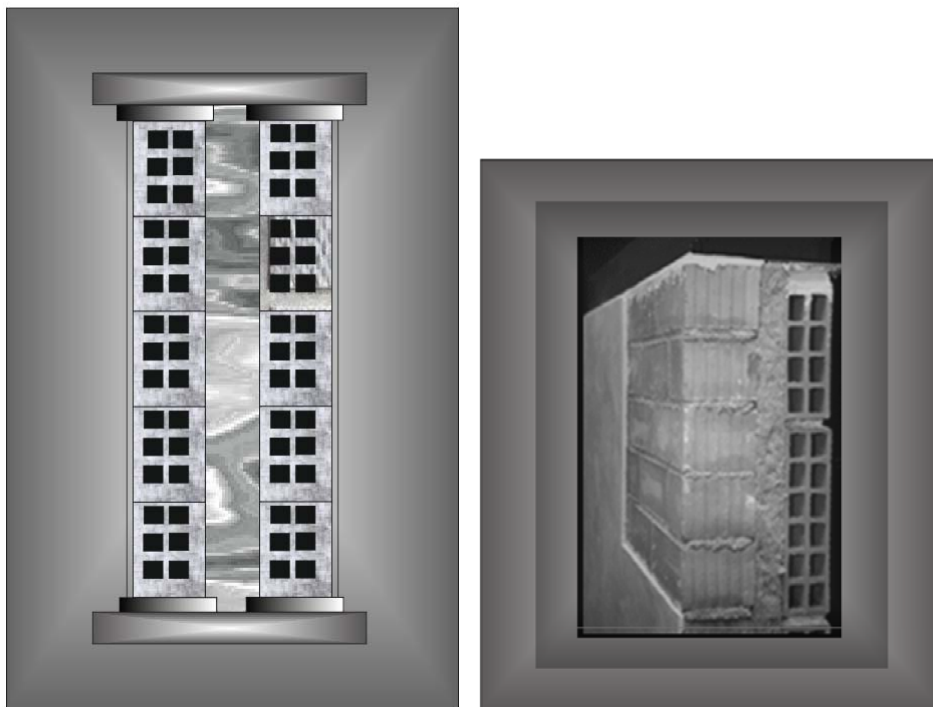


Figura 34. Imagen de una pared doble.

Mientras que la mejora del aislamiento acústico se consigue al duplicar el peso de las paredes simples (6 dB según la ley de masa) compensa el gasto en el caso de paredes ligeras, para paredes pesadas ya no es tan rentable.

Las paredes dobles aíslan generalmente mucho mejor que las paredes simples construidas con el mismo material y presentando la misma masa superficial.

En el caso de paredes dobles, el índice de aislamiento R depende:

- De la masa superficial de ambas paredes.
- Del espesor de la lámina de aire que las separa.
- Del espesor del absorbente acústico (tipo lana mineral) dispuesto entre ellas.
- De la frecuencia crítica de ambas paredes.

Una pared doble presenta a bajas frecuencias un sistema masa – muelle – masa Figura 35, en donde las masas son las dos capas de las paredes y el muelle la cámara de aire que las separa.

Un sistema así, es capaz de vibrar y posee una frecuencia propia de resonancia.

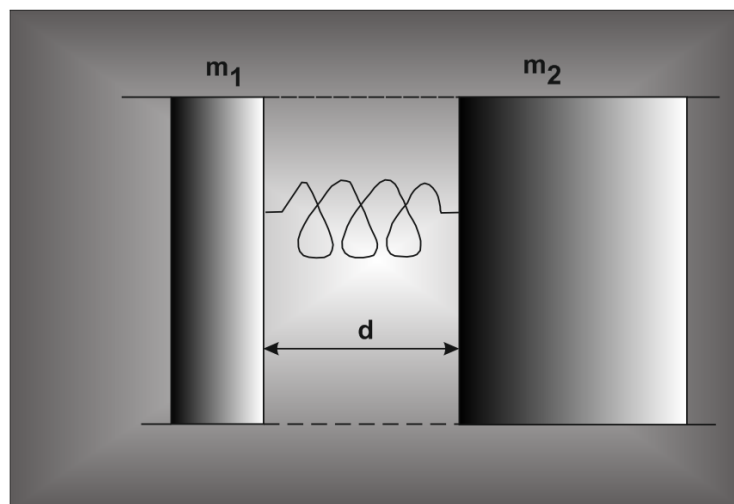


Figura 35. Las paredes y el espesor de la cámara de aire forman un sistema mecánico masa - muelle - masa.

Este conjunto tiene una frecuencia propia y, si se somete una de las paredes a una vibración que coincida con la frecuencia propia del conjunto, el sistema entrará en resonancia

- $f_r = \left(\frac{615}{\sqrt{d}}\right) \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}$.
- $f_r = 84 \sqrt{\frac{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}{d}}$.

Donde:

- d = distancia entre paredes se expresa en (cm).
- M_1 y M_2 = masas superficiales de las paredes se expresan en (kg/m^2).

La frecuencia de resonancia será tanto más baja cuantos mayores sean las masas y/o mayor sea la distancia entre ellas. Para esta frecuencia, el aislamiento acústico es muy bajo (prácticamente nulo), por lo que se deberá conseguir que esta frecuencia sea lo más baja posible.

La frecuencia, alrededor de la cual R disminuye fuertemente se encuentra en las frecuencias medias, las más perceptibles por el oído humano. Es una de las razones por la cual las paredes dobles pared son menos eficaces que la pared simple correspondiente.

Para aumentar R , hay que buscar la frecuencia de resonancia más baja posible, lo cual se consigue aumentando la distancia entre las paredes y su masa superficial.

Hay fundamentalmente tres factores que pueden influir sobre el acoplamiento en paredes dobles o múltiples:

- La resonancia de las paredes.
- Las ondas estacionarias de cavidad.
- Los acoplamientos rígidos entre paredes.

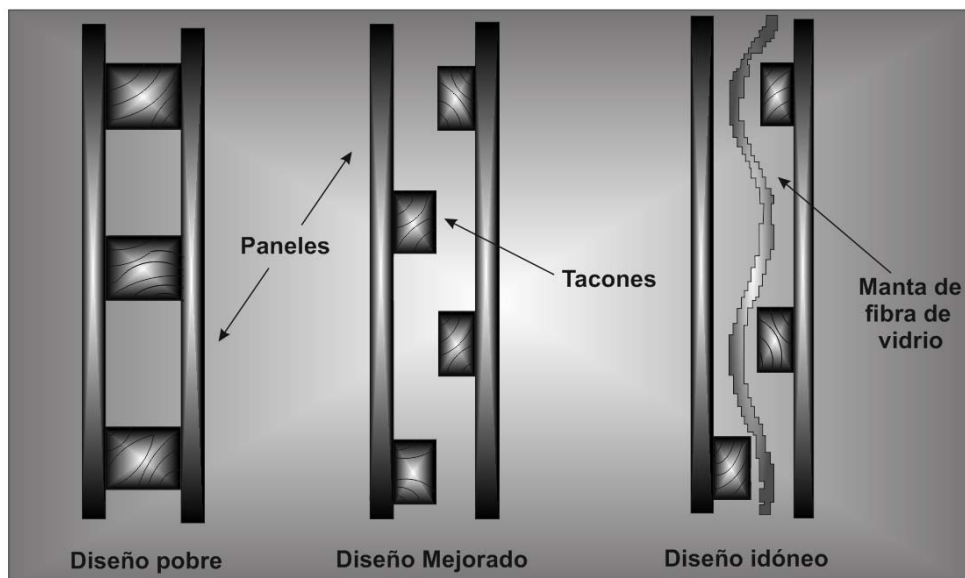


Figura 36. Diseños de paredes dobles.

La frecuencia crítica

Es aquella frecuencia en la que el material no presenta aislamiento acústico alguno. Esta definición siempre se refiere a nivel teórico, ya que a nivel práctico el aislamiento cero no existe, se da simplemente para un determinado ángulo de incidencia. Debido a que el sonido tiene distintos ángulos de incidencia, el aislamiento acústico no será cero, sino que se producirá una disminución de forma elevada.

Se deben de elegir, a ser posible, dos materiales que tengan frecuencias críticas muy distintas, de forma que las caídas de aislamiento acústico se produzcan en sitios separados dentro del espectro sonoro, y en consecuencia se compense un material con el otro.

Para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia

Es donde realmente se aprecia la ventaja de la doble pared, ya que para una masa equivalente a la de la pared simple la mejora del aislamiento acústico teórico alcanza los 18 (dB) al duplicar la frecuencia, en vez de los 6 (dB).

El nivel de aislamiento obtenido en esta zona de frecuencias a nivel teórico se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{20 \text{ Log } M_1 M_2 d W^3}{2 \rho^2 c^3} .$$

Dónde.

- M_1 y M_2 = masas superficiales de los elementos (kg/m^2).
- d = espesor de la capa de aire (m).
- W = frecuencia angular = $2\pi f$ (Hz).
- ρ = densidad del aire (kg/m^3).
- c = velocidad del sonido en el aire (m/s).

Las frecuencias más importantes en paredes dobles son:

- **La frecuencia de resonancia:** es la frecuencia a la que el sistema pared + cavidad + pared vibra con más facilidad.
- **Frecuencia de cavidad:** es la frecuencia en la que la amplitud de las ondas estacionarias es mayor. Las ondas coinciden en longitud de onda con las dimensiones o el espacio de la cavidad.

Cuando un sonido llega a una cavidad vacía, es como si llegase a una caja, y esa caja tiene tendencia a establecer unas condiciones que hacen que determinadas frecuencias de ese sonido aumenten desproporcionadamente en amplitud.

Las frecuencias que tienen que ver con la distancia de la cavidad producen una caída de aislamiento, debido a que la cavidad hace que aumente la amplitud de esas ondas sonoras en esas frecuencias.

En la Figura 37 se recopilan las ondas que se producen en el interior de la cavidad.

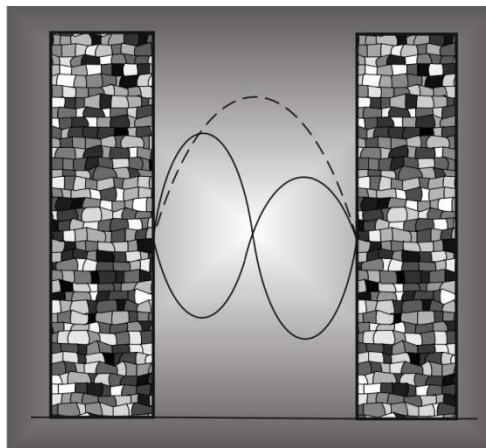


Figura 37. Frecuencia de la cavidad.

La formación de ondas estacionarias en el interior de la lámina de aire perturba también el índice R. Las frecuencias de resonancia de la lámina son:

$$f_n = \frac{n c}{2 d} \equiv 170 \frac{n}{d} .$$

Donde:

- c = velocidad del sonido (≈ 340 m/s).
- d = distancia entre las paredes.
- $n = 1, 2, 3, 4, \text{etc.}$

Ejemplo: las frecuencias de resonancia de una lámina de aire de 10 cm de espesor valen:

$$f_n = \frac{170 n}{0,10} = 1700 n .$$

Estas frecuencias se ubican a 1.700, 3.400, 5.100, 6.800 Hz.

Hay que conducir estas frecuencias hacia los agudos, disminuyendo la distancia entre las paredes.

Siendo este requisito contradictorio con el anterior, especialmente para paredes ligeras, se recomienda disponer un material absorbente entre ambas paredes Figura 38.

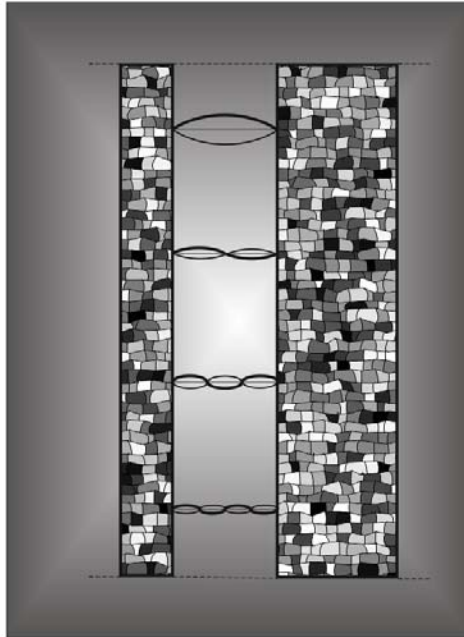


Figura 38. Valores de n : $n=1$ para la frecuencia fundamental y $n=2,3$ y 4 para los armónicos.

Cada pared tiene una frecuencia crítica f_c , para la cual R disminuye de modo más o menos importante. Si las dos paredes son idénticas, las frecuencias críticas son iguales también, y la caída de R se ve muy acentuada. Se recomienda por lo tanto utilizar paredes dobles con elementos de distinto espesor.

Es decir, si se coloca un material de ladrillo de 12 cm de espesor, el otro material que compone la pared doble deberá de tener un espesor de al menos la mitad del espesor o grosor que el del primer ladrillo, sobre los 5 cm de espesor como máximo. Cuando la diferencia de espesores sea mayor, mayor diferencia habrá entre las frecuencias críticas y más robusto será el sistema.

Las frecuencias críticas de cada pared deben de ser diferentes, y estar lo más posiblemente separadas. Se deberá de intentar que una frecuencia este relativamente baja y la otra relativamente alta. De tal forma que los aislamientos que conforman la pared doble se complementen de la mejor manera posible.

La disminución máxima de R, en la frecuencia crítica, es de unos 5 (dB) para los materiales con pérdidas internas elevadas (corcho, goma...), de unos 8 (dB) para los materiales con pérdidas internas medias (hormigón, madera,) y de unos 10 (dB) para los materiales con pérdidas internas débiles (acero, vidrio, aluminio,).

El aumento del espesor de la pared desplaza esta frecuencia crítica, llevándola hacia las bajas frecuencias.

Una forma sencilla de conseguir esto, es combinar materiales de obra seca con los de obra húmeda.

- Obra húmeda: ladrillos, losas de hormigón. Mientras que los de obra húmeda tienen una frecuencia por debajo de los 500 Hz.
- Obra seca: Placas de yeso laminado, madera, plástico, lanas de roca comprimidas. Los materiales de obra seca tienen una frecuencia crítica que abarca entre 1.000 y 3.000 Hz.

Una pared doble puede tener su cavidad rellena de un material absorbente. Lo ideal es que la cavidad esté rellena de material absorbente, pero hay que tener en cuenta el siguiente inciso:

- Los materiales absorbentes exclusivamente adheridos a una pared simple no aumentan el aislamiento acústico en una solución constructiva.

Si se tiene una pared de ladrillo y se le adhiere una lana de roca no producirá un aumento del aislamiento acústico. Lo que se consigue reducir los niveles internos de la sala donde se coloca el material absorbente, por tener una cierta absorción. Pero el aislamiento acústico se mantiene intacto.

Para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia

Es donde realmente se aprecia la ventaja de la doble pared, ya que para una masa equivalente a la de la pared simple la mejora del aislamiento acústico teórico alcanza los 18 (dB) al duplicar la frecuencia, en vez de los 6 (dB).

El nivel de aislamiento obtenido en esta zona de frecuencias a nivel teórico se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{20 \text{ Log } M_1 M_2 d W^3}{2 \rho^2 c^3}.$$

Dónde.

- M_1 y M_2 = masas superficiales de los elementos (kg/m^2).
- d = espesor de la capa de aire (m).
- W = frecuencia angular = $2\pi f$ (Hz).

- ρ = densidad del aire (kg/m^3).
- c = velocidad del sonido en el aire (m/s).

En la Figura 39 se muestra la gráfica a la que se encuentran sometidas las paredes múltiples,

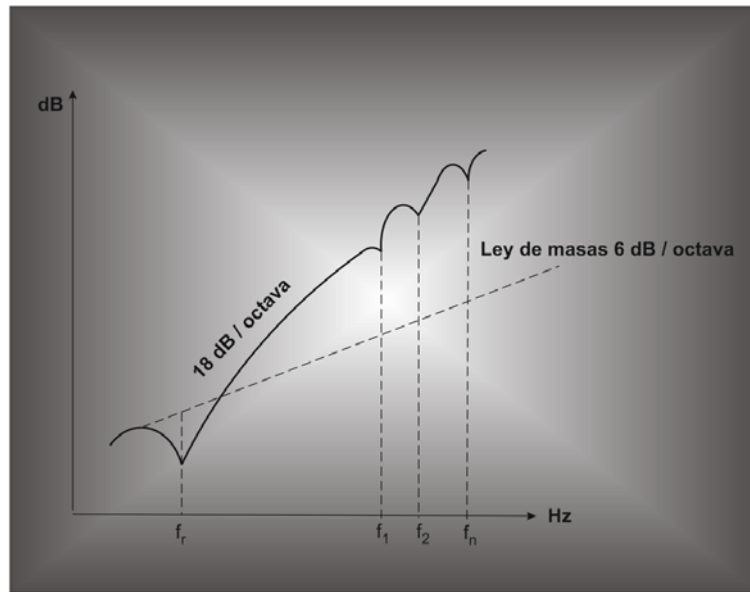


Figura 39. Las paredes múltiples alcanzan 18 dB/ octava.

Resumiendo, un sistema de aislamiento compuesto por paredes múltiples se comporta de la siguiente forma, dependiendo de la frecuencia en la que nos podamos mover:

- Para frecuencias inferiores a la frecuencia de resonancia, aunque existan dos tabiques, se comporta como uno solo de masa = $M1 + M2$.
- Para frecuencias comprendidas entre la de resonancia y la de coincidencia, en el aislamiento total influyen no sólo los aislamientos de las dos capas, sino también las dimensiones de la capa a aislar, la separación entre las mismas y el coeficiente de absorción del material que se coloca entre las dos capas.
- El espesor del material absorbente es importante para determinar la absorción máxima.
- La energía sonora penetra en el material sólo hasta determinada profundidad, a partir de la cual no sería necesario dar mayor espesor, pero si el espesor no es el adecuado se perderán posibilidades de absorción.

7.6 Estructura de los materiales acústicos

En este apartado, debido a las condiciones de los materiales composites que en el proceso del curado se van a convertir en superficies lisas y compactas, estos se encuentran englobados dentro del grupo de materiales aislantes.

La función de los materiales aislantes acústicos es, por tanto, la de reflejar la mayor parte de la energía que reciben.

Para cumplir esta función, los aislantes deberán ser materiales pesados, flexibles y continuos para obtener el máximo rendimiento de su peso, utilizándose para atenuar el paso del ruido entre ambientes o recintos distintos.

En locales en que haya alguna pared rígida lo primero que destacará será el fenómeno de la reverberación.

La fuente sonora transmitirá cierto ruido o energía de forma directa hacia un oyente situado en un punto determinado, pero además dicho oyente recibirá la energía sonora reflejada en todas las paredes del local, por lo que el ruido que percibirá será superior al que escucharía si fuente y receptor estuvieran al aire libre (p.e.) y sin estar dentro del entorno "reflectante" anteriormente descrito.

Con fin de realizar un laminado absorbente, se deberán de emplear laminados multicapa, en la que la capa central estará formada por un material absorbente.

Los materiales absorbentes deben de ser porosos para que puedan permitir el paso del aire, de tal forma que el material pueda disipar las ondas sonoras en sus choques contra las paredes de las cavidades.

Los materiales con celdas interiores de superficie cerrada no podrán ser buenos absorbentes en ningún caso.

El espesor de los materiales absorbentes es importante para determinar la absorción máxima. La energía sonora penetra en el material hasta una determinada profundidad, a partir de la cual no sería necesario dar mayor espesor, pero si el espesor no es el adecuado se perderán posibilidades de absorción.

Dicha porosidad y por lo tanto absorción se la va a proporcionar la lana de oveja material utilizado en este trabajo.

Con la aplicación de la lana de oveja [14], se pretende desarrollar un producto que sea sostenible y se pueda aplicar en el sector de la construcción, concretamente como aislante térmico y acústico.

Coeficiente de absorción sonora

El sonido se refleja en una superficie igual que la luz lo hace en un espejo. Estas reflexiones producen efectos importantes en las cualidades acústicas de un recinto, por producir reverberación, ecos e incluso la propagación del sonido a lo largo de túneles y pasillos. El control de estas reflexiones es determinante para la calidad acústica de un recinto, porque condiciona cualidades como la claridad o plenitud de un sonido.

Para controlar la reflexión del sonido, se debe de hacer un uso correcto de los materiales reflectantes (que reflejan gran parte del sonido incidente) y absorbentes (que reflejan una pequeña parte del sonido, y absorben el resto).

Se define el coeficiente de absorción acústica α de un material (o de un elemento) como la proporción de energía sonora que es absorbida al incidir en él [148], Figura 40.

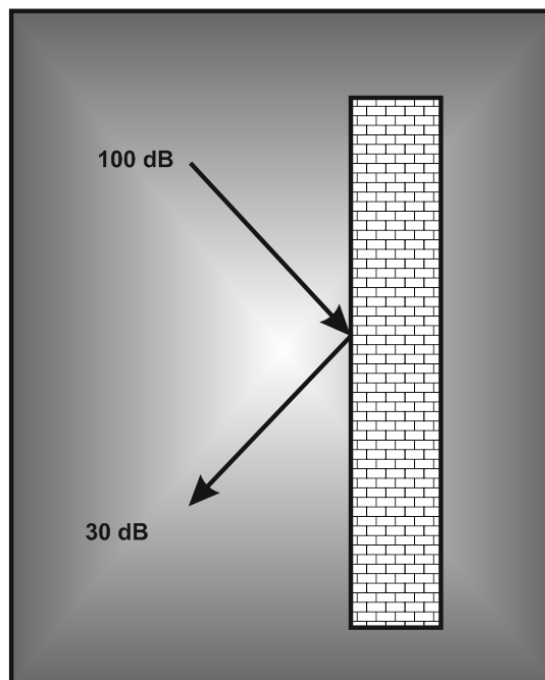


Figura 40. Coeficiente de absorción $\alpha = 70 / 100 = 0,7$.

Coeficiente de absorción, α se define como: la proporción de la energía sonora incidente que no es reflejada por la superficie. Es función de la frecuencia.

La absorción acústica de un material depende de la frecuencia del sonido. Por lo tanto, se representa el coeficiente α como una función de la frecuencia o en forma de índice global. En el laboratorio la medición de α se realiza en bandas de tercio de octava. En la Tabla 12 se recopilan los valores típicos (en bandas de octava) del coeficiente de absorción de algunos materiales usuales:

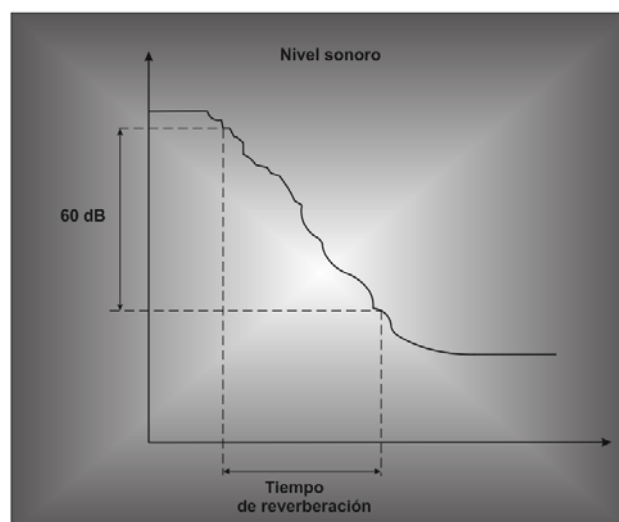
Tabla 12. Recopilación de distintos valores de α .

Coeficientes de absorción en función de la frecuencia						
Materiales	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón endurecido	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
Suelo de madera	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,08
Moqueta	0,10	0,10	0,20	0,30	0,50	0,60
25 mm de lana mineral	0,10	0,30	0,70	0,80	0,90	1,00
13 mm de lana oveja Premium	0,12	0,40	0,81	0,92	0,91	0,91
13 mm de lana oveja M5	0,27	0,50	0,89	0,90	0,92	0,90

Como se puede observar, en los resultados de la Tabla 12 las bajas frecuencias son más difíciles de absorber que las elevadas.

Tiempo de reverberación

Al generarse un sonido en el interior de un recinto, éste se propaga a través del aire, reflejándose en los paramentos, de forma que no desaparece de forma inmediata, aunque la fuente que lo haya producido dejará de emitir. Basándose en este concepto, se define el tiempo de reverberación [149-153]: como el tiempo necesario para que el nivel de sonido en un recinto cerrado decaiga 60 (dB). El tiempo de reverberación es función de la frecuencia. En la Figura 41 se muestra la curva que sigue el sonido en un recinto cerrado.

**Figura 41.** Tiempo de reverberación en un recinto.

Este tiempo dependerá de varios factores, entre los cuales destacan: el tamaño del local y la cantidad de materiales absorbentes presente en él. Cuanto mayor sea el local, más

tiempo tardarán en general en apagarse los sonidos: de aquí la peculiar acústica reverberante de las grandes catedrales. Por otra parte, cuanto mayor sea el poder de absorción acústica concentrado en un recinto más rápido se eliminarán los sonidos que viajan en su interior.

Para la medición del coeficiente de absorción de un material, se debe de analizar el coeficiente de absorción del material, estudiando el efecto que produce en el tiempo de reverberación de una cámara. Para ello se debe de medir este tiempo con y sin una muestra del material en su interior.

Cuanto más absorbente sea el material, más se acortará el tiempo de reverberación del recinto al introducir la muestra Figura 42.

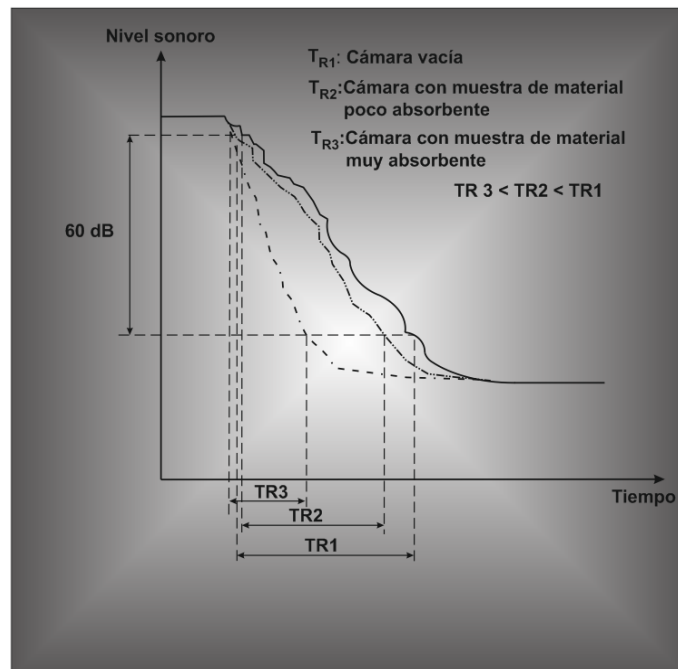


Figura 42. Medida del coeficiente de absorción de un material

7.7 Cámara reverberante

Uno de los laboratorios acústicos más utilizados para la determinación del coeficiente de absorción de los materiales, o para ensayos en los que se pretenda la obtención de la potencia acústica radiada por distintos emisores es la cámara reverberante [154].

Las características y dimensiones vienen determinadas por diferentes normativas. En el caso en concreto de ensayos del coeficiente de absorción, las dimensiones de las cámaras reverberantes construidas conforme a la norma necesitan superficies de materiales de entre 10 y 12 m² en función del volumen de las mismas. Norma UNE – EN –ISO 354:2004 [155].

El interior de la cámara debe de estar formado por superficies duras y reflectantes, para contener los objetivos de difusión y tiempos largos de reverberación. Es importante que el coeficiente de absorción de las paredes interiores sea lo suficientemente bajo. Así como la utilización de materiales o combinaciones de materiales que aíslen lo suficiente los ruidos generados en el exterior.

Rango de frecuencias de trabajo

El rango de trabajo de las frecuencias estará comprendido entre los 100 Hz a 5 000 Hz.

Superficies de las probetas a ensayar

La superficie de la probeta a ensayar estará comprendida entre los 0,28 y 0,33 m². Lo que implica un ancho de 0,75 x 0,4 m de largo, o bien de, 0,6 x 0,5 m.

Posicionamiento de las fuentes

Las fuentes emisoras deberán de tener una radiación omnidireccional, manteniendo una distancia mínima de 3 m respecto a las demás fuentes.

Posicionamiento del micrófono

Los micrófonos deben de ser omnidireccionales. Entre las distintas ubicaciones de los receptores deben de existir al menos una 1,5 m de separación. En lo que se refiere a las superficies de la cámara y de la muestra, los micrófonos deberán de estar situados a más de 1 m de distancia.

En la Figura 43 que se presenta a continuación se muestran los posicionamientos de los micrófonos y la fuente, así como la ubicación de la muestra analizar.

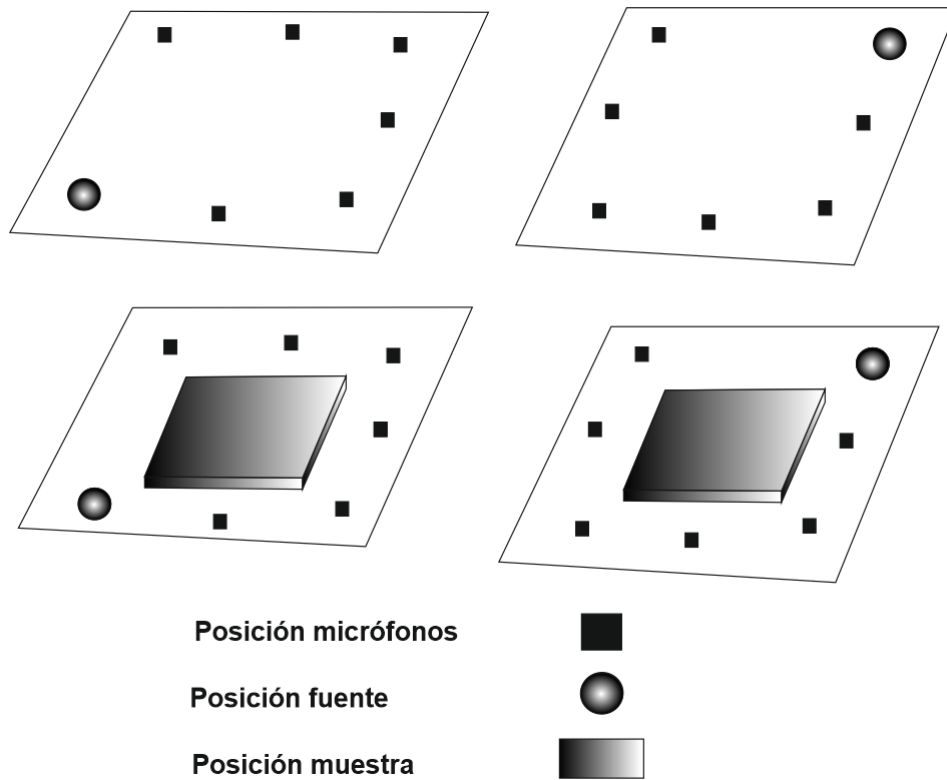


Figura 43. Posicionamiento de los micrófonos, fuente y muestra en la cámara de reverberación.

Tiempo de reverberación y coeficiente de absorción de la cámara

En primer lugar, se deberá de obtener el tiempo de reverberación de la cámara vacía, para lo que se debe de calcular el coeficiente de absorción Figura 44.

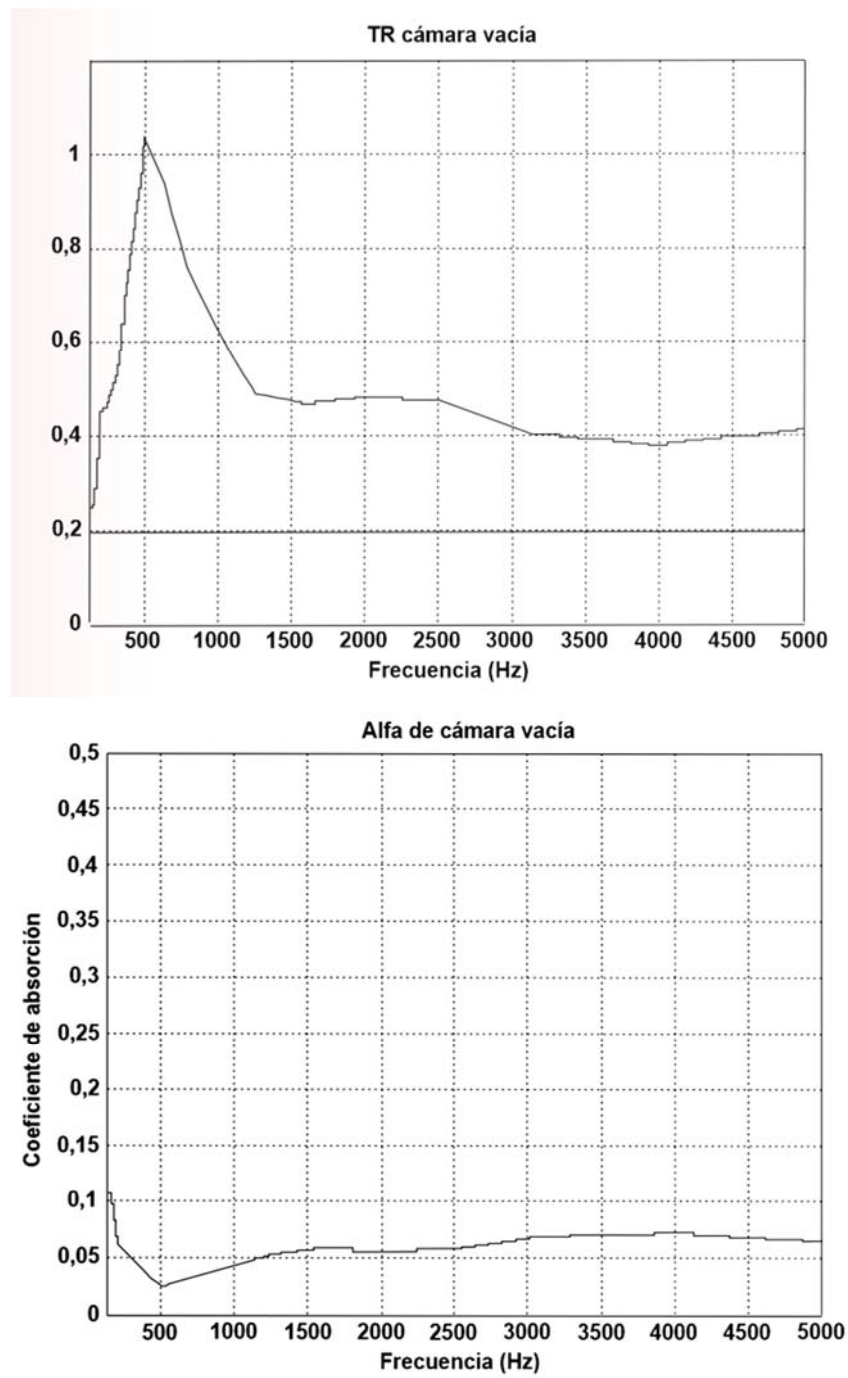


Figura 44. Tiempo de reverberación y coeficiente de absorción de la cámara de reverberación vacía.

Expresiones de las fórmulas de reverberación

Sabine

$$TR_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{A}$$

Donde:

- V: Volumen de la sala (m³).
- A: Suma del área de absorción de los materiales presentes en la sala (m²).

El área de absorción de una superficie se calcula multiplicando el coeficiente de absorción de un material expresado por la sigla (α) por los metros cuadrados del propio material.

Eyring

Se utiliza esta expresión para calcular el tiempo de reverberación en salas muy pequeñas o con una absorción muy elevada.

$$TR_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

Donde:

- V: Volumen de la sala (m³).
- S: Área de la superficie de la sala (m²).
- $\bar{\alpha}$: Coeficiente de absorción media.

Millington

Se emplea esta fórmula para medir el tiempo de reverberación en una sala que posee una gran variedad de materiales y coeficientes de absorción, cuya expresión es:

$$TR_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{\sum - S \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \bar{\alpha}}\right)}$$

Donde:

- V: Volumen de la sala (m³).
- S: Área de la superficie de la sala (m²).
- $\bar{\alpha}$: Coeficiente de absorción media.
- \sum : Sumatorio.

Procedimiento de las mediciones

Obtención del tiempo de reverberación T_1 , de la cámara reverberante a escala en cada banda de frecuencia de 1/3 de octava con la cámara vacía.

Obtención del tiempo de reverberación T_2 de la cámara reverberante para cada banda de frecuencia de 1/3 de octava con el material en su interior.

Diferencia de los tiempos de reverberación entre T_1 y T_2 .

Cálculo del área de absorción sonora equivalente, A_1 y A_2 , expresada en metros cuadrados, para la cámara reverberante a escala vacía y con muestra, según la siguiente expresión:

$$A_1 = A_2 - \frac{55,3 \cdot V}{C \cdot T_{12}}$$

Donde:

- V: Volumen de la sala vacía en (m³).
- C: Velocidad de propagación del sonido en el aire (m/s).
- T_1 y T_2 : Tiempo de reverberación (s) de la cámara reverberante vacía y con la muestra.

Cálculo de A_T (área de absorción sonora) a través de la siguiente expresión matemática:

$$A_T = A_2 - A_1.$$

Donde:

- A_T : Área de absorción sonora en (m²).

Cálculo del coeficiente de absorción sonora (α_s). mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}.$$

Donde:

- S: Área (m²) de la muestra del ensayo.

La reverberación es un fenómeno sonoro que se produce debido a la reflexión. La reflexión se basa en una permanencia ligera del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo.

Cuando se percibe un sonido este procede desde el emisor a través de dos vías: el sonido directo y el sonido que se ha reflejado en algún obstáculo, como pueden ser las paredes del recinto. Cuando el sonido reflejado es inteligible por el oído humano como un segundo sonido se denomina eco, pero cuando se percibe como una adición que produce una modificación del sonido original debido a la forma de la reflexión o del fenómeno de persistencia acústica se denomina reverberación.

La reverberación, por modificar los sonidos originales, es un parámetro que influye de un modo notable la acústica de un recinto.

Para poder valorar el modo de intervención de la reverberación en un recinto, la acústica utiliza el tiempo de reverberación. El efecto de la reverberación es más notable en salas grandes y con poco absorbentes y menos notable en salas pequeñas y muy absorbentes.

Determinación del coeficiente de absorción

Se debe de realizar en primer lugar el cálculo de los tiempos de reverberación T_{R1} y T_{R2} con la cámara vacía y con la muestra.

El tiempo de reverberación de la cámara en cada banda de frecuencia queda determinado a través de la media aritmética del total de las mediciones del tiempo de reverberación realizadas en cada una de las bandas.

A partir del cálculo de los tiempos de reverberación, se procede al cálculo de las áreas de absorción equivalentes A_1 y A_2 y A_T .

El área de absorción sonora equivalente, A_1 (m^2) corresponde a la cámara reverberante vacía, y se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$A_1 = \frac{55,2 \cdot V}{c \cdot T_{R1}} - 4V m_1.$$

Donde:

- V : Volumen (m^3) de la cámara reverberante vacía.
- c : Velocidad de propagación del sonido en el aire (m/s).

Para temperaturas entre un rango de 15- 30°C, c se puede calcular aplicando la siguiente expresión:

$$c = (331 + 0,6 \cdot t / ^\circ C).$$

Donde:

- t: Es la temperatura del aire en (°C).
- T_{R1} : Es el tiempo de reverberación(s) de la cámara vacía.
- m_1 : Es el coeficiente de atenuación sonora (m) calculado de acuerdo con la Norma Internacional ISO 9613-1, empleando las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante la medición. El valor de m se puede calcular aplicando la siguiente expresión:

$$m = \frac{\alpha}{10 \cdot \text{Log } e}$$

Donde:

- α : Coeficiente de atenuación utilizado en la Norma ISO 9613-1. Pudiéndose calcular a través de la siguiente fórmula:

$$C = -6,8346 \cdot \left(\frac{T_{01}}{T}\right)^{1,261} + 4,6151.$$

Donde:

- T_{01} : Temperatura isotérmica del punto triple, en grados kelvin 273,16 (°K).
- T: Temperatura, en grados medida en el ensayo.

$$\frac{P_{\text{sat}}}{P_r} = 10^C.$$

Donde:

- P_{sat} : Presión de saturación del vapor de agua (kPa).
- P_r : Presión atmosférica de referencia (kPa), 101,325 (kPa).
- C: El término que se ha calculado tras la aplicación de la fórmula

$$C = -6,8346 \cdot \left(\frac{T_{01}}{T}\right)^{1,261} + 4,6151.$$

$$h = h_r \left(\frac{P_{\text{sat}}}{P_r}\right) \cdot \left(\frac{P_r}{P_a}\right).$$

Donde:

- h_r : Humedad relativa (%) medida durante el ensayo.
- P_a : Presión atmosférica (kPa) medida durante el ensayo.

$$f_{rN} = \frac{P_a}{P_r} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left[9 + 280 \cdot h \cdot e^{\left(-4,170 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right)} \right]$$

Donde:

- T_0 : Temperatura de referencia en grados Kelvin, 293,15 (°K).
- h : Concentración molar del vapor de agua en la atmósfera que se calcula según:

$$f_{r0} = \frac{P_a}{P_r} \cdot \left[24 + 4,04 \cdot 10^4 \cdot h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right]$$

$$A = 0,01275 \cdot \left[e^{-\frac{2239,1}{T}} \right] + \left[f_{r0} + \frac{f^2}{f_{r0}} \right]^{-1} + 0,1068 \cdot \left[e^{-\frac{2239,1}{T}} \right] \cdot \left[f_{rN} + \frac{f^2}{f_{rN}} \right]^{-1}$$

Donde:

- f : Es la frecuencia central de la banda de tercio de octava en (Hz).
- f_{r0} : La relajación molecular del oxígeno, calculada por la siguiente expresión:

$$f_{r0} = \frac{P_a}{P_r} \cdot \left[24 + 4,04 \cdot 10^4 \cdot h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right]$$

$$f_{rN} = \frac{P_a}{P_r} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left[9 + 280 \cdot h \cdot e^{\left(-4,170 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right)} \right]$$

Donde:

- f_{rN} : La relajación molecular del nitrógeno, calculada por la siguiente expresión:

$$A = 0,01275 \cdot \left[e^{-\frac{2239,1}{T}} \right] + \left[f_{r0} + \frac{f^2}{f_{r0}} \right]^{-1} + 0,1068 \cdot \left[e^{-\frac{2239,1}{T}} \right] \cdot \left[f_{rN} + \frac{f^2}{f_{rN}} \right]^{-1}$$

- A : Es el término calculado mediante:

El área de absorción sonora equivalente, A_2 en (m^2) de la cámara reverberante conteniendo a la muestra, se calcula empleando la siguiente expresión:

$$A_2 = \frac{55,2 \cdot V}{c \cdot T_{R2}} - 4Vm_2$$

Donde:

- V: Volumen (m³) de la cámara reverberante vacía.
- c: Velocidad de propagación del sonido en el aire (m/s).
- m₂: tiene el mismo significado que m₁.
- T_{R2}: El tiempo de reverberación (s) de la cámara reverberante conteniendo la muestra del ensayo.

El área de absorción sonora equivalente A_T (m²) de la muestra se debe de calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,2 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{c_2 \cdot T_2} - \frac{1}{c_1 \cdot T_1} \right) - 4 \cdot V (m_2 - m_1).$$

Donde:

- c₁: Velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura t₁.
- c₂: Velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura t₂.

Cálculo del coeficiente de absorción sonora

El coeficiente de absorción sonora α_S de un material absorbente plano se debe de calcular aplicando la siguiente expresión:

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S}.$$

Donde:

- A_T: Es el área de absorción sonora equivalente (m²).
- S: Es el área (m²) de la muestra a ensayar.

7.8 Cámara de transmisión a ruido aéreo

Con la utilización de la cámara de transmisión al ruido aéreo [156], se pueden realizar con ciertas limitaciones el estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo de diversos materiales.

El valor experimental que se obtiene es fundamental para la realización de un diseño acústico eficaz, aplicado en el ámbito de la edificación.

La cámara de transmisión acústicamente se encuentra formada por dos recintos acoplados entre sí. En los que se puede realizar una evaluación del aislamiento acústico al ruido aéreo de determinados materiales o soluciones constructivas (acoplamiento de recintos).

Con este sistema se garantiza que las transmisiones laterales sean prácticamente despreciables, con lo que se puede evaluar de forma idónea la transmisión del sonido a través de la muestra de ensayo.

A través de los ensayos de aislamiento se puede obtener el valor del índice de reducción sonora, R (dB) a partir de la frecuencia de los 400 Hz. La realización de los ensayos se lleva a cabo a partir de la norma UNE-74.002:78 [157].

La muestra objeto de la evaluación se debe de ubicar entre los dos recintos, convirtiéndose en la principal vía de transmisión del ruido generado en el recinto emisor, debiendo de resultar el resto de vías de transmisión del sonido despreciables prácticamente.

Las muestras evaluables tendrán una superficie de $0,5 \text{ m}^2$ [158], y los valores se obtendrán a partir de los 500 Hz, ya que, para frecuencias inferiores, no se puede asegurar que los valores obtenidos sean comparables con ensayos normalizados debido a la densidad modal en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Normativa

Las cámaras acústicas de tamaño reducido siguen las especificaciones de las normas en las que se basan el comportamiento de las cámaras de tamaño normalizado, teniendo en cuenta que el tamaño de las cámaras reducidas, presentan ciertas limitaciones frente a las de tamaño normalizado sobre todo en lo que se refiere a las bajas frecuencias.

Obtención de la fórmula empleada para el cálculo del tiempo de reverberación

La emisión de un sonido producido por una fuente sonora en el interior de un recinto, hace que el nivel de la presión sonora aumente con el tiempo, debido a las reflexiones que se producen en el recinto.

La atenuación que se produce debida a la absorción de la energía acústica dentro del recinto dependerá del ángulo de incidencia del sonido, de las características del recinto, del aire y de los objetos que se encuentren en recinto. Cuando la fuente de sonido cesa, la energía sonora en el interior del recinto irá disminuyendo a una velocidad que va a depender de la capacidad de absorción de los materiales que forman el recinto, del aire y de los objetos ubicados en el recinto.

Conociendo el tiempo de reverberación de un recinto de alta reverberación, que no contenga ningún objeto absorbente para así conseguir la mínima velocidad de atenuación posible, y conociendo el tiempo de reverberación del mismo recinto, pero ahora con el material que se quiere analizar para la obtención de su absorción ubicado en el interior del recinto, se podrá determinar la absorción del material en función de la diferencia de los tiempos de reverberación medidos.

Suponiendo una fuente sonora que emite en el interior de un recinto en el cual se ha establecido una densidad de energía acústica media E' , se podrá calcular el flujo de energía en las superficies límites del recinto y la absorción del recinto.

Sea ΔS un elemento de superficie ubicado a una distancia r de un elemento de volumen dV y que r forma un ángulo θ con dicha superficie.

Si E' es uniforme, en el volumen dV hay una energía $E'dV$, la cantidad de energía que llegará a ΔS directamente desde dV valdrá:

$$\frac{E'dV}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \Delta S \cdot \cos \theta .$$

Si se considera dV como un elemento de un anillo de espesor Δr de una esfera de radio r con centro en la superficie ΔS , la energía acústica ΔE que llega desde éste anillo, considerando la hipótesis de que la energía llega igualmente desde todas las direcciones, se verifica que:

$$\Delta E = \frac{E' \cdot \Delta S}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \int dV \cdot \cos \theta .$$

Si:

$$dV = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin \theta r \cdot \Delta r \cdot \Delta d .$$

La expresión queda de la forma:

$$\Delta E = \frac{E' \cdot \Delta S \cdot \Delta r}{2} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta .$$

$$\Delta E = \frac{E' \cdot \Delta S \cdot \Delta r}{4} .$$

Esta energía llega en un intervalo de tiempo Δt y este vale:

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{c}.$$

Donde:

- C: Es la velocidad del sonido.

Por lo que la velocidad de llegada de la energía valdrá:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E' \cdot c \cdot \Delta S}{4}.$$

La velocidad de llegada de la energía por unidad de superficie del elemento absorbente valdrá:

$$\frac{dE}{d\Delta t} = \frac{E' \cdot c}{4}.$$

Por lo que, cuando el campo sonoro del recinto es estacionario y sea A la absorción sonora total del mismo, la velocidad de absorción de energía sonora en las superficies del recinto valdrá:

$$\frac{A \cdot E' \cdot c}{4}.$$

Junto con la velocidad de aumento de la energía en el volumen de aire interior:

$$\frac{V dE'}{d}.$$

Deberá de igualar a la velocidad de producción de energía de la fuente, es decir, a la potencia acústica W de la fuente.

$$W = \frac{V dE'}{d} + \frac{A c E'}{4}.$$

Si:

$$E' = \frac{p^2}{c^2 \cdot \rho_0}.$$

Donde:

- P: Amplitud de la presión acústica
- ρ_0 : Densidad del aire.
- c^2 : Velocidad de propagación del sonido.

Se verificará que.

$$W = \frac{P^2 \cdot A}{4 \cdot \rho_0 \cdot c}$$

$$E' = \frac{4 \cdot W}{A \cdot c}$$

En las expresiones anteriores A tendrá las dimensiones de superficie en metros cuadrados cuando W se exprese en vatios de potencia acústica.

La constante de tiempo de crecimiento de la energía sonora en el recinto valdrá:

$$T_E = \frac{4 \cdot V}{A \cdot c}$$

Sabiendo que el tiempo de reverberación según la definición de Sabine, es el tiempo necesario para que el nivel de presión sonora decaiga 60 dB.

$$T_E = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{E'_1}{E'_2}\right)}$$

$$T_E = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{E'_1}{E'_2}\right)} = \frac{T}{\ln\left(10^{\frac{60}{10}}\right)} = \frac{T}{\ln(10^6)} = \frac{T}{6 \cdot \ln(10)}$$

$$T_E = \frac{T}{13,8}$$

Despejando T:

$$T = T_E \cdot 13,8$$

Sustituyendo:

$$T = T_E \cdot 13,8 = 13,8 \cdot \frac{4 \cdot V}{A \cdot c}$$

Operando:

$$T = \frac{55,2 \cdot V}{A \cdot c}.$$

Si se sustituye el valor de c: por 343(m/s) se obtiene.

$$T = \frac{0,1634 \cdot V}{A}.$$

7.9 Velocidad de propagación del sonido en el aire

La velocidad de propagación del sonido se encuentra relacionada con una serie de variables físicas propias del material, como son la densidad, temperatura, presión humedad, etc.

En el caso de que la propagación se realice en medios gaseosos como es el aire, las vibraciones se transmiten de un punto a otro por medio de choques entre las partículas que forman el gas. Cuando mayor sea la densidad del gas, mayor será la velocidad de propagación de la onda.

En los gases, las moléculas están muy distanciadas y apenas interfieren entre sí. Las moléculas, después de comprimirlas, sólo se separan por efecto de sus movimientos aleatorios.

La rapidez del sonido varía muy poco con la temperatura en los sólidos y en los líquidos, sin embargo, en los gases la velocidad aumenta con la temperatura debido a que se produce un incremento de probabilidad de choques entre moléculas.

A nivel molecular un material rígido (con alta elasticidad) posee la característica de que sus moléculas se encuentran fuertemente unidas entre sí. Haciendo que estas vuelvan rápidamente a su posición de equilibrio y se encuentren en disposición de iniciar un nuevo movimiento sobre su posición de equilibrio. Lo cual indica que el sonido se desplaza más rápido a través de medios con una mayor elasticidad.

En medios sólidos corresponde a las fuerzas que unen entre sí las partículas las encargadas de propagar la perturbación producida por las ondas de presión de un punto a otro.

A medida que la onda de sonido se desplaza a través de un cuerpo sólido, los átomos o las moléculas (considerados/as como pequeñas esferas unidas unas a otras por medio de resortes) oscilan rápidamente de un lado a otro y, de forma alternativa los resortes se estiran y se comprimen transfiriendo la energía de las ondas a los que se encuentran en contacto; cuando se comprimen se separarán más rápidamente debido a su repulsión mutua, lo que dará lugar a que la propagación del sonido sea más rápida en sólidos que en gases.

La densidad de un medio representa la masa por unidad de volumen. Cuando más denso sea un material, mayor será la masa de las moléculas, si se considera un mismo volumen, implicará que el sonido se transmite de forma más lenta. Esto es debido a que las ondas de sonido transportan energía, responsable de la vibración en el medio, y se necesitará más energía para hacer vibrar a las moléculas grandes que la requerida para hacer vibrar a las moléculas más pequeñas. Por lo que el sonido se transporta de una forma más lenta en un objeto que es más denso, que en otro de menor densidad cuando ambos objetos tienen la misma elasticidad.

Cuando más compacta sea la estructura del material mayor facilidad para la transmisión acústica Figura 45.

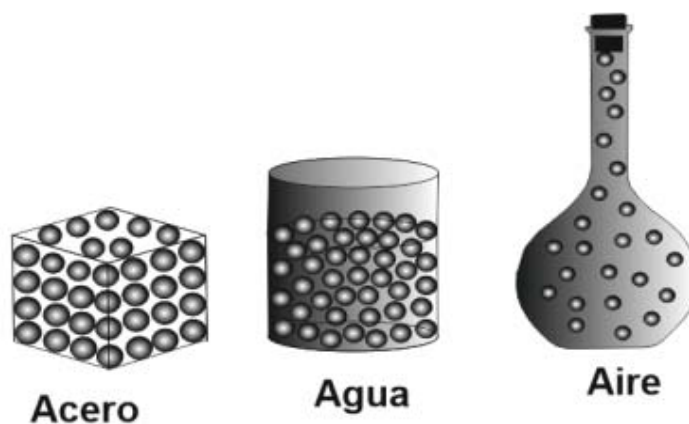


Figura 45. El sonido se puede transmitir en medios gaseosos, sólidos y líquidos.

Las ondas del sonido se propagan a través de los distintos medios con distinta velocidad y ésta va a depender de las características del medio, por lo que las ondas sonoras no se propagan con la misma velocidad en todos los medios. Sobre todo, van a depender de:

La dureza o rigidez del medio

Cuanto más duro sea el material con más velocidad se desplazarán las ondas de sonido. Debido a que en un medio duro cada molécula va a estar interconectada con mayor fuerza a las moléculas que la rodean. Ante cualquier perturbación va a desplazarse más rápidamente o transferirse. Cuanto mayor sea la densidad del material mayor propagación de la velocidad Figura 46.

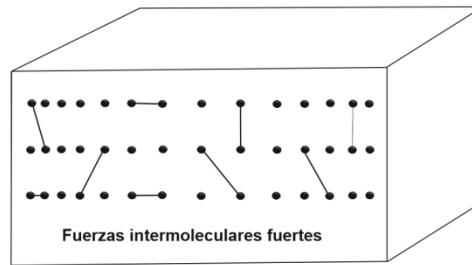


Figura 46. Materiales sólidos.

De la densidad

Cuando más denso sea el medio las ondas del sonido se van a desplazar más lentamente. Cuando un material es más denso, tendrá una mayor inercia, moviéndose más lentamente ante las perturbaciones Figura 47.

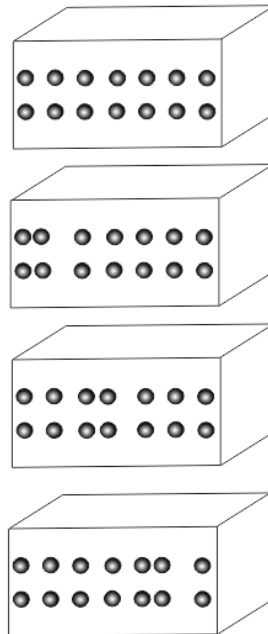


Figura 47. Movimiento de las moléculas en un medio denso.

Por lo tanto, la velocidad de propagación del sonido dependerá fundamentalmente de:

- La dureza del material que proporcionará una velocidad del sonido más rápida
- La densidad del material, cuando más denso más lenta será la velocidad de propagación del sonido.

Ambos factores se deben de considerar en la siguiente expresión:

$$V_L = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Donde:

- V_L : La rapidez de propagación del sonido.
- B : El módulo volumétrico (dificulta para comprimir un material) se mide en (Pa). Ya que determina medir la presión necesaria para realizar una compresión hasta un cierto punto de un material. Los materiales rígidos como el metal, tienen un módulo volumétrico elevado. Los materiales con una mayor facilidad para ser comprimidos (espuma) tiene un módulo volumétrico menor.
- ρ : La densidad del material. La densidad se define como la masa por unidad de volumen. Será un indicador de la cantidad de masa que tiene un material.

El hierro es un material rígido y de difícil compresión comparado con el aire. Por lo que tiene un módulo volumétrico mayor al del aire. En estas condiciones las ondas del sonido se desplazarán con mayor facilidad a través del hierro que del aire. Por el contrario, el hierro posee una densidad mucho más elevada que el aire, produciendo que las ondas del sonido tiendan a desplazarse de una forma más lenta.

El sonido en el hierro se desplazará de forma más rápida o más lenta en función de la rigidez o dureza. La rigidez tendrá un mayor efecto en la velocidad de propagación del sonido que la densidad. La velocidad de propagación del sonido en el hierro es 14 veces más rápida que en el aire. Cualquier aumento de densidad será compensado por los materiales que posean un módulo volumétrico elevado y una elevada rigidez.

La velocidad del sonido será más rápida cuando viaja a través de sólidos que en líquidos. Y a su vez será más rápida cuando viaja a través de líquidos que a través de gases. Debido a que los sólidos son más rígidos que los líquidos y estos más rígidos que los gases.

La importancia de la densidad se manifiesta en determinados aspectos. Cuando se produce un calentamiento del aire, la densidad del aire disminuirá, por lo cual el sonido viajará de forma más rápida en un medio con aire caliente en comparación con un medio de aire frío. A 20°C la velocidad del sonido es de 340 (m/s) y a 0°C es de 331 m/s.

Velocidad de propagación del sonido en sólidos

En un sólido la velocidad de propagación puede ser:

Longitudinal

También denominadas de compresión o densidad.

Características

- En las ondas longitudinales todas las partículas oscilan o vibran en la misma dirección que la dirección de la propagación.
- Su avance se realiza por compresiones y dilataciones o rarefacciones.
- Se transmite a través de sólidos y del aire.

En la Figura 48 se muestra la forma de avance de las ondas de sonido en el aire.

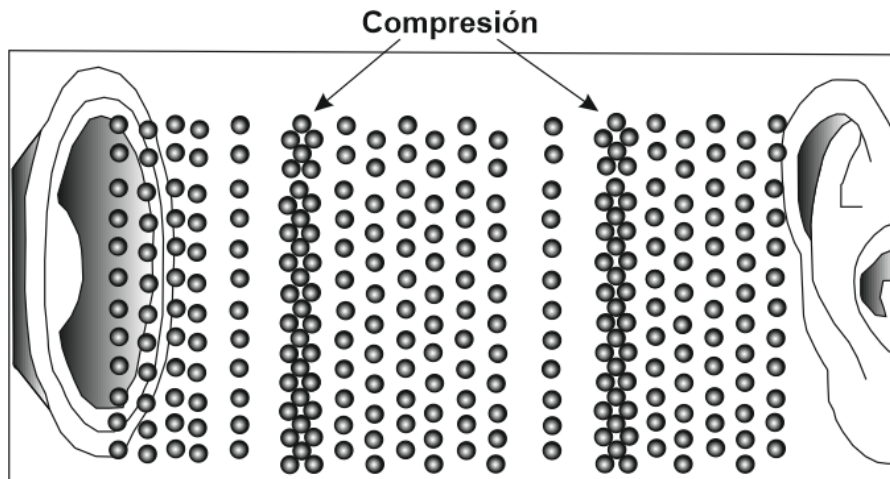


Figura 48. Avance longitudinal del sonido en el aire.

Transversal

También denominada onda de cortadura o cizalla

Características

- Todas las partículas oscilan en dirección perpendicular a la dirección del avance de la onda.
- Los gases y los líquidos son prácticamente incapaces de transmitir ondas transversales ya que sus partículas o moléculas apenas ofrecen resistencia al deslizamiento transversal, no existiendo vínculos elásticos que ligen.

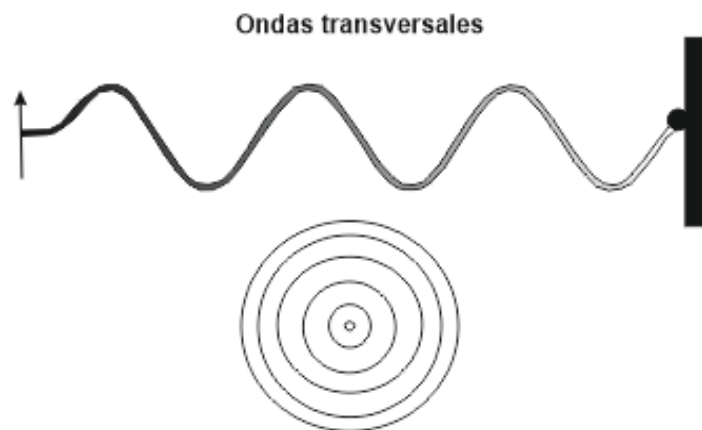


Figura 49. Ondas transversales.

Fórmulas generales

En un sólido el sonido se puede transmitir con frentes de onda longitudinal y transversal.

La expresión para el cálculo de la velocidad longitudinal viene dada por la siguiente expresión:

$$V_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 - 2\mu) \cdot (1 + \mu)}}$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad (MPa).
- μ : Coeficiente de Poisson.
- ρ : Densidad (kg/m^3)

Las ondas transversales van a depender del módulo de cortadura y de la densidad.

La expresión para poder realizar el cálculo de la velocidad transversal viene dada por:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Donde:

- G: Módulo de cortadura (MPa).
- ρ : Densidad (kg/m³).

Para barras delgadas, donde las dimensiones transversales son mucho más pequeñas que la longitud de onda, la velocidad de la onda del sonido viene determinada por:

$$V_E = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad longitudinal (Mpa).
- ρ : Densidad del material (kg/m³).

En la Tabla 13 se recopilan diferentes valores del módulo de elasticidad de distintos materiales.

Tabla 13. Módulos de elasticidad de algunos materiales sólidos.

Material	Módulo de elasticidad (GPa)
Aluminio	70
Ladrillo	20
Cobre	120
Cuarzo	70
Madera	10
Acero	200
Yute	6,98
Lino	4,10
Cáñamo	4,04
Coco	2,67
M.T.Borra	3,65
Poliestireno	3

Velocidad de propagación en los fluidos

En los fluidos se pueden propagar únicamente las ondas sonoras longitudinales.

Su velocidad de propagación dependerá del módulo de compresión B y de la densidad ρ .

Se puede utilizar el módulo de compresión adiabática:

$$B_S = -V \left(\frac{d_p}{d_v} \right).$$

Donde:

- d_p : Cambio de volumen que acompaña a un cambio de presión.
- d_v : Cambio de presión.
- V : Volumen inicial.

Se utiliza el módulo de compresión adiabática ya que, en las ondas sonoras, los cambios de presión y los cambios de temperatura ocurren de forma rápida que el flujo de calor entre los elementos colindantes es despreciable (proceso adiabático). La velocidad del sonido se puede expresar como:

$$V_L = \sqrt{\frac{B_S}{\rho}}.$$

O como:

$$V_L = \sqrt{\frac{B}{\rho}}.$$

Donde:

- B : Módulo de compresibilidad.
- ρ : Densidad del material.

En la Tabla 14 se muestra una recopilación de distintos valores del módulo de compresión de diversos materiales.

Tabla 14. Valores de los módulos de compresión de distintos materiales.

Materiales	Módulo de compresión (B) 10^9 (N/m²)
Fluidos	
Etanol	0,90
Agua	2,20
Agua mar	2,30
Mercurio	25
Sólidos	
Aluminio	70
Hierro	80
Cobre	120
Granito	47
Mármol	70
Acero	158

Velocidad de propagación en los gases

Si se considera el gas como ideal, se puede calcular B_s teniendo en cuenta que al ser un gas ideal experimentará un proceso adiabático, con lo cual los cambios de presión y de temperatura se producirán de manera que:

$$PV^\gamma = \text{constante} .$$

Donde:

- $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
- γ : Es el cociente entre los calores específicos a presión y a volumen constante a temperatura ordinaria.

Donde γ , toma para los gases monoatómicos el valor de:

$$\gamma = \frac{5}{3} .$$

Y para los gases diatómicos:

$$\gamma = \frac{7}{5} .$$

Se cumple que:

$$B_s = \gamma \cdot P.$$

Para un gas ideal:

$$\rho = \frac{m}{V} = n \cdot \frac{M}{V}$$

Donde:

- V: Volumen ocupado por η .
- M: La masa de un mol o masa molecular.

Por lo que:

$$\frac{B_s}{\rho} = \frac{\gamma \cdot PV}{n \cdot M}$$

Y como para un gas ideal se cumple que:

$$P \cdot V = n \cdot RT.$$

Donde:

- RT: Constante de los gases que toma el valor de: 8,31 (J. mol⁻¹ K⁻¹).
- M: La masa de un mol o masa molecular.

Por lo que:

$$\frac{B_s}{\rho} = \frac{\gamma \cdot PV}{n \cdot M} = \frac{\gamma \cdot RT}{M}$$

De modo que la velocidad del sonido en un gas vale:

$$V_g = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

Donde:

- γ : La razón entre los calores específicos a presión constante.
- P. Es la presión no perturbada.
- ρ : Densidad del material.

$$V_g = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot RT}{M}}$$

La velocidad de un gas aumenta con la temperatura. El aire que tiene un porcentaje aproximado del 80% de N₂ y un 20% de O₂, la masa molecular es aproximadamente 29 (g/mol) = 0,029 (kg/ mol) y como $\gamma = 7/5$.Para una temperatura de 0°C o 273 K.

En la Tabla 15 se recopilan los valores de la velocidad del sonido en distintos gases.

Tabla 15. Valores de la velocidad del sonido de distintos gases.

Material	Velocidad del sonido (m/s)
Gases (20°C)	
Aire	343
Helio	999
Hidrógeno	1 330

7.10 Impedancia acústica

La impedancia acústica se define como la resistencia que presenta un material al paso o movimiento de una perturbación elástica

Los materiales reflectores (que reflejan las ondas acústicas) contienen el parámetro de impedancia acústica. Y esta queda determinada por el producto de la velocidad de transmisión del sonido por la densidad del material. Se representa por la sigla Z, y su valor es:

$$Z = V_L \cdot \rho .$$

Donde:

- V_L: Velocidad de propagación lineal del sonido en un material.
- ρ : Densidad del material.

En la Tabla 16 se muestran las velocidades longitudinales, transversales y de barras delgadas de distintos materiales.

▪ **Tabla 16.** Velocidades de distintos materiales.

Material	V_L (m/s)	V_T (m/s)	V_E (m/s)
Yute con bioresina	3 168	1 345	2 555
Lino con bioresina	2 632	1 093	1 864
Cáñamo con bioresina	2 112	911	1 544
Coco con bioresina	2 149	998	1 658
M.T.Borra con bioresina	2 609	1 090	1 847
Aluminio	6 370	3 110	5 100
Plomo	2 160	700	1 190
Cobre	4 760	2 330	3 810
Latón	4 370	2 100	3 450
Acero inoxidable	5 980	3 300	5 280
Hierro dulce	5 950	3 220	5 190
Hielo (-4 °C)	3 980	1 990	3 280
Poliestireno	2 350	1 120	1 840

Características de la impedancia acústica:

- Cuando un material posee una impedancia baja, ofrece una baja resistencia a las deformaciones elásticas, y una elevada vibración, aunque la presión sea pequeña.
- Cuando un material posee una impedancia elevada, presenta elevada resistencia a las deformaciones elásticas y baja vibración, aunque la presión sea elevada.

En la Tabla 17 se recopilan los valores de las densidades, velocidades longitudinales y transversales e impedancias acústicas de diversos materiales.

Tabla 17. Recopilación de los valores de la densidad, velocidades longitudinales y transversales e impedancias acústicas de diversos materiales.

Material	Densidad (kg/m³ · 10³)	VL (m/s · 10³)		Impedancia acústica (kg/m² · s · 10⁶)
		V_L	V_T	
Acero inoxidable	8,03	5,66	3,12	45,50
Aluminio	2,71	6,35	3,10	17
Cobre	8,90	4,70	2,26	4,20
Fundición gris	7,20	3,50 – 5,60	2,20, - 3,20	25 - 40
Polimetil metacrilato	1,90	2,67	1,45	3,20
Resina epoxi	1,15 – 1,30	2,50 – 2,80	1,10	2,80 – 3,70
Vidrio	3,60	4,26	2,56	15
Aceites lubricantes	0,89 -0,95	1,74	-	1,50 – 1,70
Agua destilada	1,00	1,49	-	1,49
Glicerina	1,26	1,92	-	2,40
Aire	0,0012	0,34	-	0,0004

8. Análisis Modal

8.1 Medios Continuos

Los sistemas mecánicos como cables, varillas, placas, etc., que tienen sus masas y fuerzas elásticas distribuidas, en lugar de tener masas concentradas separadas por resortes, son susceptibles a tener las llamadas vibraciones en medios continuos [159-161].

Estos sistemas están compuestos por un número tan grande de partículas que vibran de forma acoplada, que sería irracional intentar determinar el comportamiento de una sola de las partículas del sistema.

Las vibraciones longitudinales en una barra se producen cuando una fuerza externa actúa sobre la barra de forma que cambia su longitud y volumen, sin alterar su forma.

Si se considera que no se produce rozamiento, la variación de longitud en cada diferencial de volumen de la barra se propagará según la ecuación de ondas.

La mayoría de los sistemas tienen muchos modos de vibración [162,163].

El análisis modal es una herramienta eficiente para describir, comprender y modelar el comportamiento de las estructuras. Su función principal es determinar la forma de esos modos.

La vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado.

Es una técnica que se utiliza para determinar las características vibratorias de una estructura que tiene un comportamiento elástico y lineal, proporcionando las frecuencias y formas naturales con las que entra en vibración una estructura.

Es el análisis dinámico más importante, puesto que las características vibratorias de una estructura van a determinar cómo responde esta ante las cargas dinámicas (fundamental para evitar el efecto de la resonancia).

Teóricamente se puede hallar la frecuencia natural para una viga en un medio continuo por la ecuación siguiente:

$$W_n = B \sqrt{\frac{E I g}{W I^4}} .$$

Donde:

- E: es el módulo de Young.
- I: es la inercia de la viga.
- g: la gravedad.
- W: es el peso de la viga
- l: la longitud de la viga.
- B una constante que depende de las condiciones de borde, y que tiene distintos valores para cada modo de vibración, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 18. Valores de la constante de la que dependen las condiciones de borde para cada modo.

Configuración de la carga	B1 Modo 1	B2 Modo 2	B3 Modo 3
Simplemente Apoyada	9,87	39,50	88,90
Voladizo	3,52	22	61,70
Libre	22,40	61,70	121
Empotrada libre	22,40	61,70	121
Empotrada Articulada	15,40	50	104
Articulada Libre	0,00	15,40	50

Con el análisis modal se puede definir el comportamiento dinámico de cualquier estructura mecánica lineal en términos de sus propiedades dinámicas o de sus parámetros modales:

- Frecuencia de resonancia.
- La amortiguación.
- Los modos de vibración para todos los modos en un rango de frecuencias de interés.

La frecuencia natural o de resonancia de un sistema es aquella frecuencia que tiene una tendencia o facilidad para vibrar.

Todo sistema posee una o varias frecuencias naturales de forma que al ser excitadas se producirá un aumento importante de vibración. La fórmula de la frecuencia natural es:

$$F_n = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{k}{m}}} .$$

Siendo

- m: la masa.
- K: La rigidez.

De esta fórmula se deduce que, si la rigidez aumenta, la frecuencia natural también aumentará, y si la masa aumenta, la frecuencia natural disminuye.

La resonancia es un estado de funcionamiento en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural de la estructura de la máquina.

Cuando ocurre el fenómeno de la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños muy rápidamente.

Todas las estructuras tienen frecuencias naturales y modos de vibración, que van a depender básicamente de la masa y de la rigidez de la estructura.

En el diseño es necesario identificar estas frecuencias y conocer cómo afecta a la respuesta de la estructura cuando una fuerza actúa sobre la misma.

El amortiguamiento modal va a predecir la vida a fatiga de una estructura. En un ensayo dinámico se aplica una carga dinámica a la estructura.

Dicha carga tiene componentes en un cierto rango de frecuencias y la estructura responde a todas las frecuencias, pero entrará en resonancia cuando las componentes modales coincidan con las frecuencias naturales de la estructura.

La respuesta de la estructura será una superposición lineal de todos los modos de vibración excitados. Un modo de vibración es una forma característica en la que vibra un sistema mecánico.

Los sistemas tienen muchos modos de vibración. El análisis modal tiene como objetivo determinar la forma de esos modos.

Como se ha indicado en párrafos anteriores, la vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado.

Por ejemplo, si se toca una campana suavemente, lo primero que se va oye es el modo fundamental de vibración, pero si se la toca más fuerte, otros modos son excitados y se oyen los parciales superiores del tono. El análisis modal estudia la estructura cuando está sometida a una excitación conocida, con el objetivo de obtener un modelo matemático del comportamiento dinámico de la estructura.

El procedimiento consiste en la adquisición de datos, su análisis y luego determinar todos los parámetros modales.

El análisis modal se puede desarrollar de forma teórica, basado en técnicas analíticas o simulaciones a través de ley de Newton puede crear un modelo matemático con n grados de libertad (posibilidad de movimiento que puede tener un sistema).

El modelo teórico es función de su geometría, de las condiciones de contorno y las características de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema.

El modelo matemático basado en estos parámetros es un modelo lineal que da una descripción completa del comportamiento lineal de la estructura. Se puede representar en forma matricial:

$$[M]\{\ddot{Y}\} + [C]\{\dot{Y}\} + [K]\{Y\} = \{f(t)\}.$$

Dónde.

- M: Matriz de masas o de inercia.
- C: Matriz de amortiguamiento.
- K: Matriz de rigidez.
- \ddot{Y} : Aceleración
- \dot{Y} : Velocidad.
- Y: Desplazamiento.

Las matrices [M], [C] y [K], llamadas respectivamente matriz de inercia, matriz de amortiguamiento y matriz de rigidez, son simétricas.

8.2 Ecuaciones del movimiento: Formulación matricial

Sea el sistema discreto con 2 grados de libertad Figura 50 1(a) [164].

En este caso, las ecuaciones diferenciales del movimiento pueden obtenerse aplicando a cada una de las masas el Principio de D'Alembert y estableciendo el equilibrio de fuerzas en la dirección del movimiento.

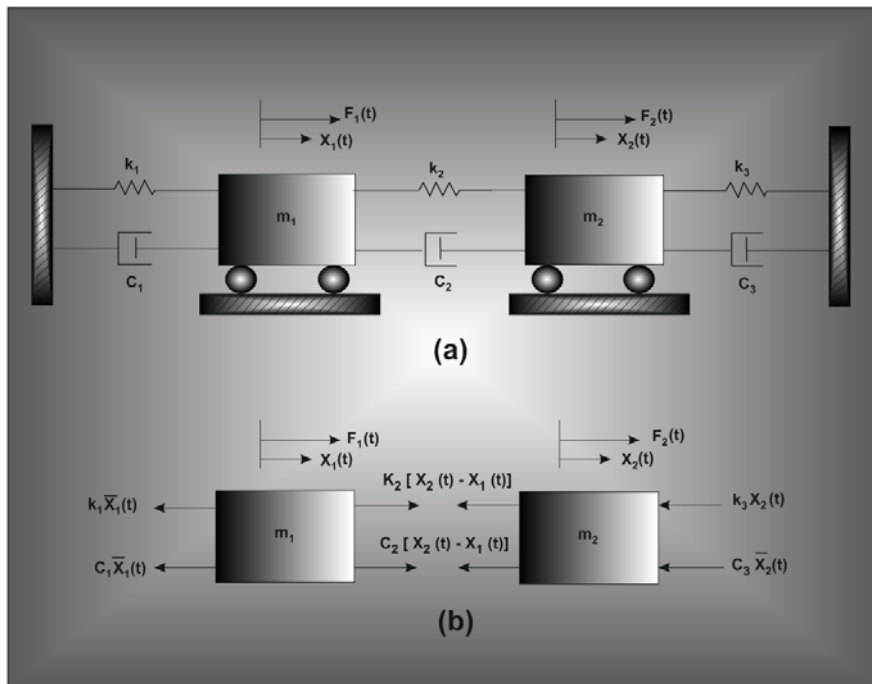


Figura 50. Sistema con dos grados de libertad.

Teniendo en cuenta que la fuerza en el resorte (k) y amortiguador (C) centrales dependen de la posición y velocidad relativas entre ambas masas.

Aplicando la segunda ley de Newton ($\sum F = m a$) y estableciendo el equilibrio de fuerzas en dirección x Fig.45 1b, resulta:

$$k_1 x_1(t) - c_1 \dot{x}_1(t) + k_2 (x_2(t) - x_1(t) + c_2 \dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) + F_1(t) = m_1 \ddot{x}_1(t)$$

$$-k_2 (x_2(t) - x_1(t) - c_2 (\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) + F_2(t) = m_2 \ddot{x}_2(t)$$

La ecuación diferencial para la masa K tiene que tener dos condiciones iniciales; en general, $x_k(0)$, $\dot{x}_k(0)$.

Reordenando:

$$m_1 \ddot{X}_1(t) + (C_1 + C_2) \dot{X}_1(t) + (K_1 + K_2) X_1(t) - C_2 \dot{x}_2(t) - K_2 X_2(t) = F_1(t)$$

$$m_2 \ddot{X}_2(t) - C_2 \dot{X}_1(t) - K_2 X_1(t) + C_2 \dot{x}_2(t) + K_2 X_2(t) = F_2(t).$$

Ecuaciones diferenciales, que no son independientes y constituyen un sistema ya que ambas incógnitas $x_1(t)$ y $x_2(t)$ aparecen en las dos, y pueden expresarse matricialmente:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 + C_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 + K_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix}$$

Por tanto:

$$[M][\ddot{X}(t)] + [C][\dot{X}(t)] + [K][X(t)] = [F(t)]$$

$$[X(t)] = \begin{Bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{Bmatrix} \quad [F(t)] = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix}.$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix}.$$

El caso más sencillo es el de la vibración libre $[F(t)] = 0$ y sin amortiguamiento $[C(t)] = 0$.

8.3 Vibraciones libres no amortiguadas. Modos de vibración

La aproximación al problema vibratorio, sin tener en cuenta el amortiguamiento, permite la simplificación de los cálculos y llegar a conclusiones que serán validadas en apartados posteriores cuando se resuelva la ecuación del movimiento. Para la determinación de las frecuencias propias es necesario determinar el movimiento del sistema en vibración libre [165,166].

La resolución del problema de vibraciones libres no amortiguadas permitirá la determinación de los parámetros modales característicos del sistema de dos grados de libertad: sus dos frecuencias naturales y sus dos modos naturales de vibración.

Suponiendo que no hay fuerzas exteriores aplicadas al sistema y que los términos disipativos de energía son nulos, el sistema de ecuaciones del movimiento se reduce a ($k_{11} = k_1 + k_2$ $k_{22} = k_2 + k_3$):

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & -k_2 \\ -k_2 & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

El modelo matemático queda simplificado si no se tienen en consideración el amortiguamiento Figura 51.

$$\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} \uparrow 0 & & \uparrow 0 \\ [M] \{\ddot{y}\} + [C] \{\dot{y}\} + [K] \{y\} = \{f(t)\} \\ \downarrow \\ [M] \{\ddot{y}\} + [K] \{y\} = \{0\} \end{array} \end{array}$$

Figura 51. Simplificación de la ecuación matricial teniendo en cuenta que el amortiguamiento es nulo.

La ecuación diferencial, tiene una solución de la forma:

$$[M] \{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = 0.$$

$$\{y(t)\} = a_i \sin(\omega_i t - \theta).$$

Dónde.

- M: Matriz de masas.
- C: Matriz de amortiguamiento.
- K: Matriz de rigidez.

Donde:

$$([K] - \omega_n^2 [M]) [28] = 0.$$

Para que este sistema de ecuaciones no tenga una solución trivial hay que hacer que:

- $[100] = 0.$
- $[K] - \omega_n [M] = 0.$

Los resultados de la ecuación son conocidos como auto- valores, y son ω_i^2 , cuyas raíces cuadradas son las frecuencias, propias, ω_i del sistema.

La otra aproximación del análisis modal, es de forma experimental, mediante las funciones de respuesta de frecuencia.

Esta función se obtiene mediante la relación que existe entre la respuesta y la excitación dinámica entre dos puntos de un sistema.

Obteniéndose de forma las gráficas del modelo de respuesta, que indican las frecuencias naturales del sistema para el primer y segundo modo de vibración.

En la Figura 52 se observan los valores fundamentales para el estudio de las propiedades de los materiales.

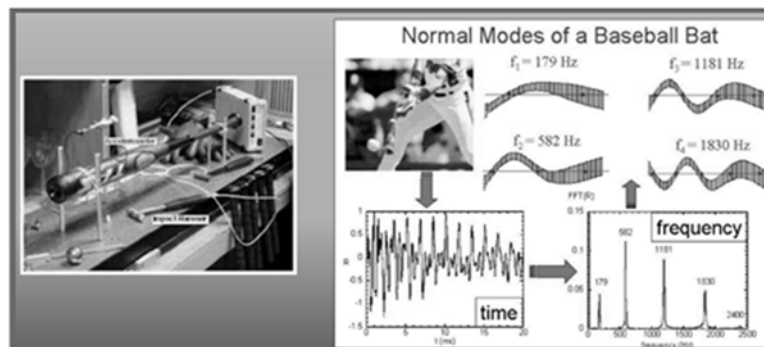


Figura 52. Modelo experimental.

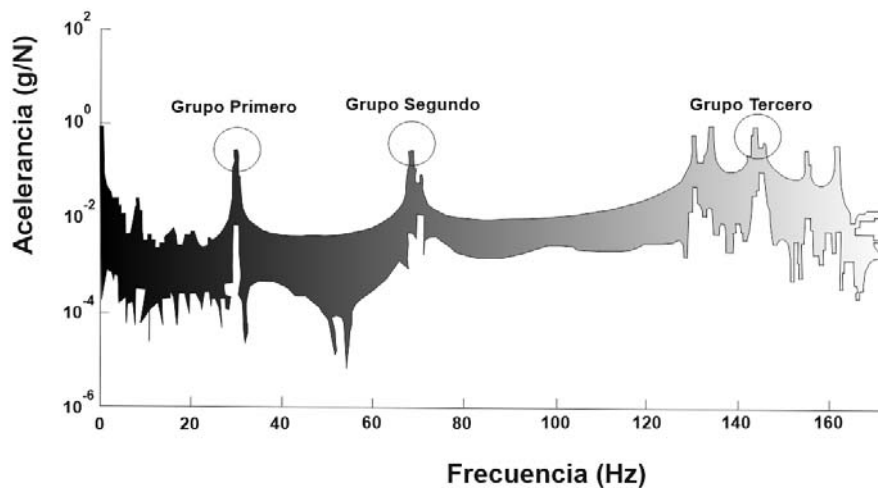


Figura 53. Ejemplo de las frecuencias de respuestas obtenidas a través de la aproximación experimental.

Para la resolución del análisis modal se utilizan programas informáticos que facilitan la obtención de resultados.

En la Figura 54, se muestran la simulación de los modos de vibración para una viga en voladizo para los tres primeros modos [167-171].

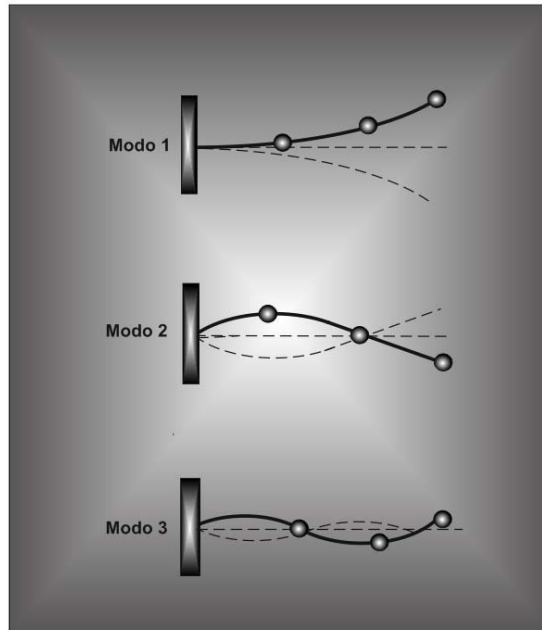


Figura 54. Modos de vibración de una viga en voladizo.

8.4 Técnicas no destructivas

En general, se denominan ensayos no destructivos o técnicas dinámicas [172-174] a cualquier tipo de pruebas practicadas a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales.

Los métodos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como:

- Ondas electromagnéticas.
- Ondas acústicas.
- Ondas elásticas, etc.

O cualquier otro tipo de pruebas, que permitan evaluar o detectar una determinada propiedad del material.

La estimación de las propiedades resistentes de la composites:

- Densidad.
- Módulo de elasticidad.

- Tensión de rotura.

Se puede realizar mediante la utilización de diferentes técnicas:

- Visuales.
- Mecánica.
- Midiendo una serie de parámetros físicos que se utilicen como predictores de las mismas, por ejemplo, la velocidad de propagación de ultrasonidos.

Tanto las técnicas visuales como las mecánicas son sistemas normalizados y muy extendidos, donde la asignación de clase resistente es prácticamente inmediata.

8.5 Métodos acústicos: análisis de vibraciones

Una propiedad dinámica importante de todo sistema elástico es la frecuencia natural de vibración [175].

Para una pieza de unas determinadas dimensiones que se encuentra en vibración, la frecuencia natural asociada a su vibración está principalmente relacionada con sus propiedades físicas (densidad) y mecánicas (módulo de elasticidad). Por lo que el módulo de elasticidad dinámico de un material puede determinarse a través de la medición de la frecuencia natural de vibración de una pieza prismática de dimensiones conocidas y de su densidad.

La relación matemática existente entre estas variables, se enuncia suponiendo que se trate de medios que sean sólidos:

- Homogéneos.
- Isótropos y perfectamente elásticos.

Sin embargo, esta expresión puede también aplicarse a sistemas heterogéneos, como la madera o el hormigón cuando las dimensiones de la pieza son elevadas con relación al tamaño de los elementos que forman o constituyentes el material.

En resumidas cuentas, la utilización del análisis de vibraciones consiste en medir la frecuencia natural de vibración de una pieza y a partir de esta, poder estimar sus propiedades resistentes.

La probeta de ensayo puede hacerse vibrar de varios modos, en función de las condiciones del apoyo y de la localización del lugar del impacto.

Si el golpe se aplica en la cabeza, Figura 55 la vibración originada va a permitir medir la frecuencia propia de vibración con facilidad en la dirección longitudinal.

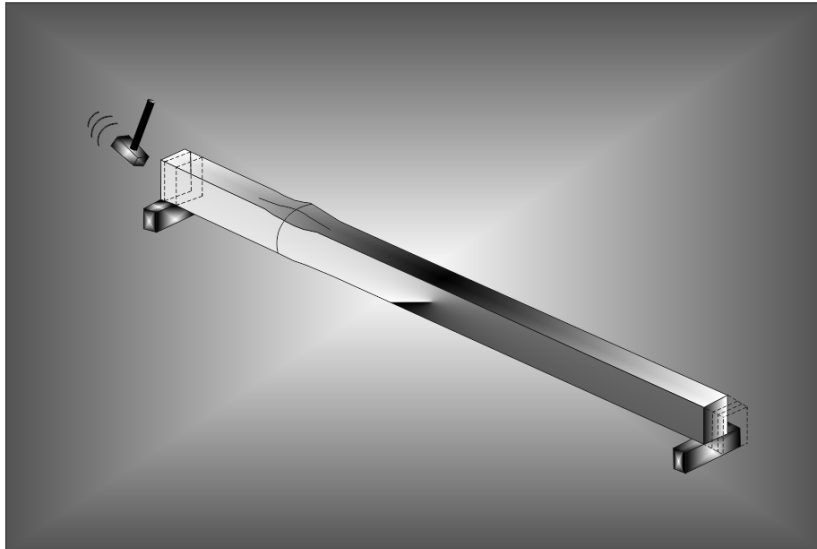


Figura 55. Detalle de la vibración longitudinal.

Resolviendo la ecuación diferencial de la propagación de las ondas planas longitudinales a través de una barra de sección constante, se obtiene la expresión que permite calcular el módulo de elasticidad dinámico del material a partir de la frecuencia natural de vibración longitudinal de una probeta:

$$E_{\text{din}} = (2\pi f)^2 \rho \cdot L^3$$

Donde:

- E_{din} : Módulo de elasticidad dinámico, en (N/m²)
- L : Longitud total de la probeta, en (m).
- f : Frecuencia natural de vibración longitudinal, en (Hz).
- ρ : Densidad del material, en (kg/m³).

Si, por el contrario, el golpe se realiza de forma transversal a la directriz de la pieza, Figura 56 el modo de vibración es el de flexión, pudiendo de así medir la frecuencia natural de flexión.

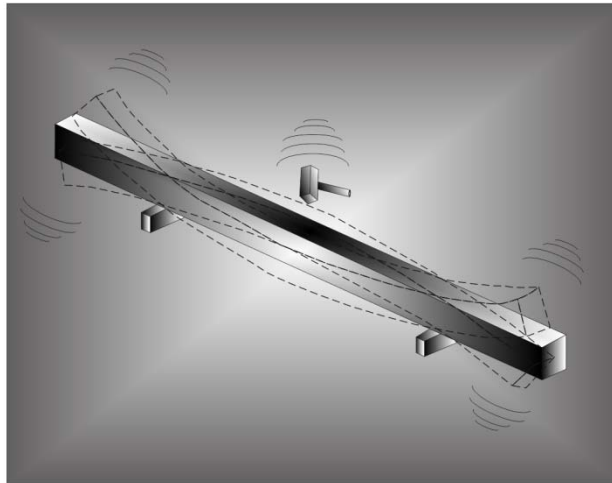


Figura 56. Detalle de la vibración a flexión.

Para piezas prismáticas que vibran en flexión, la teoría de Timoshenko [176] desarrolla la vibración de la barra a través de la ecuación diferencial siguiente:

$$EI = \left(\frac{\delta^4 r}{\delta X^4} \right) + \rho A \left(\frac{\delta^2 r}{\delta t^2} \right) - \rho I \left(1 + \frac{E}{\beta G} \right) \frac{\delta^4 r}{\delta^2 \delta t^2} + \frac{\rho^2 I \delta^2 r}{\beta G \delta t^4}.$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad longitudinal (N/m²).
- I: Momento de inercia de la sección (m⁴).
- r: Desplazamiento (m).
- x: Coordenada longitudinal (m).
- ρ: Densidad (kg/m³).
- A: Área de la sección transversal (m²).
- t: Tiempo (s).
- β: Factor de cortante (1/1,2 para barras prismáticas).
- G: Módulo de elasticidad transversal o de cortante (N/m²).

El inconveniente de esta ecuación reside en su complejidad y del requerimiento de al menos medir las frecuencias en dos modos de vibración. Además, de no existir una solución exacta, por lo que se deben de utilizar métodos iterativos para el cálculo de su resultado.

La ecuación de Euler es, sin embargo, mucho más sencilla [177]:

$$E I = \left(\frac{\delta^4 r}{\delta x^4} \right) + \rho A \left(\frac{\delta^2 r}{\delta t^2} \right) = 0$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad longitudinal (N/m²).
- I: Momento de inercia de la sección (m⁴).
- r: Desplazamiento (m).
- x: Coordenada longitudinal (m).
- ρ: Densidad (kg/m³).
- A: Área de la sección transversal (m²).
- t: Tiempo(s).

La ecuación de Euler tiene por solución la siguiente expresión:

$$E_{din} = \frac{2 f_n}{\gamma_n \pi} \frac{2m L^3}{I}$$

Donde:

- E_{din}: Módulo de elasticidad dinámico, en (N/m²)
- L: Longitud total de la probeta, en (m).
- f: Frecuencia natural de vibración en flexión, en (Hz), siendo “n” el modo (si n=1, se llama modo básico o fundamental).
- ρ: Densidad del material, en (kg/m³).
- γ_n: es una constante igual a (n+0,5)², donde “n” es el modo, γ₁ = 2,267.
- I: Momento de inercia de la sección, en (m⁴).

Esta simplificación de la ecuación de Euler no considera la deformación por cortante incluida en la vibración de flexión, por lo que presentará un resultado con menor precisión que cuando se emplea la expresión de Timoshenko.

Si la pieza tiene unas dimensiones más semejantes a una placa que a una probeta prismática, y se encuentra apoyada tal como se muestra en la Figura 57 su modo de vibración más relevante será el de torsión, pudiendo obtener el módulo de elasticidad dinámica transversal o de cortadura a partir de la siguiente expresión

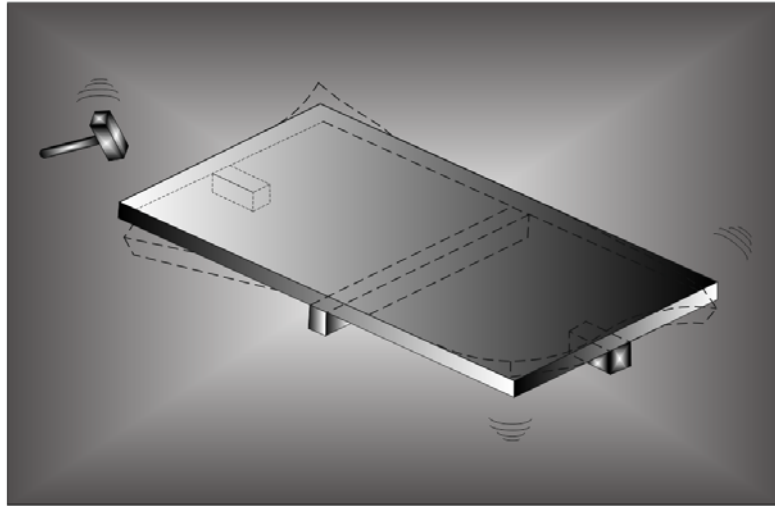


Figura 57. Detalle de vibración en torsión para probetas en forma de placa.

$$G_{\text{din}} = \left(\frac{2 L f_n}{\gamma_n} \right)^2 \frac{\rho I}{k}.$$

Donde:

- G_{din} : Módulo de elasticidad din. transversal o de cortadura, en (N/m²)
- L : Longitud total de la pieza, en (m), en la dirección perpendicular a la línea de apoyo central.
- f_n : Frecuencia natural de vibración en torsión, en (Hz), siendo “n” el modo).
- ρ : Densidad del material, en (kg/m³).
- γ_n : es una constante igual a $(n+0,5)^2$, donde “n” es el modo, y $\gamma_1 = 2,267$.
- I : Momento de inercia de la sección, en (m⁴).
- K : Valor que depende de la sección transversal de la pieza [178].

El método para obtener el módulo de elasticidad de cuerpos sólidos a partir de sus frecuencias resonantes fue descubierto a principios del siglo XX. En 1938, Powers en los Estados Unidos, fue el primero en calcular la frecuencia de resonancia de prismas de hormigón de 51 x 51 x 241 mm haciéndolos vibrar mediante un golpe de martillo [179].

Uno de los posibles métodos para determinar las frecuencias fundamentales consiste exactamente en eso, es decir, en golpear la probeta con un martillo.

El impacto hace que la pieza comience a vibrar en su frecuencia natural. La amplitud y frecuencia de la vibración de resonancia son obtenidas utilizando un analizador de espectro que determina las frecuencias relativas mediante la transformada rápida de Fourier. Las ventajas de este método frente al de vibraciones forzadas, por ejemplo, es la mayor rapidez de ejecución del ensayo y la posibilidad de estudiar piezas de muy diferentes dimensiones.

En piezas de hormigón, Obert y Duball demostraron que el valor del módulo de elasticidad dinámico depende de las dimensiones de la pieza estudiada. Las piezas de mayor tamaño, debido a sus dimensiones y peso, tienen frecuencias de resonancia menores. Las piezas grandes vibrando a frecuencias más bajas dan valores de módulo de elasticidad dinámico proporcionalmente más altos que los de las piezas más pequeñas [180].

Diferentes estudios advierten de que, aunque haya buena correlación entre los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos, generalmente los valores de rigidez del último suelen ser superiores a los reales (estáticos), por lo que no se recomienda utilizarlos sin corregir en los cálculos estructurales. Una de las propuestas consiste en someter a la estructura a una oscilación, mediante un motor con una masa excéntrica que provoca una vibración con una frecuencia creciente [181]. La vibración de la estructura se registra de manera automática, hasta que se detecta la frecuencia de resonancia en el primer modo de vibración en flexión, (f_1). De esta manera se obtiene la rigidez a flexión ($E \cdot I$), en $N \cdot m^2$, mediante la siguiente expresión:

$$E I = \frac{f_1^2 W L^3}{k g}.$$

Donde:

- k : Parámetro que depende de las condiciones de apoyo de la viga:
- Biarticulada, $k = 2,46$.
- Biempotrada, $k = 12,65$.
- g : Aceleración de la gravedad, en (m/s^2) .
- f_1 : Frecuencia de vibración en flexión del modo fundamental, en (Hz).
- W : es la carga total, en (N), repartida uniformemente.
- L : Luz entre apoyos, en (m).

Sin embargo, la diferencia de los resultados obtenidos entre ambas ecuaciones es despreciable debido a las posibles esbelteces de la pieza (longitud/grosor) superiores a 15, por debajo de este valor, el módulo de elasticidad calculado mediante el método de Euler desciende de una manera exponencial.

8.6 Técnica utilizada en los ensayos

Hay que tener en cuenta que, en la caracterización de los materiales compuestos con fibras naturales, sus propiedades van a variar según en la dirección en las que se realicen.

Un método que se puede utilizar para la caracterización de los composites con fibras naturales es el de utilizar el martillo de impacto y un acelerómetro como receptor.

El acelerómetro es un transductor (capaz de procesar información y energía) utilizado para la medida de vibraciones debido a su pequeño tamaño, su amplio rango de sensibilidad y su gran rango de frecuencias útiles.

La probeta se va a colocar de forma vertical sujeta por dos finos alambres elásticos. El martillo se utilizará para producir la vibración de flexión en la probeta. La vibración será procesada por el acelerómetro y la información pasará a un analizador de frecuencia que la transmitirá a un ordenador; donde será procesada y digitalizada a través de software, obteniéndose graficas de frecuencia y amplitud para la conseguir los valores máximos que sean distintos a los modos de vibración Figura 58.

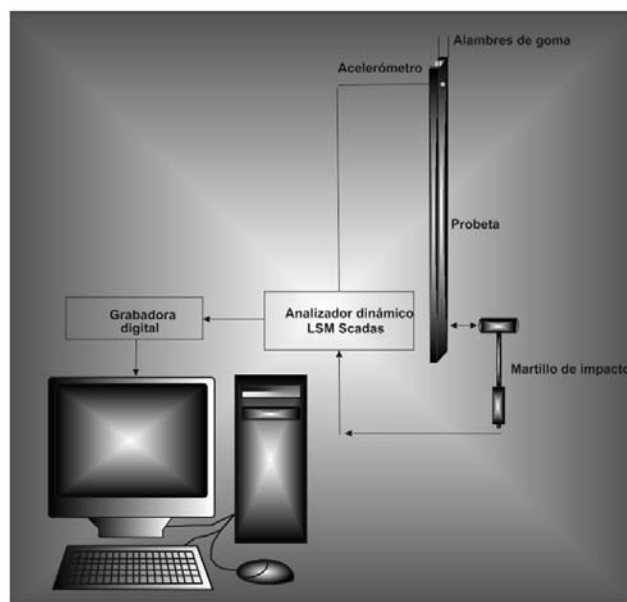


Figura 58. Esquema del equipo experimental.

La finalidad del estudio del comportamiento dinámico del composite, es averiguar la relación que puede existir entre la baja densidad de estos y las características de amortiguación con la posibilidad de fabricar paneles aislantes y la utilización en estructuras secundarias que no soporten demasiada carga.

Al ensayo con martillo de impulso y acelerómetro se le denomina ensayo de análisis modal de impulso – respuesta [182], Figura 59.

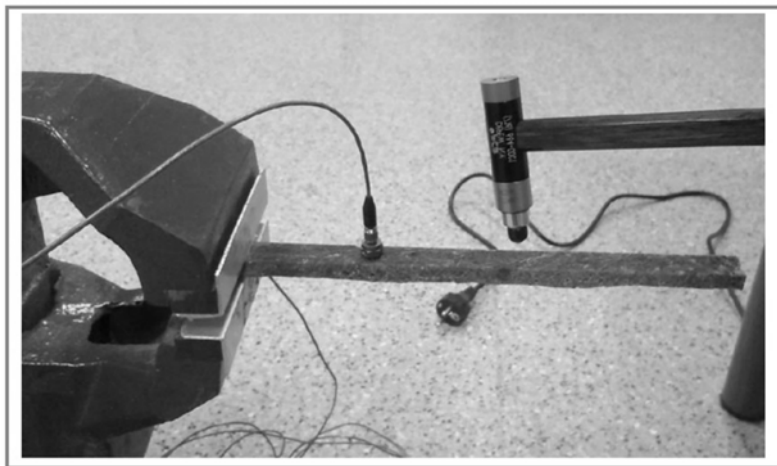


Figura 59. Imagen del ensayo del Análisis modal impulso - respuesta.

En la realización experimental de los ensayos de los composites de fibras naturales se van a utilizar tres tipos de equipos distintos para su análisis.

Se realizará el ensayo de vibración forzada que van a genera frecuencias a través de un shaker (vibradores electrodinámico) utilizado para producir vibraciones en probetas o vigas que se encuentren en voladizo Figura 60.



Figura 60. Imagen del ensayo de vibración forzada con shaker.

El ensayo con la utilización de un micrófono de campo para escuchar el ruido generado por la vibración producida en una probeta, y se obtiene la frecuencia natural del primer modo de la viga en voladizo. A este ensayo se le denomina método de vibración libre.

El método de vibración libre consiste en la recepción de ondas acústicas generadas por la vibración libre de la probeta, utilizando un micrófono de alta precisión Figura 61. La probeta del composite, se encuentra colocada en la misma posición que en los métodos anteriores, es decir en viga en voladizo, dispuesta con un extremo libre a 230 mm desde la mordaza.

Para que la probeta entre en vibración, se debe de flexionar considerablemente y en un instante posterior se deja de realizar la flexión con lo cual la probeta al encontrarse sin ninguna fuerza exterior al sistema entra en un estado de vibración libre.

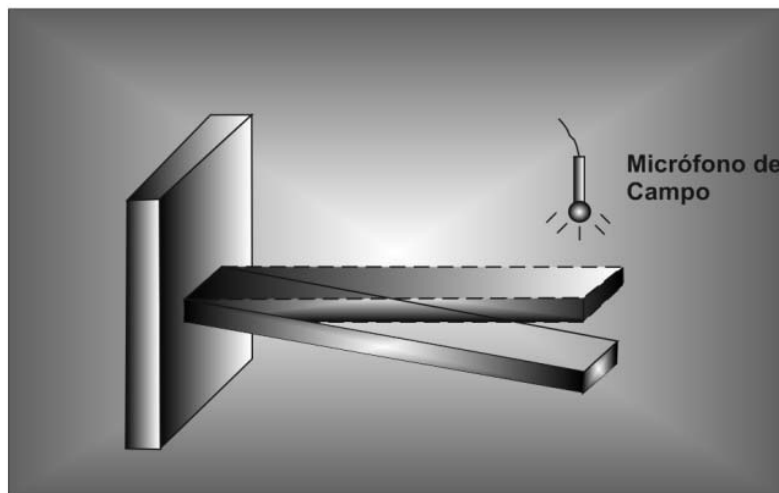


Figura 61. Vibración libre de la probeta.

9. Cálculo de laminados

9.1 Conceptos generales sobre laminados

Un material compuesto consiste en la combinación a nivel macroscópico de dos o más componentes no solubles entre ellos que se unen sinérgicamente, obteniéndose un material con una mayor capacidad estructural que la de sus constituyentes cuando actúan por separado [183].

La fase denominada refuerzo –la más rígida y resistente– es normalmente discontinua, y se presenta en forma de partículas o en forma de fibras continuas o discontinuas, largas o cortas, en una o varias direcciones, distribuidas uniforme o aleatoriamente.

El refuerzo se halla embebido en un material continuo denominado matriz, que actúa como aglutinante, protector, y se encarga de repartir y transmitir las cargas al refuerzo. Por consiguiente, las propiedades mecánicas del material compuesto dependerán esencialmente de las propiedades de los materiales constituyentes, de su geometría, de su distribución y de su fracción volumétrica.

Así, por ejemplo, la distribución topológica del refuerzo determina el grado de uniformidad u homogeneidad del material compuesto, y su geometría y orientación afecta al grado de anisotropía del sistema.

Por lo general, el uso de partículas o fibras cortas originan materiales compuestos de bajo rendimiento, ya que el refuerzo solo proporciona una marcada rigidez y un incremento de la resistencia local, siendo la matriz el constituyente que gobierna las propiedades mecánicas globales del material. Esto se debe a la incapacidad –por debajo de una longitud crítica– de transmitir eficientemente los esfuerzos de la matriz al refuerzo.

Por el contrario, cuando se requieren aplicaciones de altas prestaciones se recurre normalmente a láminas de fibras largas apiladas conformando un laminado.

Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, los materiales compuestos ofrecen ventajas determinantes en comparación con los materiales estructurales convencionales, como la posibilidad de generar estructuras de geometrías complejas.

La base de su superioridad estructural en los materiales compuestos radica en sus altos módulos de rigidez y resistencia específica¹ y en la naturaleza heterogénea y anisótropa del material. Aunque a priori estas últimas características puedan verse como una desventaja, pues requieren de un análisis más complejo que el de los materiales monolíticos, isótropos y homogéneos convencionales, proporcionan una mayor libertad para un diseño y una configuración óptima del material estructural.

En las tareas de cálculo y diseño estructural es indudable la necesidad de conocer las propiedades mecánicas de los materiales utilizados. En el caso particular de los materiales compuestos, dada su naturaleza anisótropa y heterogénea, el número de variables es notablemente superior a los materiales convencionales.

La presente sección constituye una introducción a la mecánica de materiales compuestos laminados, donde se presentan los fundamentos y los procedimientos de análisis para determinar su comportamiento elástico y estimar los límites de resistencia.

Esta sección está basada en torno a las tres escalas de análisis anteriormente mencionadas. Como introducción, previamente se describen las relaciones generales de tensión-deformación y sus simplificaciones en función del grado de anisotropía del material y las hipótesis sobre el estado tensional representativo de trabajo.

A continuación, se presentan los fundamentos del enfoque micro mecánico, donde se evalúa la interacción mecánica entre los materiales constituyentes, con el fin obtener una predicción de las propiedades elásticas e higrótérmicas del compuesto.

Seguidamente se aborda el análisis de lámina, evaluando la rigidez en función del ángulo de orientación, la afectación higrótérmica y la estimación de su resistencia.

El siguiente nivel corresponde al análisis del laminado, donde se presenta el procedimiento para obtener las ecuaciones constitutivas del laminado [184-186].

9.2 Micromecánica y Macromecánica

La estructura de los materiales compuestos reforzados con fibras es heterogénea y anisótropa.

La heterogeneidad va a implicar que las propiedades del material sean función del punto y la anisotropía que será función de la dirección a la que se refiera Figura 62.

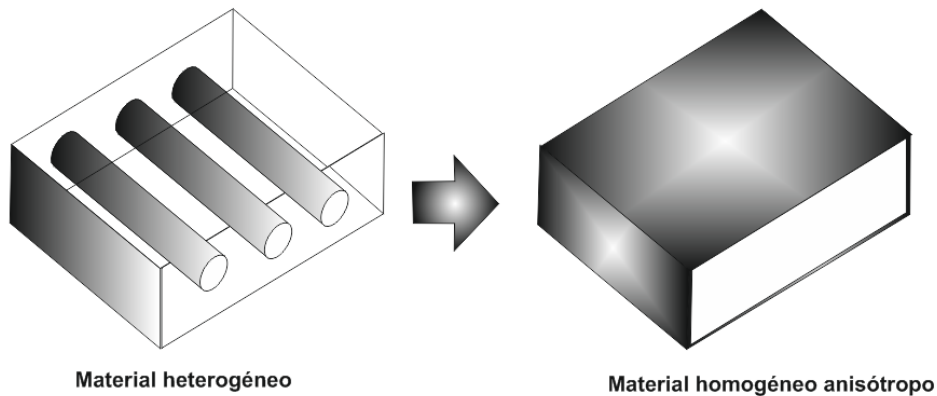


Figura 62. Estructura de los materiales compuestos reforzados con fibras.

En algunos casos de láminas unidireccionales, se pueden producir situaciones particulares de ortotropía (tres planos principales de simetría del material) o incluso de cuasi – isotropía si las láminas se colocan con diferentes orientaciones.

La complejidad del análisis heterogéneo, ha hecho necesario la realización de algunas hipótesis de comportamiento cuyos buenos resultados justifican su mantenimiento. Estas hipótesis están conectadas con una división clásica, aunque tienen algunos aspectos distorsionantes y se encuentra basada en la mayoría de los libros que tratan sobre composites en un análisis de los materiales compuestos desde dos puntos de vista distintos:

- Micromecánico.
- Macromecánico.

En el análisis Micromecánico se reconocen la existencia de dos componentes:

- Fibra.
- Matriz.

Pero no se tienen en cuenta la estructura interna de cada uno de ellos.

El objetivo de este tipo de análisis es por ejemplo la definición de las propiedades de una lámina homogénea y ortótropa que se comporta de forma equivalente, desde el punto de vista mecánico, que una lámina real de material compuesto formado por una cierta distribución de fibras embebidas en una matriz.

Para poder efectuar esta equivalencia, es necesario realizar algunas hipótesis adicionales que permitan calcular unas propiedades representativas de la lámina a partir de las propiedades de los componentes y del porcentaje de ellos existentes en el compuesto. Con este análisis se pueden obtener las constantes ingenieriles de un material compuesto.

La técnica más sencilla de homogenización es la Ley de las Mezclas. Este tipo de métodos sugieren la existencia de un elemento de volumen representativo (RVE). Si la dispersión de la fibra es estadísticamente homogénea, cabe pensar en un (RVE) estadísticamente igual para el compuesto Figura 63.

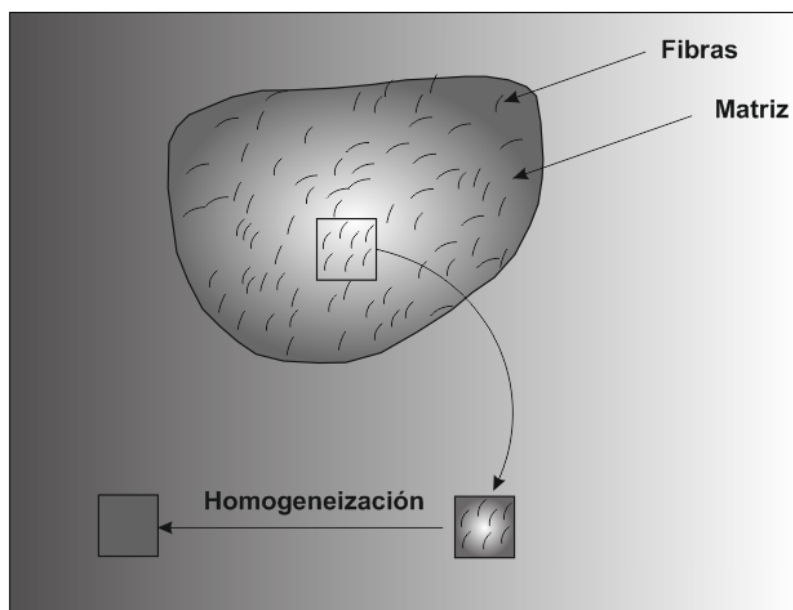


Figura 63. Elemento de Volumen Representativo, (RVE).

Para la realización del estudio desde el punto de vista Micromecánico se parte de las propiedades de los materiales constituyentes del material compuesto, es decir de las fibras:

- ρ_f : Densidad de la fibra.
- E_f : Módulo de elasticidad de la fibra.
- G_f : Módulo de cortadura de la fibra.
- μ_f : Coeficiente o módulo de poisson de la fibra.
- X_f : Resistencia a tracción de la fibra.
- Y_f : Resistencia a compresión de la fibra.
- S_f : Resistencia a cortadura de la fibra.

De las propiedades de la matriz:

- ρ_m : Densidad de la matriz.
- E_m : Módulo de elasticidad de la matriz.
- G_m : Módulo de cortadura de la matriz.
- μ_m : Coeficiente o módulo de poisson de la matriz.
- X_m : Resistencia a tracción de la matriz.
- Y_m : Resistencia a compresión de la matriz.
- S_m : Resistencia a cortadura de la matriz.

Y de ambas propiedades se pueden extraer las propiedades de la lámina:

- ρ_c : Densidad del material compuesto.
- E_c : Módulo de elasticidad del material compuesto.
- G_c : Módulo de cortadura del material compuesto.
- μ_c : Coeficiente o módulo de poisson del material compuesto.
- X_t : Resistencia longitudinal a tracción del material compuesto.
- X_c : Resistencia longitudinal a compresión del material compuesto.
- Y_t : Resistencia transversal a tracción del material compuesto.
- Y_c : Resistencia transversal a compresión del material compuesto.
- S : Resistencia a cortadura del material compuesto.

Por otra parte, en el análisis Macromecánico se considera la lámina como un material homogéneo con unas propiedades representativas que son las calculadas en el análisis Micromecánico.

Por consiguiente, la estructura de una lámina no es considerada salvo en el caso de que existan propiedades diferentes en la dirección de la fibra y en la dirección perpendicular. Como los materiales compuestos están constituidos generalmente por una estructura laminada realizada por el apilamiento de varias láminas apiladas unas sobre otras.

Conociendo la Macromecánica de una lámina única, se desarrolla la Macromecánica de un laminado. Se puede determinar para todo el laminado la rigidez, resistencia y los coeficientes de expansión térmica y humedad. La rotura del laminado se basa en las tensiones y la aplicación de las teorías de rotura de cada lámina.

Para la base del cálculo del análisis se toma una lámina como ortótropa Figura 64.

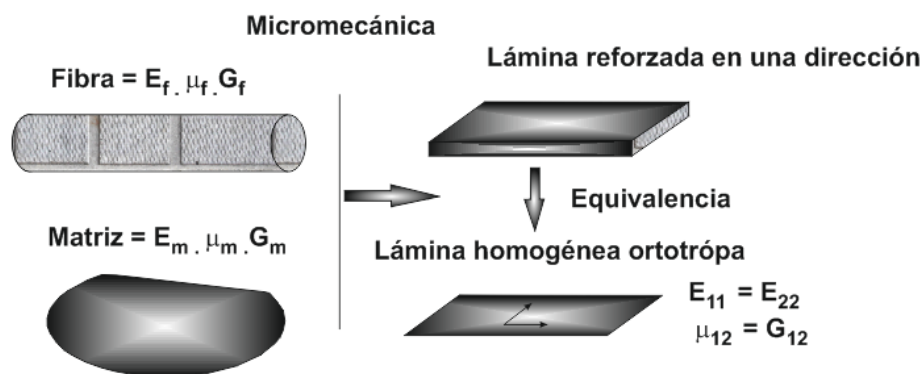


Figura 64. Caracterización analítica de los materiales compuestos.

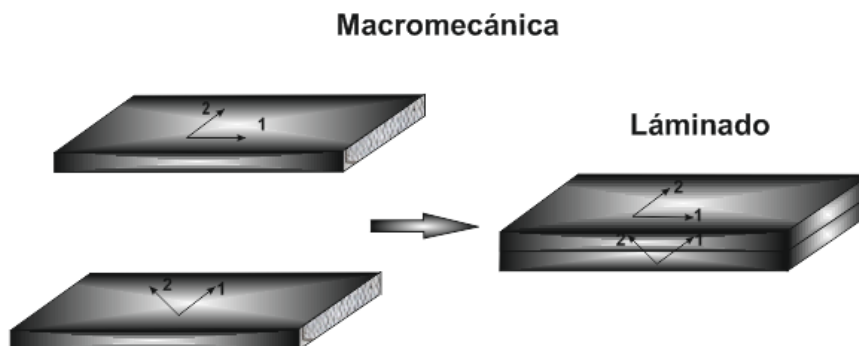


Figura 65. Caracterización analítica de los materiales compuestos.

El funcionamiento como material compuesto que se acaba de esbozar, incita a profundizar en dos aspectos que, en gran medida han favorecido al uso extensivo de los materiales compuestos:

- El primer aspecto es el de las propiedades del material en relación a su peso.
- El segundo aspecto de interés se corresponde con el control que puede alcanzarse en la anisotropía de las propiedades finales. De esta forma se puede disponer de refuerzos de fibra a medida para soportar de la forma más óptima posible el estado tensional que se va a producir.

En la Tabla 19 se recopilan los valores de rigidez y resistencia de varios laminados cruzados y convencionales.

Si se utilizan laminados cruzados formados por laminados unidireccionales se obtendrán valores aún mucho mayores a los obtenidos en la Tabla 19 pero la aplicación de este tipo de laminados es más restringida.

Los materiales reforzados con fibras como puede observarse en la Tabla 19 son muy superiores en cuanto a resistencia y rigidez específica (salvo los de fibra de vidrio) frente a los convencionales. Por consiguiente, la comparación entre los materiales convencionales y los compuestos a efectos de propiedades mecánicas están condicionados por el papel que el peso juega en el diseño.

Tabla 19. Comparación de propiedades del acero y laminados cross – Ply con los composites.

Material	Vf (%)	E (GPa)	σ_{12} (GPa)	ρ (g/cm ³)	E/ ρ	σ_{12}/ρ
Acero		210	0,45 – 0,83	7,80	26,90	0,058 – 0,116
Aluminio 2024 – T4		73	0,41	2,70	27	0,15
Aluminio 6061 – T6		69	0,26	2,70	25,50	0,01
Vidrio (E) - Epoxi	57	21,50	0,57	1,97	10,90	0,26
Kewlar 49 - Epoxi	60	40	0,80	1,40	29	0,57
Carbono - Epoxi	60	83	0,97	1,54	53,90	0,63

Donde:

- E (GPa): Módulo de elasticidad.
- σ_{12} (GPa): Resistencia a la tracción.
- E/ ρ : Módulo específico.
- σ_{12}/ρ : Resistencia específica.

9.3 Laminas

Los laminados son materiales compuestos formados por apilamientos de capas de espesor muy pequeño, denominadas láminas [187].

La unidad básica de un material laminado se denomina lámina, es un material de capa única de muy pequeño espesor 0,1 – 1 mm, Figura 66 en la que el refuerzo puede ser mediante fibras largas paralelas (lámina unidireccional) o mediante un tejido que se obtendría entrelazando las fibras (lámina bidireccional), o bien tener una configuración de fibras cortas.

La lámina puede ser un material de:

- De fibra corta.
- De fibra larga.
- Un tejido 2D.

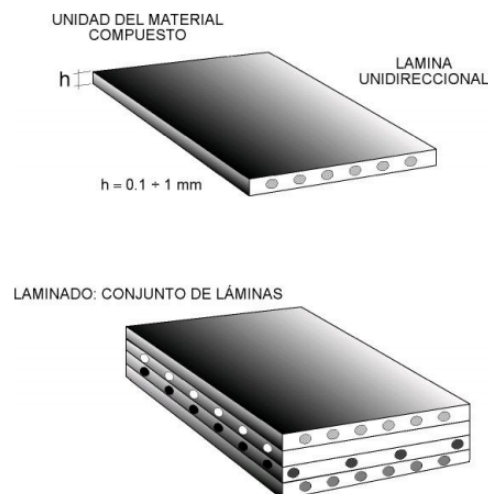


Figura 66. Diferencia entre lámina y laminado.

Nótese que, cada lámina, puede tener sus fibras con una orientación distinta a la del resto de las otras.

9.4 Análisis micromecánico de una lámina

9.4.1 Introducción

Las relaciones tensión – deformación, las constantes ingenieriles y las teorías de rotura de una lámina en ángulo se desarrollarán en secciones más adelante, utilizan 4 módulos elásticos, 5 parámetros de resistencia, 2 coeficientes de expansión térmica (CTE) y 2 coeficientes de expansión de humedad (CME) de una lámina unidireccional. Estos 13 parámetros se pueden obtener de forma experimental mediante la realización de varios ensayos de tracción, compresión, esfuerzo cortante e higrotérmicos en una lámina unidireccional.

Sin embargo, a diferencia de los materiales isotópicos, la evaluación de estos parámetros es costosa y con el consiguiente consumo de tiempo, debido a que son funciones de varias variables, como pueden ser.

- Los componentes individuales del material compuesto.
- La fracción de volumen de las fibras.
- Las geometrías del empaquetamiento.
- El procesado, etc.

Por lo que, la necesidad y motivación para el desarrollo de modelos analíticos para la determinación de dichos parámetros es muy importante.

Antes de analizar los 13 parámetros de una lámina unidireccional, se va a introducir el concepto de fracción volumétrica de fibras en el material compuesto. Concepto fundamental, debido a que las fórmulas teóricas para resolver la rigidez, la resistencia y las propiedades higrotérmicas de la lámina unidireccional son función de la fracción de volumen de las fibras.

Por otra parte, la definición de la densidad de un material es necesaria debido a que su valor se emplea en la determinación experimental del volumen de fibras y huecos de un material compuesto, siendo además utilizado el valor de la densidad en las definiciones de módulo específico y resistencia específica.

9.4.2 Fracción volumétrica

Consideremos un material compuesto que tiene como componentes fibra y matriz, si se toman las siguientes anotaciones de símbolos:

V_c , V_f y V_m : Volumen de material compuesto, fibra y matriz respectivamente.

ρ_c , ρ_f y ρ_m : Densidad de material compuesto, fibra y matriz respectivamente.

Se define la fracción de volumen de las fibras \mathcal{V}_f :

$$\mathcal{V}_f = \frac{\text{Volumen de fibras}}{\text{Volumen total}}.$$

Sustituyendo por su simbología:

$$\mathcal{V}_f = \frac{V_f}{V_c}.$$

Se define la fracción de volumen de la matriz \mathcal{V}_m :

$$\mathcal{V}_m = \frac{\text{Volumen de matriz}}{\text{Volumen total}}.$$

Sustituyendo por su simbología:

$$\mathcal{V}_m = \frac{V_m}{V_c}.$$

Sabiendo que:

$$V_c = V_f + V_m.$$

La suma de las fracciones volumétricas es:

$$\mathcal{V}_f + \mathcal{V}_m = \frac{V_f}{V_c} + \frac{V_m}{V_c} = \frac{V_f + V_m}{V_c} = \frac{V_c}{V_c} = 1.$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$\mathcal{V}_f + \mathcal{V}_m = 1.$$

Los contenidos volumétricos de fibras más usuales que se obtienen en los materiales compuestos dependen de su sistema de procesado.

En la Tabla 20 se resumen algunos valores típicos de este parámetro en función del tipo de proceso.

Tabla 20. Valores de fracción de volumen en función del procesado.

Procesado de fabricación	ν_f
Por contacto	30
Por presión	40
Por enrollamiento continuo (Filament winding)	60 – 85
Por bolsa de vacío	50 – 80

Los contenidos volumétricos de fibra que posee una lámina también pueden determinarse a partir de la arquitectura del refuerzo.

Así, por ejemplo, para unas estructuras de refuerzo hexagonal o cuadrado, como se indican en la Figura 67 se obtiene, respectivamente.

$$\nu_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \text{ (hexagonal).}$$

$$\nu_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \text{ (cuadrado).}$$

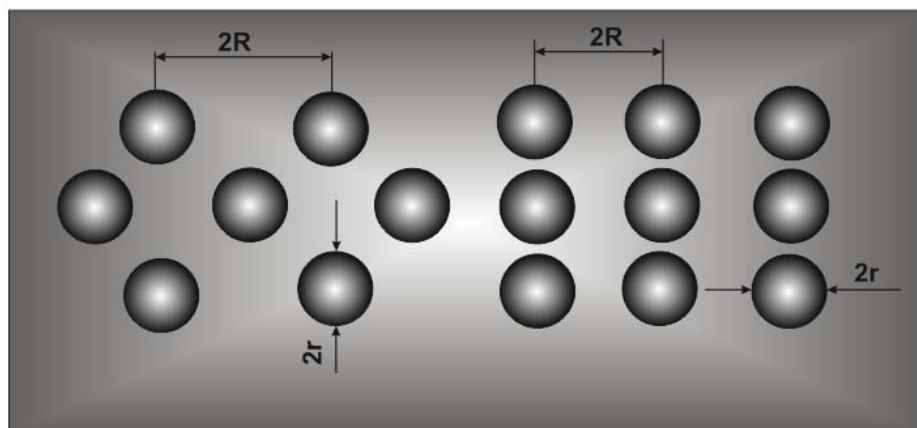


Figura 67. Estructura del refuerzo hexagonal (izquierda) y cuadrado (derecha).

9.4.3 Fracción másica.

Considerando un material compuesto que tiene como componentes fibras y matriz, si se toman las siguientes anotaciones de símbolos:

M_c , M_f y M_m : Masa de material compuesto, fibra y matriz respectivamente.

Se define la fracción másica de las fibras M_f como:

$$M_f = \frac{\text{masa de fibras}}{\text{masa total}}.$$

Sustituyendo por su simbología:

$$M_f = \frac{M_f}{M_c}.$$

Denominando M_m al contenido másico de matriz, que se definirá como:

$$M_m = \frac{\text{masa de matriz}}{\text{masa total}}.$$

Sustituyendo por su simbología:

$$M_m = \frac{M_m}{M_c}.$$

Sabiendo que:

$$M_c = M_f + M_m.$$

La suma de las fracciones volumétricas es:

$$M_f + M_m = \frac{M_f}{M_c} + \frac{M_m}{M_c} = \frac{M_f + M_m}{M_c} = \frac{M_c}{M_c} = 1.$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$M_f + M_m = 1.$$

Nota aclaratoria

Algunos autores denominan por la sigla W al porcentaje de volumen en masa.

Por lo que:

W_c , W_f y W_m Son la masa del material compuesto, fibra y matriz respectivamente.

Quedando las expresiones de la siguiente forma:

$$W_f = \frac{W_f}{W_c}.$$

$$W_m = \frac{W_m}{W_c}.$$

$$W_f + W_m = 1.$$

9.4.4 Densidad de la lámina

La densidad de la lámina (ρ) puede determinar a partir de las densidades y porcentajes volumétricos de los constituyentes, resultando:

$$\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}.$$

Densidad de la fibra:

$$\rho_f \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_f}{V_f}.$$

Densidad de la matriz:

$$\rho_m \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_m}{V_m}.$$

Densidad del compuesto:

$$\rho_c \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_f + M_m}{V}.$$

Despejando los valores de las fracciones másicas de fibra y matriz de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\rho_f \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_f}{V_f} \quad \rightarrow \quad M_f(\text{g}) = \rho_f \cdot V_f \cdot$$

$$\rho_m \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_m}{V_m} \quad \rightarrow \quad M_m(\text{g}) = \rho_m \cdot V_m \cdot$$

Sustituyendo en la densidad del material compuesto:

$$\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m \cdot$$

A esta expresión se la conoce con el nombre de la regla de las mezclas.

9.4.5 Relaciones entre propiedades

Conocidos los valores del volumen de la fibra y la masa o peso de la fibra; se puede calcular el valor de la densidad de la fibra:

$$\rho_f \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_f}{V_f} \quad \rho_m \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_m}{V_m} \cdot$$

Fracción volumétrica de la fibra y de la matriz:

$$V_f(\%) = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \cdot$$

Para la obtención del valor de la fracción de peso de fibras hay que aplicar la expresión.

$$V_f(\%) = W_f \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot$$

Donde W: es la fracción de peso de la fibra.

Sabiendo que:

$$\rho_m \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m \cdot$$

Sustituyendo se obtiene una expresión que relaciona V_f con W_f y las densidades del compuesto y de la fibra:

$$V_f (\%) = W_f \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} = W_f \cdot \frac{\rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f)}{\rho_f}.$$

9.4.6 Porosidad

Determinación del volumen de fibra, resina y huecos

Con este ensayo se pretende determinar el volumen de fibra, resina y huecos que presenta un laminado. Para ello, se debe de determinar inicialmente la densidad del laminado tal como se ha comentado en el apartado anterior.

Una vez obtenida la densidad del laminado, se debe de eliminar la resina. Para lo cual la muestra se disuelve en una solución ácida o se quema.

Los materiales compuestos de fibra de vidrio se queman y los basados en carbono o aramida son digeridos en soluciones ácidas con ácido sulfúrico o nítrico.

Los materiales de fibras de carbono o de aramida no pueden ser quemados, ya que el carbono oxida en el aire a una temperatura superior a los 300 °C y la fibra de aramida se puede descomponer a elevadas temperaturas.

Los composite a base de resina de epoxi pueden ser digeridos por el ácido nítrico o en una mezcla de caliente de etilenglicol e hidróxido de potasio.

Los composites de poliamida y de resinas fenólicas utilizan mezclas de ácido sulfúrico u peróxido de hidrógeno.

Cuando la digestión o quemado se haya completado, las fibras restantes se lavan y se secan varias veces, para luego ser pesadas.

El proceso que se sigue para la digestión con ácido es el siguiente:

- Se debe de eliminar el tejido pelable de la probeta si lo tuviera y a continuación pesar la probeta (P_1).
- Pesar el vaso de precipitados, vacío y seco, e identificarlo (Peso del vaso).
- Colocar la muestra en un Erlenmeyer con ácido sulfúrico concentrado.
- Calentar hasta la digestión total de la probeta (eliminación de la resina).
- Retirar el calor, y añadir agua destilada gota a gota para no elevar la temperatura, enfriando hasta alcanzar la temperatura ambiente.

- Realizar un filtrado reteniendo la totalidad de las fibras, depositarlas en el vaso de precipitados identificado y realizar un lavado con agua destilada y a continuación con acetona.
- Secado de las fibras en una estufa de aire forzado hasta obtener peso constante y enfriar en desecador hasta temperatura ambiente.
- Pesar el vaso de precipitados más la fibras secas (Peso vaso + fibras), de forma que el peso de las fibras sea (P_2).

(P_1) = Peso del vaso – (peso de las fibras + peso del vaso).

Cálculos

$$\% \text{ Volumen de fibra} = \left(\frac{\frac{P_2}{\rho_f}}{\frac{P_1}{\rho^{23^\circ\text{C}}}} \right) \cdot 100 .$$

$$\% \text{ Volumen de resina} = \left(\frac{\frac{P_1 - P_2}{\rho_R}}{\frac{P_1}{\rho^{23^\circ\text{C}}}} \right) \cdot 100 .$$

$$\% \text{ Volumen de huecos} = 100 - (V_f + V_R).$$

Donde:

- V_f : Volumen de la fibra.
- V_R : Volumen de la resina.
- ρ_R : Densidad de la resina.
- ρ_f : Densidad de la fibra.
- $\rho^{23^\circ\text{C}}$: Densidad del laminado.

Los valores de la densidad de la fibra y de la resina son valores que suministra el fabricante, siendo valores nominales.

Otra expresión que se puede utilizar para la obtención del porcentaje de huecos está basada en la regla de las mezclas pero ampliada con la porosidad V_p .

$$E_x \text{ (MPa)} = E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f - V_p).$$

Se compone de dos términos. El primero formado por el producto del módulo de la fibra por la fracción de volumen de la fibra $E_f V_f$, y el segundo por el módulo de la matriz que multiplica a uno menos el porcentaje de volumen de la fibra menos el volumen de la porosidad $E_m (1 - V_f - V_p)$.

Para obtener el rendimiento es necesario conocer cuál de los términos es el más elevado.

En el caso de trabajar con laminados de altas prestaciones el primer término $E_f \cdot V_f$ va a ser muy superior, considerando al segundo término despreciable.

En el caso de trabajar por procesado de contacto a mano con fracciones de fibra más bajas, el segundo término sí que tendrá repercusión. Por regla general el primer término será el más importante.

En el caso de que los resultados obtenidos tomen valores negativos, se sustituyen las ecuaciones anteriores por la utilización de las siguientes expresiones:

$$V_f + V_m = 1.$$

$$V_f (\%) = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}}.$$

$$\rho_c \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{1}{\left(\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m} \right)}.$$

$$\rho_c \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m.$$

$$V_V (\%) = \frac{\rho_c - \rho_{\text{expe}}}{\rho_c}.$$

9.4.7 Gramaje de la fibra y de la matriz

Para la obtención de la masa de la fibra, o bien se conoce el gramaje a través de la información aportada por el fabricante del tejido, dicha información está referida a un área de 1 m². En el caso de que el tamaño de las muestras sea inferior se deben de cortar a las dimensiones determinadas.

El siguiente paso consiste en el pesaje de cada una de las láminas del tejido en seco. Para lo cual se debe de realizar en una balanza de precisión.

Si el laminado está formado por varios sublaminados todos ellos deberán de tener las mismas dimensiones, y su pesaje se realiza de forma conjunta o individual anotando los valores de cada pesaje. Con esta operación se obtendrá el valor de la masa o peso de las fibras que se representa por la sigla: M_f .

Para la obtención de la masa del composite, se deberá de obtener el laminado compuesto tras la infusión y el curado respectivamente. Su valor se representa por la sigla: M_c .

Una vez obtenidos estos valores de forma experimental, se pueden calcular sus correspondientes volúmenes, aplicando las siguientes expresiones:

$$V_c = \frac{M_c}{\rho_c} .$$

Donde V_c es el volumen del material compuesto.

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m} .$$

Para la obtención del Volumen de la fibra se aplicarán las siguientes expresiones:

$$M_c = M_f + M_m .$$

Como los valores de M_c y M_f son conocidos se obtiene el valor de:

$$M_m = M_c - M_f .$$

Partiendo de la hipótesis de que el volumen del material compuesto es igual:

$$V_c = V_m + V_f .$$

Niveles de deformación – tensión

El nivel de tensión que soporta la fibra sobre el compuesto vendrá determinado por la relación:

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_c} .$$

Así con el nivel de tensión de la matriz sobre el compuesto por:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_c} .$$

Los niveles de tensión soportados por la fibra y la matriz valdrán:

$$\sigma_{cL} = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) .$$

Por otra parte, en un material compuesto la matriz y la fibra tienen la misma deformación, para que no se produzca la delaminación. Por lo tanto:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon_c.$$

Aplicando la ley de Hooke, se obtiene la relación entre tensiones y deformaciones entre la matriz y las fibras:

$$\frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_f}{E_f}.$$

Operando y sustituyendo.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_f} = \frac{E_m}{E_f} \quad \sigma_m = \left(\frac{E_f}{E_m} \right) \sigma_f.$$

De forma generaliza se obtendrá que:

Para el material compuesto:

$$\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_c.$$

Para las fibras:

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f.$$

Para la matriz:

$$\sigma_m = \varepsilon_m \cdot E_m.$$

Aplicando la ley de las mezclas se puede relacionar los módulos de elasticidad del composite con la fracción de volumen en fibra:

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m (1 - V_f).$$

Relación entre fuerza y área o sección transversal de una lámina:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_T}.$$

Para el cálculo de A_T que es el área transversal se necesita conocer:

- A_0 : es el ancho del laminado.
- T : espesor del mismo.

El valor de A_T se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$A_T = A_0 \cdot T.$$

Hay que operar en Newton y metros.

La relación entre las deformaciones y las tensiones en un material compuesto viene determinada por las siguientes expresiones.

Para la deformación en el sentido de las fibras:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_{cL1}}{E_1} - \frac{\mu_{12}\sigma_{cL}}{E_1}.$$

Donde el primer término indica lo que se incrementa la longitud y el segundo término lo que se contrae el espesor.

Para la deformación en el sentido transversal de las fibras:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_{cT}}{E_2} - \frac{\mu_{21}\sigma_{cT}}{E_2}.$$

Se necesita realizar el cálculo de módulo de poisson secundario o μ_{21} :

$$\mu_{21} = \mu_{12} \frac{E_2}{E_1}.$$

Donde el primer término indica lo que se incrementa la longitud y el segundo término lo que se contrae el espesor.

9.4.8 Análisis de una lámina de material ortótropo compuesto en las direcciones locales

Hipótesis

Antes de empezar con el desarrollo del análisis se tienen que establecer una serie de hipótesis de cálculo.

Las fibras han de considerarse como un material que es:

- Homogéneo.
- Elástico lineal.
- Isótropo.

Con una configuración:

- Fibras regularmente espaciadas.
- Fibras perfectamente alineadas.

En la Figura 68 se muestra dichas consideraciones.

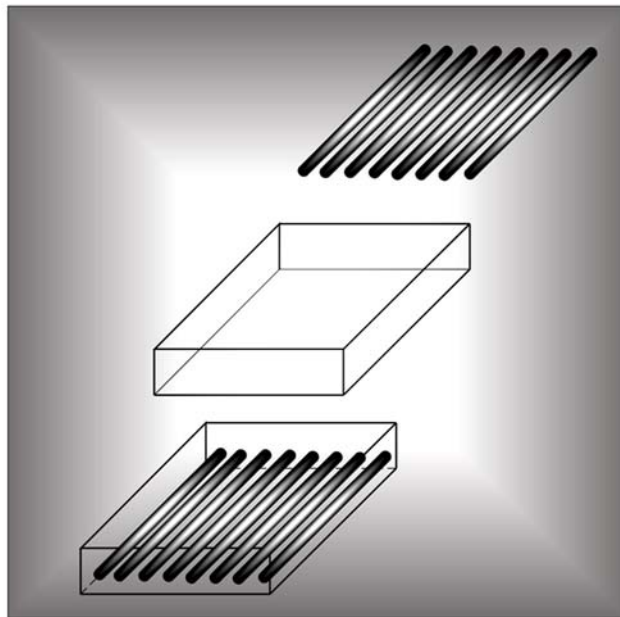


Figura 68. Características de las fibras.

En la Tabla 21 se expone un ejemplo de los parámetros micromecánico de estas láminas.

Tabla 21. Propiedades de las fibras de refuerzo.

Fibras				
	Vidrio	Kevlar	Carbono H.R	Carbono H.M
E_{fl} (GPa)	85	124	230	390
E_{ft} (GPa)	85	8,00	15	6
G_f (GPa)	22	12	50	20
μ_{flt}	0,25	0,37	0,30	0,35
	Fibras isotrópicas		Fibras anisótropas	

Por su parte la matriz se ha de considerarse como un material que es:

- Homogéneo.
- Elástico lineal.
- Isótropo.

En la Figura 69 se muestra dichas consideraciones.

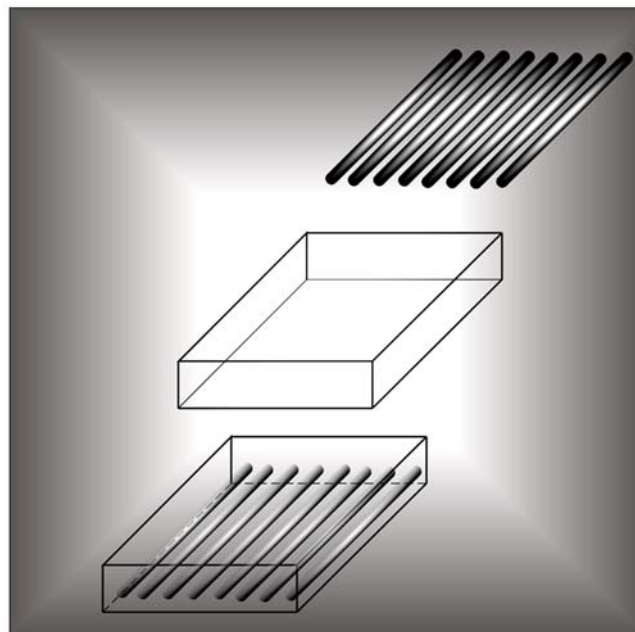


Figura 69. Características de la matriz.

En la Tabla 22 se expone un ejemplo de los parámetros micromecánico de estas láminas.

Tabla 22. Propiedades de las matrices.

Matrices			
	Epoxi	Poliamida	Aluminio
E_{ml} (GPa)	3,40	3,50	70
E_{mt} (GPa)	3,40	3,50	70
G_m (GPa)	1,30	1,30	26,90
μ_m	0,30	0,35	0,30

Las características del material compuesto que se obtiene después del procesado y curado son:

- Material macroscópicamente homogéneo.
- Elástico lineal
- Macroscópicamente ortótropo.

Configuración:

- Ausencia de tensiones iniciales.
- Unión fibra – matriz perfecta.
- Ausencia de porosidad.

En la Figura 70 se muestra dichas consideraciones.

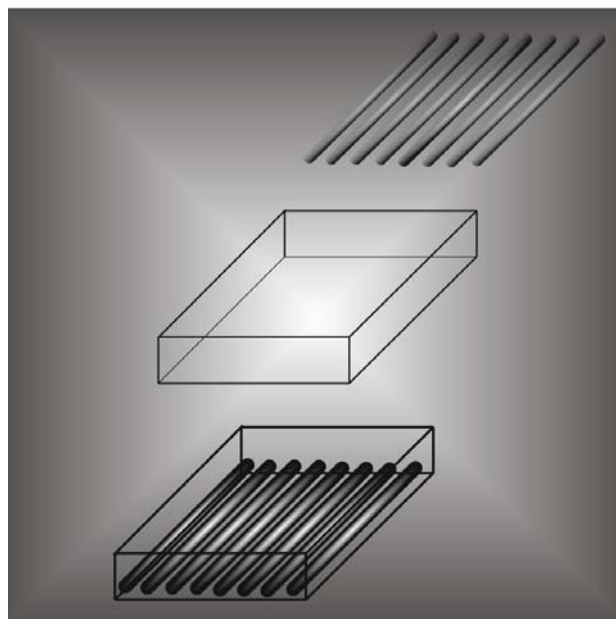


Figura 70. Características de la lámina.

Consideraciones

A partir de una lámina unidireccional, se selecciona un elemento de volumen representativo (RVE) que es la parte más pequeña del material que represente a este en su conjunto., y que básicamente consiste en la fibra rodeada por la matriz Figura 71.

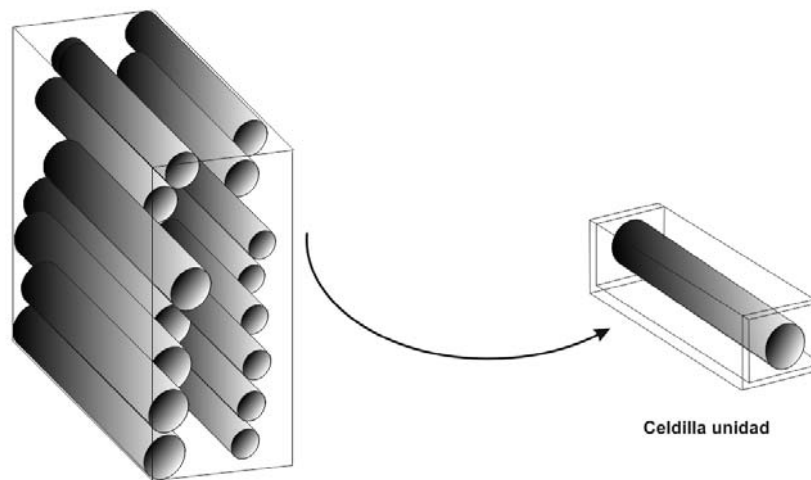


Figura 71. Elemento de volumen representativo de una lámina.

A este elemento representativo se le conoce con el nombre de celdilla unidad. Y tiene las siguientes propiedades Figura 72.

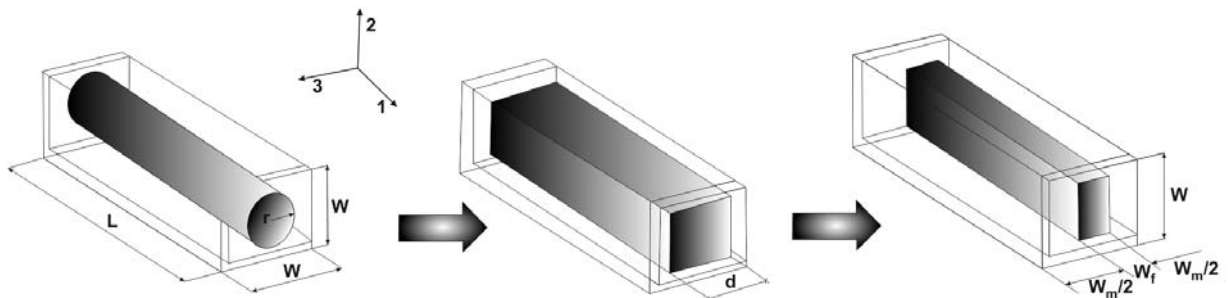


Figura 72. Propiedades de la celdilla unidad.

Tensión plana

Si se tiene un sublaminado formado por tres láminas o sublaminados, de este se puede tomar una unidad celular de la lámina central tal como se visualiza en la Figura 73.

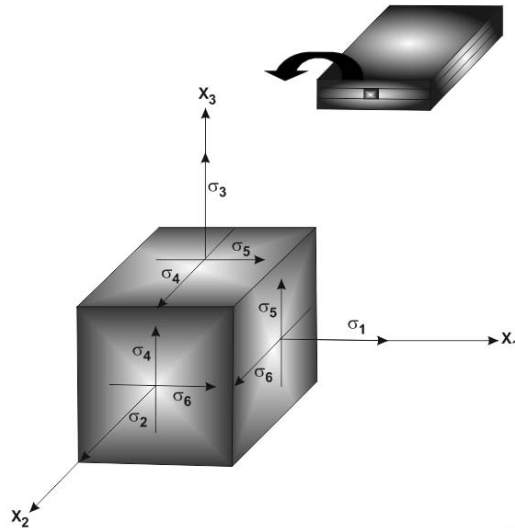


Figura 73. Tensiones que actúan sobre el plano interlaminarmente.

Dentro de la unidad celular se observan unas componentes de tensión que trabajan en el plano. Actuando en las caras frontal y lateral, de tal forma que actúan con la celda unidad en su derecha y enfrente dentro del mismo plano, por lo que conocen como tensiones planas.

Estas tensiones planas van a ser:

- Sigma σ_1 denominada tensión normal.
- Sigma σ_2 denominada tensión ortogonal a la dirección 2, también denominada tensión normal.
- Sigma σ_6 denominada tensión de cortadura en el plano.

Siendo estas las componentes más importantes desde el punto de vista de lo que son las propiedades que se van a necesitar para los cálculos de la gran mayoría de las estructuras laminares.

Como se observa en la Figura 74 existen también las denominadas tensiones interlaminares. Debido a que actúan en la cara superior de la celda unitaria. En esta cara se encuentra actuando esta celda unidad con la superior. Es decir, se encuentra actuando entre la lámina central y la siguiente. De ahí que reciben el sobrenombre de tensiones entre lámina o interlaminares.

Las tensiones interlaminares son:

σ_3 , σ_4 y σ_5 .

De las cuales σ_3 es una tensión normal o de pelado y los 2 restantes son de cortadura.

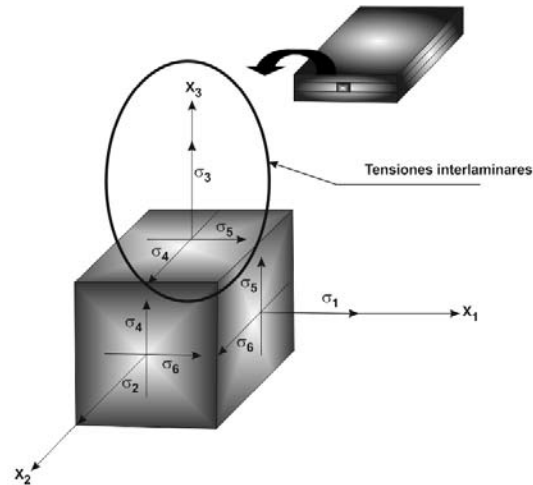


Figura 74. Tensiones interlaminares.

Las tensiones interlaminares si no se diseñan de forma correcta van a provocar defectos de delaminación.

Las propiedades que se necesitan para el cálculo de placas delgadas y membranas son las que se encuentran comprendidas en el plano del laminado (X – Y).

En la Figura 75 se muestra esta disposición del plano del laminado.

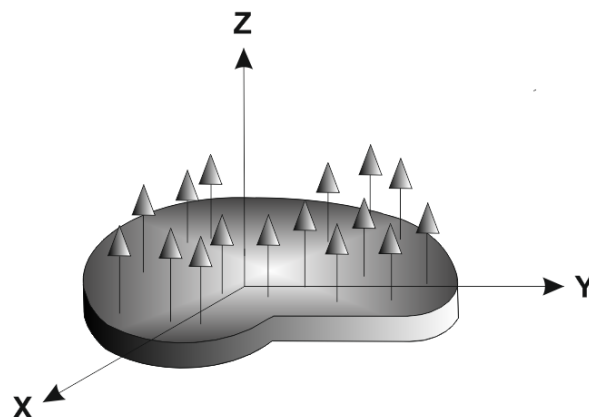


Figura 75. Plano del laminado (X – Y).

A este estado de carga σ_1 , σ_2 y σ_6 se les va a denominar tensión plana.

Se va a considerar siempre que el laminado va a tener dos direcciones principales ortogonales entre sí y se van a considerar como ortótropos.

Siempre se van a tener unas direcciones 1 y 2 que van a ser ortogonales entre sí.

En la Figura 76 se representa lo que es una lámina unidireccional que trabaja en tensión plana.

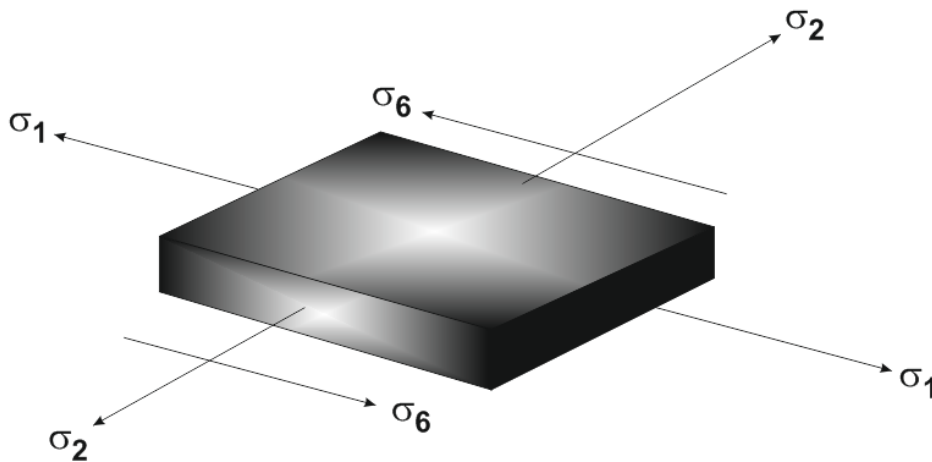


Figura 76. Lámina trabajando en tensión plana.

Estas tensiones van a generar unas deformaciones en lámina que también serán planas. Estas deformaciones serán.

- Épsilon ε_1 en la dirección longitudinal de las fibras.
- Épsilon ε_2 en la dirección transversal de las fibras.
- Épsilon ε_6 una deformación de cortadura la dirección del plano.

Comportamiento mecánico en las direcciones locales

Los materiales compuestos cada vez presentan una mayor importancia en el campo de la ingeniería debido sobre todo al aporte de sus propiedades mecánicas, elevada ligereza, muy buena procesabilidad y bajo costo.

Todas estas propiedades hacen que los materiales compuestos se utilicen en aplicaciones tecnológicas de contenido medio y elevado.

Cuando se trabaja en aplicaciones de elevado contenido tecnológico, las tareas de diseño y de cálculo adquieren una gran importancia y tienen que optimizarse. Por lo que, se hace necesario diseñar modelos que permitan la estimación de las características de estructuras laminadas.

Análisis de una lámina en las direcciones locales (1 - 2).

Se parte de un material compuesto formado por una matriz y un elemento de refuerzo lineal, de fibra larga que va a formar un determinado ángulo determinado θ en las direcciones principales (X - Y).

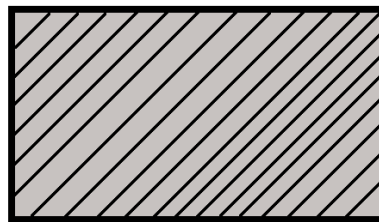


Figura 77. Orientación de las fibras de refuerzo de la lámina.

Estas fibras forman un determinado ángulo con las direcciones globales o principales de la misma. En la Figura 78 se muestran las direcciones locales o secundarias, las globales y principales y el ángulo que forman las fibras con las direcciones principales de la lámina.

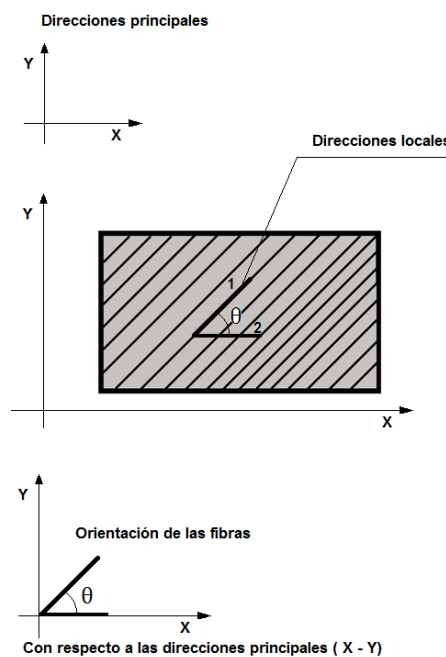


Figura 78. Imagen de las direcciones locales, globales.

Las direcciones globales vienen definidas por las direcciones X e Y de los ejes cartesianos. Y las direcciones locales 1 y 2. En las direcciones locales, el índice numérico 1 indica la longitud longitudinal o de la fibra, y el índice numérico 2 la longitud perpendicular a la fibra o transversal.

Análisis en la dirección longitudinal y transversal local

El material compuesto se puede representar de forma esquemática según la Figura 79.

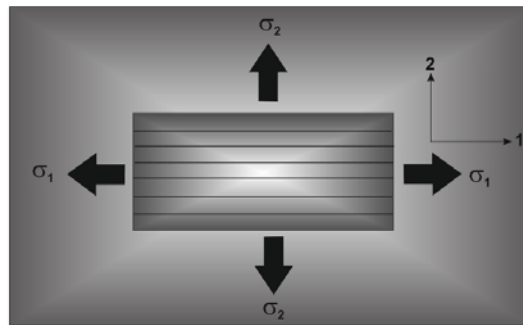


Figura 79. Forma esquemática de las direcciones de las fibras.

En la Figura 79 se ha hecho coincidir la dirección de las fibras con la dirección de las cargas de tracción ejercidas longitudinalmente.

El estado tensional que soporta la lámina estará formado por:

- Una tensión longitudinal σ_1 .
- Una tensión transversal en la dirección perpendicular a las fibras σ_2 .
- Una tensión de cortadura o de cizalla también en el plano definida por τ_{12} .

La Figura 80 representa dicho estado tensional.

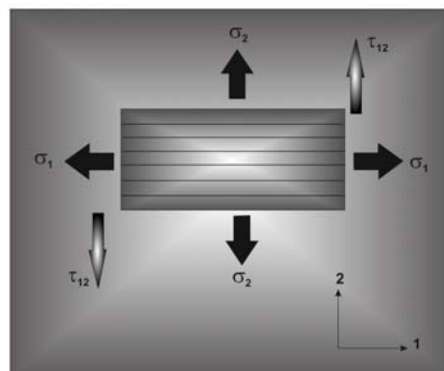


Figura 80. Estado tensional de un laminado plano.

Como se observa en la Figura 80 existen dos tipos de tensiones:

- Tensión Normas $=\sigma$.
- Tensión tangencial $=\tau$.

Propiedades mecánicas en las direcciones 1 – 2

Como se ha visto en el apartado anterior las propiedades de la matriz vienen definidas por el terceto de parámetros:

- Módulo de tracción.
- Módulo de cortadura.
- Coeficiente de Poisson.

Como el material de la matriz es isotrópico no se van a considerar direcciones. Ahora bien, como las fibras de refuerzo son anisotrópicas la dirección de la fibra se encuentra más favorecida en la dirección transversal.

Las características mecánicas de la lámina vendrán definidas por estos tres pares de valores Tabla 23.

Tabla 23. Parámetros de las fibras a tracción, cortadura y coeficiente de poisson.

Tracción	E_1	E_2
Cortadura	G_{12}	G_{21}
Poisson	μ_{12}	μ_{21}

- La tracción vendrá definida por el módulo de tracción en la dirección longitudinal (1 – 2) E_1 y transversal (2 – 1) E_2 .
- La cortadura o cizallamiento vendrá definida por el módulo de cortadura en la dirección longitudinal (1 – 2) G_{12} y en la dirección transversal (2 – 1) G_{21} .
- El coeficiente de poisson en la dirección longitudinal (1 – 2) μ_{12} y transversal (2 – 1) μ_{21} .

Desde el punto de vista de la tracción el material puede trabajar indistintamente en ambas direcciones. Con lo cual los módulos de elasticidad en las direcciones longitudinal y transversal serán necesarios para el análisis de la lámina.

En el caso del módulo de cortadura, como la lámina es simétrica, la cortadura sólo se produce en la dirección (1 – 2) dirección de las fibras. En la dirección transversal o (2 – 1) el alargamiento no va producir cortadura. Por lo que se pondrá prescindir del término G_{21} para la resolución del análisis.

Por el contrario, el coeficiente de poisson va a producir contracción tanto en la dirección (1- 2) debido a la tensión transversal y contracción en la dirección (2 – 1); debido a tensión longitudinal.

Los parámetros necesarios para el análisis de las propiedades mecánicas en las direcciones (1 – 2) queda como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Parámetros de cálculo de una lámina en las direcciones locales.

Tracción	E_1	E_2
Cortadura	G_{12}	
Poisson	μ_{12}	μ_{21}

Obtención del módulo de elasticidad longitudinal

Si se aplica la condición de isodeformación o igual deformación (Modelo de Voigt), se debe de cumplir que:

$$\epsilon_f = \epsilon_m.$$

La deformación que sufre la matriz debe de ser igual a la deformación que sufre el elemento resistente., siempre y cuando se cumpla la condición que la unión entre la fibra y la matriz es perfecta.

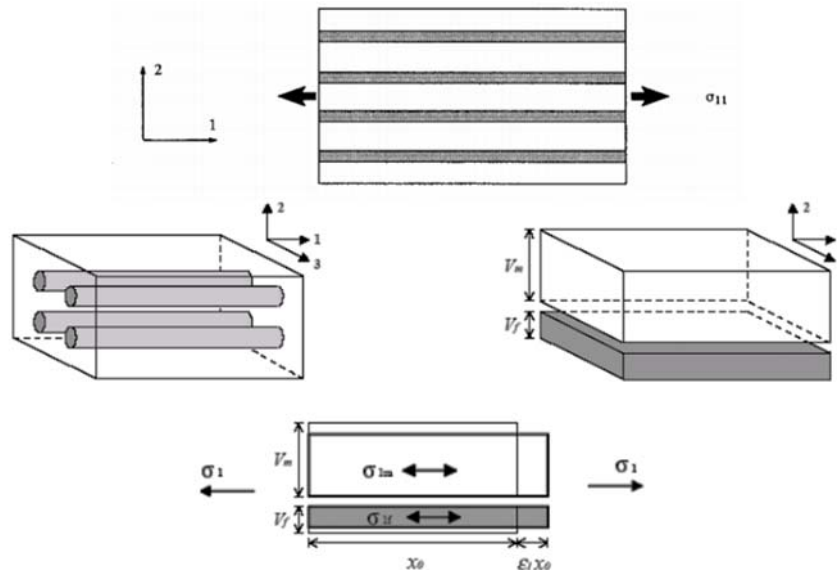


Figura 81. Material compuesto con fibras dispuesta unidireccionalmente, sometidas a una carga de tracción en la dirección del eje de las fibras.

En un material compuesto reforzado con fibras dispuestas unidireccionalmente, que se encuentra sometido a una carga de tracción o de compresión en la dirección del eje de las fibras Figura 81 se obtiene la expresión matemática del módulo de elasticidad dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L}.$$

Donde:

- ε : Es la deformación.
- ΔL : El cambio de longitud.
- L : La longitud inicial.
- f, m y c : Los subíndices de la fibra, matriz y composite en dirección longitudinal .

Si se supone el comportamiento elástico y aplicando la ley de Hooke, las tensiones uniaxiales σ que se encuentran actuando sobre las fibras y la matriz vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_c .$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_c .$$

Se debe de cumplir que el módulo de elasticidad de la fibra debe de ser mayor que el módulo de elasticidad de la matriz. Debido a que el refuerzo de las fibras soporta la parte principal de las cargas aplicadas (F).

La carga aplicada al material compuesto, se va a denominar (F_c) y se va a soportada por la matriz y por las fibras Figura 82.

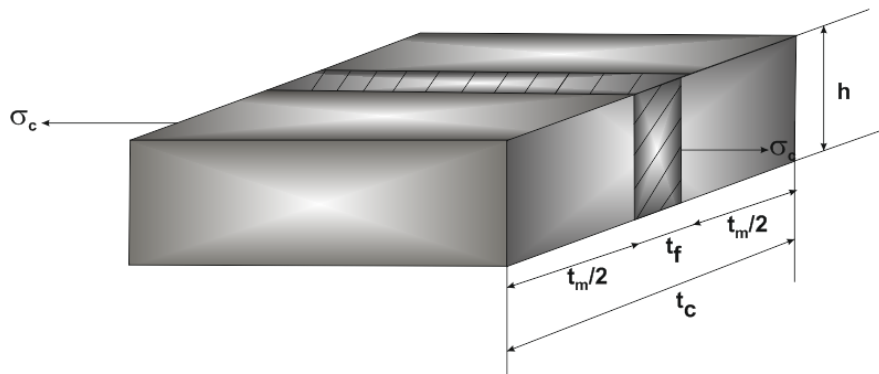


Figura 82. Esfuerzo longitudinal aplicado al elemento de volumen representativo para el desarrollo del cálculo del módulo de elasticidad longitudinal de una lámina unidireccional.

Operando se tendrá:

$$F_c = F_f + F_m [a].$$

Y como a su vez aplicando la ley de Hooke:

$$F_c = \sigma_c \cdot A_c .$$

$$F_f = \sigma_f \cdot A_f .$$

$$F_m = \sigma_m \cdot A_m .$$

Sustituyendo y operando en la ecuación [a]:

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m .$$

Y como a su vez los valores de sigma valen:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_c .$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_c .$$

Sustituyendo:

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m = E_f \cdot \varepsilon_c \cdot A_f + E_m \cdot \varepsilon_c \cdot A_m = \varepsilon_c \cdot (E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m) . [b]$$

Como a su vez se tiene que:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c .$$

Sustituyendo en [b]:

$$\sigma_c = E_{cL} \cdot \varepsilon_c \cdot A_c = \varepsilon_c \cdot (E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m) .$$

$$\sigma_c = E_{cL} \cdot \varepsilon_c \cdot A_c = \varepsilon_c \cdot \left(E_f \cdot \frac{A_f}{A_c} + E_m \cdot \frac{A_m}{A_c} \right) .$$

Luego identificando con la ley de Hooke, $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

$$E_{cL} = E_f \cdot \frac{A_f}{A_c} + E_m \cdot \frac{A_m}{A_c} [c].$$

Y como la relación de:

$$\frac{A_f}{A_c} = V_f.$$

$$\frac{A_m}{A_c} = V_m.$$

Sustituyendo en [c]:

$$E_{cL} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m.$$

A esta ecuación se la denomina regla de las mezclas.

Como se sabe que:

$$V_f + V_m = 1.$$

También se puede representar la regla de las mezclas como:

$$E_{cL} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f).$$

E_{cL} corresponde a la dirección longitudinal = E_1 .

Obtención del módulo de elasticidad transversal

Se puede utilizar el mismo procedimiento para la predicción del módulo de elasticidad transversal de una lámina unidireccional.

A este módulo se le denomina como E_{cT} o E_2 .

Para determinarlo se puede utilizar una condición de igual tensión o isotensión (Modelo de Reuss), en que la fibra, la matriz y el material compuesto soportan la misma tensión.

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma_{cT}.$$

En la Figura 83 se pone de manifiesto la condición de igualdad de tensión.

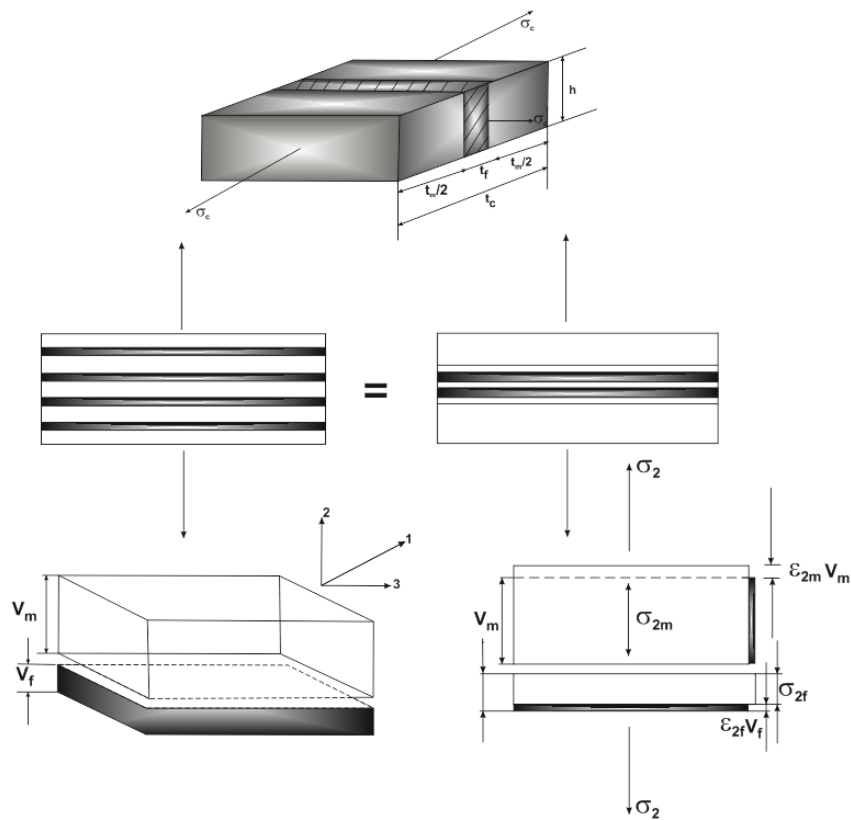


Figura 83. Igualdad de isotensión.

El desplazamiento que sufre Δ_t en la dirección transversal (en su espesor) es la suma de la deformación transversal de la fibra y de la matriz.

$$\Delta_{tc} = \Delta_{tf} + \Delta_{tm} .$$

Si se realiza el cociente de la expresión anterior por el espesor inicial t_c , se obtendrá la deformación en la dirección transversal.

$$\varepsilon_{tc} = \frac{\Delta_{tc}}{t_c} = \frac{\Delta_{tm}}{t_m} \cdot \frac{t_m}{t_c} + \frac{\Delta_{tf}}{t_f} \cdot \frac{t_f}{t_c} .$$

O bien:

$$\varepsilon_{tc} = \varepsilon_m \cdot \frac{t_m}{t_c} + \varepsilon_f \cdot \frac{t_f}{t_c} = \varepsilon_m \cdot V_m + \varepsilon_f \cdot V_f .$$

Esto es debido a que las fracciones entre los espesores son las mismas que las fracciones en volumen, porque las otras dos dimensiones en la fibra y la matriz son iguales. La fibra, la matriz y el material compuesto se supone que tienen la misma anchura, que se denominará (h), pero de espesores t_f , t_m y t_c respectivamente.

El área de la matriz y de la fibra resistente, así como la del material compuesto viene determinada por:

$$A_f = ht_f .$$

$$A_m = ht_m .$$

$$A_c = ht_c .$$

Por lo que:

$$V_f = \frac{V_f}{A_T} = \frac{A_f}{A_T} = \frac{ht_f}{ht_c} = \frac{t_f}{t_c} .$$

$$V_m = \frac{V_m}{A_T} = \frac{A_m}{A_T} = \frac{ht_m}{ht_c} = \frac{t_m}{t_c} .$$

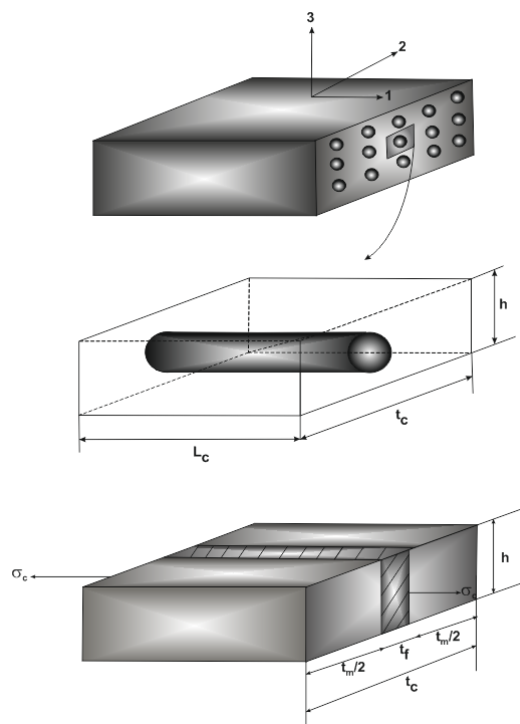


Figura 84. Elemento de volumen representativo de una lámina unidireccional.

Aplicando la ley de Hooke la ecuación [4] puede expresarse como:

$$\frac{\sigma_{ct}}{E_{ct} (= E_2)} = \frac{\sigma_{ct}}{E_m} \cdot V_m + \frac{\sigma_{ct}}{E_f} \cdot V_f.$$

De donde:

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} = \frac{1}{E_{22}} = \frac{1}{E_2}.$$

Operando:

$$E_{ct} = E_2 = \frac{E_m \cdot E_f}{E_m \cdot V_f + E_f (1 - V_f)} = \frac{E_m \cdot E_f}{E_m \cdot V_f + E_f \cdot V_m}.$$

Pero para obtener unos resultados aceptables se debe de aplicar la fórmula de Halpin Tsai.

$$E_2 = E_m \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right).$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + \xi}.$$

ξ = Parámetro empírico obtenido por ajuste de curvas [adimensional].

El valor de ξ es una medida del refuerzo de fibra del material compuesto que depende de la geometría, geometría de empaquetamiento y condiciones de carga. Un valor de $\xi = 2$ usualmente da buenos resultados en el caso de fibras circulares o cuadradas.

Coefficiente de poisson principal dirección (1 – 2)

El módulo de poisson principal se define como la relación entre la deformación normal en la dirección transversal (negativa) con respecto a la deformación en la dirección longitudinal, cuando se aplica una carga normal en la dirección longitudinal Figura 85.

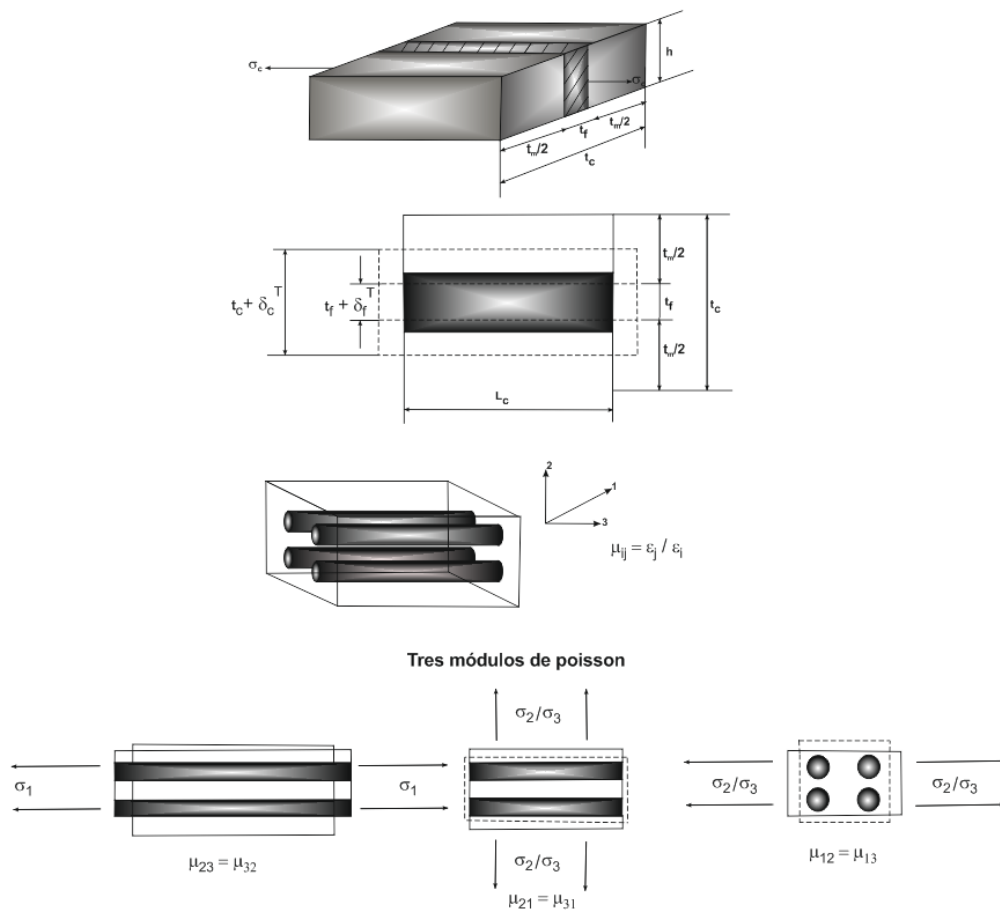


Figura 85. Efectos del módulo de poisson.

La contracción en la dirección dos es debida a todas las fibras y valdrá:

$$- \epsilon_1 \cdot V_f \cdot \mu_f \cdot$$

Donde:

- V_f : Es la fracción de volumen de las fibras.
- μ_f : Es el coeficiente de poisson de las fibras.

La contracción que sufre la matriz es:

$$- \epsilon_1 \cdot V_m \cdot \mu_m \cdot$$

La contracción total del material compuesto en la dirección dos vendrá, entonces, dada por:

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_1 \cdot V_f \cdot \mu_f - \varepsilon_1 \cdot V_m \cdot \mu_m = -\varepsilon_1 (V_f \cdot \mu_f + V_m \cdot \mu_m).$$

Con lo que se puede definir el coeficiente de poisson de un material compuesto como:

$$\mu_{12} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

$$\mu_{12} = V_f \cdot \mu_f + V_m \cdot \mu_m.$$

Por otra parte, como se cumplen las dos relaciones siguientes:

$$\frac{\mu_{12}}{E_1} = \frac{\mu_{21}}{E_2}.$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \mu_{23})}.$$

Se tiene que:

$$\mu_{21} = (V_f \cdot \mu_f + V_m \cdot \mu_m) \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right) = \mu_{12} \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right).$$

El valor del coeficiente de poisson en la dirección (2 – 1) será menor que el coeficiente de poisson en la dirección (1 – 2), debido a que bajo tensiones transversales las fibras ofrecen una gran resistencia a la contracción axial.

Módulo de cortadura en el plano

En el caso del módulo de cortadura principal o longitudinal, tanto las fibras como la matriz están sometidas a la misma tensión cortante (modelo de bloques), como se muestra en la Figura 81. Las deformaciones en la matriz y en las fibras vienen dadas por:

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m}.$$

$$\gamma_f = \frac{\tau}{G_f}.$$

Donde:

τ : Es la tensión cortante (MPa).

G: Es el módulo de cortadura (MPa).

El desplazamiento total del material compuesto Δ , debido a la tensión cortante es:

$$\Delta = \gamma \cdot t.$$

Donde:

γ : Es la deformación a cortadura media del material.

t: Es el espesor (mm).

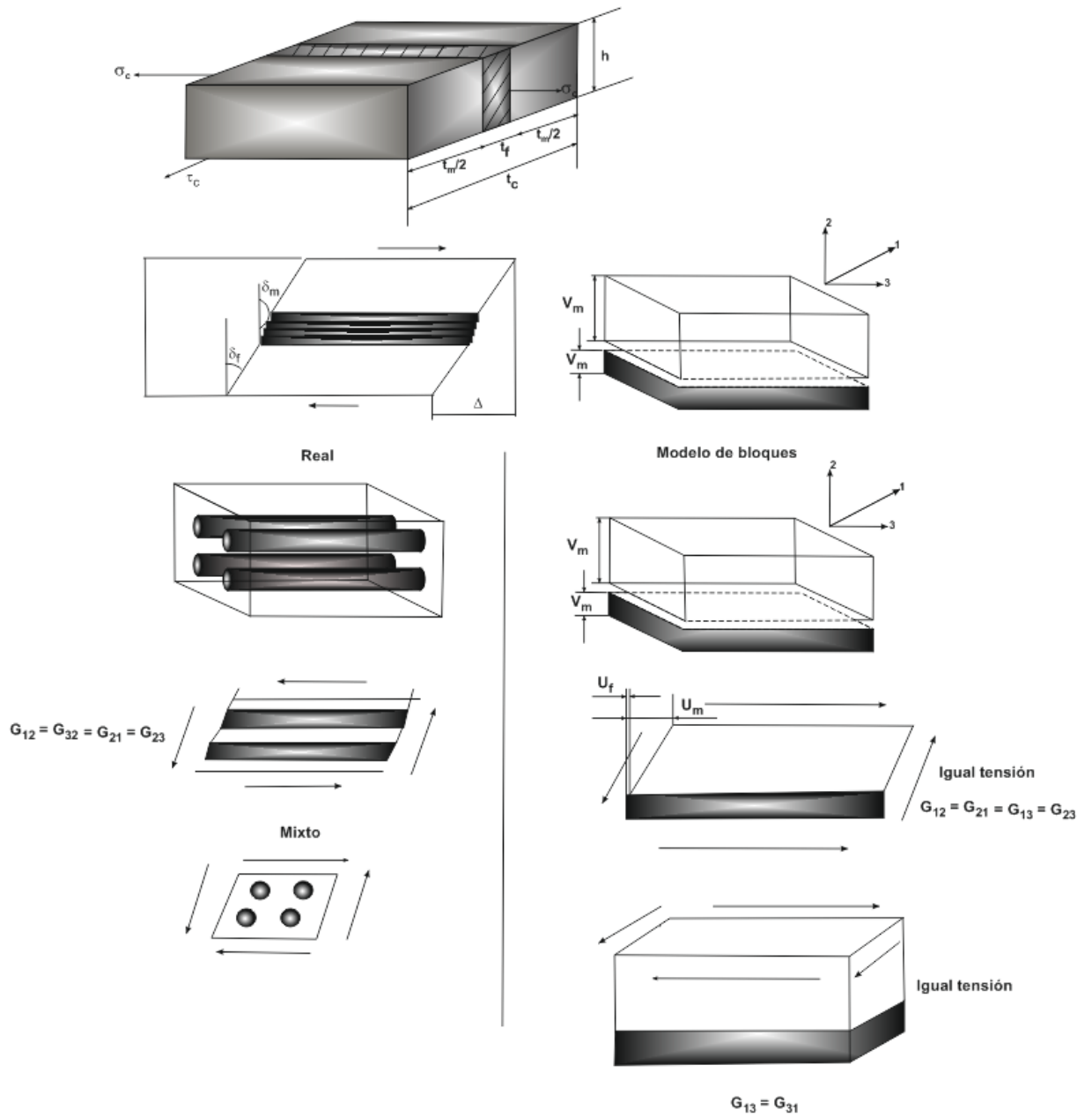


Figura 86. Módulo de cortadura en el plano.

En la parte izquierda de la Figura 87 se representa un material compuesto con fibras unidireccionales bajo el efecto de una carga de tensión cortante. En la parte derecha de la Figura 87 se presenta la deformación de cortadura que sufre el material compuesto con fibras dispuesta unidireccionalmente.

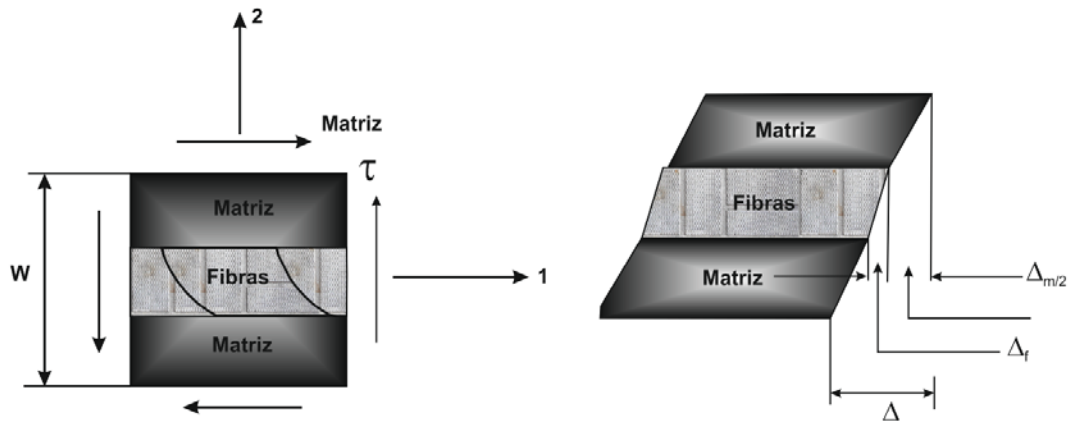


Figura 87. Material compuesto con fibras dispuestas unidireccionalmente, que se somete a una carga cortante paralela a las fibras.

En caso de igual tensión el desplazamiento total del material compuesto Δ se puede descomponer en términos de desplazamiento de los componentes como:

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_m.$$

O bien:

$$\Delta = V_f \cdot t \cdot \gamma_t + V_m \cdot t \cdot \gamma_m.$$

De las ecuaciones anteriores se deduce que:

$$\gamma = \frac{\Delta}{t} = V_f \cdot \gamma_t + V_m \cdot \gamma_m.$$

Y teniendo en cuenta que.

$$\frac{\tau}{G_{12}} = \frac{\tau}{G_m} \cdot V_m + \frac{\tau}{G_f} \cdot V_f.$$

De donde:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_m}{G_m} + \frac{V_f}{G_f}.$$

Operando:

$$G_{12} = \frac{G_m \cdot G_f}{G_m \cdot V_f + G_f \cdot V_m} = \frac{G_m \cdot G_f}{G_m \cdot V_f + G_f (1 - V_f)}$$

Las ecuaciones de Halpin – Tsai, también se aplican para el cálculo del módulo de rigidez al cortante G_{12} , según las ecuaciones:

$$G_m = \frac{E_m}{2 (1 + \mu_m)}$$

$$G_f = \frac{E_f}{2 (1 + \mu_f)}$$

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f}$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{G_f}{G_m}\right) - 1}{\left(\frac{G_f}{G_m}\right) + \xi}$$

Para este caso, se asigna un valor de $\xi = 1$ si se está trabajando con fibras de sección transversal circular o cuadrada. De igual manera, si la sección transversal de las fibras es rectangular, se aplica la ecuación $\log \xi = 1.73 \cdot \log (a/b)$ para obtener valores con alta precisión.

Análisis entre tensiones y deformaciones en las direcciones locales

De forma paramétrica se puede expresar la deformación global en la dirección longitudinal a través de una expresión con dos términos:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{21} \cdot \frac{\sigma_2}{E_2}$$

Las tensiones que provocan deformaciones en la dirección longitudinal son respectivamente:

σ_1 : Produce un alargamiento en la dirección local 1.

σ_2 : Produce una compresión, ya que un alargamiento en la dirección transversal produce compresión.

De tal forma que la deformación total longitudinal en la dirección 1 valdrá:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{21} \frac{\sigma_2}{E_2}.$$

De forma análoga se realiza la evaluación de la deformación total en la dirección 2. En esta dirección hay dos tensiones que provocan deformación.

La tensión dos (σ_2) que provoca una deformación en dicha dirección y la tensión en la dirección uno (σ_1) que va a provocar una compresión. Así la deformación total en la dirección 2 valdrá:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{12} \frac{\sigma_1}{E_1}.$$

La deformación paramétrica de la tensión de cortadura (γ_{12}) se expresa mediante la siguiente expresión matemática:

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}.$$

Las tres expresiones que se acaban de analizar corresponden a las expresiones paramétricas. Desde el punto de vista de cálculo es conveniente expresar estas ecuaciones de forma matricial en forma de matriz de tres por tres cuyos términos adoptan los siguientes valores:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}.$$

Donde:

$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$ es el vector de deformaciones.

$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$ es el vector de tensiones.

Los valores de la matriz estarán formados por los siguientes parámetros:

- En la primera fila aparece el término que multiplica a σ_1 y vale $\frac{1}{E_1}$.
- En la segunda columna aparece el término que multiplica a σ_2 , cuyo valor es $-\frac{\mu_{21}}{E_2}$.
- El término que multiplica a la tensión de cortadura no aparece porque es nulo en dicha expresión.
- En la segunda fila aparece el valor que multiplica a σ_2 y es $-\frac{\mu_{12}}{E_1}$.
- El valor que multiplica a σ_1 será $\frac{1}{E_2}$.
- El término que multiplica a tensión de cortadura es nulo por no aparecer en dicha expresión.
- La tercera fila vendrá definida solamente por el término que multiplica a la tensión de cizalla y vale $\frac{1}{G_{12}}$.

Mientras que los otros parámetros serán nulos ya que no multiplican ni a σ_1 ni a σ_2 . La expresión matricial se puede simplificar:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}.$$

A esta matriz se la conoce con el nombre de matriz de flexibilidad.

El vector de deformaciones se representa por:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}.$$

El vector de tensiones por:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}.$$

Quedando la siguiente expresión.

$$[\varepsilon] = [S] \cdot [\sigma].$$

La inversa de la matriz de flexibilidad se denomina matriz de rigidez cuyo valor se representa por [Q].

Quedando la siguiente expresión:

$$[\sigma] = [Q] \cdot [\varepsilon].$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}.$$

Las relaciones entre las matrices de flexibilidad y de rigidez vienen relacionadas por la siguiente expresión:

$$[Q] = [S]^{-1}.$$

Donde como ya se ha indicado $[S]^{-1}$ = Matriz inversa de [S].

Resumen de las propiedades mecánicas en las direcciones 1 – 2

Módulo de elasticidad en la dirección longitudinal

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m.$$

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f).$$

Módulo de elasticidad en la dirección transversal

$$E_2 = E_m \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right).$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + \xi}.$$

$$\xi = 2.$$

Módulo de cortadura

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f}.$$

$$G_m = \frac{E_m}{2 (1 + \mu_m)}.$$

$$G_f = \frac{E_f}{2 (1 + \mu_f)}.$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{G_f}{G_m} \right) - 1}{\left(\frac{G_f}{G_m} \right) + \xi}.$$

$$\xi = 1.$$

Coefficientes de poisson

$$\mu_{12} = \mu_f \cdot V_f + \mu_m \cdot V_m.$$

$$\mu_{12} = \mu_f \cdot V_f + \mu_m (1 - V_f).$$

$$\mu_{21} = \mu_{12} \left(\frac{E_2}{E_1} \right).$$

Todas estas expresiones anteriores dependen únicamente de las características de los materiales.

Matriz de flexibilidad

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}.$$

Matriz de rigidez

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}.$$

Relación entre matrices

$$[Q] = [S]^{-1}.$$

Comportamiento mecánico en las direcciones globales

La utilización de los materiales compuestos se utiliza cada vez más en aplicaciones altamente tecnológicas. Estas aplicaciones requieren una optimización de las tareas de diseño y de cálculo en el sector de la ingeniería. Por lo que se necesita la utilización de modelos que permitan la estimación de las características de los materiales compuestos en base a los materiales que lo integran. Debido a que un material compuesto está formado por un laminado para la consecución de estructuras isotrópicas con aplicaciones en ingeniería. Estos modelos permiten la estimación de las características mecánicas del conjunto laminado.

El procedimiento que se utiliza para calcular las características mecánicas de un laminado es en primer lugar el análisis de una lámina de material compuesto en sus direcciones locales (1 – 2).

En segundo lugar, en base a las características obtenidas por las direcciones locales se podrá realizar el análisis de la lámina en las direcciones globales (X – Y).

Cuando las fibras de la lámina forman un determinado ángulo con las direcciones globales (X – Y).

Planteamiento del problema

Se parte de una lámina de material compuesto reforzado con fibra larga unidireccional Figura 88.

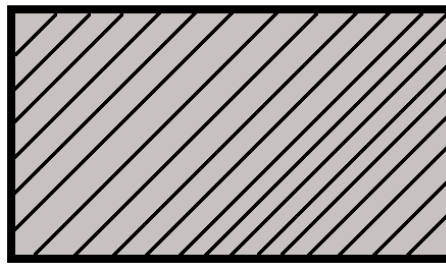


Figura 88. Material compuesto reforzado con fibra larga unidireccional.

Las fibras van a formar un ángulo determinado θ con las direcciones principales (X – Y).

Se pueden distinguir en una lámina dos direcciones distintas.

Las direcciones globales definidas o determinadas por los ejes principales Figura 89.

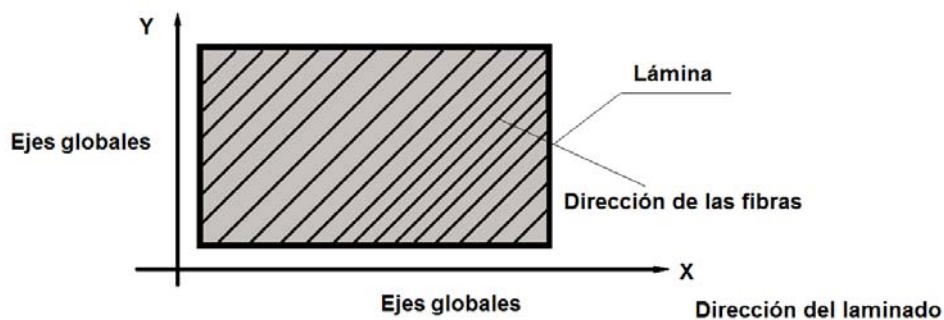


Figura 89. Direcciones globales de una lámina.

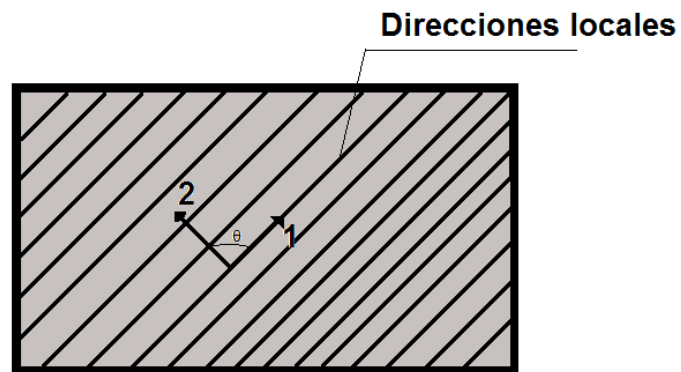


Figura 90. Direcciones locales de una lámina.

Las direcciones locales (1 – 2) que coinciden con la dirección de las fibras en la dirección perpendicular o normal. Donde el índice numérico 1 indica la longitud longitudinal o de la fibra, y la longitud perpendicular a la fibra o transversal vendrá definida por el índice numérico 2.

Se parte de la hipótesis que la lámina se encuentra sometida a un estado tensional Figura 91.

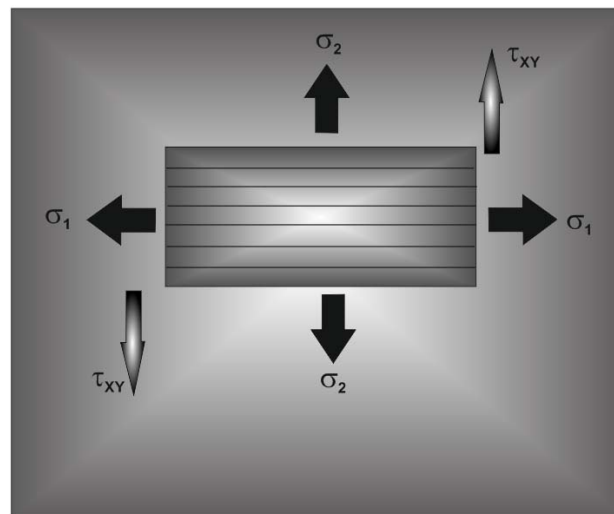


Figura 91. Estado tensional de la lámina.

- En el eje de las X se encuentra aplicada una tensión de tracción principal denominada σ_1 ; tensión longitudinal.
- En el eje de las Y se encuentra aplicada una tensión de tracción principal denominada σ_2 : tensión transversal en la dirección perpendicular a las fibras.
- Una tensión de cortadura o de cizalla aplicada en la dirección X – Y, denominada τ_{xy} .

Información disponible

Se parte la hipótesis de cálculo de que son conocidas las características tanto de la matriz como del refuerzo y la fracción de volumen del refuerzo.

Las características de la matriz vienen definidas por una terna de parámetros:

- Módulo de tracción: E_m .
- Módulo de cortadura: G_m
- Coeficiente de Poisson: μ_m .

Al igual que las características de las fibras de refuerzo:

- Módulo de tracción: E_f .
- Módulo de cortadura: G_f
- Coeficiente de Poisson: μ_f .

La fracción volumétrica de fibra viene designada por: V_f .

También es conocido el valor del ángulo θ con las direcciones principales (X – Y).

Y la geometría de la lámina

Con esta información, se pretende obtener las características mecánicas en las direcciones (X – Y) y las relaciones de $\sigma - \varepsilon$ entre tensión y deformación en estas direcciones.

Comportamiento mecánico en las direcciones locales

Partiendo de la geometría de la lámina formada por una matriz y una fibra de refuerzo larga que forma un determinado ángulo con la dirección (X – Y) y con el estado tensional descrito anteriormente

Recuerde que en las direcciones locales (1—2), (1) en la dirección de las fibras y (2) perpendicular a la dirección de las fibras.

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m.$$

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f).$$

Módulo de elasticidad en la dirección transversal

$$E_2 = E_m \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right).$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + \xi}.$$

$$\xi = 2.$$

Módulo de cortadura

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f}.$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{G_f}{G_m} \right) - 1}{\left(\frac{G_f}{G_m} \right) + \xi}.$$

$$G_m = \frac{E_m}{2 (1 + \mu_m)}.$$

$$G_f = \frac{E_f}{2 (1 + \mu_f)}.$$

$$\xi = 1.$$

Coefficientes de poisson

$$\mu_{12} = \mu_f \cdot V_f + \mu_m \cdot V_m.$$

$$\mu_{12} = \mu_f \cdot V_f + \mu_m (1 - V_f)$$

$$\mu_{21} = \mu_{12} \left(\frac{E_2}{E_1} \right).$$

Relaciones de tensión deformación en las direcciones locales (1-2)

Se va a realizar una relación matricial entre las deformaciones en la dirección (1-2) y las tensiones en la misma dirección.

Teniendo en cuenta que las deformaciones en esta dirección son un vector columna formado por tres términos:

$$[\varepsilon_{12}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}.$$

Donde:

- ε_1 : Deformación en la dirección longitudinal.
- ε_2 : Deformación en la dirección transversal.
- γ_{12} : Deformación de cortadura.

Mientras que la matriz de tensiones es un vector columna formado por los siguientes términos:

$$[\sigma_{12}] = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}.$$

Donde:

σ_1 : Tensión longitudinal en la dirección de las fibras.

σ_2 : Tensión transversal o perpendicular a las fibras.

τ_{12} : Tensión de cortadura.

La matriz que relaciona a ambos vectores columna es la matriz de flexibilidad [S].

$$[\varepsilon_{12}] = [S] \cdot [\sigma_{12}].$$

La matriz de flexibilidad adquiere los siguientes términos:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}.$$

Estos términos se obtienen a través de las características mecánicas calculadas anteriormente.

Esta expresión que relaciona tensiones con deformaciones se puede mostrar de forma inversa. De tal forma que las tensiones en las direcciones locales (1 – 2) son iguales a una matriz de rigidez [Q] por las deformaciones en la dirección local (1 – 2).

$$[\sigma_{12}] = [Q] \cdot [\varepsilon_{12}].$$

La relación entre la matriz de flexibilidad y la matriz de rigidez viene determinada por la siguiente expresión:

$$[Q] = [S]^{-1}.$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}.$$

Una vez se disponen de las características mecánicas en las direcciones locales se puede pasar a proceder el cálculo de las relaciones tensión – deformación en las direcciones globales (X – Y).

9.4.9 Relaciones tensión – deformación en las direcciones globales

Hay que convertir las tensiones de las direcciones (1 – 2) y deformaciones en la misma dirección a tensiones en las direcciones (X – Y).

Para esta conversión se van a utilizar relaciones de transformación trigonométricas. Estableciendo que las tensiones en la dirección (1 – 2).serán igual a una matriz de transformación de tensiones $[T_\sigma]$ por el vector de tensiones $[\sigma_{xy}]$.

Es decir:

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] \cdot [\sigma_{xy}].$$

Mientras que las deformaciones en la dirección (1 – 2).son iguales a la matriz de transformación de deformaciones $[T_\varepsilon]$ por el vector de deformación $[\varepsilon_{xy}]$.

$$[\varepsilon_{12}] = [T_\varepsilon] \cdot [\varepsilon_{xy}].$$

Estas expresiones anteriores permiten la relación entre tensiones y deformaciones en diversas direcciones. Es decir, en la dirección (1 – 2) y en la dirección (X – Y).

La matriz de transformación es una matriz de 3 x 3 (filas, columnas) de tensiones que engloba las siguientes relaciones trigonométricas:

$$[T_{\sigma}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix}.$$

La matriz de transformación es también una matriz de 3 x 3 de deformaciones que engloba las siguientes relaciones trigonométricas:

$$[T_{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \sin \theta \cos \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix}.$$

Ambas matrices de transformación de tensiones y deformaciones dependen del valor del ángulo que forman las fibras con la dirección X.

Partiendo con la expresión que relaciona las deformaciones en la dirección (1 – 2) con (X – Y), se puede expresar de forma inversa con la siguiente expresión matricial:

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_{\varepsilon}]^{-1} \cdot [\varepsilon_{12}].$$

Donde:

- $[T_{\varepsilon}]^{-1}$: A la inversa de la Matriz de transformación de deformación.

Teniendo en cuenta que las deformaciones en la dirección (1 – 2) es $[\varepsilon_{12}] = [S] \cdot [\sigma_{12}]$, sustituyendo en la nueva ecuación, se obtiene que $[\varepsilon_{xy}] = [T_{\varepsilon}]^{-1} \cdot [S] \cdot [\sigma_{12}]$.

Las tensiones en la dirección $[\sigma_{12}] = [T_{\sigma}] \cdot [\sigma_{xy}]$ por lo tanto sustituyendo:

A esta expresión se le denomina matriz de flexibilidad global.

Y es igual al producto de tres matrices, es decir al producto de la inversa de la matriz de deformaciones por la matriz de flexibilidad local y por la matriz de transformación de tensiones.

$$[T_{\varepsilon}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ 2 \sin \theta \cos \theta & -2 \sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix}.$$

La matriz de flexibilidad global se representa por los siguientes parámetros:

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\mu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\mu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & \overline{S}_{16} \\ \overline{S}_{21} & \overline{S}_{22} & \overline{S}_{26} \\ \overline{S}_{16} & \overline{S}_{26} & \overline{S}_{66} \end{bmatrix}.$$

Por lo tanto, la matriz de flexibilidad global se puede expresar de la siguiente forma:

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} \cdot [S] \cdot [\sigma_{12}].$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ 2 \sin \theta \cos \theta & -2 \sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}.$$

A este término del producto de 3 matrices se le denomina como matriz de rigidez global y su simbología es:

$$\overline{[S]}.$$

Y su valor en forma matricial vale:

$$\overline{[S]} = [T_\varepsilon]^{-1} \cdot [S] \cdot [T_\sigma].$$

Se la denomina matriz de flexibilidad global por contener el ángulo que forman las fibras con la dirección global.

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ 2 \sin \theta \cos \theta & -2 \sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}.$$

Recopilación de las expresiones utilizadas en el cálculo de las matrices de rigidez y flexibilidad globales

Otras expresiones para poder determinar la matriz de flexibilidad global en función del valor del ángulo θ son:

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & \overline{S}_{16} \\ \overline{S}_{21} & \overline{S}_{22} & \overline{S}_{26} \\ \overline{S}_{16} & \overline{S}_{26} & \overline{S}_{66} \end{bmatrix}.$$

$$\overline{S}_{11} = S_{11} \cdot \cos^4 \theta + (2 S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{22} \cdot \sin^4 \theta.$$

$$\overline{S}_{12} = (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta).$$

$$\overline{S}_{22} = S_{11} \cdot \sin^4 \theta + (2 \cdot S_{12} + S_{66})(\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta) + S_{22} \cdot \cos^4 \theta.$$

$$\overline{S}_{16} = (2 \cdot S_{11} - 2 \cdot S_{12} - S_{66}) (\sin \theta \cdot \cos^3 \theta) + (2 \cdot S_{12} - 2 \cdot S_{22} + S_{66}) (\sin^3 \theta \cdot \cos \theta).$$

$$\overline{S}_{26} = (2 \cdot S_{11} - 2 \cdot S_{12} - S_{66})(\sin^3 \theta \cdot \cos \theta) + (2 \cdot S_{12} - 2 \cdot S_{22} + S_{66})(\sin \theta \cdot \cos^3 \theta).$$

$$\overline{S}_{66} = 2(2S_{11} + 2 S_{22} - 4 S_{12} - S_{66}) (\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta) + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta).$$

Esta misma ecuación se puede expresar de forma inversa, de tal forma que la matriz de tensiones en la dirección (X – Y) es igual a la matriz de rigidez global por la matriz de deformaciones en la dirección (X – Y)

$$[\overline{Q}] = [T_{\sigma}]^{-1} \cdot [Q] \cdot [T_{\epsilon}].$$

Donde:

$[T_{\sigma}]^{-1}$: La inversa de la matriz de transformación de tensiones.

$$[T_{\sigma}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix}.$$

A su vez la matriz de rigidez global está formada por los siguientes términos:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}.$$

Donde:

$\bar{Q}_{11}, \bar{Q}_{12}, \bar{Q}_{22}$ y \bar{Q}_{66} Vienen determinadas por las siguientes expresiones:

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cdot C^4 + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) S^2 \cdot C^2 + Q_{22} \cdot S^4.$$

$$\bar{Q}_{12} = \bar{Q}_{21} = (Q_{11} + Q_{22} - 4 Q_{66}) S^2 \cdot C^2 + Q_{12} (S^4 + C^4).$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} \cdot S^4 + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) S^2 \cdot C^2 + Q_{22} \cdot C^4.$$

$$\bar{Q}_{16} = \bar{Q}_{61} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) S \cdot C^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) S^3 \cdot C.$$

$$\bar{Q}_{26} = \bar{Q}_{62} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) C \cdot S^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) S \cdot C^3.$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2 Q_{12} - 2 Q_{66}) S^2 \cdot C^2 + Q_{66} (S^4 + C^4).$$

Y:

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}.$$

Donde: Q_{11}, Q_{12}, Q_{22} y Q_{66} vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}.$$

$$Q_{12} = \frac{\mu_{12} E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} = \frac{\mu_{21} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}.$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}.$$

$$Q_{66} = G_{12}.$$

Casos particulares

En el caso de que el ángulo de la dirección de las fibras sea de 0° :

$$[Q] = [\bar{Q}].$$

En el supuesto que el ángulo de las fibras forme 90° :

$$[Q]_{0^\circ} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_{0^\circ}.$$

Para obtener de forma directa la matriz $[\bar{Q}]$ a 90° . Bastará con intercambiar el término Q_{22} de la matriz de 0° por el término Q_{11} de la misma matriz.

$$[Q]_{90^\circ} = \begin{bmatrix} Q_{22} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_{90^\circ}.$$

Son muy importantes los laminados $[0/\pm 45]$. Por lo que, en el cálculo hay que incorporar láminas orientadas Figura 92.

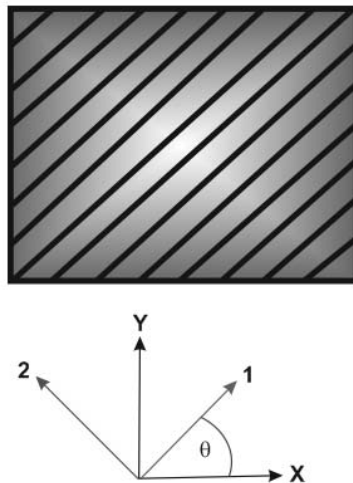


Figura 92. Laminado a 45° y orientación en los ejes globales.

Fórmulas de aplicación para obtener los valores de los componentes de la matriz de rigidez global.

$$\bar{Q}_{21} = \bar{Q}_{12} = C^2 \cdot S^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4 Q_{66}) + (C^4 + S^4) \cdot Q_{12} \cdot$$

$$\bar{Q}_{22} = S^4 \cdot Q_{11} + 2 \cdot C^2 \cdot S^2 (Q_{12} + 2 Q_{66}) + C^4 \cdot Q_{22} \cdot$$

$$\bar{Q}_{16} = C^3 \cdot S (Q_{11} - Q_{12}) + C \cdot S^3 (Q_{12} - Q_{22}) - 2 \cdot C \cdot S (C^2 - S^2) \cdot Q_{66} \cdot$$

$$\bar{Q}_{26} = C \cdot S^3 (Q_{11} - Q_{12}) + C^3 \cdot S (Q_{12} - Q_{22}) - 2 \cdot C \cdot S (C^2 - S^2) \cdot Q_{66} \cdot$$

$$\bar{Q}_{66} = C^2 \cdot S^2 (Q_{11} + Q_{22} - 2 Q_{12} - 2 Q_{66}) + (C^4 + S^4) \cdot Q_{66} \cdot$$

Donde:

- $C = \cos \theta$.
- $S = \sin \theta$.

Se aconseja la utilización de la matriz de Reuter para la obtención de la matriz de rigidez global, empleando el siguiente producto matricial:

$$[\bar{Q}] = [T_{\sigma}] \cdot^{-1} [Q] \cdot [R] \cdot [T_{\sigma}] \cdot [R]^{-1}.$$

Donde:

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

$$[R]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

Expresión para la obtención de la matriz de rigidez global operando con todos los términos de las distintas matrices que lo conforman:

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} c^2 \theta & s^2 \theta & -2 s \theta c \theta \\ s^2 \theta & c^2 \theta & 2 s \theta c \theta \\ s \theta c s \theta & -s \theta c \theta & (c^2 \theta - s^2 \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} c^2 \theta & s^2 \theta & 2 s \theta c s \theta \\ s^2 \theta & c^2 \theta & -2 s \theta c s \theta \\ -s \theta c \theta & s \theta c s \theta & (c s^2 \theta - s^2 \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

Donde:

- S: seno del ángulo θ .
- C: Coseno del ángulo θ .

Constantes ingenieriles globales

Cuando el ángulo de las fibras coincide con el ángulo Θ de las direcciones globales o principales XY.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & 0 \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{bmatrix}.$$

Se tiene que:

$$E_x = \frac{1}{\bar{S}_{11}}.$$

$$E_y = \frac{1}{\bar{S}_{22}}.$$

$$G_{xy} = \frac{1}{\bar{S}_{66}}.$$

$$\mu_{xy} = -E_x \bar{S}_{12}.$$

$$\mu_{yx} = -E_y \bar{S}_{12}.$$

Cuando las fibras forman un determinado ángulo Θ con las direcciones globales o principales XY.

$$E_x = \frac{1}{\bar{S}_{11}} = \frac{E_1}{C^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\mu_{12}\right) C^2 \cdot S^2 + \frac{E_1}{E_2} S^4}.$$

$$E_y = \frac{1}{\bar{S}_{22}} = \frac{E_2}{C^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\mu_{12}\right) C^2 \cdot S^2 + \frac{E_2}{E_1} S^4}.$$

$$G_{xy} = \frac{1}{\bar{S}_{66}} = \frac{G_{12}}{C^4 + S^4 + 2\left(2\frac{G_{12}}{E_1}(1 + 2\mu_{12}) + 2\frac{G_{12}}{E_2} - 1\right) C^2 \cdot S^2}.$$

$$\mu_{XY} = -\frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{22}} = \frac{\mu_{12} (C^4 + S^4) - \left(1 + \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_{12}}\right) C^2 \cdot S^2}{C^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2 \mu_{12}\right) C^2 \cdot S^2 + \frac{E_1}{E_2} S^4}.$$

$$\mu_{YX} = -\frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{22}} = -\frac{\bar{S}_{21}}{\bar{S}_{22}} = \frac{\mu_{21} (C^4 + S^4) - \left(1 + \frac{E_2}{E_1} - \frac{E_2}{G_{12}}\right) C^2 \cdot S^2}{C^4 + \left(\frac{E_2}{G_{12}} - 2 \mu_{21}\right) C^2 \cdot S^2 + \frac{E_2}{E_1} S^4}.$$

Donde:

- C: Coseno θ .
- S: Seno θ .

9.4.10 Análisis de laminados

Cada una de láminas que componen el laminado se considera como un material cuasi – homogéneo y ortótropo.

Las láminas tienen un comportamiento elástico lineal hasta producirse su rotura.

Las láminas se encuentran perfectamente unidas entre sí.

El laminado y todas las láminas que lo conforman se encuentran en un estado de tensión plana Figura 93.

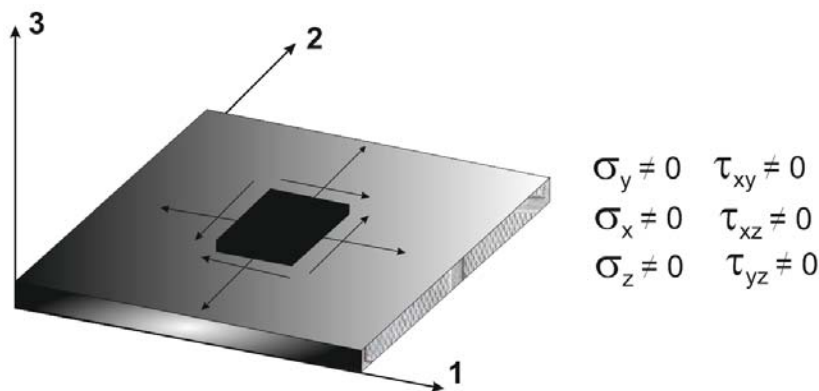


Figura 93. Tensión plana de los laminados.

Hay una serie de situaciones donde la hipótesis de la tensión plana no se puede aplicar al laminado, Figuras 94 - 95.

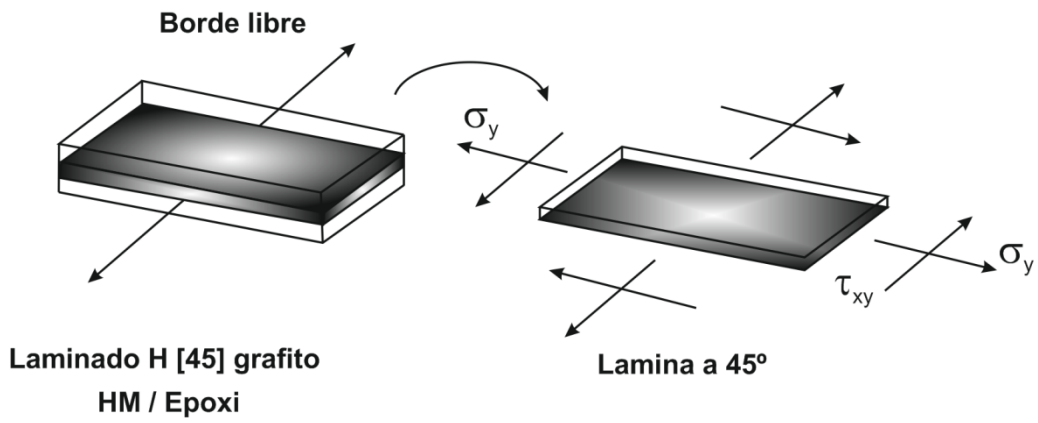


Figura 94. Situación donde no se puede aplicar la hipótesis de tensión plana (Borde libre).

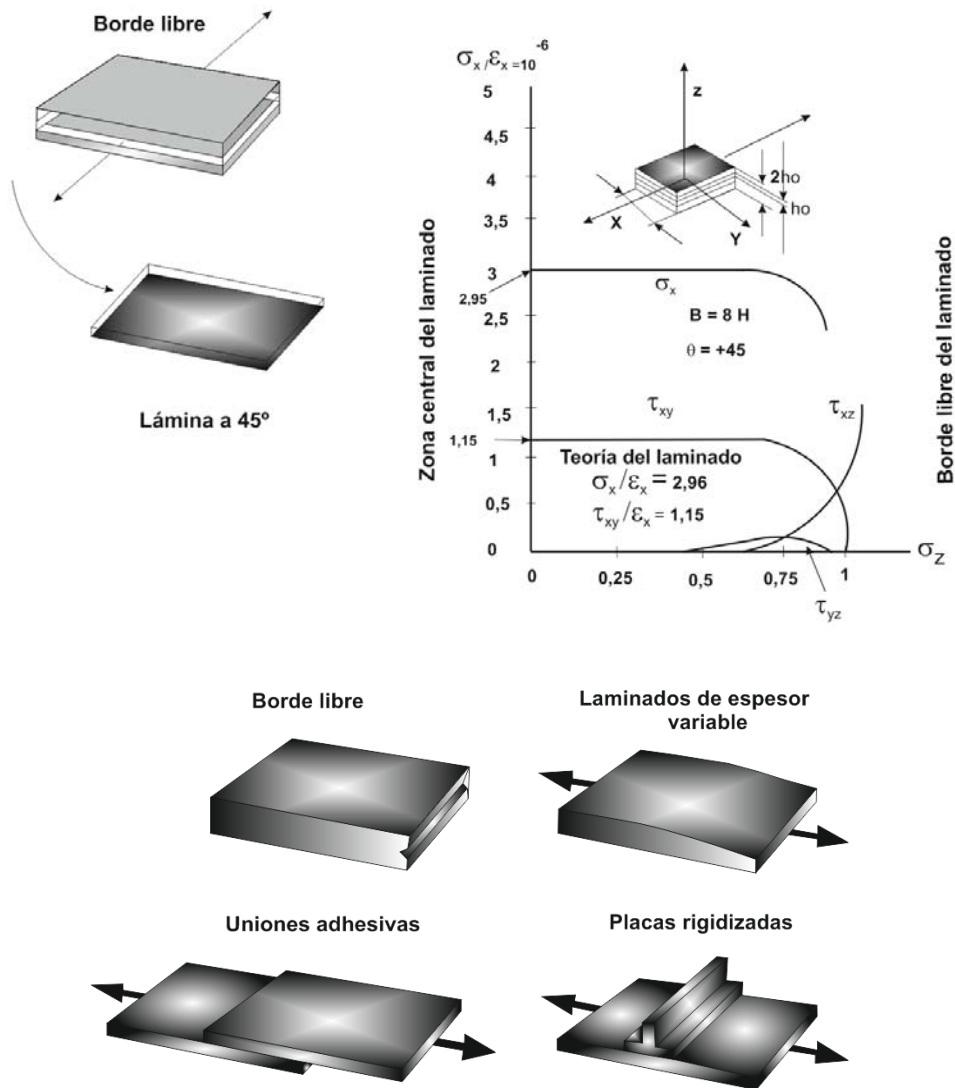


Figura 95. Otras situaciones donde no se puede aplicar la hipótesis de tensión plana.

Se debe de cumplir con que los desplazamientos y sus derivadas sean pequeños.

Se verifica la hipótesis de Kirchhoff:

Una sección normal al plano medio del laminado permanece plana y normal a la superficie media deformada.

$$\gamma_{yz} = 0.$$

$$\gamma_{xz} = 0.$$

El laminado no cambia de espesor:

$$\varepsilon_z = 0.$$

Es posible expresar el desplazamiento de cada punto del laminado en función de los desplazamientos del plano medio y de las rotaciones de la sección del laminado.

Definición de los ejes del laminado

En la Figura 96 se pone de manifiesto los ejes del laminado.

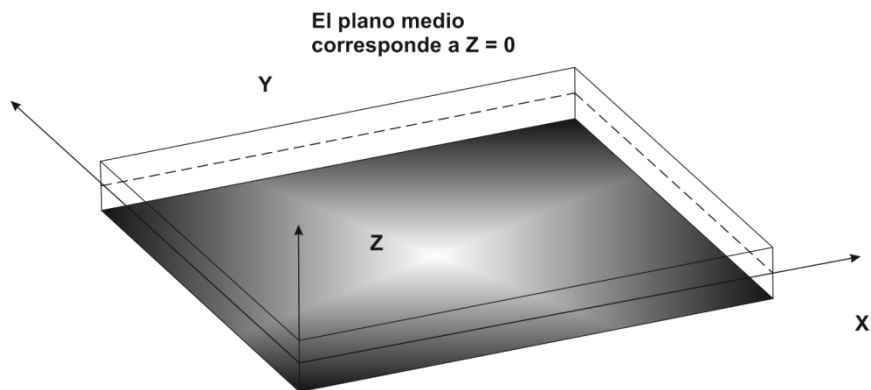


Figura 96. Definición de los ejes del laminado.

Campo de desplazamiento y deformación

En la Figura 97 se muestra el desplazamiento y deformación respecto al plano medio del laminado.

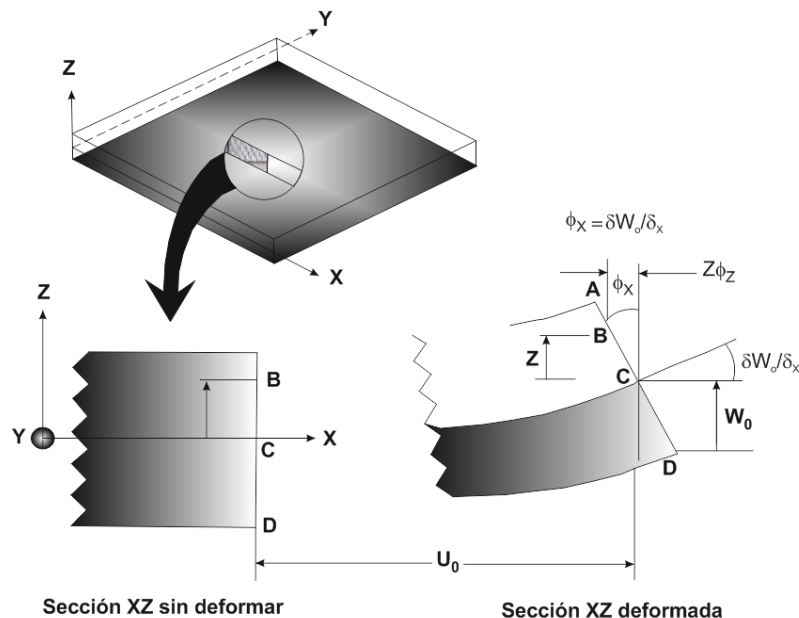


Figura 97. Secciones sin deformar y deformadas respecto al plano medio.

9.4.11 Características mecánicas del modelo de un laminado

Hay una gran cantidad de materiales compuestos formados por estructuras laminadas con la finalidad de conseguir un comportamiento isotrópico (mismo comportamiento en todas las direcciones). Los materiales con comportamiento isotrópico son los que realmente tiene un interés elevado en el campo de la ingeniería.

Basándose en los conceptos anteriores es necesario conocer las características mecánicas de todo el conjunto laminado, formado por varias láminas con distintas matrices, fibras, ángulos, etc.

Para la obtención de las características mecánicas del laminado, se llevará a cabo primero el análisis en las direcciones locales o (1 – 2), que aportarán las bases para la obtención del análisis de las direcciones globales (X – Y) de una sola lámina. Y en base al análisis de esta lámina se podrá realizar el análisis global de todas las láminas del material compuesto o laminado.

Para llevar a cabo el análisis se va a partir de un material estructural con las condiciones de estar formado por distintas láminas y sometido a distintas fuerzas Figura 98.

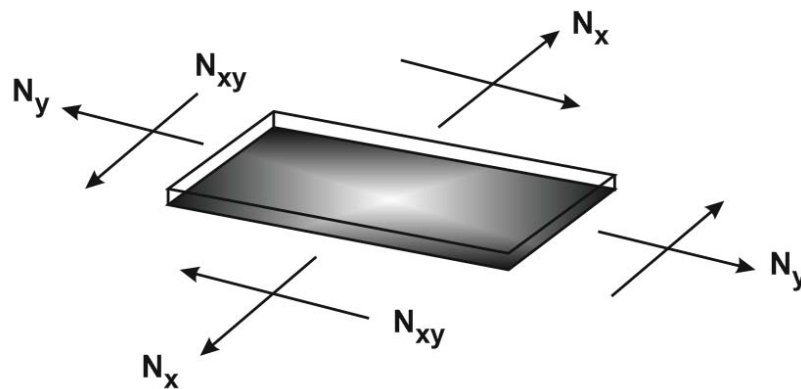


Figura 98. Designación de los esfuerzos a los que se encuentra sometido la lámina.

- Los esfuerzos, N_x, N_y corresponden a los esfuerzos longitudinales.
- Los esfuerzos N_{xy} corresponden a los esfuerzos de cortadura.

Ambos esfuerzos se encuentran aplicados en las direcciones globales (X – Y).

A su vez al material estructural también se le puede someter a momentos aplicados sobre el eje X, Y en los ejes YX e XY Figura 99.

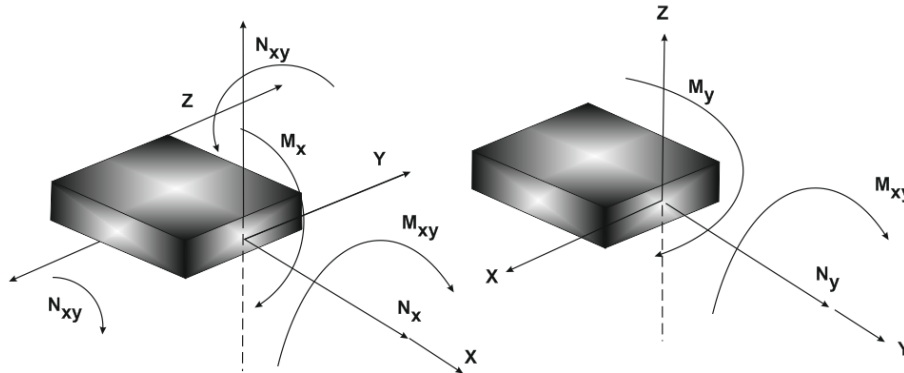


Figura 99. Designación de los esfuerzos a los que se encuentra sometido la lámina.

Teniendo en cuenta que el material está compuesto por una estructura laminar donde cada una de las láminas se encuentra ubicada en la posición que aparece en la Figura 100.

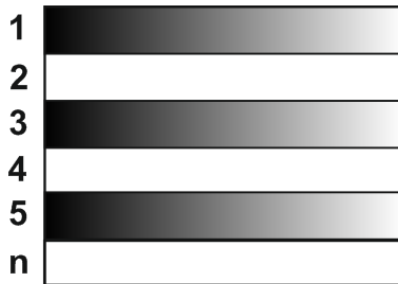


Figura 100. Posicionamiento de las láminas en el laminado.

La posición de cada lámina: Lámina 1, 2, 3 hasta la N, vendrá determinada por su espesor Figura 101.

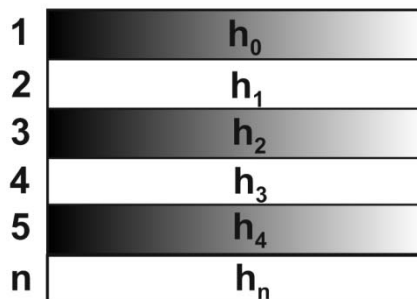


Figura 101. Disposición de la ubicación de cada lámina en función del espesor de la misma.

En este sentido el espesor de cada una de las láminas se puede representar a través de la siguiente expresión matemática:

$$t_i = h_i - h_{i-1} .$$

Cada una de las láminas constituyentes del laminado, vendrá determinada por sus características mecánicas y geométricas.

Dentro de las características mecánicas se encontrarán las de la matriz y las del refuerzo:

- Módulo de tracción.
- Módulo de cortadura.
- Módulo de poisson.

A su vez cada lámina va a tener una tipología geométrica, que se encontrará relacionada con el refuerzo:

- Cantidad de fibras.
- Ángulo de orientación con respecto al eje de la fibra.

A partir de las premisas del estado tensional y de la geometría de la lámina se obtendrán las características mecánicas en las direcciones globales (denominadas constantes ingenieriles) y las relaciones entre las tensiones y las deformaciones en dichas direcciones principales para todo el material compuesto, no solamente para una lámina.

Partiendo de la información mecánica de cada una de las capas y geométrica se puede observar en la Tabla 26, los parámetros de un laminado...

Tabla 25. Recopilación de los parámetros de un laminado.

Característica mecánicas Fibra	
Módulo de elasticidad de la fibra	E_f
Módulo de cortadura de la fibra	G_f
Coefficiente de poisson de la fibra	μ_f
Características de la matriz	
Módulo de elasticidad de la matriz	E_m
Módulo de cortadura de la matriz	G_m
Coefficiente de poisson de la matriz	μ_m
Características geométricas	
Fracción volumétrica de fibra	V_f
Ángulo de orientación sobre eje fibras	Ángulo θ

9.4.12 Cálculo de tensiones y deformaciones

Si se consideran las direcciones principales o del plano X – Y, así como la dirección perpendicular dirección Z Figura 102.

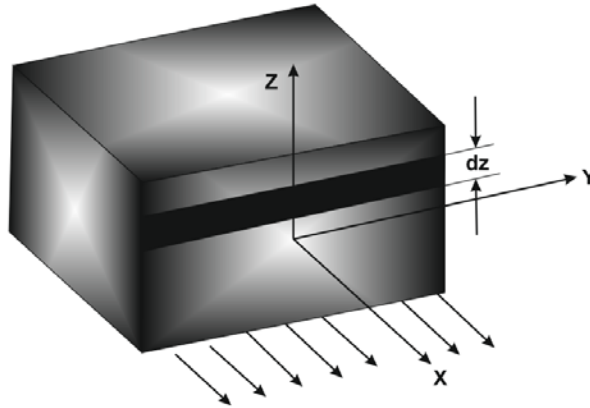


Figura 102. Tensiones y deformaciones

Y si sobre el laminado de la Figura 102 se considera un elemento diferencial en la dirección del eje Z o de las alturas y se aplicada una tensión sobre dicho elemento diferencial en el plano perpendicular eje X, se obtiene:

La fuerza total que se aplica en la dirección X es la resultante de la integral de la tensión en la dirección X por el diferencial de Z que se está considerando.

$$N_x = \int \sigma_x dz .$$

La expresión anterior se puede mostrar en forma matricial de tal forma que la matriz de fuerzas es igual a la integral de la matriz de tensiones por el diferencial de Z:

$$[N] = \int [\sigma] dz .$$

De forma semejante, se puede estimar la matriz de los momentos totales que actúan sobre el composite como la integral del producto de la matriz de tensiones por Z y por diferencial de Z:

$$[M] = \int [\sigma] Z dz .$$

Por otra parte, partiendo del análisis de las deformaciones de un material compuesto se deduce que la deformación a una determinada altura Z en un composite de un laminado consta de dos componentes:

$$\varepsilon (Z) = \varepsilon + z c .$$

Donde:

- ε : Componente planar que representa la deformación en el plano (estiramiento o compresión).
- c : Curvatura debida al equilibrio de las distintas láminas del material compuesto.

La curvatura es función de la altura. Y se representa por el producto:

$$z . c$$

Donde:

- z : Representa a la altura
- c : la curvatura.

Del análisis del comportamiento de la lámina por la ley de Hook se deriva que:

$$\sigma_{(Z)} = [\bar{Q}] . [\varepsilon] + [\bar{Q}] . z . [c] .$$

Teniendo en cuenta que la deformación consta de los dos componentes anteriores, es decir $\varepsilon + z c$.

Se define que la tensión que soporta un material compuesto una vez que se ha determinado su altura Z , es igual a la matriz de rigidez global por la matriz de deformación en el plano más el producto de la matriz de rigidez global por z y por la matriz de curvaturas.

Teniendo en cuenta que la matriz de rigidez global a su vez es igual a:

$$[\bar{Q}] = [T_\varepsilon] . [Q] . [T_\sigma]^{-1} .$$

9.4.13 Análisis de fuerzas y deformaciones

Las fuerzas totales que actúan sobre el composite se obtienen del sumatorio de i_1 y del número total de capas I_T de las fuerzas que actúan en cada una de las láminas $[N]_i$:

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{I_T} [N]_i .$$

Teniendo en cuenta que la matriz de las fuerzas es igual al producto de la matriz de tensiones por diferencial de z :

$$[N]_i = \int [\sigma]_i d_z .$$

Sustituyendo esta expresión en la matriz de fuerzas totales:

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{I_T} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma]_i d_z .$$

Sabiendo que la matriz de la tensión a una altura Z es igual al producto de la matriz de rigidez global:

$$[\sigma]_i = \sigma_{(z)} = [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] + [\bar{Q}] \cdot z \cdot [c] .$$

Sustituyendo:

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{I_T} \left\{ [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} d_z + [\bar{Q}] \cdot [c] \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} z d_z \right\}_i .$$

Donde:

- $[\varepsilon]$ = matriz de deformación
- $[\bar{Q}]$: matriz de rigidez global
- $[c]$: matriz de curvaturas.

Resolviendo las integrales:

$$\int_{h_{i-1}}^{h_i} dz = (h_i - h_{i-1}) .$$

$$\int_{h_{i-1}}^{h_i} z dz = \frac{1}{2} (h^2_i - h^2_{i-1})$$

Sustituyendo se obtiene la expresión:

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{I_T} \left\{ [\bar{Q}] [\varepsilon] (h_i - h_{i-1}) + [\bar{Q}] \cdot [c] \frac{1}{2} (h^2_i - h^2_{i-1}) \right\}_i .$$

Simplificando la expresión global de la fuerza total que soporta el laminado de material compuesto:

La matriz de las fuerzas totales que actúa sobre el material compuesto es igual a una matriz [A] por la matriz de deformación $[\varepsilon]$ más una matriz [B] por la matriz de curvatura [c].

Los valores de los términos de las matrices son:

$$[A] = \sum_{i=1}^{i_T} [\bar{Q}]_i (h_i - h_{i-1}).$$

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i_T} [\bar{Q}]_i (h^2_i - h^2_{i-1}).$$

Quedando como:

$$[N]_T = [A] \cdot [\varepsilon] + [B] \cdot [c] .$$

9.4.14 Análisis de momentos

Partiendo de las expresiones vistas en secciones anteriores:

$$\varepsilon(Z) = \varepsilon + z \cdot c.$$

$$\sigma_{(Z)} = [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] + [\bar{Q}] \cdot z \cdot [c].$$

$$[\bar{Q}] = [T_\varepsilon] \cdot [Q] \cdot [T_\sigma]^{-1}.$$

El momento total que actúa en el laminado de un material compuesto es el sumatorio de todos los momentos que actúan sobre cada una de las láminas de las que está constituido.

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{I_T} [M]_i.$$

Teniendo en consideración que el momento es igual al producto de la tensión por z y por diferencial de z :

$$[M]_i = \int [\sigma]_i z d_z.$$

El momento total es igual al sumatorio desde $i = 1$ hasta el número total de láminas I_T de la integral para cada una de las capas entre h_{i-1} y h_i de la matriz de tensiones $[\sigma]$ por z y por diferencial de z (d_z).

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{I_T} [M]_i = \sum_{i=1}^{I_T} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma] z d_z.$$

Sabiendo que la matriz de las tensiones es igual a la matriz de rigidez global por la matriz de deformaciones más la matriz de rigidez global por z y por la matriz de curvatura:

$$[\sigma]_z = [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] + [\bar{Q}] \cdot z \cdot [c].$$

Sustituyendo esta expresión en la expresión del sumatorio total de momentos:

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{I_T} \int_{h_{i-1}}^{h_i} ([\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] \cdot z + [\bar{Q}] \cdot [c] \cdot z^2) d_z.$$

Operando en la expresión anterior se puede obtener una expresión más generalizada, en la que se enuncia que el momento total aplicado sobre un composite es igual al sumatorio desde $i = 1$ hasta I_T de un primer término formado por la matriz de rigidez global por la matriz de deformaciones por la integral entre h_{i-1} hasta h_i de z diferencial d_z más un segundo término formado por el producto de la matriz de rigidez global y la matriz de curvaturas y por la integral entre h_{i-1} y h_i de z cuadrado diferencial de z para cada una de las láminas.

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{I_T} \left\{ [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} z \, d_z + [\bar{Q}] \cdot [c] \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} z^2 \, d_z \right\}_i$$

Resolviendo las integrales:

$$\int_{h_{i-1}}^{h_i} z \, d_z = \frac{1}{2} (h_i^2 - h_{i-1}^2)$$

$$\int_{h_{i-1}}^{h_i} z^2 \, d_z = \frac{1}{3} (h_i^3 - h_{i-1}^3)$$

Sustituyendo se obtiene la expresión:

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{I_T} \left\{ [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] \frac{1}{2} (h_i^2 - h_{i-1}^2) + [\bar{Q}] \cdot [c] \frac{1}{3} (h_i^3 - h_{i-1}^3) \right\}_i$$

La expresión global anterior puede simplificarse de siguiente forma:

$$[M]_T = [B] \cdot [\varepsilon] + [D] \cdot [c]$$

La matriz [B]: Es la matriz de rigidez de acoplamiento y viene dada por la expresión:

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{I_T} [\bar{Q}]_i (h_i^2 - h_{i-1}^2)$$

La matriz [D]: Es la matriz de rigidez a flexión, dada por la siguiente expresión.

$$[D] = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{I_T} [\bar{Q}]_i (h_i^3 - h_{i-1}^3)$$

9.4.15 Matriz de rigidez a flexión (D)

Para realizar el cálculo de cómo se distribuyen los esfuerzos en el interior del laminado se debe de proceder a calcular la rigidez del laminado por medio de las matrices:

[A] [B] [D].

Éstas matrices constituyen la base de la ecuación general de la teoría clásica de placas laminadas, en la que se relacionan las fuerzas en el plano y momentos resultantes por unidad de longitud, con la deformación y la curvatura del plano de referencia del laminado, esto es:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix}.$$

O en forma expandida:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}$$

En concreto, A es la denominada matriz de rigidez plana, B la matriz de acoplamiento y D la matriz de rigidez a flexión. ABD son matrices simétricas cuyas componentes se determinan mediante las siguientes expresiones explícitas:

$$A_{ij} = \sum_{K=1}^N \bar{Q}_{ijk} (h_k - h_{k-1}).$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^N \bar{Q}_{ijk} (h_k^2 - h_{k-1}^2).$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{K=1}^N \bar{Q}_{ijk} (h_k^3 - h_{k-1}^3).$$

En el caso de que el laminado sea simétrico la matriz B será nula. Lo que implicará que el esfuerzo axial no producirá curvaturas en el plano medio del laminado.

La expresión simplificada para este caso vale:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix}.$$

Las deformaciones del plano medio están desacopladas, por lo tanto:

$$\{N\} = [A] \cdot \{\varepsilon^0\}.$$

$$\{M\} = [D] \cdot \{K\}.$$

Las curvaturas del plano medio, vendrán determinadas por la matriz D y por los momentos aplicados.

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{ys} \\ D_{xs} & D_{ys} & D_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix}.$$

9.4.16 Matriz plana normalizada

Si al laminado se le considera constituido por un material homogéneo y ortótropo, que presente un comportamiento elástico, el cual se puede caracterizar en base a las denominadas constantes ingenieriles efectivas o aparentes del laminado. Las expresiones para determinar las constantes elásticas aparentes del laminado se obtienen de manera análoga al procedimiento descrito para la lamina a partir de las componentes de la matriz de flexibilidad, Tabla 27.

No obstante, son necesarias varias indicaciones. El estudio se centra generalmente en las constantes ingenieriles efectivas en el plano de laminados simétricos.

Tabla 26. Constantes ingenieriles globales.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\mu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\mu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{Bmatrix}.$$

Primeramente se define una tensión media σ_x , σ_y y τ_{xy} en el plano del laminado, cuya expresión matemática es:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{H} N_x \equiv \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_x dz.$$

$$\bar{\sigma}_y = \frac{1}{H} N_y \equiv \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_y dz.$$

$$\bar{\tau}_{xy} = \frac{1}{H} N_{xy} \equiv \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \tau_{xy} dz.$$

Donde H, es el espesor del laminado.

Substituyendo el vector de tensión media en la ecuación de la relación constitutiva del laminado simétrico se obtiene:

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_X \\ \bar{\sigma}_Y \\ \bar{\tau}_{XY} \end{Bmatrix} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon^0_X \\ \varepsilon^0_Y \\ \gamma^0_{XY} \end{Bmatrix}.$$

Donde:

$$\frac{1}{H} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} = [A^*].$$

Donde $[A^*]$ es la denominada matriz de rigidez plana normalizada, siendo su inversa de la matriz de flexibilidad plana normalizada $[a^*]$.

$$[a^*] = [A^*]^{-1}.$$

A partir del sentido físico de las componentes de la matriz de flexibilidad, la relación deformación-tensión del laminado puede reescribirse en términos de las constantes ingenieriles efectivas del laminado, es decir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0_X \\ \varepsilon^0_Y \\ \gamma^0_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a^*_{11} & a^*_{12} & a^*_{16} \\ a^*_{21} & a^*_{22} & a^*_{26} \\ a^*_{16} & a^*_{26} & a^*_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_X \\ \bar{\sigma}_Y \\ \bar{\tau}_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{E}_x} & -\frac{\bar{\mu}_{yx}}{\bar{E}_y} & 0 \\ -\frac{\bar{\mu}_{xy}}{\bar{E}_x} & \frac{1}{\bar{E}_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\bar{G}_{xy}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_X \\ \bar{\sigma}_Y \\ \bar{\tau}_{XY} \end{Bmatrix}.$$

O en forma explícita:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{a^*_{11}}.$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{a^*_{22}}.$$

$$\bar{G}_{xy} = \frac{1}{a^*_{66}}.$$

$$\bar{\mu}_{xy} = -\frac{a^*_{12}}{a^*_{11}}.$$

$$\bar{\mu}_{yx} = -\frac{a^*_{12}}{a^*_{22}}.$$

9.4.17 Matriz de acoplamiento [B]

Debido a que los laminados son simétricos será nula. Esto implicará que los esfuerzos axiales aplicados no producirán curvaturas en el plano medio del laminado, es decir:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & 0 \\ 0 & [D] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\varepsilon\}^0 \\ \{k\} \end{Bmatrix}.$$

Las deformaciones del plano medio y las curvaturas del plano medio están desacopladas.

$$\{N\} = [A] \cdot \{\varepsilon\}^0.$$

$$\{M\} = [D] \cdot \{k\}.$$

En el caso de que no haya momentos aplicados, las curvaturas del plano medio resultan nulas:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{ys} \\ D_{xs} & D_{ys} & D_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}.$$

Lo que implica que:

$$\begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

9.4.18 Tipos de laminados

Basándose en el ángulo, en el material y en el espesor de las láminas o antisimetría del laminado, pueden hacerse cero algunos elementos de las tres matrices de rigidez [A], [B] y [D]. Esto es importante para la realización del estudio del laminado, ya que pueden resultar en la reducción del acoplamiento de las fuerzas y los momentos de flexión, las fuerzas normales y cortantes o los momentos de flexión y torsión. Con lo cual no solo simplifica el análisis mecánico de los composites, sino que también ofrece el rendimiento mecánico deseado. Por ejemplo, el análisis de un laminado simétrico se simplifica debido a que la matriz de acoplamiento es nula, es decir $[B] = 0$. Mecánicamente, los laminados no experimentan alabeo en una placa plana debido a los cambios de temperatura durante su procesado.

Laminados simétricos

Un laminado es simétrico si el material, el ángulo y el espesor de las láminas son los mismos por encima y por debajo del plano medio Figura 103.

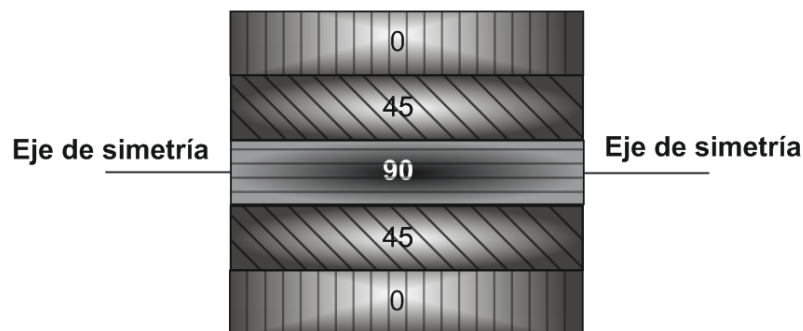


Figura 103. Laminado simétrico.

Su nomenclatura sería:

$$[0/45/\overline{90}/45/0]_s .$$

Para un laminado simétrico a partir de la definición de la matriz [B], se puede demostrar que $[B] = 0$. Así, la ecuación:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} .$$

Se puede desacoplar para dar:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix}.$$

Esto demuestra que los términos de fuerza N y de momento M se encuentran desacoplados. Por lo que, si un laminado se somete sólo a fuerzas, tendrá curvaturas nulas en el plano medio.

Y si un laminado se somete sólo a momentos, tendrá deformaciones nulas en el plano medio. El desacoplo entre la extensión y la flexión en los laminados simétricos hace que el análisis de tales laminados sea más sencillo.

También se previene que una lámina se torsione debido a las cargas térmicas, tales como el enfriamiento desde las temperaturas de procesamiento y las fluctuaciones de temperatura durante su uso, ejemplo, una nave espacial.

Laminado de láminas cruzadas

El laminado de láminas cruzadas (denominado como laminado con capas ortotrópicas) se denomina así cuando solamente utiliza láminas de 0° y 90° Figura 104.

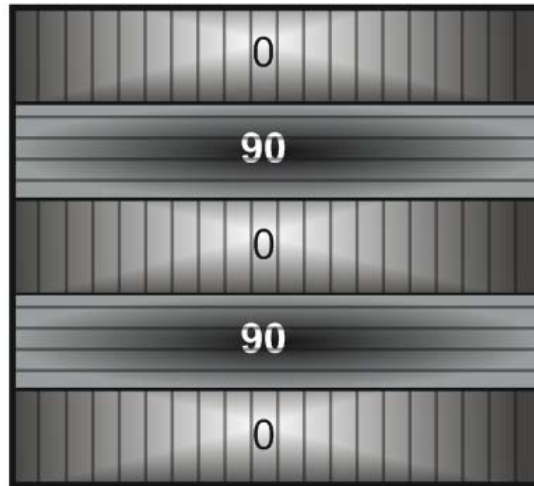


Figura 104. Laminado de láminas cruzadas.

Para los laminados de láminas cruzadas, se tiene que:

- $A_{16} = 0$.
- $A_{26} = 0$.
- $B_{16} = 0$.
- $B_{26} = 0$.
- $D_{16} = 0$.
- $D_{26} = 0$.

Se puede escribir la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}.$$

En este caso, se produce un desacoplamiento entre las fuerzas normales y cortantes, así como entre los momentos de flexión y de torsión.

Si el laminado de láminas cruzadas es también simétrico (laminados cruzados simétricos) entonces, además del desacoplamiento anterior, la matriz de acoplamiento será nula, es decir se tienen que $[B] = 0$ y no se producirá el acoplamiento entre los términos de fuerzas y momentos.

Laminados cruzados simétricos

Considérese una estructura laminar que tiene como ecuación la de un laminado de láminas cruzadas. Consistente en tres láminas de espesor t_1 , con una dirección transversal al eje de las fibras y dos láminas con un espesor t_2 , orientadas en la dirección del eje de las fibras.

La relación de los espesores totales de cada conjunto de láminas es de $\frac{3 t_1}{2 t_2}$.

En el caso general, esta relación puede expresarse como la relación de fracción de volumen de los dos conjuntos de láminas $\frac{V_A}{V_B}$ Figura 105.

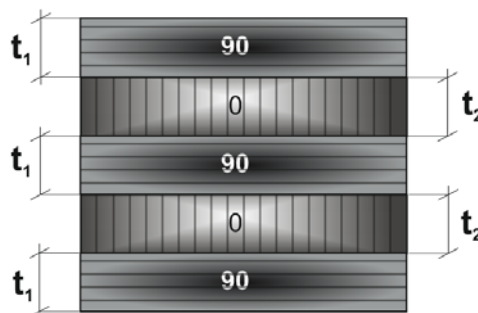


Figura 105. Laminado cruzado simétrico.

El laminado de láminas cruzadas presenta propiedades elásticas ortotrópicas, Figura 106 debido a que tiene tres planos de simetría del material perpendiculares entre sí.

Así las relaciones esfuerzos – deformaciones tendrán como ecuación en los ejes locales:

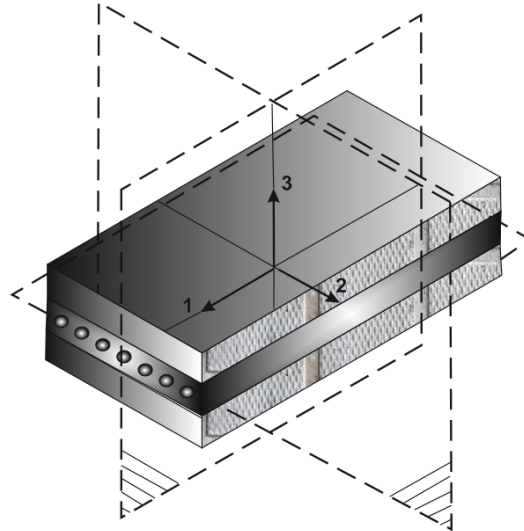


Figura 106. Tres planos ortogonales de simetría del material de un laminado cruzado.

Resumen de teoría de placas laminadas

La teoría de materiales compuestos laminados constituye una teoría importante, debido a que es la base del cálculo empleada por la mayoría de los programas informáticos de elementos finitos.

Generalmente una lámina se encuentra sometida a 6 tensiones, pero en la teoría de las placas laminadas solamente se contemplan 3. Las 3 tensiones y deformaciones planas.

Se trabaja con:

Las deformaciones $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ y ε_6 .

No se van a considerar las tres deformaciones que se encuentran fuera del plano, por ser deformaciones interlaminares (entre dos láminas) que se denominan $\varepsilon_3, \varepsilon_4$ y ε_5 .

Donde ε_3 : Es la el término de deformación interlaminar del laminado. Y ε_4 y ε_5 : Son los términos de cortadura interlaminar.

Por otra parte, se va a trabajar con:

Las curvaturas k_1 , k_2 y k_6 .

Con lo que se va a poder contemplar tanto los esfuerzos normales y de cortadura de tensión plana y de flexión.

Las hipótesis que se utilizan para realizar los cálculos pertinentes se exponen a continuación:

Las flechas que se produzcan en los materiales compuestos laminados tienen que ser bajas, por tratarse de un cálculo lineal, por lo que las flechas no van a variar la geometría de la estructura del laminado.

La deformación es lineal a lo largo del espesor del laminado (eje z) por lo que no se van a producir tensiones interlaminares.

Las placas son delgadas. Se considera que una lámina o placa es delgada cuando su longitud fundamental es de diez veces mayor que el espesor, es decir:

$$\frac{L}{h} > 10.$$

Donde:

- h : Espesor total del laminado.
- L : Longitud.

Sin embargo, cuando si el cociente entre la longitud o la anchura de la lámina es de:

$$\frac{L}{h} < 10.$$

Los esfuerzos interlaminares pasan a desempeñar un papel importante y la teoría de placas laminadas no sería válida.

Los laminados de $\pm 45^\circ$ son muy importantes, por lo tanto, a través de las matrices de transformación tanto en deformación como de tensión se puede obtener el cambio de constantes locales a globales. Se pasa de las coordenadas 1-2 donde se tienen orientadas las fibras a las coordenadas X- Y que corresponden a las coordenadas generales en los ejes estructurales. Se pasa de tener una matriz incompleta (rigidez local) a una matriz completa (global) formada por 9 términos. Recuerde que los términos de la matriz local \bar{Q}_{16} y $\bar{Q}_{26} = 0$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}.$$

Donde: Q_{11} , Q_{12} , Q_{22} y Q_{66} vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}.$$

$$Q_{12} = \frac{\mu_{12} E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} = \frac{\mu_{21} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}.$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}.$$

$$Q_{66} = G_{12}.$$

Por matrices de transformación:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}.$$

Donde:

\bar{Q}_{11} , \bar{Q}_{12} , \bar{Q}_{22} y \bar{Q}_{66} Vienen determinadas por las siguientes expresiones:

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cdot C^4 + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) S^2 \cdot C^2 + Q_{22} \cdot S^4.$$

$$\bar{Q}_{12} = \bar{Q}_{21} = (Q_{11} + Q_{22} - 4 Q_{66}) S^2 \cdot C^2 + Q_{12} (S^4 + C^4).$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} \cdot S^4 + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) S^2 C^2 + Q_{22} \cdot C^4.$$

$$\bar{Q}_{16} = \bar{Q}_{61} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) S \cdot C^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) S^3 \cdot C.$$

$$\bar{Q}_{26} = \bar{Q}_{62} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) C \cdot S^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) S \cdot C^3.$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2 Q_{12} - 2 Q_{66}) S^2 \cdot C^2 + Q_{66} (S^4 + C^4).$$

Dónde.

- S: seno del ángulo.
- C: Coseno del ángulo.

9.4.19 Trabajo de un laminado en tensión plana y flexión

En tensión plana, por equilibrio, se tiene que los esfuerzos en tensión plana vana a ser iguales a:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau\sigma_{xy} \end{bmatrix}_k d_z.$$

Dónde.

- H: Espesor del laminado.
- σ_x , σ_y y $\tau\sigma_{xy}$: Las tensiones que aparecen encada una de las láminas.

Desarrollando esta expresión, se obtendrán las relaciones tensión – deformación del laminado completo:

$$[N]_T = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \{\sigma\} d_z = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [Q] \cdot [\varepsilon] d_z = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [Q] d_z \cdot [\varepsilon^0] = [A] \cdot [\varepsilon^0].$$

El valor de las tensiones es igual al producto de la matriz de rigidez por las deformaciones. Se desarrolla este producto y se separa $[Q]d_z$, debido a que:

ε^0 : Deformación constante a lo largo del espesor.

Por lo tanto se puede hablar de la integral de la matriz de rigidez local por el espesor y por la deformación que es constante a lo largo del espesor $\int [Q] \cdot d_z \cdot [\varepsilon^0]$.

A esta integral a través del espesor se le denomina matriz de rigidez plana $[A]$. Valor de la matriz de tensión plana:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}.$$

La matriz de rigidez plana es fácil de determinar, ya que simplemente es el sumatorio de todas las láminas que forman el laminado por la matriz de rigidez global de cada lámina por Z_k menos Z_{k-1} que es el espesor de cada la lámina.

Flexión

Si el laminado es simétrico y sólo hay aplicadas cargas de flexión, el análisis del laminado solamente va a tener en cuenta las curvaturas k_1, k_2 y k_6 .

En flexión, el punto P de la Figura 102, es igual al desplazamiento que sufre en u (p):

$$u(P) = z \sin \beta.$$

Donde:

- β : Ángulo de inclinación una vez que la estructura se encuentra flexionada.

Al encontrarse ubicados en deformaciones lineales y láminas con poco espesor o delgadas, se puede considerar que:

$$u = z \beta .$$

Y como β :

Es la derivada del desplazamiento W (vertical) con respecto de X se obtiene:

$$u = Z \frac{\delta_w}{\delta_x} .$$

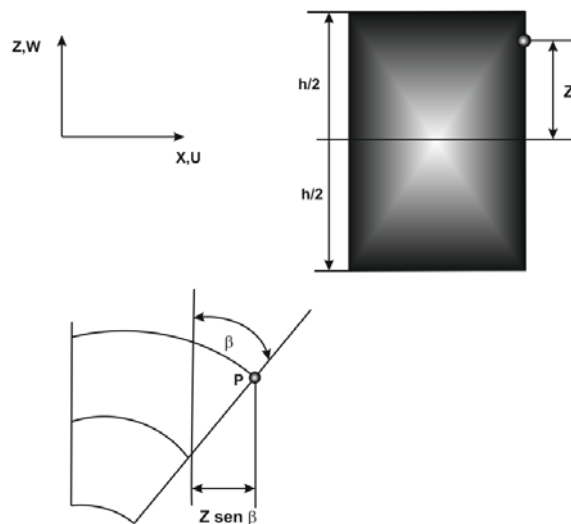


Figura 107. Desplazamiento del punto (P) en flexión.

Derivando ambas partes de la igualdad anterior con respecto de X :

$$\frac{\delta u}{\delta x} = Z \frac{\delta^2 w}{\delta^2 x}.$$

Generalizando la función anterior de la deformación como la derivada del desplazamiento con respecto a cada coordenada se obtiene:

$$\varepsilon_x = z k_x.$$

Generalizando para las coordenadas 1,2 y 6:

$$\{\varepsilon\} = z \{k\} = \varepsilon_i = \varepsilon_i^0 + z k_i, \text{ donde } i = 1,2, \text{ y } 6.$$

O en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = z \cdot \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}.$$

Partiendo de la premisa que el material compuesto laminar se debe de encontrar en equilibrio, los momentos resultantes se pueden definir como:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau\sigma_{xy} \end{bmatrix}_k z dz.$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau\sigma_{xy} \end{bmatrix}_k : \text{Tensor de tensiones.}$$

Si se desarrolla la matriz de idéntica forma, donde la curvatura va a ser constante a lo largo del espesor del laminado en flexión:

$$\{M\} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \{\sigma\} \cdot z dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [Q] \cdot [\varepsilon] \cdot z dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [Q] \cdot z dz \cdot [\varepsilon^0] = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [Q] z^2 dz \cdot [k].$$

Y, por lo tanto:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}.$$

Donde el vector de momento flector M se corresponde con el vector de curvatura a través de la matriz $[D]$.

La matriz $[D]$ resulta fácil de calcular, debido a que igual al sumatorio de la matriz de rigidez global orientada en las direcciones principales del laminado por la diferencia de cubos de las distancias inferiores y superiores del laminado a la línea central del mismo.

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6.$$

En este caso, la secuencia del apilado de las láminas juega un papel importante por no tener el mismo efecto en tener ubicada una lámina muy próxima el eje central de simetría que tenerla muy alejada del mismo. Con lo que la rigidez del laminado será variable con la disposición del apilamiento.

La matriz general de la tensión de laminados es:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ k \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

Donde:

- $[A]$: Tensión plana- Componentes de deformación en el plano.
- $[B]$: Tensión plana – Curvaturas de flexión.
- $[D]$: Momentos – Curvaturas de tensión plana

$$A_{ij} = \sum_{K=1}^N \bar{Q}_{ijk} (h_k - h_{k-1}).$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^N \bar{Q}_{ijk} (h_k^2 - h_{k-1}^2).$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{K=1}^N \bar{Q}_{ijk} (h_k^3 - h_{k-1}^3).$$

La teoría del laminado nos va a dictar el funcionamiento del laminado.

Por ejemplo se dispone de un laminado de carbono / epoxi simétrico y equilibrado $[0/90]_S$.

Donde la matriz de rigidez plana es:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \\ A_{12} & A_{22} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}.$$

En este tipo de laminado no existe acoplamiento de tensión plana – curvatura en el plano. Por lo tanto:

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

No existe acoplamiento tensión plana flexión.

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \\ D_{12} & D_{22} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix}.$$

No existe acoplamiento flexión – torsión. Si se cumplen estas tres condiciones no existe ningún tipo de acoplamiento. Cuando se someta al laminado a ensayo de tracción o a un esfuerzo de tracción simplemente se va a traccionar. Y si se somete a flexión sólo se flexionará.

II. Estudio bibliográfico

1. Introducción

A la hora de realizar un estudio científico, es importante conocer la documentación existente que haga referencia al tema de estudio, y que permitirá conocer aspectos importantes sobre la viabilidad, el interés científico y social, así como conocer las vías necesarias para alcanzar con éxito los objetivos que se planteen.

La presente tesis doctoral se encuentra basada en la investigación de temas basados sobre en los fundamentos de composites elaborados con: fibras naturales de origen lignocelulósico fibras procedentes de residuos textiles; resinas biodegradables, y resinas de poliéster; para la obtención de composites que actúen como elementos ligeros en estructuras y paramentos que se puedan validar como materiales acústicos absorbentes. Además de mejorar el aislamiento acústico al ruido aéreo de particiones multilámina, que utilicen como material absorbente la lana de oveja como núcleo. Los resultados de estas láminas y laminados reciclables, se compararán con combinaciones de placas de yeso.

Así mismo, se realizará el diseño y fabricación de los composites, su caracterización mecánica a través de equipos dinámicos y estáticos. También se realizarán aproximaciones de modelos matemáticos por elementos finitos.

Cada uno de los temas tiene su grado de interés y de dificultad, es por ello que se requiere gran cantidad de tiempo en el análisis de las diferentes publicaciones.

La búsqueda más relevante ha sido la referente a publicaciones que hacen referencia al tema de estudio en este trabajo mediante la caracterización de materiales compuestos naturales destinados al aislamiento acústico en el sector de la edificación.

2. Revisión bibliográfica

En la actualidad las series que se encuentran en las “Citation Index” quedan integradas dentro de la “Web of Science”, que a su vez forma parte de la “Web of Knowledge”. Esta última plataforma está formada por distintas bases de datos interrelacionadas entre sí, entre las que se encuentran las siguientes:

- “Web of Science”: incluye información desde el año 1945, en ella se permite la búsqueda de artículos, además dispone de un índice de citas.
- “Journal Citation Report on the Web”: muestra información de un gran número de publicaciones, además del factor de impacto de dichas revistas.

- “Derwent Innovation Index”: en este caso la base de datos hace referencia a las patentes existentes.
- “ISI proceedings”: base de datos referente a las actas de congresos.
- “Current Contents Connect”: Boletín de sumarios multidisciplinar.

Hoy en día, son múltiples las bases de datos existentes que permiten la realización de búsquedas de una forma muy sencilla. La plataforma utilizada para su localización, hace uso de redes internas de distintas instituciones, además de Internet. Este hecho posibilita el acceso a la información de manera muy rápida y sin ninguna dificultad.

De las distintas bases de datos conocidas destacan las englobadas en los “Citation Index” por su gran volumen de datos en la que se pueden encontrar tres bases de datos multidisciplinarias, ciencias sociales, humanidades y las artes.

Estas no son las únicas bases de datos que existen o pueden utilizarse, también hay otras dedicadas a temas científicos, como “Scifinder Scholar” altamente especializada en química orgánica e inorgánica.

Para patentes, también es posible utilizar una base de datos.

Por último, “Teseo” es una base de datos gestionada por el Ministerio de Ciencia, Educación y Cultura, donde se recoge información sobre tesis doctorales leídas en universidades españolas desde el año 1976.

Los artículos publicados son muy diversos y los puntos clave para filtrar la información son los dominios de investigación, que principalmente son de tecnología científica, además las áreas de investigación tienen relación con ingeniería y la ciencia de los materiales.

Resulta indispensable el uso de la “Web of Science”, servicio de información en línea suministrado por “Thomson Reuters”, y que es posible acceder a él, por el convenio existente con la “Universidad Politécnica de Valencia”, este portal de publicaciones y actualidad de temas científicos, será de aquí en adelante la herramienta fundamental de búsqueda en el avance del estado del arte.

Hasta el momento y por norma general, las bases de datos utilizan el inglés como idioma de referencia, pero es de destacar la existencia de distintas bases de datos en español.

Se realiza un análisis cualitativo de las publicaciones realizadas desde el año 2.006 hasta la presente, con la finalidad de poder identificar lo determinante que resulta un tema con respecto a otro, y así poder enfocar la mayor cantidad de recursos.

Otras fuentes de información son libros de Ciencia e Ingeniería de los Materiales y del comportamiento acústico de materiales y edificios, que manifiestan tópicos relacionados con los temas iniciales. Debido a que el estudio de los materiales es muy extenso, se marcan límites sobre los estudios en los materiales compuestos, sus características y aplicaciones.

Finalmente, el bloque de información se completa con la búsqueda de diversos conceptos, presentados en la web, validando en todo momento la legitimidad de las páginas de internet utilizadas.

3. Palabras clave de búsqueda

La plataforma de internet, más adecuada para la búsqueda de artículos y trabajos relacionados con los composites, las fibras naturales y las resinas bio-degradables, es la “Web of Knowledge”, y concretamente la base de datos “Web of Science”; debido a que posee una enorme cantidad de publicaciones recopiladas en esta base de datos.

La principal acción recae en la definición correcta de las palabras claves o bien de la unión de varias palabras claves. La elección de estas palabras permite la elección del camino correcto o incorrecto en la búsqueda de la información deseada. Junto con las palabras clave se deben de utilizar los operadores “booleanos” que permiten combinar distintas búsquedas.

Las palabras claves utilizadas para la búsqueda del tipo de documentos son:

- Biocomposites.
- Natural fibers.
- Biodegradable resin.
- Resin polyester.
- Acoustic properties.
- Mechanical properties.

Es un factor importante la acotación de los años en que se produce la búsqueda de la información. Se elige un intervalo de 12; empezando la recerca de documentación en el año 2006 y finalizando en el 2018.

Se empieza la búsqueda de trabajos, artículos, conferencias, patentes y libros, introduciendo el tema de:

Materiales compuestos de fibras naturales, con la utilización de las palabras claves:

- green composites.
- Green fibers
- Flax.
- Hemp.
- Jute.
- Coconut.
- Polyester.
- Bioresin.

En la Tabla 27 se muestra la cantidad de Resultados obtenidos en la búsqueda bibliográfica por separado de las palabras claves.

Tabla 27. Búsqueda de palabras clave en el tema materiales compuestos fibras naturales.

Palabra clave	Resultados obtenidos
Flax	7 710
Jute	3 501
Hemp	3 440
Coconut	7 562
Green composites	12 850
Green fibers	11 648
Fiber flax	2 584
Fiber jute	2 238
Fiber hemp	1 982
Fiber coconut	1 299
Bioresin	66
Resin polyester	4 059

Como se pueden observar de los valores obtenidos tras la búsqueda de información según los criterios claves, hay una gran cantidad de información a tratar.

Para realizar un filtrado de la información y obtener información que más se adecue a la búsqueda, en la Tabla 28 se muestra la combinación de las palabras clave acompañadas del operador *and*.

Biocomposite and natural fiber *and* biodegradable resin.

Tabla 28. Resultados obtenidos sobre la búsqueda con la palabra clave.

Palabra clave de la búsqueda	Tipo de documento	Resultados
Biocomposite <i>and</i> natural fiber <i>and</i> biodegradable resin	Artículo	7

En la Tabla 29 se realiza una acotación mayor utilizando las palabras claves que en ella se exponen. Lo cual facilita enormemente el trabajo de la investigación de la información.

Tabla 29. Resultados obtenidos sobre la búsqueda con la palabra clave.

Palabra clave de la búsqueda	Tipo de documento	Resultados
Biocomposite <i>and</i> natural fiber <i>and</i> biodegradable resin <i>and</i> mechanical <i>and</i> properties	Artículo	9

La primera tarea que se debe de realizar, es la identificación de la información obtenida en estos 12 documentos, es decir, averiguar aquellos documentos que son artículos publicados en revistas, los que son patentes, o bien de los que se trate de conferencias.

Tras el análisis detenido de cada uno de los documentos, se llega a la información que se recopila en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultados obtenidos sobre la búsqueda de palabras claves.

Palabras clave de la búsqueda	Tipo de documento	Número de las referencias encontradas	Resultados
Biocomposite <i>and</i> natural fiber <i>and</i> biodegradable resin <i>and</i> mechanical <i>and</i> properties	Artículo de revistas	[1,2,4,5,7,9 – 12]	9
	Patentes	[6 y 8]	2
	Sección del libro	[3]	1

En la Tabla 31 se sustituye la palabra clave biodegradable resin , por resin polyester. De los cuales, el procesamiento y caracterización de biocompuestos 100% de cáñamo obtenido por infusión de vacío, tiene una similitud aproximada a las palabras claves utilizadas para el desarrollo de la tesis.

Tabla 31. Palabras claves de la búsqueda.

Palabra clava de la búsqueda	Tipo de documento	Resultados
Biocomposite and natural fiber and resin polyester and mechanical and properties	Artículo	12

En las siguientes líneas se expone el resumen de dicho artículo.

Se fabricaron biocompuestos novedosos hechos de una biorresina epoxidizada basada en aceite de cáñamo reforzado con malla de fibra de cáñamo al azar mediante la técnica de infusión al vacío. Se investigaron las propiedades mecánicas (tracción, flexión, impacto Charpy y cortante interlaminar), propiedades mecánicas dinámicas (temperatura de transición vítrea, módulo de almacenamiento y densidad de reticulación) y propiedades de absorción de humedad (nivel de saturación de humedad y coeficiente de difusión) y se compararon con muestras fabricadas bajo el mismo condiciones pero usando una resina comercial de vinilester sintético como la matriz polimérica. Los resultados mostraron que el rendimiento mecánico del 100% de biocompuestos es comparable al de los compuestos híbridos fabricados con la resina sintética.

Las pruebas de absorción de humedad mostraron que las muestras acriladas basadas en aceite de cáñamo epoxidado exhibían un mayor coeficiente de difusión y contenido de humedad de saturación; sin embargo, el refuerzo de fibra fue el mecanismo de transferencia dominante. Se encontró que las muestras basadas en éster de vinilo tenían un módulo de almacenamiento, una temperatura de transición vítrea y una densidad de reticulación más altos que las muestras de aceite de cáñamo epoxidado acrilatado.

Si definitivamente se acota a artículos con todas las palabras clave:

Biocomposite and natural fiber and resin polyester and mechanical and properties and properties acoustic
--

No se encuentra ningún tipo de información. A excepción de dos artículos escritos por:

Del Rey, Romina; Alba, Jesús; Crespo, José Enrique; Fontoba, Jorge. *Estudio de la Influencia del Tipo de Fibra y Resina en Composites como Soluciones Ligeras para Aislamiento Acústico*. Universitat Politècnica de València. Escuela Politécnica Superior de Gandia. Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica. [188].

Del Rey, Romina Alba, Jesús; Crespo, José Enrique; Fontoba, Jorge. *Propuesta de Soluciones Ligeras para Aislamiento Acústico a Ruido Aéreo basadas en Lana de Oveja y green composites*. Universitat Politècnica de València. Escuela Politécnica Superior de Gandia. Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica [189]

4. Patentes

La protección más adecuada para esta invención que se pretende proteger por tratarse paramentos o pantallas acústicas con materiales compuestos realizados a base de fibras naturales (Yute, Cáñamo, Coco, Lino Biaxial o materia textil disuelta Borra) con una matriz de origen termoestable (Resina epoxi, biodegradable o de poliéster) con una aplicación en la edificación sostenible (ruido aéreo), **será la de patente**

Según marca la OEPM Española, una invención [190] se puede referir a un procedimiento nuevo, un aparato nuevo, un producto nuevo (sustancia o composición) o un perfeccionamiento o mejora de los mismos. En este caso la protección de la invención será la de un producto nuevo, un material compuesto por tejidos o fibras naturales con resinas biodegradables, epoxi o de poliéster, pero en una visión conceptual; más allá del material se pretende proteger la aplicación de estos paramentos y barreras acústicas.

La finalidad de proteger esta invención puede extraerse directamente del concepto de patente “título expedido por el estado que otorga al concesionario el derecho exclusivo y excluyente a disfrutar, por período improrrogable de veinte años desde la fecha de presentación de la solicitud, pero produce los efectos desde el día de publicación de la concesión, de una invención susceptible de aplicación industrial”.

4.1 Tipo de patentes

4.1.1 Protección a las creaciones estéticas. Diseño Industrial

Un diseño industrial [191] es aquel que añade valor al producto, haciéndolo más atractivo y llamativo para los clientes pudiendo incluso convertirlo en el principal objetivo de la presunta compra del producto. Por lo tanto, es muy habitual la protección de los diseños valiosos pasando a formar una parte fundamental de la estrategia comercial de cualquier diseñador o fabricante.

Concepto: la apariencia de la totalidad o de una parte de un producto.

Sobre la apariencia de la totalidad o de una parte de un producto, que se derive de las características de, en particular, las líneas, contornos, colores, forma, textura o materiales del producto en sí o de su ornamentación. Los diseños podrán ser bidimensionales (Dibujos) o tridimensionales (Modelos) o combinación de ambos.

Razones para proteger los diseños industriales:

- Impedir que se copien.
- Política de la empresa.
- Para adelantarse a la competencia.
- Cuestión de prestigio.
- Para evitar suspicacias de que se está copiando.

Son requisitos positivos de patentabilidad, debiendo de cumplir con la exigencia de que el objeto patentable sea una invención industrial, ejecutable, nueva y con actividad inventiva (CPE).

Pero no todas las invenciones son patentables, sino sólo las invenciones industriales que según los arts. 4.1 LP y 52.1 CPE son susceptibles de aplicación industrial (arts. 9 LP y 52.4 CPE).

No son patentables los descubrimientos, las invenciones que no son industriales, por ejemplo, las que se refieren a planes, reglas y métodos para el ejercicio de actividades intelectuales, para juegos o para actividades económico comerciales, ni tampoco los programas de ordenadores (arts. 4.2 LP y 52.2 CPE). Tampoco pueden considerarse invenciones industriales aquellas que se refieren a métodos de tratamiento quirúrgico o terapéutico del cuerpo humano o animal, ni los métodos de diagnóstico (arts. 4.4 LP y 52.4 CPE).

Inventiones industriales cuya patentabilidad está prohibida, esto es, por carecer de los requisitos negativos de patentabilidad.

Son aquellas que se refieren a invenciones cuya publicación o explotación sea contraria al orden público o a las buenas costumbres; las variedades vegetales, las razas animales y los procedimientos esencialmente biológicos de obtención de vegetales o de animales (arts. 5 LP y 53 CPE).

Qué protege el diseño industrial: El diseño industrial [192], protege la forma externa innovadora de los productos englobando tanto las formas bidimensionales (dibujos) como las tridimensionales (modelos) o una combinación de ambas. Así, se protege la innovación formal referida a las características de apariencia del producto en sí o de su ornamentación.

Los aspectos técnicos no tienen relevancia a efectos de registro y en su caso la vía de protección es la patente. En el diseño industrial sólo tiene relevancia la forma externa.

En cuanto a colores y acabados, se podrían proteger aquellos que fueran el resultado de la mezcla de las fibras y/o tejidos con las resinas. Pero su protección se vería limitada únicamente al acabado estético.

Respecto a la geometría de los paneles, se tienen en consideración, por corresponder a parámetros necesarios para la caracterización mecánico – acústica de los laminados con la obtención de los módulos de elasticidad (mediante ensayos dinámicos) y densidades hidrostáticas y aparentes. Pero estos constituyen aspectos puramente técnicos; por lo que no tienen relevancia a efectos de registro y como se indica su vía de protección es la patente industrial. ***Por lo que la geometría de los laminados o paneles quedan descartadas de este tipo de protección.***

En la protección del diseño industrial [193], se pueden proteger por ejemplo vehículos, muebles, embalajes, carcasas de aparatos, líneas de objetos, novedades introducidas en los dibujos de telas y papeles.

4.1.2 Propiedad intelectual

La propiedad intelectual se relaciona con las creaciones de la mente: invenciones, obras literarias y artísticas, así como símbolos, nombres e imágenes utilizados en el comercio.

La propiedad intelectual se divide en dos categorías:

- La propiedad industrial [194], formada por las patentes de invención, las marcas, los diseños industriales y las indicaciones geográficas.
- El derecho de autor, que se extiende a las obras literarias (novelas, poemas y obras de teatro), películas, música, obras artísticas (dibujos, pinturas, fotografías y esculturas) y los diseños arquitectónicos. Los derechos relacionados con los derechos de autor son los derechos de los artistas intérpretes y ejecutantes sobre sus interpretaciones o ejecuciones, los de los productores de fonogramas sobre sus grabaciones y los de los organismos de radiodifusión respecto de sus programas de radio y televisión.

Concepto: la propiedad intelectual [195], protege las creaciones originales literarias, artísticas o científicas expresadas en cualquier medio, tales como libros, escritos, composiciones musicales, obras dramáticas, coreografías, obras audiovisuales, esculturas, obras pictóricas, planos, maquetas, mapas, fotografías, programas de ordenador y bases de datos. También protege las interpretaciones artísticas, los fonogramas, las grabaciones audiovisuales y las emisiones de radiodifusión. Se podría redactar y editar el contenido de la investigación en un libro y protegerse a través de este medio, ***pero sólo se estaría protegiendo la información y su uso y no su explotación tecnológica.***

4.2 Resumen de patentabilidad

Como resumen en la Tabla 32 se ponen de manifiesto el descarte de la protección de patentes que no sean adecuadas para la invención objeto del estudio, así como la elección de la protección a la que se debe de someter la misma.

Tabla 32. Recopilación de opciones descartadas y válidas en la protección de la invención.

Creaciones técnicas	Descartada	No descartada	Motivo
Reglas técnicas			
Patentes Industriales		√	Se trata de una aplicación industrial que tiene como objetivo la busca de la resolución de un problema técnico industrial
Imágenes interconectadas	√		Por no tratarse de un producto semiconductor [196].
Variedades Vegetales	√		Por no contener materia viva y no estar la invención en el ámbito de variedad vegetal [197].
Creaciones estéticas			
Diseño industrial	√		Los aspectos técnicos no tienen relevancia a efectos de registro y en su caso la vía de protección es la patente
Signos distintivos			
Marca	√		Por lo que la protección por este medio de la invención sólo quedaría protegido un nombre (en este caso el del producto fabricado) [198].
Nombre comercial	√		Por lo que si se protege por este medio la invención solo quedaría protegido un nombre (en este caso el del nombre de la empresa) [199].
Denominaciones e indicaciones geográficas	√		Por no tratarse de un producto alimenticio o agrícola [200].
Direcciones en internet	√		Invención objeto de estudio por no tratarse de una dirección en internet [201].
Patente biotecnológica			
Protección de la materia viva	√		Por no contener materia viva o material biológico que contenga información genética autorreproducible o reproducible en un sistema biológico ni contener ningún procedimiento que utilice una materia microbiológica [202,203].
Propiedad intelectual	√		Sólo se estaría protegiendo la información y su uso y no su explotación tecnológica [204].

4.3 Resumen de patentes obtenido tras la búsqueda en la base de datos INVENES

En la Tabla 34 se ponen de manifiesto los resultados alcanzados tras la búsqueda.

Tabla 33. Valores obtenidos tras la realización de las distintas búsquedas en función de distintas palabras claves.

Buscador		INVENES	
Palabras clave	Búsqueda de título	Búsqueda título resumen	Resultado de la Búsqueda
1	Materiales acústicos	Composites con fibras naturales para la construcción	No hay ningún resultado
2	Materiales acústicos	Composites con fibras de Lino	No hay ningún resultado
3	Materiales acústicos	Composites con fibras naturales	No hay ningún resultado
4	Materiales acústicos	Material compuesto	No hay ningún resultado
5	Materiales acústicos paramentos	Material compuesto	No hay ningún resultado
6		Materiales acústicos	2 patentes*
7		Materiales acústicos con fibras	No hay ningún resultado
8		Materiales compuestos	2.123 patentes* registradas
9		Barreras acústicas	234 patentes* registradas
10		Barreras acústicas con fibras naturales	24 patentes* registradas
11		Barreras ligeras acústicas con fibras naturales	6 patentes* registradas
12		Barreras acústicas con materiales compuestos de fibras naturales	13 patentes* registradas
13		Barreras acústicas con materiales compuestos con fibras de Lino	4 patentes* registradas
14		Barreras acústicas con materiales compuestos con fibras de Yute	4 patentes* registradas
15		Barreras acústicas con materiales compuestos con fibras de Cáñamo	4 patentes* registradas
16		Barreras acústicas con materiales compuestos con fibras de Coco	3 patentes* registradas
17		Barreras acústicas con materiales compuestos con fibras de Borra	No hay ningún resultado*

*De las patentes encontradas en los apartados correspondientes con las palabras claves mencionadas en la Tabla no hay ninguna patente que se asemeje a la que es objeto de protección en el presente estudio.

4.4 Búsqueda de patentes a nivel nacional con la base de datos de Google

En la tabla 35 se recopilan los valores obtenidos de las patentes a nivel nacional empleando la base de datos del buscador google.

Tabla 34 Valores obtenidos tras la realización de las distintas búsquedas en función de distintas palabras claves.

Buscador			
Google buscador avanzado de patentes			
Palabras clave	Con la frase exacta	Con todas las palabras	Resultado de la Búsqueda
1	Eco- composites acústicos como materiales de construcción en la edificación sostenible.		No hay ningún resultado
2		Construcción materiales compuestos	850 patentes* encontradas
3		Paneles acústicos con fibras de Yute	3 patentes* encontradas
4		materiales compuestos fibras naturales aislamiento al ruido aéreo	4 patentes* encontradas

* De las patentes encontradas en los apartados correspondientes con las palabras claves mencionadas en la Tabla no hay ninguna patente que se asemeje a la que es objeto de protección en el presente estudio.

4.5 Esp@cenet

Para la búsqueda de patentes a **nivel europeo y mundial** se va a utilizar el programa Esp@cenet [205]. Buscador de la European Patent Office, que incluye patentes europeas, pero también de hasta setenta países diferentes incluyendo los Estados Unidos. Las más antiguas son de 1920. Las primeras palabras clave para iniciar la búsqueda serán:

- Acoustic barriers with natural composites and bioresinas.

Con esta combinación de palabras claves no se ha encontrado ninguna patente.



The screenshot shows the Scopus search interface. At the top, the Scopus logo is on the left, and navigation links for 'Buscar', 'Fuentes', 'alertas', and 'Liza' are on the right. A 'Mostrar original' button is also visible. Below the navigation bar, the main heading reads 'resultados de la búsqueda de documentos'. Underneath, there are filters for 'TODAS (acústicas Y barreras Y con Y naturales Y composites Y bioresina)' and options to 'Editar', 'Salvar', 'conjunto de alerta', and 'conjunto de alimentación'. A central message box states 'No se encontraron documentos.' Below this, there are three columns of links: 'Acerca de Scopus' (including 'Lo que es Scopus', 'la cobertura de contenido', 'el blog Scopus', 'API Scopus', and 'asuntos de privacidad'), 'Idioma' (with links for '日本語に切り替える', '切换到简体中文', and '切换到繁體中文'), and 'Servicio al cliente' (with links for 'Ayuda', 'Chat en vivo', and 'Contáctenos'). At the bottom, the Elsevier logo is on the left, followed by 'Términos y Condiciones' and 'Política de privacidad'. A copyright notice for 2017 Elsevier is present, along with a disclaimer about cookies. The RELX Group logo is in the bottom right corner.

Segunda búsqueda, con las siguientes palabras clave:

- Acoustic barriers with natural composite materials

4.6 PatentScope

PatentScope. Buscador de la WIPO que busca patentes internacionales aceptadas desde 1978 [206].

Tabla 35 Valores obtenidos tras la realización de las distintas búsquedas en función de distintas palabras claves.

Buscador PatentScope		
Palabras clave	Búsqueda de título	Resultado de la Búsqueda
1	Materiales acústicos	21 148 patentes** encontradas
2	Materiales acústicos con fibras naturales	2 346 patentes** encontradas
3	Materiales acústicos con composites naturales	84 patentes(*) encontradas
4	Materiales acústicos con composites de Lino	93 patentes(*) encontradas
5	Materiales acústicos con composites de Yute	9 patentes* encontradas
6	Materiales acústicos con composites de Cáñamo	8 patentes* encontradas
7	Materiales acústicos con composites de Coco	18 patentes* encontradas
8	Materiales acústicos con composites de Borra	4 patentes* encontradas
9	Materiales acústicos al ruido aéreo con composites fibras naturales	5 patentes* encontradas
10	Materiales compuestos lino yute cáñamo soluciones acústicas constructivas	3 patentes* encontradas
11	Fibras lino yute cáñamo soluciones acústicas constructivas	3 patentes* encontradas
12	Fibras lino yute cáñamo paneles acústicos	42 patentes (*) encontradas
13	Fibras naturales paneles acústicos ruido aéreo.	37 patentes (*) encontradas
14	Materiales compuestos con fibras naturales y bio resina para aplicaciones acústicas ruido aéreo	6 patentes * encontradas
15	Materiales compuestos con fibras naturales y bio resina para aplicaciones acústicas ruido aéreo en la edificación.	No hay ningún resultado

(¹) De las patentes encontradas en los apartados correspondientes con las palabras claves mencionadas en la Tabla hay una serie de referencias que se asemejan a la patente objeto de protección.

** No se lleva a cabo la comprobación de la existencia de patentes iguales a la del objeto del estudio por ser una cifra muy elevada.

5. Resultado y conclusiones

Finalizada la búsqueda de trabajos, artículos, conferencias, patentes y libros, no se encuentra ningún tipo de estudio que sea similar al trabajo de tesis. Por lo que se abre un nuevo campo en la investigación de los materiales compuestos con resinas biodegradables y con resinas de poliéster en la búsqueda de materiales acústicos que sean respetuosos con el medioambiente, a su vez que den una solución al aislamiento o reverberación en el sector de la acústica arquitectónica

III. Objetivos y planificación

1. Objetivos

Con el presente proyecto de tesis doctoral, se pretende el desarrollo y aporte de nuevos materiales, productos, soluciones tecnológicas que sean sostenibles con el medio ambiente de materias primas renovables, que reduzcan o eliminen el uso de sustancias peligrosas y la generación de residuos que supongan un gran impacto en el medio ambiente que sean reutilizables y reciclables basados en componentes naturales, así como las nuevas técnicas de caracterización y validación de soluciones acústicas elaboradas a partir de éstos.

La utilización de materiales debe tender hacia la búsqueda de soluciones que, por un lado, reduzcan la cantidad de material necesario para obtener un resultado similar, utilizar materiales biodegradables y por otro lado que permitan reutilizar o reciclar materiales de otros ámbitos y darles una nueva vida útil.

Se pretende estudiar el posible uso de estos nuevos composites, fabricados mediante infusión de resina, en soluciones reales aplicables a la edificación actual, en su nueva construcción y/o reforma, y adaptadas a las normas europeas y españolas y como éstos pueden mejorar el diseño de las mismas, tanto desde el punto de vista acústico (aislamiento y difracción) como global (reutilización de materiales, reducción de costes, aligeramiento de pantallas).

Debido a la imposibilidad en la mayoría de los casos, a nivel de investigación y desarrollo, de contar con grandes cantidades de material para poder evaluarlo acústicamente bajo norma, se desarrollarán y validarán técnicas de ensayo en modelos a escala que nos permitirán obtener valores de aislamiento al ruido aéreo y pérdidas por transmisión de los nuevos materiales y prototipos de barreras acústicas. Los modelos a escala diseñados y construidos para el desarrollo de esta investigación son una cámara reverberante con un factor de escala 1/6 respecto a la original y una cámara de transmisión. En estos laboratorios a escala podremos obtener el coeficiente de absorción sonora y el aislamiento acústico de los nuevos materiales, ambos parámetros esenciales para caracterizar un material o configuración como absorbente o aislante acústico.

2. Planificación de la investigación

La propuesta de trabajo de la tesis doctoral se estructura en diferentes fases. Estas fases seguirán una secuencia lógica basada en la satisfacción de los objetivos parciales de cada una de ellas. Con esto se permitirá obtener los objetivos específicos generales indicados en el apartado anterior. Las fases y tareas del proyecto propuesto se detallan a continuación:

2.1 Estado del arte. Estudio Bibliográfico

Esta primera fase, se pretende obtener la documentación adecuada sobre el tema concreto planteado en el proyecto de tesis, antes de iniciar el trabajo de desarrollo centrado en unas determinadas aplicaciones y/o usos del proyecto, realizando una introducción de las tecnologías y de los materiales utilizados hasta el momento en éste tipo de soluciones constructivas que existen en el mercado. Para ello, se utilizará adecuadamente una serie de herramientas y se aplicará una metodología de análisis y síntesis de información con el fin de estructurar y organizar la información ligada al proyecto.

Las herramientas a utilizar son: la base de datos de “Web of Science” y se completará el estudio con bases de datos tipo “Journal of Citation Reports” para establecer la relevancia de las investigaciones. Así mismo, trabajará con herramientas de gestión de citas como EndNote o RefManager con el fin de disponer de una base de datos donde se integre toda la información vinculada al proyecto propuesto y de fácil acceso.

También se trabajará con herramientas de búsqueda y localización de patentes (a través de webs gratuitas) y bases de datos como el “Derwent Innovation Index” o “Spacenet”, para obtener relacionados con los productos industriales actualmente disponibles. Además, se podrá trabajar con catálogos o documentos técnicos divulgativos para completar el conocimiento en este sector.

Una vez recopiladas todas las fuentes, se llevará a cabo una clasificación de la documentación y se desarrollará un estudio bibliométrico de toda la documentación.

Destacar la importancia de la revisión bibliográfica de forma periódica como sistema de retroalimentación del proyecto a lo largo de toda su duración.

2.2 Selección de materiales.

En esta segunda fase, se llevará a cabo la selección de los materiales adecuados para la fabricación de los eco-composites.

Primeramente, se realizará una búsqueda de las diferentes resinas biodegradables que existen en el mercado y los fabricantes que las suministran. A continuación, se realizará igualmente que tipo de fibras naturales y/o residuos se pueden emplear para reforzar la matriz biodegradable.

Una vez elegidos los materiales, para la matriz y las diferentes fibras, se llevará a cabo las diferentes combinaciones y/o número de capas a emplear para la fabricación del eco-composite.

Todo lo anterior siempre estará supeditado a que el material seleccionado para la fabricación del composite tenga disponibilidad de suministro y éste se pueda suministrar en cantidades relativamente pequeñas, ya que el precio de estos productos es elevado y a veces las cantidades por lote son excesivamente grandes, no pudiendo adquirirse rollos o placas sueltas. La investigación de tejidos de fibras largas naturales con bioresina termoestable de origen renovable o natural, se encuentran ubicados dentro de un campo en la actualidad muy poco desarrollado, dando lugar a expectativas para el desarrollo del mismo.

2.3 Diseño y fabricación de los composites

En esta fase, se llevará a cabo el diseño y fabricación de los eco-composites una vez realizada la fase anterior donde se han seleccionado los materiales adecuados para ello. La fabricación de los eco-composites se realizará mediante el proceso de infusión de resina [207], donde se permitirá la realización de placas de grandes dimensiones, y donde no es necesario un molde de doble cara para su realización, con las ventajas económicas que supone éste tipo de proceso.

2.4 Caracterización físico-mecánica

En esta fase, primeramente, se realizarán los ensayos para la obtención de las densidades por diferentes métodos. Se obtendrán las características proporcionales de los composites como son los porcentajes en peso de la matriz y la fibra.

A continuación, se obtendrán las probetas de las placas obtenidas de cada uno de los eco-composites fabricados en la fase anterior para su posterior ensayo, donde se cortarán y preparan a las medidas indicadas en función del ensayo a realizar.

Una vez realizada la preparación de las probetas, se llevará a cabo una completa caracterización de los diferentes composites con el fin de determinar las propiedades mecánicas más relevantes como: módulo de tracción, módulo de flexión, tensión de rotura, módulo de Poisson, energía de impacto charpy, dureza, etc.

2.5 Caracterización acústica.

En esta fase, se realizará una caracterización acústica clásica que consiste básicamente en, ensayos de absorción sonora en incidencia normal, resistencia al flujo, pérdidas por transmisión, rigidez dinámica, etc., de los materiales a estudio. Las pérdidas por transmisión o TL, se obtendrán de ensayos del material en un tubo de impedancias diseñado y construido para este propósito. Se realizan ensayos de la rigidez dinámica, en aquellos materiales susceptibles de ser considerados con propiedades elásticas. Ambos parámetros son esenciales, tanto para entender el comportamiento acústico del material, como para poder modelar el mismo.

2.6 Validación de los laboratorios a escala. Cámara reverberante a escala y cámara de transmisión a escala

En esta fase, se desarrollarán y validarán técnicas de ensayo en los laboratorios a escala para el desarrollo de esta investigación. Para verificar la validez de la cámara reverberante a escala se compararán los valores obtenidos de coeficientes de absorción de determinados materiales con los resultados obtenidos para estos mismos materiales cuando se ensayan en la cámara reverberante de la Escuela Politécnica Superior de Gandía. En el caso de la cámara de transmisión, la verificación de su validez pasa por una comparativa entre el aislamiento acústico a ruido aéreo obtenido para elementos ligeros, obtenido mediante programas de cálculo numérico y simulación elaborados por personal del propio equipo de investigación.

3. Resultados y conclusiones

En este momento, se busca resumir todos los resultados obtenidos a lo largo del proyecto, y ver si los resultados dan por válido una metodología de trabajo y de validación de los elementos fabricados en éste proyecto que cumplan con los objetivos marcados inicialmente en éste proyecto de tesis. Hay que tener en cuenta que esta fase abarca casi la totalidad de la parte experimental, dado que continuamente se toman decisiones al respecto de los resultados parciales que se obtienen en fases anteriores. La planificación es la parte del proyecto que es fundamental para el desarrollo y organización de las ideas planteadas. En esta fase se establecen las metas que se desean conseguir, así como una orientación sobre la investigación.

En la Figura 108, se muestra de forma esquematizada las fases en que va a quedar dividido el trabajo.

La etapa inicial del proyecto consta del planteamiento de los objetivos y la justificación de por qué se debe utilizar materiales compuestos lignocelulósicos frente a los composites tradicionales. Es la fase en la que se tiene que realizar una búsqueda de información. Es la etapa más laboriosa en cuanto a tiempo utilizado.

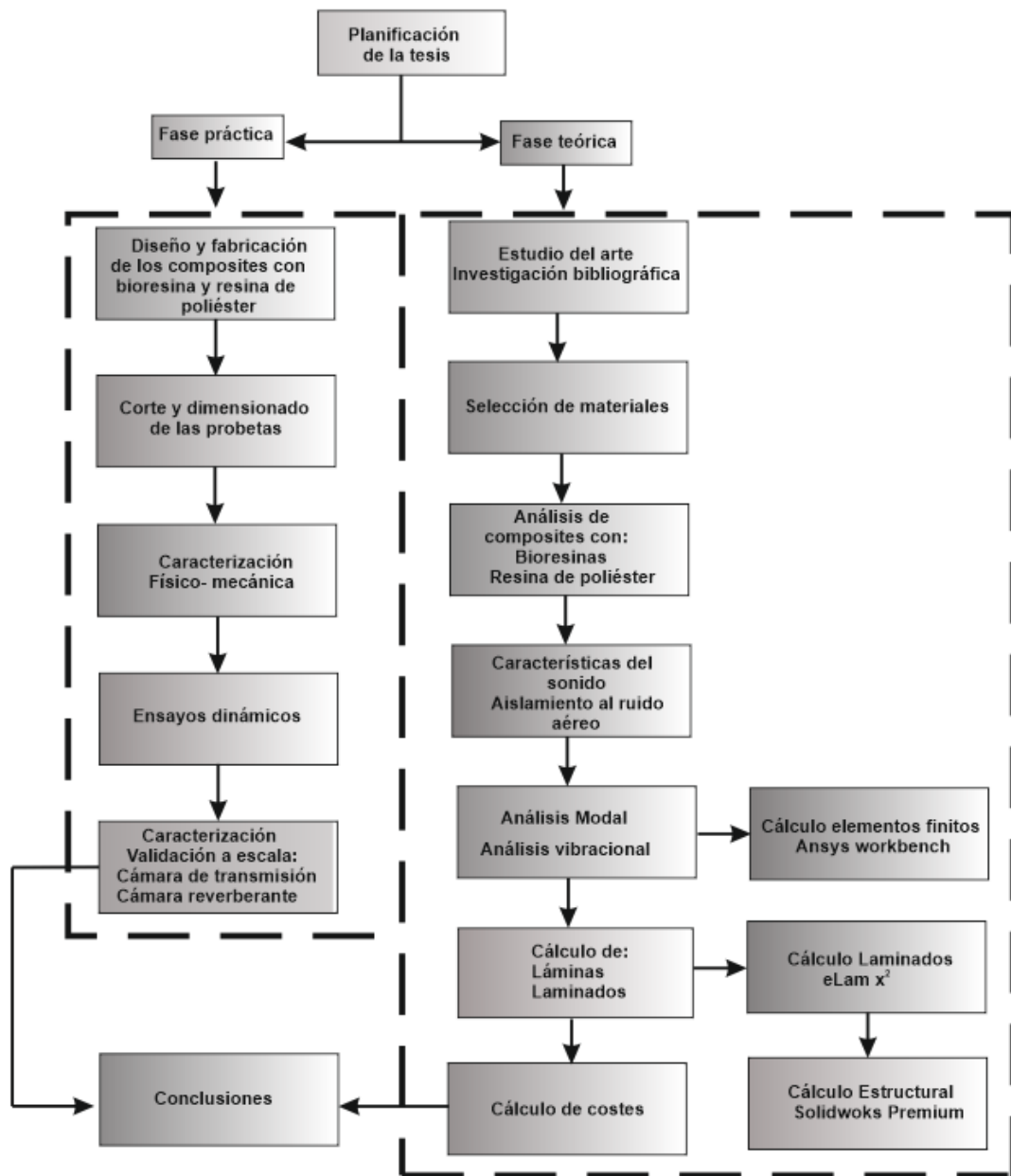


Figura 108. Esquema de planificación del proyecto de tesis.

En la fase práctica, se deben de realizar pruebas preliminares de infusión con las fibras lignocelulósicas y la resina biodegradable y de poliéster, hasta obtener las proporciones adecuadas de la resina, para obtener un curado adecuado.

Una vez que se controlan las distintas variables del proceso de la infusión, se pasa a la fabricación de las placas de los composite de las fibras y/o materiales textiles que se deben de experimentar.

La fabricación de las placas será concretamente de cinco.

Una vez realizadas todas las placas planificadas, se debe de realizar el corte de las mismas, para llevar a cabo los distintos dimensionamientos de las probetas necesarias para realizar los ensayos.

Cuando se disponga de las probetas, se pasará a la realización de los ensayos pertinentes, anotando todos los parámetros que se vayan obteniendo.

Finalizadas estas etapas, se procederá a la fase experimental.

Con respecto a la fase teórica, en la etapa de investigación bibliográfica, se revisarán temas de caracterización acústica de los materiales, así como todos los métodos aplicables con herramientas en este campo.

Con la recopilación de los resultados, se pasará a la fase de análisis y comparativa de los mismos.

IV. Equipamiento

1. Fabricación

En esta sección se va a describir el equipamiento que se ha utilizado para la elaboración, corte y caracterización mecánica, térmica, física y acústica de los materiales elaborados en este trabajo.

Medios a Utilizar

A continuación, se enumeran los medios a utilizar a nivel general.

- Respecto a instalaciones o laboratorios de fabricación:
 - Equipo de Infusión de Resina.
 - Equipo de Corte y Preparación de Probetas.
 - Prensa de Platos Calientes.
- Respecto a instalaciones o laboratorios de caracterización mecánica:
 - Máquina de Tracción Universal.
 - Péndulo de Charpy.
 - Equipo de Extensometría Eléctrica.
- Respecto a instalaciones o laboratorios de acústica:
 - Cámara Reverberante de la Escuela Politécnica Superior de Gandía a escala (modelo propio).
 - Cámara de Transmisión a escala (modelo propio).
- Respecto a instrumentación y software:
 - Analizador de frecuencias de doble canal con sus correspondientes micrófonos de medida y cableado.
 - Sonómetro integrador con módulo de medida de tiempo de reverberación con su correspondiente micrófono de medida y cableado.
 - Fuentes sonoras. Altavoces Genelec modelo 8030 A y fuente omnidireccional.
 - Prototipo de medida de resistencia al flujo basado en tubo de Kundt.
 - Prototipo de medida de la resistencia al flujo para materiales porosos.
 - Software Aisla 3.01 (software propio).
 - Software de análisis y procesado de datos como Matlab o Pulse Reflex Core.
 - Equipamiento específico para la determinación de transmisiones laterales (martillos, acelerómetros, etc.).

1.1 Bomba de vacío

La bomba de vacío utilizada en la infusión de bioresina, es del tipo de paletas Figura 109. Es de la marca comercial Griñón Rotamik, desarrolla una potencia de 0,75 Kw y proporciona un caudal de 20 m³/ hora.



Figura 109. Imagen de la bomba de vacío para la realización de las placas de composite.

1.2 Cubo de evacuación de resina Airtech

El cubo de resina RB 451 Figura 110 está diseñado para recoger el exceso de resina durante los procesos de transferencia de resina asistida por vacío a molde (VARTM). La RB451 tiene una entrada de vacío y 3 entradas de resina lo que nos permite realizar varias infusiones al mismo tiempo. Cara entrada de resina está equipada con una válvula de seguridad.

La unidad viene equipada con un regulador medidor de vacío para la reducción y detección de fugas.

Desconectando la fuente de vacío uno puede comprobar el vacuómetro para observar signos de pérdida de vacío, como fugas.

Adicionalmente, cada unidad incluye: Un cubo de polipropileno para recoger la resina sin dañar el tanque interno y un enchufe AQD 500TF 1/4"

Hembra NPT para ser montado en la fuente de vacío. 3 adaptadores para cada una de las siguientes medidas: 3/8" ID, 1/4" ID y 5/8" ID para ser montados en las tres entradas de resina de la trampa.



Figura 110. Imagen del cubo de evacuación de resina.

En la Tabla 36 se recopilan los datos técnicos del cubo de evacuación de resina.

Tabla 36. Datos técnicos del cubo de evacuación de resina.

Tamaño del cubo de evacuación	10 litros
Diámetro del cubo de evacuación	30 (cm)
Altura del cubo de evacuación, con el útil	46 (cm)
Fuente de vacío	1/4 pulgada macho NPT
Entrada de la resina	3/8 pulgada hembra NPT
Temperatura máxima de uso	50 °C

1.3 Máquina de corte

El corte de las probetas, se lleva a cabo mediante la utilización de una máquina de corte de la marca RUBÍ (Barcelona, España) mod. DU-200-L-BL.

El disco utilizado tiene un diámetro exterior de 200 mm con plaquitas de metal duro de 40 dientes. La característica de esta máquina radica en que la mesa de sujeción se mantiene estática, y por lo tanto el material a cortar, siendo el disco el que se desplaza a través de la bancada Figura 111.



Figura 111. Imagen de la máquina de cortar RUBÍ mod DU - 200 - L - LB.

2. Caracterización física. Densidad - porosidad

Una vez realizada la caracterización termomecánica y obtenido la temperatura de reblandecimiento de los composites, se procede a la obtención de la densidad por medio de una balanza hidrostática, UNE-EN ISO 1183-2:2005 [208] Figura 112.



Figura 112. Imágenes de la balanza hidrostática y componentes auxiliares.

Normativa aplicada al ensayo de densidad – porosidad

La obtención de la densidad se realiza en una balanza de la casa METROTEC, S. A (San Sebastián, España) junto con los accesorios correspondientes para poder obtener la masa por unidad de volumen del material bajo la normativa UNE EN ISO 53020:1973. Las pesadas en inmersión se realizarán en agua destilada a una temperatura de $23^{\circ}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Para el ensayo de la porosidad se utilizan las normas ASTM D792 [209].

3. Caracterización mecánica y dinámica

3.1 Ensayo de tracción

La resistencia a la tracción y comportamiento a flexión de los materiales compuestos obtenidos, se realiza en una maquina universal de ensayos de la marca IBERTEST modelo ELIB-50 (Madrid, España).

En la Figura 113 se muestra la imagen de la máquina universal de tracción empleada para el desarrollo de los ensayos.

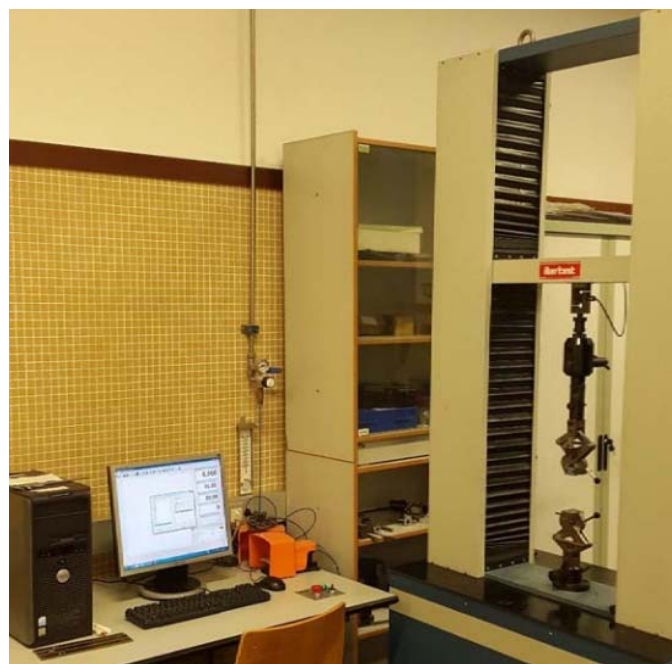


Figura 113. Imagen de la maquina universal de tracción Ibertest mod ELIB - 50.

Normativa aplicada al ensayo de tracción

La norma que se utiliza es:

- UNE- EN ISO 527-4: 1997 [210].
- Materiales cerámicos no aplicables.

Para los materiales cerámicos no es aplicable este tipo de ensayo, sólo se le aplica el ensayo de compresión y el de flexión.

Para el ensayo de tracción según la norma UNE EN ISO 527-4:1997 se obtiene el valor promedio de cinco probetas rectangulares de las siguientes dimensiones. Longitud total igual o superior a 250 mm, de 2 a 10 mm de espesor y de 25 a 50 mm de espesor. Se utiliza una distancia entre garras de 150 mm y la zona de medida de la deformación mediante extensómetro es de 50 mm.

La velocidad de ensayo la fija Lloyd's Register en 2 mm/min.

Y la norma indica que el módulo elástico se determina entre deformaciones unitarias de $5 \cdot 10^{-4}$ y $2.5 \cdot 10^{-3}$.

En la Figura 114 se indican las dimensiones normalizadas que deben de tener las probetas para el ensayo de tracción.

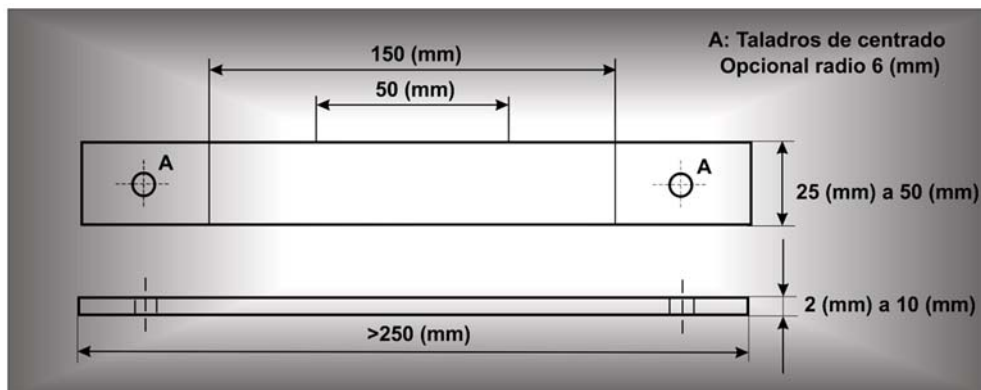


Figura 114. Dimensionamiento de las probetas según normativa UNE EN ISO 527- 4.

Las variables para la realización del ensayo son:

- Velocidad ensayo 2 mm/segundo.
- Deformación medida con extensómetro.
- Módulo elástico determinado entre deformaciones unitarias 0.0005 y 0.0025.

En la Figura 115, se observa el aspecto de las probetas de tracción tras llevar a cabo el ensayo. Como se puede observar se ha producido la delaminación en el primer caso, y la rotura completa en el segundo.

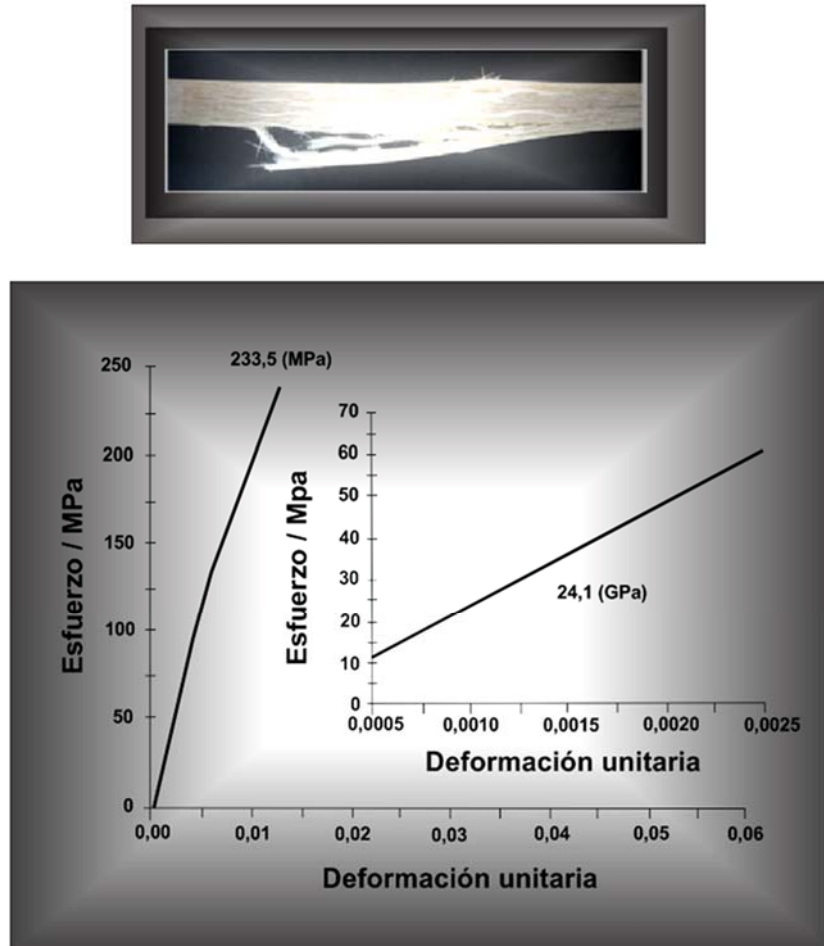


Figura 115. Imagen del aspecto de las probetas de tracción tras llevar a cabo el ensayo.

En la gráfica de la Figura 115 se puede observar como el material soporta tensiones de hasta 250 MPa, cuando se produce la rotura de la primera fibra. La rotura es frágil, con una baja deformación.

En el detalle se observa la relación lineal entre la tensión y la deformación en el intervalo de deformaciones indicadas en la norma para el cálculo del módulo elástico.

Accesorios para la obtención del coeficiente de poisson

En la máquina universal y concretamente en el ensayo de tracción; se puede obtener el módulo de poisson, para lo que se necesita emplear unos accesorios complementarios denominados: Extensómetros MFQ y Épsilon Figura 116.

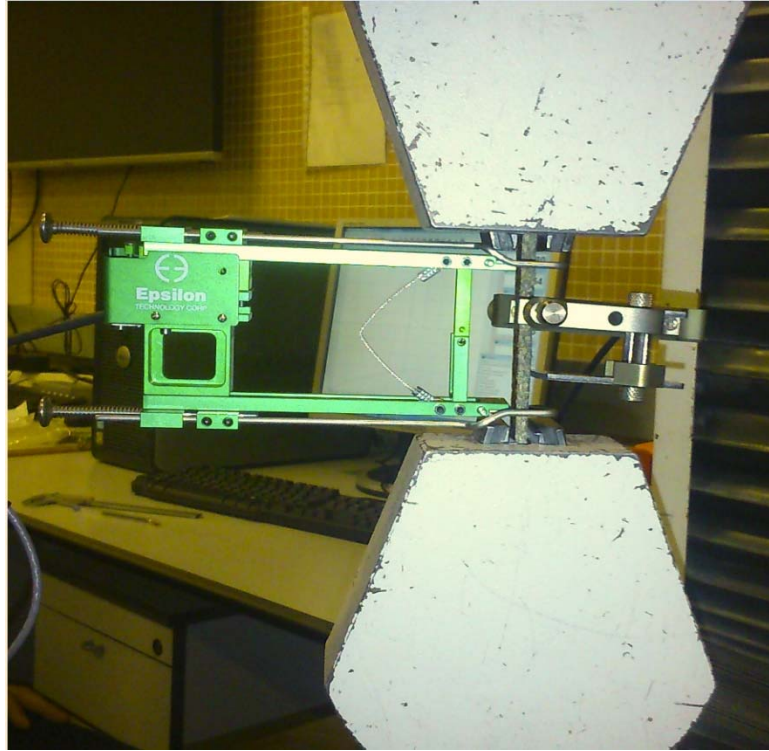


Figura 116. Accesorios extensométricos.

Las variables empleadas para la realización de los ensayos se exponen las líneas siguientes:

- Extensómetro MFQ: Extensómetro transversal, diseñado para trabajar con probetas Planas y Redondas. Indicado para ensayo de tracción. Pinzable. 2 cabezales de medida: Dispuestos en paralelo para la determinación del valor medio.
- Principio de medida: bandas extensométricas.
- Clase 0.2 según ISO 9513 (EN 10002-4): 2003 [211].
- Alargamiento máximo medible: 4 mm (opcional 6 mm).

Dimensiones de la probeta de ensayo:

Planas: desde 4 a 25 mm de ancho (opc hasta 50 mm) y hasta 20 mm espesor (opc hasta 30 mm).

Redondas: desde 4 a \varnothing 25 mm (opc hasta 50 mm). Ensayo de Tracción.

- Extensómetros Épsilon de uso general: para ensayos de tracción, compresión y cíclicos. Longitudes iniciales de 0,5 a 2 pulgadas (y de 10 a 80 mm) y rangos de medición de 5% a 100% de deformación.
- Estos extensómetros están diseñados para realizar ensayos a una gran diversidad de materiales, incluidos metales, plásticos, materiales compuestos y material cerámico.
- Todos trabajan tanto en tracción como en compresión. El diseño de flexión doble hace que las unidades sean muy fuertes e insensibles a las vibraciones, lo que admite una operación de frecuencia superior.

Se entregan con el equipo de unión rápida de Épsilon, que permite montar el extensómetro sobre la probeta de ensayo rápida y fácilmente con una mano. El equipo de unión rápida se puede desmontar, permitiendo montar el extensómetro con muelles o gomas.

Los extensómetros Modelo 3 542 son dispositivos de medición de deformación, con lo que son compatibles con cualquier electrónica diseñada para transductores de medición de deformación. Generalmente están conectados a un controlador de máquina de ensayo.

La electrónica para acondicionamiento de señal para el extensómetro suele estar incluida en el controlador de la máquina de ensayo o se suele agregar. En este caso el extensómetro se envía con el conector adecuado y el cableado de conexión directamente a la electrónica.

En los sistemas que no disponen de la electrónica necesaria, Épsilon puede facilitar una diversidad de soluciones, que permiten conectar la salida del extensómetro en placas de adquisición de datos, registradores gráficos u otros equipos.

Los ensayos de tracción para cada material de este estudio se han realizado a la temperatura de 22° C y con una velocidad de 10 mm/min y utilizando una célula de carga de 50 kN.

Los requisitos que se deben de cumplir en el ensayo de tracción, se exponen a nivel de cuadro resumen en la Figura 117.

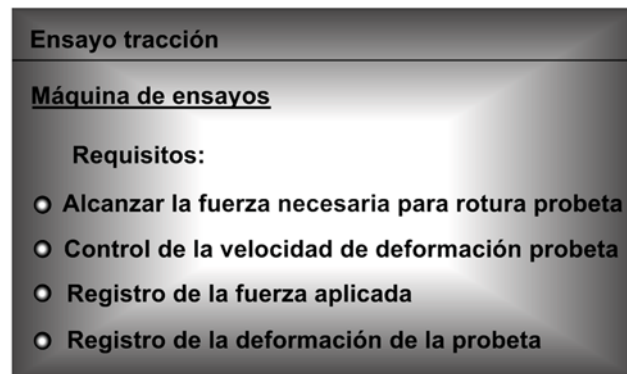


Figura 117. Requisitos a cumplir en el ensayo de tracción.

El módulo de elasticidad en tracción viene definido por la expresión:

$$E = \frac{R_2 - R_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}.$$

Donde:

- E: es el módulo de elasticidad en tracción (MPa).
- R1 es el esfuerzo (MPa) medido para una deformación $\varepsilon_1 = 0.0005$.
- R2 es el esfuerzo (MPa) medido para una deformación $\varepsilon_2 = 0.0025$.

3.2 Ensayo de flexión

En la Figura 118 se muestra la imagen del accesorio empleado para la realización del ensayo de flexión de las probetas.

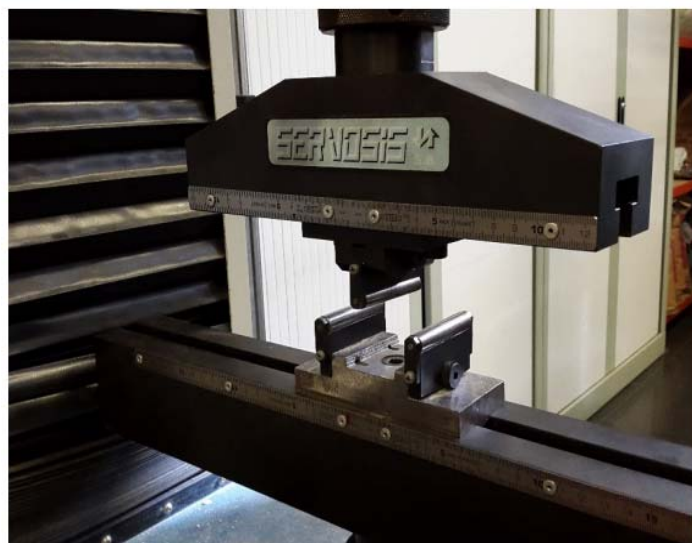


Figura 118. Imagen del accesorio utilizado para el ensayo de flexión.

Normativa aplicada al ensayo de flexión

Para el ensayo a flexión en tres puntos de apoyo, Figura 119 la obtención de las probetas y el desarrollo del ensayo, se ha seguido la normativa UNE-EN ISO 14125: 2002 [212]. Cantidad de probetas a ensayar: 5.

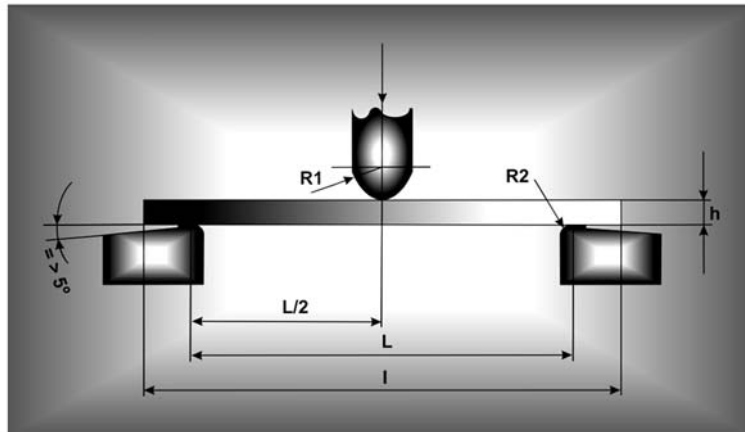


Figura 119. Dimensionamiento general de las probetas para el ensayo de tracción sobre tres puntos de apoyo.

Dimensionamiento concreto para distintos tipos de refuerzos.

Tabla 37. Dimensionamiento de las probetas según el tipo de refuerzo.

Tipo de refuerzo	Longitud probeta	Distancia entre apoyos	Anchura	Espesor
Fieltro, hilo continuo y tejidos	80	64	15	4
Ensamblados de fibra vidrio	60	40	15	2
Ensamblados de fibra carbono	100	80	15	2

Velocidad del ensayo:

$$\text{Velocidad de ensayo} = \frac{\text{espesor}}{2} \left(\frac{\text{mm}}{\text{minuto}} \right).$$

Esfuerzo de flexión:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}.$$

Módulo de flexión determinado entre deformaciones unitarias en flexión de 0,0005 y 0,0025.

$$\varepsilon_f = \frac{S \ 6 \ h}{L^2}.$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f0,0025} - \sigma_{f0,0005}}{\sigma_{f0,0025} - \sigma_{f0,0005}}.$$

Donde:

- F: Fuerza (N).
- L: Distancia entre apoyos (mm).
- B: Anchura probeta (mm).
- H: Espesor (mm).
- S: Flecha (mm).

La determinación del módulo se realiza a través de la expresión, que relaciona las dimensiones de la probeta con la relación fuerza-flecha:

$$E = \frac{L^2 \ \Delta F}{4bh^3 \Delta s}.$$

Donde:

- E: es el módulo de elasticidad de flexión (MPa).
- Δs : es la diferencia de las flechas entre s'' y s' (mm), para una deformación $\varepsilon'' = 0.0025$ y $\varepsilon' = 0.0005$ respectivamente.
- ΔF : es la diferencia entre las cargas F'' y F' en s'' y s' respectivamente, (N).
- L: es la distancia entre apoyos (mm).
- b: es la anchura media de la probeta (mm); h es el espesor medio de la probeta (mm).

3.3 Péndulo de charpy

El ensayo de impacto Figura 120 se ha realizado mediante un péndulo charpy de la marca METROTEC, S.A.

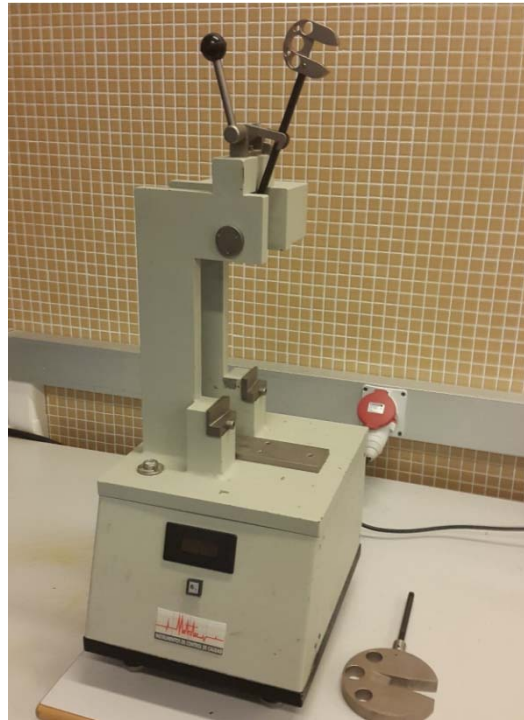


Figura 120. Imagen del péndulo de Charpy.

Normativa aplicada al ensayo de impacto

La determinación de la energía de impacto se ha obtenido bajo la normativa ISO 179:1993 [213].

En la Figura 121 a modo de cuadro resumen se expone la normativa complementaria a la normativa ISO 179:1993.

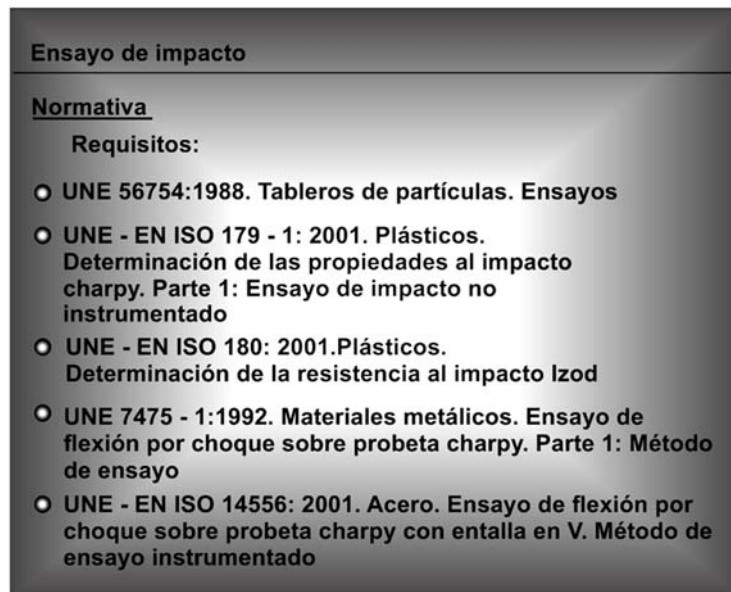


Figura 121. Normativa complementaria.

Accesorios utilizados en el ensayo de impacto

Péndulo pequeño de 1 Julio, para hacerlo servir en materiales con escasa resistencia al impacto y por lo tanto con escasa energía. El péndulo grande de 6 Julios, para materiales con mayor resistencia de impacto Figura 122.

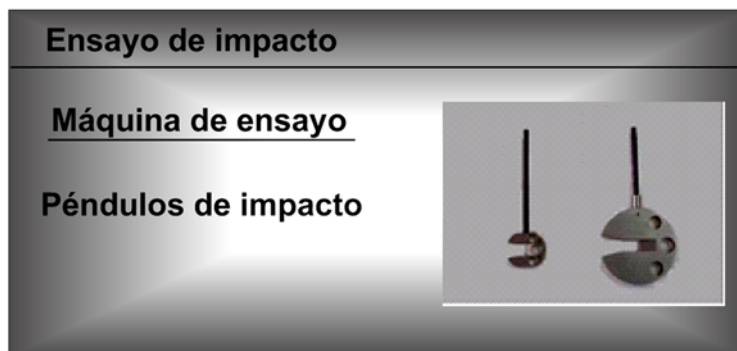


Figura 122. Tipos de péndulos utilizados en el ensayo de impacto.

En la Figura 122 se muestran todos los accesorios utilizados en los ensayos de impacto.

La Figura 123 ilustra la cantidad de masas de impacto aplicadas a la normativa ISO.

Es indispensable para la buena realización del ensayo, que no se cambie de valor de la maza de impacto elegida durante el ensayo de las probetas. La variación de las mazas que se utilizan para el ensayo de péndulo de impacto pueden variar desde un valor de 0,5 a 25 julios. En el caso de los ensayos de los 10 composites se ha utilizado una maza de 1 julio.



Figura 123. Imagen del tipo de masas de impacto aplicadas a la normativa ISO.

Requisitos del ensayo de impacto

Los requisitos de la máquina de ensayo de impacto, se reflejan en forma de cuadro resumen en la Figura 124.

Ensayo de impacto
Máquina de ensayos
Requisitos:
<input type="radio"/> Romper la probeta
<input type="radio"/> Reproducir la velocidad de aplicación de la carga
<input type="radio"/> Medición de la energía de absorción de probeta en el impacto

Figura 124. Requisitos a cumplir en el ensayo de impacto.

El valor de la energía absorbida por la probeta en su rotura, resiliencia, viene determinada por la expresión:

$$a_{cu} = \frac{W}{be}$$

Donde:

- a_{cu} : es el valor de la resiliencia (kJ/m^2).
- W : es la energía medida en el ensayo (kJ).
- b : es la anchura promedio de la probeta (m).
- e : es el espesor promedio de la probeta (m);

3.4 Dureza Shore D

La resistencia a la dureza, se ha realizado mediante en un durómetro Shore de la marca INSTRUMENTS J. BOT, S.A (Barcelona, España) modelo 673D.

La escala utilizada en el ensayo es Shore D donde se emplea una aguja no roma y cuyo ángulo de la punta es 30° Figura 125.



Figura 125. Imagen del durómetro Shore utilizado en el ensayo de dureza.

Normativa aplicada al ensayo de dureza

Ensayo realizado bajo la normativa UNE EN ISO 868:2003 [214].

4. Caracterización dinámica

4.1 Shaker

El Shaker junto al generador de función de la marca PASCO, van a ser los encargados de generar las frecuencias de vibración y permitir la observación de que frecuencia es la más cercana a la frecuencia natural del sistema Figuras 126 y 127.



Figura 126. Imagen del Shaker (vibrador electrodinámico). Utilizado para el ensayo de vibración forzada.



Figura 127. Generador de funciones.

4.2 Método de análisis modal impulso-respuesta

Este método vibracional consiste en la excitación de un material mediante un martillo de impacto Figura 128 que transmite al material un estado vibracional que es recogido a través de un acelerómetro [215] que convierte las vibraciones en señales que son analizadas por una tarjeta electrónica [216], Figura 129 que transforma la señal en datos que se presentan en un ordenador por medio de gráficas de Función de Respuesta de Frecuencia.



Figura 128. Martillo de impacto y acelerómetro.



Figura 129. Tarjeta electrónica de frecuencia de la casa National Instruments.

4.3 Método de vibración libre

El sonido es generado por una vibración forzada por la flexión en el extremo libre de la probeta y posterior liberación de la probeta. Este fenómeno va a generar una vibración que será captada por un micrófono de la marca B&K. El ensayo de vibración libre se lleva a cabo bajo la Norma ASTM C1215 – 92:2012 [217].

En la Figura 130 se muestra la imagen del micrófono empleado en el ensayo.



Figura 130. Imagen del micrófono unidireccional de elevada precisión.

5. Caracterización acústica

5.1 Cámara de transmisión

El ensayo se realiza según la norma UNE-EN ISO 10140-4:2016 [218]. Con la cámara de transmisión a escala, se permite obtener el valor del aislamiento a ruido aéreo, bajo ciertas limitaciones, de placas de biocomposites de apenas 1m².

En cada ensayo de aislamiento acústico se mide el tiempo de reverberación en el recinto receptor mediante el método de ruido interrumpido. Para ello se utiliza uno de los altavoces como fuente de ruido. Además, en cada ensayo se comprueba que el ruido de fondo en el recinto receptor sea 15 (dB) inferior al ruido recibido durante el ensayo.

La norma UNE-EN ISO 10140-4:2016, establece los procedimientos de medición básicos para el aislamiento acústico a ruido aéreo en instalaciones de ensayo de laboratorio. En la Figura 131 se puede ver un esquema sencillo del conexionado y equipo empleado durante las mediciones y en la Figura 132 una imagen tomada durante la preparación de uno de los ensayos de aislamiento acústico en la cámara de transmisión para muestras de tamaño reducido. Entre ellos especifica que para cada posición de altavoz fija se deben utilizar un mínimo de cinco posiciones de micrófono en cada recinto.

Procedimiento

- Obtención del tiempo de reverberación en la cámara emisora y receptora:
- Obtención de la absorción:
- $A = 0,16V / TR$
- Medición de la presión sonora en el emisor y en el receptor.
- Obtención del aislamiento acústico al ruido aéreo
- $R \text{ (dB)} = L_E - L_R + 10 \text{ Log } S / A.$

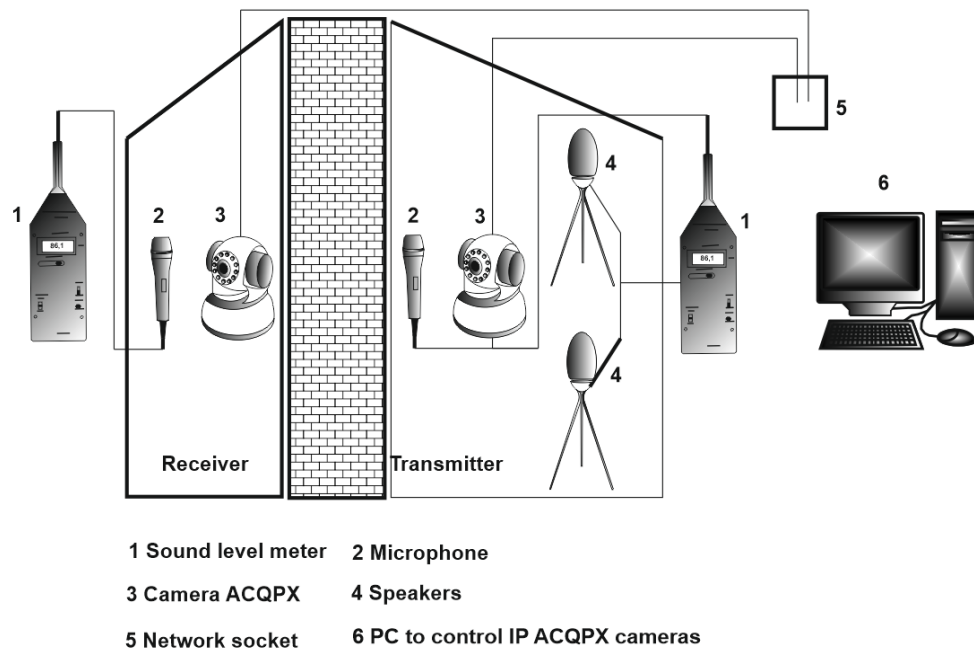


Figura 131. Conexión cámara de transmisión.



Figura 132. Captura de imagen durante la puesta en marcha del ensayo de aislamiento acústico al ruido aéreo en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Normativa:

- UNE – EN ISO 10140-2:2016: Medición en laboratorios de aislamiento acústico de los elementos de construcción Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo (ISO – 10140-2:2010).
- UNE – EN ISO 10140 – 4:2016. Medición en laboratorios de aislamiento acústico de elementos de construcción. Procedimientos y requisitos de medición. (ISO 10140-4:2010).
- UNE – EN ISO 10140 – 5:2016. Medición en laboratorios de aislamiento acústico de elementos de construcción. Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo. (ISO 10140- 5:2010).

5.2 Cámara de reverberación

La cámara reverberante es uno de los laboratorios acústicos de mayor uso para la determinación del coeficiente de absorción de los materiales.

Debido a que, a nivel de investigación de nuevos materiales, en muchas ocasiones se dispone de probetas menores de 1 m² para la realización de ensayos de absorción acústica, se utiliza la cámara reverberante a escala. Con lo obtención de la absorción acústica de probetas de reducido tamaño.

En la imagen de la Figura 133 se muestra el esquema de la cámara reverberante.

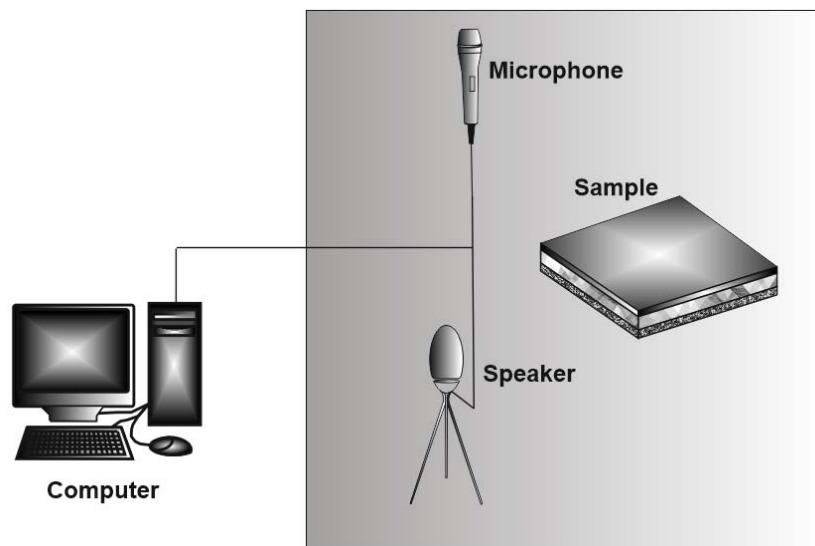


Figura 133. Montaje para la medición en cámara reverberante.

Normativa:

- UNE – EN ISO 354:2004 [219]. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003).

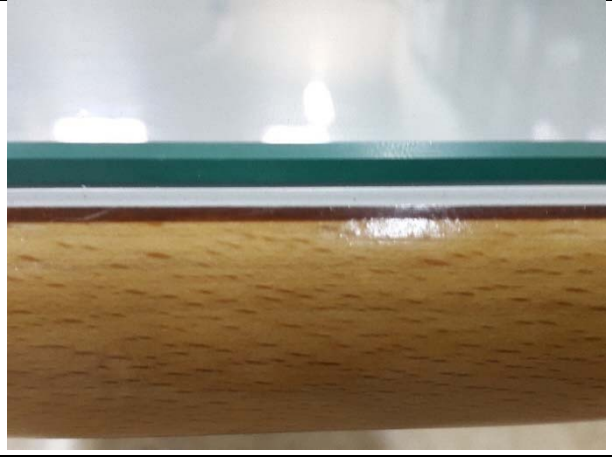

V. Materiales


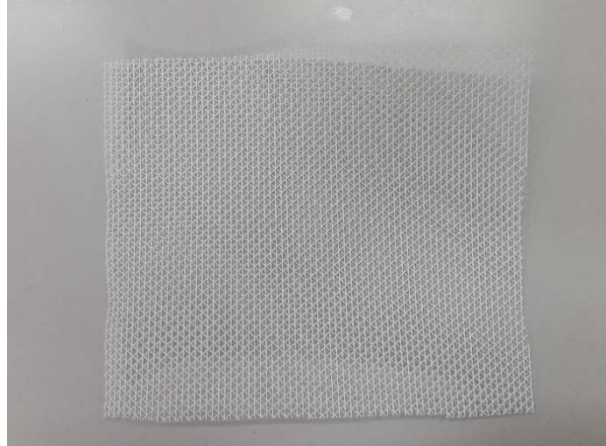

1. Materiales fungibles



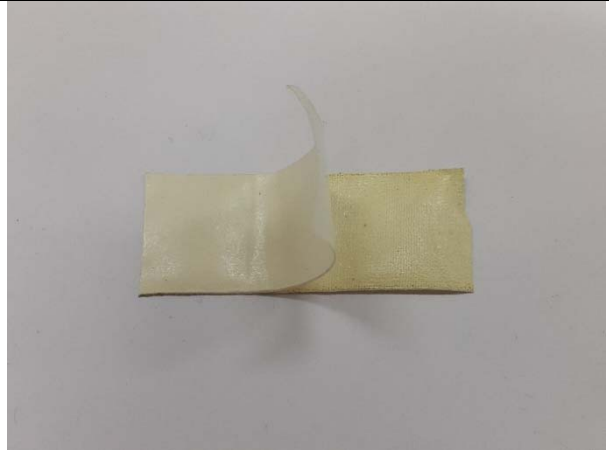
El material fungible son todos aquellos materiales que se consumen en la fabricación de las láminas de material compuesto. En la Tabla 38 se ilustran el conjunto de materiales utilizados para la preparación, fabricación y el control del proceso de infusión.




Todo el material fungible utilizado para la realización del proceso de infusión de las láminas ha sido adquirido a la empresa MATVA, Materiales de Vacío, S.L.

Tabla 38. Materiales utilizados en la fabricación de los composites.

Designación	Imagen
Placa de vidrio de 5 mm	
Tijeras de corte especiales	

<p>Tejido pelable</p>	
<p>Red de infusión o distribución</p>	
<p>Canal de entrada</p>	

<p>Canal de infusión</p>	
<p>Tubo de aspiración helicoidal de polietileno</p>	
<p>Cinta adhesiva de doble cara</p>	

<p>Bolsa de vacío</p>	
<p>Masilla de cierre</p>	
<p>Tubo de polietileno</p>	

Codo a 90° y codo en "t"



Llave de cierre



Medidor de temperatura





De los materiales citados anteriormente, se tiene que hacer referencia al medidor de fugas que se utiliza como su propio nombre indica para el control de las fugas de aire localizadas sobre todo en la periferia de la bolsa de vacío.

Si se produce alguna fuga se dificultará la infusión, lo que producirá una falta de compactación entre las distintas capas del tejido, lo que conllevará a la obtención de placas con defectos de laminación.

El medidor de temperatura, es fundamental para el control de la temperatura de la resina en su fase de curado, en la que se produce la reacción que debe de ser controlada, ya que si se supera el tiempo de gelificación será imposible realizar la infusión de la resina.

2. Resinas

2.1 Resina biodegradable

Como matriz polimérica se ha elegido una bioresina epoxi que se encuentra disponible en el mercado, y fabricada por la compañía Entropy Resins Inc. (EE.UU) bajo el nombre comercial de SUPER SAP® CLR Epoxy y distribuida en Europa por Ferrer-Dalmau (Barcelona) [220].

Esta resina “sustainable epoxy”, como así recibe la denominación de su fabricante, es una resina epoxi modificada, en cuya formulación se han reemplazado parcialmente componentes derivados del petróleo por biomateriales renovables, procedentes de derivados o residuos de otros procesos industriales, como la producción de pulpa de madera y de bio-fuel [221,222]. En concreto, contiene aceite epoxidizado de pino y derivados de la producción de bio-fuel.

Esta resina puede ser catalogada por su origen como "bio-based epoxy". Según fabricante, alcanza un bio-contenido en masa entre el 30,8% y el 45,2%, empleando para su cálculo el bio-carbón content number, de acuerdo a la norma ASTM D6866 [223] y su estructura molecular.

Las características se pueden observar en la Tabla 39. En la Figura 134 se puede apreciar los dos componentes A y B que se utilizan en la formulación de la resina, donde el componente A es la resina base y el componente B es el iniciador o endurecedor de la misma.

Tabla 39. Características de la resina biodegradable utilizada.

Denominación comercial	SUPERSAP CLR
Viscosidad @ 25°C (cPs)	2000-4000
Densidad (kg/lit)	1,0
Tiempo de Gelificación @ 25°C (min)	20



Figura 134. Imagen de la resina Super SAP CLR "Entropy Resins".

Propiedades

La Resina Epoxi (Epoxy en inglés) es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador.

Es un tipo de resina muy versátil ya que posee un gran rango de propiedades [104]. Su gran adherencia en todo tipo de soportes hace que sea un producto ampliamente utilizado en una gran variedad de aplicaciones.

Para mejorar sus prestaciones, se modifican sus propiedades para adecuarse al uso específico como su temperatura de transición vítrea, tiempo, endurecimiento, viscosidad, dureza, etc.

El curado de una resina epoxi, empieza al mezclar un endurecedor (componente B), creando una red de moléculas tridimensionales y resultando en un sólido episódico que ofrece una alta resistencia química y a la corrosión.

La temperatura de transición vítrea de este tipo de resinas es de los mayores, aportando un buen rendimiento a temperaturas hasta 80-100 °C.

La exposición de la resina epoxi a los rayos UV (refuerzos expuestos a la luz solar) puede producir su degradación. Para evitar que esto ocurra es recomendable la aplicación de un revestimiento en base de poliuretano.

Las resinas epoxi son uno de los materiales más utilizados en la preparación de materiales compuestos, debido a:

- Su facilidad de procesado (a baja presión y temperatura).
- Buena adhesión a distintos tipos de sustratos.
- Baja contracción en el proceso de curado.
- Mejora tras el curado de las propiedades mecánicas, resistencia térmica y química.
- Su bajo coste.
- Relativa alta resistencia en ambientes cálidos y húmedos.

Por el contrario, una de sus limitaciones es la necesidad de realizar un proceso de curado cuya duración viene dado principalmente por la temperatura a la cual se realiza. La duración del curado disminuye al aumentar la temperatura, ya que aumenta la velocidad de las reacciones químicas implicadas, pero tiene un límite por encima del cual lo que se produce es una degradación térmica del material.

Sistema utilizado

El sistema utilizado para realizar la infusión del material es denominado "SUPER SAP ® CLR Epoxy System - Clear", que consta de dos partes como se menciona anteriormente, el componente A es la resina y actualmente la empresa distribuye tres tipos de endurecedores, componentes B.

- El tipo CLF, es un endurecedor de velocidad rápida.
- EL tipo CLS, es un endurecedor de velocidad lenta.

- El endurecedor CLX, es un nuevo tipo de iniciador que permite alcanzar velocidades extra rápidas de curado, específicas para la elaboración de laminados.
- El tipo de iniciador utilizado en la fabricación de las láminas en este trabajo es del tipo CLF.

A diferencia de las resinas convencionales, que se componen de materiales basados de la extracción del petróleo, el sistema SUPER SAP, contiene materiales biorenovables obtenidos de productos de residuos de procesos industriales tales como la extracción de la pulpa de madera y la producción de bio-combustibles. Estos componentes naturales presentan excelente elongación y propiedades excepcionales de alta adhesión.

La identificación química exacta de la parte A es un secreto industrial. Esta parte está compuesta de epoxidado de aceite de pino, bisfenol A/F del tipo de resina epoxi, alcohol de bencilo y diluyentes reactivos epoxi de propiedad de la empresa.

De la misma manera, la parte B, la identificación química exacta también es un secreto industrial, sin embargo, se conoce que está compuesto por una solución de polímero de poliamida, isoforondiamina, 1,3- bencendimetanamina (MXDA), bencildimetilamina y varios componentes de poliamina propiedad de la empresa.

La relación de mezcla óptima en peso, 100 gramos de Parte A con 47 gramos de Parte B, generalmente aplicable para procesos de moldeo por bolsa de vacío, moldeo manual y en general procesos de laminado.

El tiempo de curado recomendado es de 7 días a 25 °C y la ficha establece un tiempo de gelificación de 20 a 25 minutos a la misma temperatura. Se debe tener bastante cuidado sobre no superar este tiempo. Pasado el tiempo de gelificación es imposible realizar la infusión de la resina.

2.2 Resina de poliéster

La resina de poliéster, utilizada en éste trabajo para realizar la comparativa de propiedades con respecto a los composites biodegradables es la resina Norsodyne

El producto se presenta en forma líquida con un color rosa transparente. Se trata de una resina de poliéster no saturado, ortoftálico, con reactividad y viscosidad baja preacelerada.

En la Tablas 40 y 41 se recopilan las propiedades de la resina polimerizada.

Tabla 40. Propiedades de la resina Norsodyne.

Peso específico (g/cm³)	1,20
Resistencia a la tracción (MPa)	60
Elongación a la rotura (%)	1,80
Resistencia a la flexión(MPa)	105
Propiedades físicas módulo de flexión (MPa)	4 300
Temperatura de deformación (°C)	60
Contracción (%)	7

Características

Tabla 41. Propiedades físicas y de curado de la resina Norsodyne.

Peso específico a 25°C (g/cm³)	1,12		
Viscosidad a 25°C (dPa.s)	3,65		
Extracto seco (%)	63,50		
Reactividad			
Temperatura de ensayo (°C)	25		
Sistema catalítico (%)	2,5- 50 Mekp		
Cantidad de resina (g)	100		
	Versión	Invierno	Verano
Tiempo de gel (minutos)		11,50	16
Tiempo total (minutos)		26	36
Temperatura máxima (°C)		175	165

3. Tipo de fibras y/o tejidos


Las fibras y/o tejidos utilizados en la fabricación de las placas con resina biodegradable se han obtenido de diversas empresas suministradoras. Las fibras y/o tejidos son de carácter lignocelulósico de origen natural, exceptuando la fibra textil o también conocida como borra esta se obtiene del triturado y cardado de materiales textiles de diversa procedencia. En la Tabla 42 se puede observar cada uno de los suministradores de dichos materiales empleados.

Tabla 42. Características de las fibras utilizadas.

Tipo de fibra	Suministrador
Fibra de Yute	Hijos de Antonio Ferre, S.A
Fibra de Lino Biaxial	Jordi Sacrista, S.L
Fibra de Materia Textil Borra	Arte Nuevo, S.L
Fibra de Coco	Barnacork, S.L
Fibra de Cáñamo	Cannabric, S.L

En la Tabla 43 se puede observar cómo es la textura de cada una de las fibras y/o textiles utilizados en éste proyecto mediante una imagen de cada una de ellas.

Tabla 43. Fibras utilizadas en la fabricación de placas.

Tipos de fibras	Imagen
Fibra de yute	

<p>Fibra de lino biaxial</p>	
<p>Fibra de Materia Textil Borra</p>	
<p>Fibra de coco</p>	



Se realiza un análisis de la morfología de las fibras, mediante un microscopio óptico y se decide la dirección en la cual se realizan los ensayos para caracterizar el material elaborado.

Se cortan pequeñas muestras para su observación. En la Figura 135 se muestra empezando de izquierda a derecha la fibra de yute, a continuación, la fibra de lino biaxial, le sigue la fibra de cáñamo, la fibra de coco y por último la fibra de Materia Textil Borra.



Figura 135. Muestras de fibras naturales.

3.1 Características generales de las fibras utilizadas

Entre las características que hacen atractivas las fibras naturales, destacan sus elevadas propiedades de resistencia y rigidez, resistencia al impacto y flexibilidad [224]. Al mismo tiempo proporcionan un aislamiento térmico, acústico y ligereza estructural, lo que da lugar a una reducción de peso, y por lo tanto a un menor consumo de combustible y menores emisiones contaminantes.

Sin embargo, en valores de rigidez específica, las fibras naturales como el lino (flax), el cáñamo (hemp) y el yute (jute) inclusive, son superiores a la de la fibra de vidrio.

En la actualidad, las fibras naturales, se presentan de distintas formas, bien en forma de fibras cortas, aleatorias, largas y orientadas (tejidos). La elección de la fibra natural

idónea para la fabricación del biocomposite dependerá de su aplicación, de las condiciones del procesado y de la geometría deseada. Las propiedades físico-mecánicas finales del material compuesto serán distintas según su orientación, forma, tamaño y origen del refuerzo. Por ejemplo, si se trata de la fabricación de un material compuesto de matriz polimérica de tal modo que todas las fibras se encuentren paralelas entre sí, el material tendrá una gran resistencia en la dirección de las fibras, pero muy poco en el sentido perpendicular. Siendo un reto fundamental en el diseño de estructuras a las que se apliquen fuerzas multidireccionales, por esto las distintas disposiciones de fibra natural van a conseguir materiales con propiedades mecánicas muy específicas que se adaptarán a los distintos aspectos que requiere un determinado diseño, es decir, las fibras naturales van a permitir la fabricación de materiales a la carta

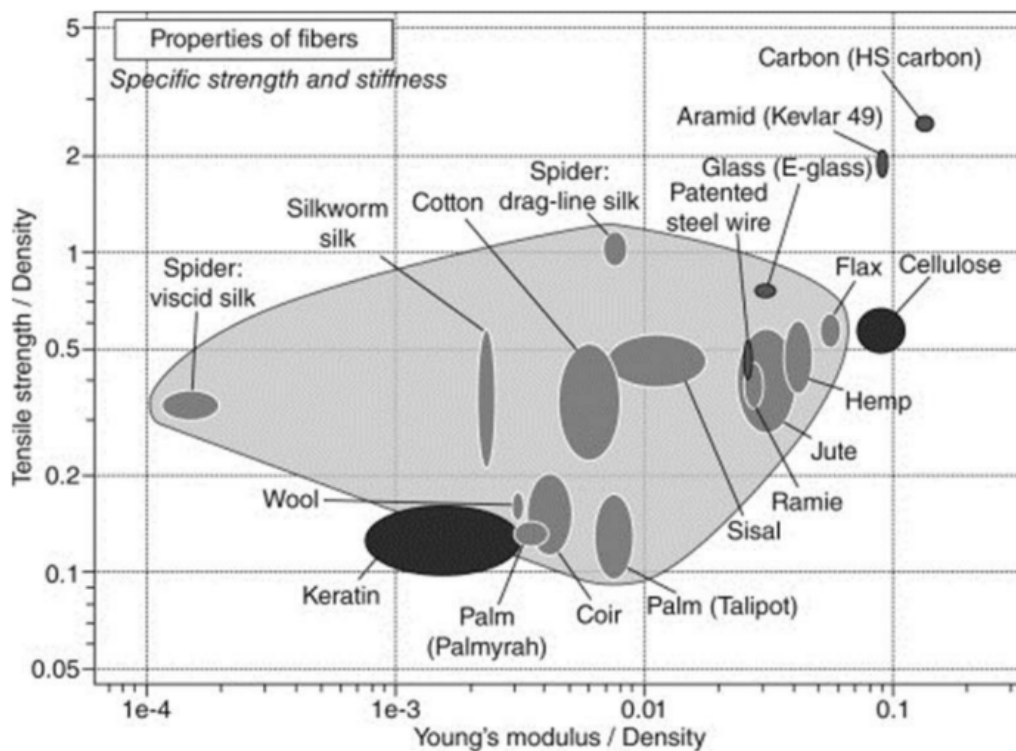


Figura 136. Comparación de las propiedades específicas de las fibras naturales y las no renovables [225].

Fuente: Michael F. Ashby 1999.

3.1.1 Fibra de yute

Las fibras de yute se presentan en forma de fibras o de mat [226].

Características de la Fibra

Nombre técnico: **Fibra de Yute T2728160 (Tafetán (0-90))**.

Espesor Inicial individual: **0,75 mm**.

Gramaje: **315 g/m²**.

Las fibras de yute tienen una baja densidad y por lo tanto son mucho más ligeras que las fibras de vidrio, carbono y kevlar.

Entre sus propiedades mecánicas destacan su buena resistencia y rigidez. Este tipo de fibra se está utilizando ampliamente en sectores como el de la automoción [56, 62].

Fibra del tallo. La más económica de las fibras textiles y la segunda fibra más utilizada después del algodón. No se cultiva en nuestro clima.

El yute es extraído de la corteza de la planta de yute blanco, *Corchorus capsularis* y en menor cantidad del yute rojo (*C. olitorius*). Éste florece en áreas de tierras bajas tropicales con una humedad del 60% al 90%.

Los rendimientos son de cerca de 2 toneladas de yute seco por hectárea. Llamada la "fibra dorada", el yute es larga, suave y brillante, con una longitud de 1 a 4 metros y un diámetro de entre 17 a 20 micrómetros.

Es una de las fibras naturales vegetales más fuertes (alta resistencia a la tracción) aunque frágil. Sólo está en segundo lugar con el algodón, en términos de cantidad de producción.

El yute tiene propiedades altamente aislantes y antiestáticas, moderadas reabsorción de humedad y baja conductividad térmica.

Es una de las fibras naturales más fuertes (presenta una alta resistencia a la tracción), [62] aunque frágil. La fibra de yute se presenta en forma de ligamento simple, denominado Tafetán (ligamento más básico) en la elaboración de un tejido de calado (Se entiende por ligamento el orden en que se entrecruzan los hilos de la urdimbre con las pasadas de la trama).

Cada pasada de la trama cruza los hilos de la urdimbre yendo por encima del primero y por debajo del segundo, y así sucesivamente. El ligamento tafetán se caracteriza por ser fuerte y resistente.

Es un tejido de calado de dos dimensiones (2D), y se caracteriza por tener una estructura bidireccional a 0/90 (BE), donde la trama y la urdimbre realizan la misma trayectoria.

La Figura 137 muestra el picaje de la fibra de yute.

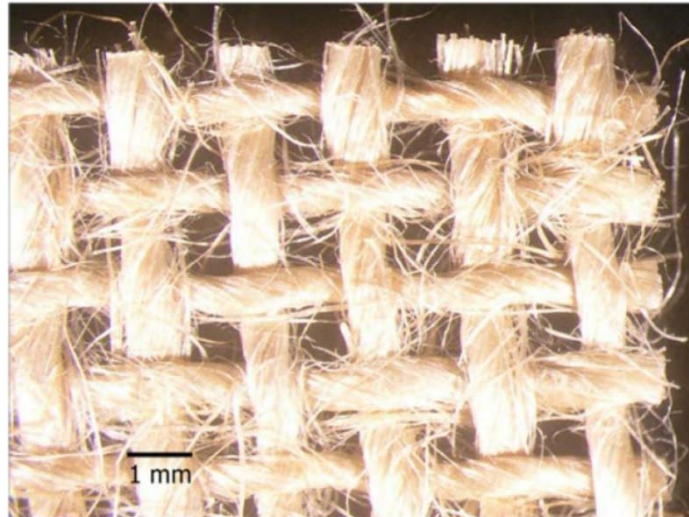


Figura 137. Imagen tomada en microscopio óptico de la fibra de yute x 0,8 aumentos.

Como se puede observar en la Figura 137 la fibra de yute es larga; presentando cada uno de sus filamentos un conjunto de hilos finos. La urdimbre, que es como se denomina al conjunto de hilos dispuestos verticalmente en un tejido. Será la que se encuentre sometida a los esfuerzos de tensión. Por este motivo, cuando se realice el corte del composite de yute, para la elaboración de sus probetas, se realizará en esta dirección.

Para la composición de la lámina de composite, se utilizan 6 capas de fibra de lino ortogonal, apiladas sin variar la orientación de sus fibras. Las dimensiones de las capas son de 55 x 85,5 mm. La masa de resina utilizada es de 2,3 kg.

El yute reemplazó por largo tiempo a las fibras de lino y cáñamo en la arpillera. Hoy, la arpillera aún es el grueso de los productos manufacturados de yute.

El hilo y los cordeles de yute son también tejidos en cortinas, cubiertas de sillas, tapetes, tapices y forros para linóleo.

Mezclado con otras fibras, es usado en cubiertas de cojines, juguetes, pantallas de lámparas y zapatos.

Los hilos muy finos son separados y convertidos en seda de imitación. El yute está siendo usado crecientemente en empaques rígidos y plástico reforzado y está reemplazando a la madera en pulpa y papel. Los geotextiles hechos de yute son biodegradables, flexibles, absorben la humedad y drenan bien. Estos son usados para prevenir la erosión del suelo y los deslizamientos de tierra.

Tabla 44. Prestaciones de la fibra de yute.

Prestaciones de la fibra de yute	
Presentación	Floca
Producción anual (Tm)	2,6 millones
Exportación (Tm)	La India:200 000 Bangladesh:400.000
Productores	India Bangladesh China Nepal

3.1.2 Fibra de lino

Características de la Fibra

Nombre técnico: **Fibra de Lino Biaxial AmpliTex (+/-45 1270MM (ML)).**

Espesor Inicial individual: **0,8 mm.**

Gramaje: **370 g/m².**

Lino: es la fibra más utilizada en la fabricación de materiales compuestos debido a sus elevadas prestaciones mecánicas, es la fuente más importante para competir con las fibras de vidrio [227].

Fibra natural procedente del tallo de la planta herbácea del lino. Consiste probablemente, en el cultivo más antiguo de fibras conocido hasta la actualidad, remontándose en Europa hasta el Neolítico.

Es una fibra suave, lustrosa y flexible. Se caracteriza por una mayor resistencia que el algodón, pero con una menor elasticidad.

Tabla 45. Prestaciones de la fibra de Lino.

Prestaciones de la fibra de lino	
Presentación	Floca. Bobina
Producción anual (Tm)	160 000
Exportación (Tm)	China: 60 000
Productores	Unión Europea, China

La fibra de lino se presenta al igual que la fibra de yute en forma de ligamento simple, pero en este caso su ligamento es biaxiales concretamente a $+45/-45$ (BXE). En la Figura 138 se muestra cada uno de los filamentos del lino está formado por un conjunto de hilos. Para realizar el estudio de las probetas del lino biaxial se deberá de realizar el corte de las mismas en ambas direcciones, es decir en dirección longitudinal y transversal.

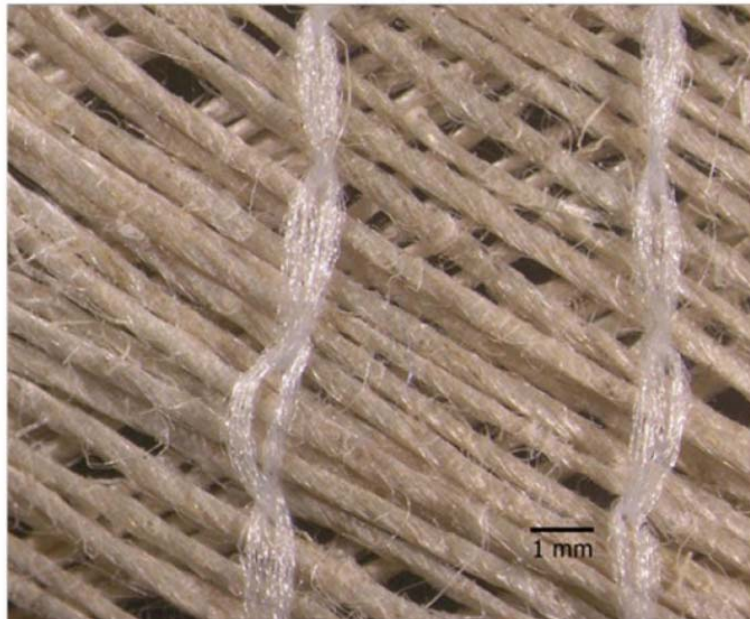


Figura 138. Imagen tomada en microscopio óptico x 0,8 aumentos de la fibra de lino biaxial.

Para la fabricación de la lámina de composite de lino biaxial, se utilizan 6 capas de fibra, apiladas sin variar la orientación de sus fibras. Las dimensiones de las capas son de 55 x 85,5 mm. La masa de resina utilizada es de 1,53 kg.

3.1.3 Fibra de Materia Textil Borra

Características de la Fibra

Nombre técnico: **Manta Textil.**

Espesor Inicial individual: **1,5 mm.**

Gramaje: **225 g/m².**

La borra es un material que se obtiene de la trituración de varios productos textiles [228], por lo tanto, se considera como un aglomerado depositado sobre un film polimérico [229].

No se puede considerar a la borra como un tejido, sino como una materia textil disuelta, ya que no mantiene un orden considerable en la disposición de sus componentes.

Si se observa en el microscopio, se observa un cumulo de fibras cortas ubicadas de forma aleatoriamente que se mantienen adheridas entre sí por el adhesivo y por la presión a la que fueron sometidas en si proceso de fabricación.

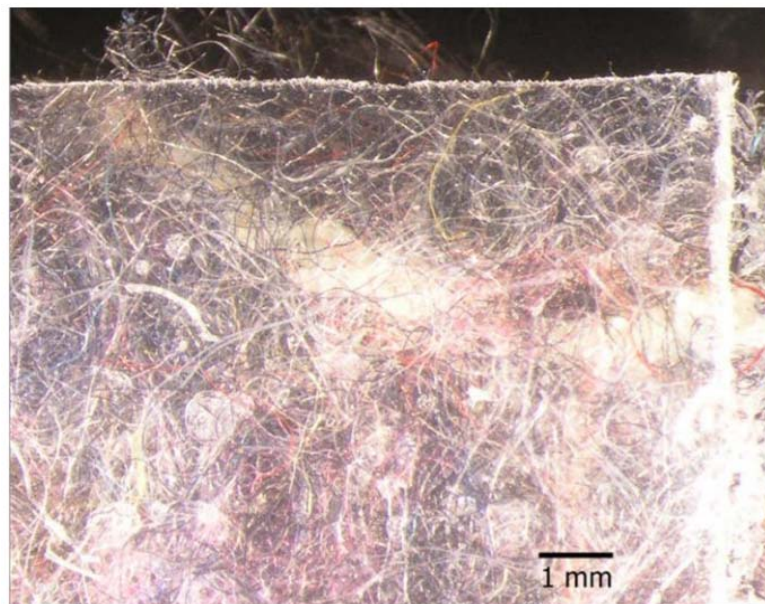


Figura 139. Imagen tomada en microscopio óptico x 0,8 aumentos de la materia textil borra.

Las fibras que conforman el residuo textil, son de índoles diversas, formadas por fibras de origen sintético como pueden ser el nylon y el poliéster. También puede contener fibras de origen natural vegetal como pueden ser el algodón y el lino o de origen animal como la lana. En la Figura 139 se puede observar en su parte superior el film de material sintético que actúa como base para mantener sujeta a la borra.

Para la fabricación de la placa de residuo textil disuelto, se debe en primer lugar de retirar el film, y a continuación se utilizan 5 capas de fibra textil apiladas. Las dimensiones de las capas son de 55 x 85,5 mm. La masa de resina utilizada es de 2,27 kg.

3.1.4 Fibra de coco

Características de la Fibra

Nombre técnico: **Fibra de Coco S-15.**

Espesor Inicial individual: **6,5 mm.**

Gramaje: **2.516 g/m².**

La fibra de coco [230] se obtiene del fruto del cocotero, originario de las islas del Océano Pacífico. Su uso tradicional ha sido destinado a la fabricación de cordajes, siendo la principal fibra dura utilizada por los fabricantes de cuerdas europeas.

Su proceso de extracción se realiza tradicionalmente mediante el triturado de su cascara y posterior remojo en baños de "Retting" durante un periodo mínimo de 72 horas con lo que se facilita la penetración de agua y la acción de las bacterias descomponedoras.

Después las fibras se extraen mediante una máquina especial (denominada drums). El proceso de extracción también se puede realizar en seco, considerando a este método el más eficiente en la actualidad. Del coco se pueden obtener tres tipos de fibras: fibras más largas para la fabricación de esteras, fibra de cerda (más tosca) y tipo fibra de colchón (mucho más corta).

Las fibras más largas son las denominadas fibras blancas, cuyo origen son los cocos verdes; los otros dos tipos de fibra son coloreadas y su procedencia son los cocos maduros.

Los grados de calidad de las fibras, vienen determinados por su: resistencia, limpieza y color.

Tabla 46. Prestaciones de la fibra de Coco.

Prestaciones de la fibra de coco	
Presentación	Floca
Producción anual Tm	1 111 300
Exportación Tm	60 000
Productores	Estado de Kerala (India) 60% Sri Lanka : 36% México Indonesia Vietnam Caribe

El uso principal de las fibras de coco es:

- Cepillos.
- Cuerdas y redes de pesca.
- Alfombras y esterillas.
- Colchones Estructuras de aislamiento térmico y acústico.
- Composites en sustitución de la madera Geotextiles.

Las fibras de coco son resistentes a la humedad. Son inmunes a los roedores y termitas. No se pudren y no producen hongos. Sus propiedades se pueden aplicar en aislamiento acústico (Reducción de ruidos aéreos: 47 dB). Tiene un comportamiento al fuego: Clase B.

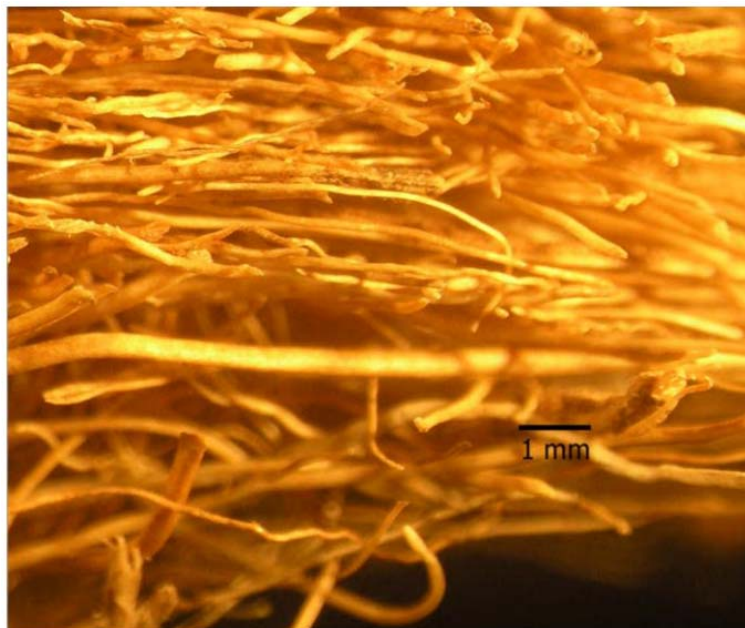


Figura 140. Imagen tomada en microscopio x 0,8 aumentos de la fibra de coco.

En la Figura 140 se muestran que las fibras de coco tienen distintos tamaños y se encuentran entrelazadas entre sí, sin un orden establecido.

El espesor medido en la fibra de coco es variable, oscilando entre 6,5 mm y los 10 m.

Para la fabricación de la placa, se utiliza 1 capa de fibra de coco. Las dimensiones de la capa son de 55 x 85,5 mm. La masa de resina utilizada es de 4,54 kg.

3.1.5 Fibra de cáñamo

Características de la Fibra

Nombre técnico: **Fibra de Cáñamo Technifeutre.**

Espesor Inicial individual: **5 mm.**

Gramaje: **2.245 g/m².**

La fibra de cáñamo se caracteriza por su aislamiento térmico y acústico, ideal como refuerzo de paneles en sector de la construcción o en piezas para interiores del sector de la automoción [125].

Fibra que procede del líber de la planta Cannabis sativa L. Ésta planta crece fácilmente hasta una altura de 4,5 metros sin agroquímicos y captura grandes cantidades de carbón. El cáñamo es casi un 70% de celulosa y contiene bajos niveles de lignina (8 a 10%).

El diámetro de la fibra está entre 16 y 50 micras y su longitud media es de 35 mm a 40 mm.

Su fibra le confiere una especial valía económica, por su utilidad para la industria textil.

Tabla 47. Prestaciones de la fibra de Cáñamo Albahaca.

Prestaciones de la fibra de cáñamo - Albahaca	
Presentación	Floca de fibras
Producción anual Tm	66 000
Exportación Tm	Filipinas: 15 474 Reino Unido: 7 701 Japón: 5 481 EEUU: 1 420
Productores	Filipinas: 80% Ecuador, Costa Rica, Indonesia I

Tabla 48. Prestaciones de la fibra de Cáñamo.

Prestaciones de la fibra de cáñamo	
Presentación	Floca
Producción anual (Tm)	69 735
Productores	China Europa: Francia, Alemania, Inglaterra Chile Rep. Pop. democrática de Corea Canadá

Los principales usos de la fibra de cáñamo son:

- Cuerdas.
- Cordeles.
- Cinturones.
- Redes.
- Tendales.
- Lonas, tejidos para filtración.
- Velas, estopa en las conexiones, aislamientos etc.
- Hogar.
- Papel.
- Indumentaria.
- Calzado.

La fibra de cáñamo que se va a utilizar para la fabricación del composite, se encuentra dispuesta en forma de rollos.

Las fibras son cortas y depositadas sobre un film de origen natural similar al utilizado en la borra.

La Figura 141 permite la visualización de la disposición de las fibras cortas del cáñamo, así como de su aleatoriedad en su ubicación.



Figura 141.Imagen tomada en microscopio óptico x 0,8 aumentos de la fibra de cáñamo.

Para la fabricación de la lámina de fibra de cáñamo, se utiliza 1 capa de fibra de cáñamo. Las dimensiones de la capa son de 550 x 85,5 mm. La masa de resina utilizada es de 3,37 kg. El corte de las probetas para su posterior estudio se realiza de forma longitudinal y transversal.

3.1.6 Lana de oveja

La lana de oveja se encuentra englobada dentro del grupo de residuos de pelo y su producción se realiza dentro de la industria peletera.

Es un producto de origen natural que posee unas características excelentes frente al aislamiento térmico, humedad y absorción del sonido.

La finalidad de utilizar lana natural se basa en encontrar una alternativa sostenible a las lanas convencionales minerales.

La lana de oveja es un material que por el mero hecho de ser de origen natural es menos agresivo con el medio ambiente, no depende de los derivados del petróleo como es el caso de las lanas minerales. Por otra parte se realiza un aprovechamiento de los residuos provenientes de los restos de las pieles de las ovejas.

Las fibras de la lana tienen forma ondulada y con un tamaño de diámetro comprendido entre los 16 – 40 micras, mientras que su longitud oscila entre los 35 – 350 mm. Una fibra de lana de oveja de 16 micras tendría un tamaño similar al de las fibras minerales. Los valores de los parámetros anteriores dependerán de la zona del vello de donde se obtengan y de la raza de la oveja. Por lo tanto, no pueden ser consideradas como fibras homogéneas. La composición en densidad y espesor de las lanas de oveja utilizadas se recogen en la Tabla 49.

Tabla 49. Composición, densidad y espesor de las muestras de lana de oveja M5 y Premium.

Composición					
Muestra	Pet	Calidad de la lana	Calidad de la lana	Densidad (kg/m ²)	Espesor (mm)
M5	20%	40%	40%	30	60
Premium	15%	40%	45%	30	50

La lana contiene unas características absorbentes muy buenas tal y como se muestra en la Figura 137.

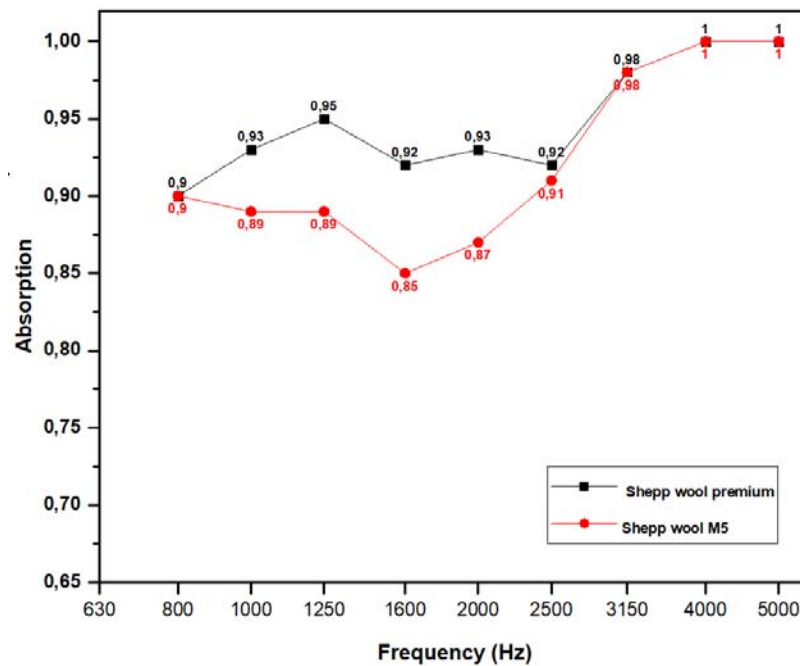


Figura 142. Resultados de la absorción en cámara reverberante estandarizada de la lana Premium y M5.

3.1.7 Yeso laminado

El yeso laminado se utiliza en este trabajo como material comparativo de sus propiedades acústicas, al ser un material muy utilizado en las construcciones de paredes y trasdosados en la actualidad.

Espesor de yeso laminado 13 mm, módulo de elasticidad 310 MPa y una rigidez a flexión de 573 Nm, con un gramaje de 11 kg/m². En la tabla 50 se muestra una recopilación de los valores de los módulos de elasticidad y de poisson, así como la frecuencia crítica de dicho material.

Tabla 50. Módulo de elasticidad y de poisson del yeso.

Material	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (MPa)	Frecuencia crítica f _c (Hz) d= espesor (cm)	Coefficiente de poisson
Yeso	1000	348,33	3 400/d	0,1

La influencia de los revestimientos de yeso, en cuanto al aislamiento ante el ruido aéreo, no son apreciables. En cuanto al coeficiente de absorción acústica del yeso, comentar que es muy bajo, pero se puede mejorar actuando en la superficie del yeso mediante

tratamientos como la microfisuración superficial del material. De esta forma se consigue que la energía sonora se atenúe a medida en que la onda penetra por el yeso, [231].

El peso de la placa de yeso laminado (PYL) de 60 x 90 cm es de 2,24 kg.

VI. Procedimientos experimentales

1. Fabricación

1.1 Metodología de fabricación

La primera operación que se realiza para la fabricación de las láminas del material compuesto es el cortado de los diferentes tejidos lignocelulósicos con unas dimensiones rectangulares de 60 x 90 cm. Con el mencionado dimensionado se agrupan los tejidos, según el espesor deseado y se realiza la infusión de la placa. Una vez terminada la infusión de la placa, se obtienen unas medidas similares a las iniciales, más un incremento por la ubicación de la resina en los bordes perimetrales de las placas. La siguiente operación consiste en el cortado de las placas rectangulares de los distintos composites, hasta dejarla en una dimensión de 55 x 85,5 cm. A continuación, se describen los pasos principales llevados a cabo para la fabricación de los composites por medio del proceso de infusión de resina.

1.2 Preparación de los tejidos y/o fibras

El inicio del proceso de infusión consta de la preparación de las muestras correspondientes de cada uno de los tejidos a emplear en el composite. Para ello se coloca el material sobre una mesa y se recortan diferentes capas, con las dimensiones especificadas en el trabajo más un pequeño incremento para poder realizar posteriormente un corte con las medidas exactas de las placas en perfectas condiciones. Las medidas a recortar en las fibras y/o tejidos con el incremento son placas de 60 x 90 cm.



Figura 143. Imagen de preparación y corte de diversas capas de fibra de yute.

Posterior al corte de los tejidos y/o fibras, se apilan el número de capas que se quiere infundir, para obtener un espesor concreto, en este caso se buscan placas de aproximadamente 5 mm de espesor.

Una vez realizado el corte, se procede a pesar el conjunto. Éste es un dato necesario para calcular el porcentaje de fibra presente en la placa de material compuesto.

1.3 Acondicionamiento de la superficie de trabajo

La superficie donde se va a llevar a cabo el proceso de fabricación de las placas por infusión de resina [232,233], estará constituida por una mesa de trabajo recubierta por una placa de vidrio. El vidrio tiene un espesor de 5 mm, y debe tener una superficie completamente lisa y perfectamente limpia. Esto facilitará el despegue de la lámina y se obtendrá una superficie casi perfecta.



Figura 144. Imagen del vidrio utilizado para la infusión de los composite y su preparación superficial.

La cera aplicada al vidrio proporciona superficies totalmente antiadherentes, si su aplicación es correcta. Es necesario una aplicación y pulimentados repetitivos para obtener buenos resultados, especialmente en las primeras aplicaciones.

1.4 Colocación de los tejidos y/o fibras

El procedimiento se inicia con la colocación de la capa de tejido y/o fibra, previamente cortada, sobre la mesa de trabajo, a esta se coloca capas pelables (peel-ply), para poder desmoldear posteriormente, Figura 145.



Figura 145. Imagen de superposición de diversas capas de yute.



Figura 146. Imagen de la colocación del tejido pelable encima de las capas de fibra de yute.

A continuación, se coloca encima de las capas o del laminado, un tejido pelable con el objetivo de poder retirar la bolsa de vacío una vez curada la placa y que está no se quede adherido a las placas elaboradas Figura 147.

Hay que tener en cuenta que el tejido pelable debe de sobrepasar en varios centímetros la superficie de la placa a infundir.

1.5 Colocación de los canales de vacío

Alrededor de las capas ubicadas de polietileno en la superficie de trabajo, una vez aplicada la cera, se coloca el tubo helicoidal (PE) con uniones tipo T y tubería continua, que serán las principales salidas hacia la bomba de vacío Figura 147.

En este paso, también se procederá a la colocación de la red de infusión también llamada de distribución, para que la resina pueda fluir de forma uniforme a través de toda la superficie.

Esta red de infusión tiene que cubrir toda la placa a infundir para asegurar que la resina impregne en todas las fibras y/o tejido y se realice una distribución homogénea en toda la superficie de la placa a infundir Figura 148.



Figura 147. Colocación del tubo (PE) - uniones del tipo T - tubería continuá.

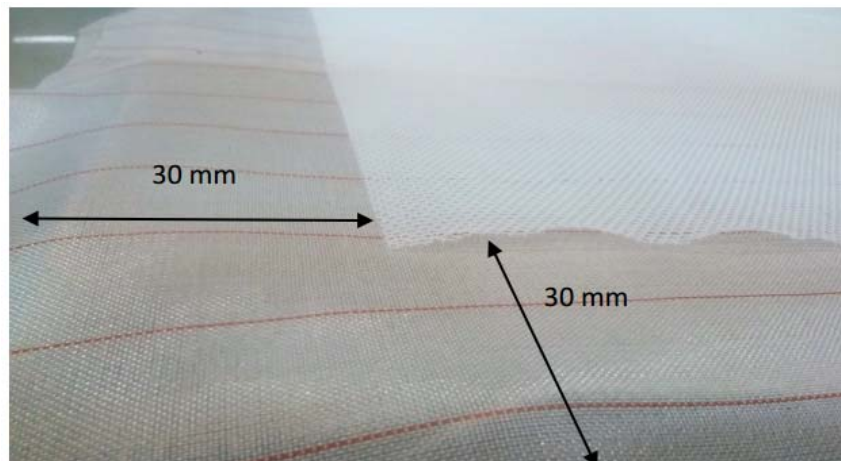


Figura 148. Colocación de la red de distribución de resina por encima del tejido pelable.

1.6 Colocación de los canales de entrada de resina

Sobre la red de infusión, se colocan los canales de entrada de la resina según la disposición deseada o más conveniente en función del tamaño de la pieza a infundir Figura 149. Debajo de ellos se suele colocar o bien una segunda capa de red de infusión de varios centímetros de ancho y largo con el objetivo de no producir marcas superficiales en el apilado de láminas de fibra una vez desmoldeado. También se puede utilizar un elemento llamado canal de infusión que realiza la misma función y se coloca debajo de las tomas de infusión Figura 149.



Figura 149. Colocación de los canales de entrada de resina.

1.7 Colocación de la bolsa de vacío

Cuando el conjunto está totalmente montado, se cubre todo con una lámina plástica flexible llamada bolsa de vacío para el sellado del conjunto, Figura 150. Esta bolsa se sujeta por sus extremos mediante una masilla que sella los bordes de la misma y deja herméticamente el conjunto. Hay que tener en cuenta que siempre hay que dejar una cantidad de bolsa en exceso para no provocar tensiones en la bolsa cuando entra en contacto con los tubos de vacío o las tomas de entrada de resina, así como para poder hacer un buen sellado de la bolsa.



Figura 150. Bolsa de vacío para el sellado hermético.



Figura 151. Red de infusión y canal de entrada de resina.

A continuación, se realizan las conexiones del vacío del conjunto uniéndolo al cubo de evacuación de resina, el cual está conectado a su vez a la bomba de vacío.

Se revisan todas las juntas y se asegura que no exista ninguna fuga, la prueba para saber si está correcto el vacío, es revisar el manómetro del cubo de evacuación y cerciorarse que se alcanzó el máximo de vacío. En la Figura 151 se puede comprobar cuando todo el conjunto se encuentra bajo vacío total.

1.8 Colocación de las canalizaciones

Finalmente, se termina el montaje del conjunto, realizando las canalizaciones para la entrada de la resina mediante una serie de tubos, codos, llaves de conexión y empalmes en forma de "T" por donde se inyectará la resina.

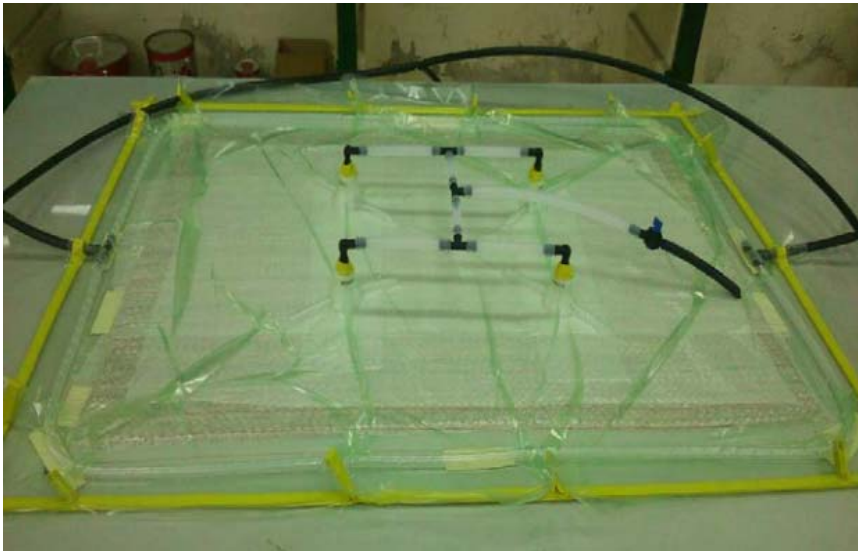


Figura 152. Tubos de canalización de entrada de resina.

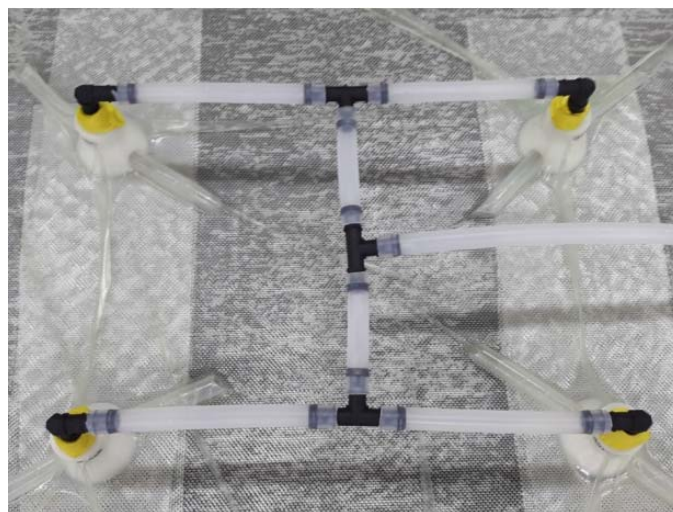


Figura 153. Detalle del conjunto con cuatro canales de entrada de resina.

Además, se debe revisar con mucho cuidado que no existan pequeñas fugas alrededor de todo el perímetro del conjunto y en especial en los sellados de los dobles de la bolsa de vacío. Para esto se utiliza el equipo detector de fugas descrito anteriormente.



Figura 154. Conjunto total preparado para la infusión de resina.

1.9 Infusionado de la resina

Por último, se realiza la infusión de la resina donde primeramente se calcula la mezcla de resina y el endurecedor según el peso de la fibra y/o tejido en relación de dos, y en la proporción recomendada por el fabricante para el proceso de infusión. Se combinan ambos elementos, se mezclan en un recipiente y se procede a la infusión introduciendo el canal de llenado en el recipiente y abriendo la llave de entrada que da paso al llenado del conjunto. Una vez terminada la infusión de la resina, se coloca una pinza de cierre junto a la llave de ingreso ya cerrada, se revisa que no existan fugas y que la resina fluya normalmente por toda la fibra y/o tejido para asegurarnos de un completo reparto de la resina en el conjunto.

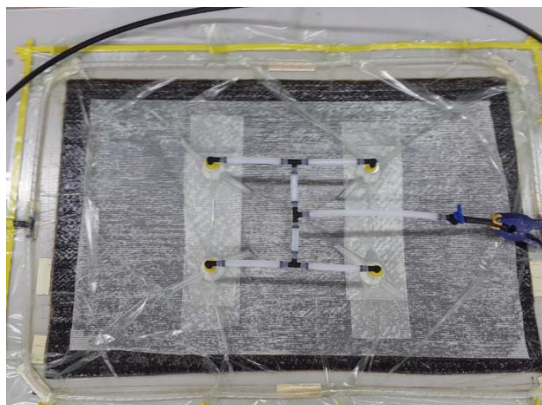


Figura 155. Imagen del conjunto una vez realizada la infusión de la resina y cerrado el canal de entrada de la resina.

2. Caracterización física: densidad - porosidad

Una vez realizada la infusión de la placa, se procede a la obtención de la densidad por medio de una balanza hidrostática Figura 156.



Figura 156. Imágenes de la balanza hidrostática y sus componentes para la obtención de las densidades de los composites.

2.1 Metodología de medida de la densidad

Conociendo el valor de la densidad del fluido 1 g/cm^3 , por tratarse de agua destilada, y obteniendo el peso de la muestra fuera y dentro del fluido, se puede obtener la densidad del sólido. La muestra ideal es de un tamaño de $20 \times 20 \text{ mm}$. La fórmula para la obtención de la densidad es la siguiente:

$$\sigma = \frac{W_a - \sigma_{fl}}{W_a - W_{fl}}$$

Donde:

- Densidad del sólido: σ . ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)
- Densidad del fluido: σ (fi). ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$).
- Peso del sólido en el aire: $W(a)$. (g).
- Peso del sólido en el líquido: W (fi). (g).

Primeramente, se lleva a cabo el montaje de los accesorios de la balanza para poder medir la densidad.

Dependiendo de la densidad del material, si ésta es inferior o superior a la del fluido (en este caso es agua destilada), se elige el soporte. Este podrá ser cóncavo o convexo, que dependerá de la densidad del material.

Si al colocar un soporte en el interior del vaso de precipitados se comprueba que el material flota, se debe cambiar de soporte.

La cantidad de fluido que se introduce es de medio vaso de precipitados.

Es muy importante que la parte metálica del soporte no toque con las paredes del vaso de precipitados.

Cuando se dé esta circunstancia, se realiza el tarado.

En caso de que toque no saldrá ningún valor numérico en el monitor de la balanza.

Primero se pesa el material colocándolo en la parte superior del soporte, previo tarado, y se anota su peso fuera del fluido.

A continuación se introduce en el interior del agua destilada, con lo que el material se depositará en la parte inferior del soporte e indicará el peso del material dentro del fluido.

La Figura 157 indica donde colocar la muestra para poder medir los pesos, tanto fuera del fluido como en el interior del mismo.

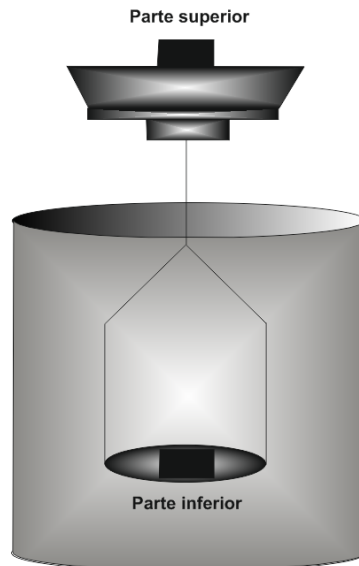


Figura 157. Ilustración de los accesorios donde se realiza el pesaje de la muestra tanto fuera como dentro del fluido.

2.2 Nivel de porosidad de lámina

Durante el proceso de fabricación de un material compuesto, se pueden introducir huecos. La aparición de estos huecos hace que la densidad teórica del material compuesto sea mayor que el valor real de la densidad. La aparición de huecos es perjudicial para las propiedades mecánicas, ya que produce una reducción de:

- Rigidez de corte y resistencia.
- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la tracción transversal.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia a la humedad.

La ecuación que se utiliza para determinar de forma indirecta, la fracción de volumen de los huecos presentes en un material compuesto es:

$$\rho_c = \frac{\rho_c}{\rho_c \left(\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m} \right) + V_v}$$

Donde:

V_V : Volumen de huecos presentes en el material compuesto.

Si se desea obtener el valor del porcentaje de huecos bastará con despejar V_V :

$$V_V = 1 - \rho_c \left(\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m} \right).$$

Existen otras fórmulas, donde el valor del porcentaje de huecos se obtiene calculando de forma teórica dicho valor y luego obteniéndolo de forma experimental, quedando una expresión como:

$$V_V(\%) = \frac{\rho_{\text{teo}} - \rho_{\text{expe}}}{\rho_{\text{teo}}} \cdot 100.$$

Donde:

$$\rho_{\text{teo}} = \rho_f \cdot V_f + \rho_m (1 - V_f) = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m.$$

Determinación experimental de la porosidad

Las fracciones en volumen de fibra de los componentes de un material compuesto se determinan por norma general, por combustión o mediante ensayos de digestión ácida.

Caracterización Física de laminados: Densidad

La densidad de los composites se obtiene a través de una balanza hidrostática.

Se pretende con este ensayo determinar la densidad de un laminado a partir del empuje que una muestra de material experimenta al ser sumergida en agua destilada.

Este ensayo se puede aplicar a las muestras con un mínimo de 1 gramo de peso, que cuando se sumerjan en el agua destilada se humedezcan, no absorbiendo agua.

Las muestras se deben de cortar en paneles de forma cuadrada con unas dimensiones de 25 x 25 mm.

Para poder realizar el ensayo se necesita de una balanza hidrostática, Figura 156. El procedimiento analítico para realizar el análisis consiste básicamente en:

- En la obtención del peso de la muestra, mediante la utilización del kit de densidad disponible junto con la balanza. Se mide y se anota la temperatura del agua destilada, posteriormente se pesa la muestra en seco (parte superior del kit de la balanza) Figura 152. A continuación, se introduce la muestra en el líquido a través del hundidor.

Dependiendo de la densidad del material, si ésta es inferior o superior a la del fluido se elige el soporte o hundidor.

Este podrá ser cóncavo o convexo, que dependerá de la densidad del material.

Si al colocar un soporte en el interior del vaso de precipitados se comprueba que el material flota, se debe cambiar de soporte.

La probeta debe quedar situada a unos 25 mm del fondo del vaso de precipitado, Figura 152.

Precauciones

La cantidad de agua destilada que se debe introducir es de medio vaso de precipitados.

Es muy importante que la parte metálica del soporte no toque con las paredes del vaso de precipitados. Cuando se dé esta circunstancia, se realiza el tarado. En caso de que toque no saldrá ningún valor numérico en el monitor de la balanza.

2.3 Proceso operativo del ensayo densidad

En este apartado se va a detallar por medio de tablas, los distintos valores obtenidos en las densidades de los composites, utilizando para el ensayo la balanza hidrostática. El número de probetas que se van a ensayar para cada uno de los composites serán de cinco y sus dimensiones de 20 x 20 mm. Cada una de las columnas de las tablas va a tener como parámetros identificativos los siguientes:

- Nombre del composite.
- Número de ensayos a realizar.
- Peso del composite en el aire.
- Peso del composite en el interior del fluido.
- Densidad g / cm^3 .
- Promedio de valores obtenidos de la densidad del composite.
- Desviación estándar.
- Desviación unitaria.

- Error cometido sobre el promedio.

Se va a elegir el composite Materia Textil Borra con bioresina como ejemplo explicativo para la recopilación de datos, Tabla 51.

Tabla 51. Densidad del composite M.T.Borra con bioresina.

Biocomposite	Número Ensayos (g/cm ³)	Peso Aire (g/cm ³)	Peso Fluido (g/cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Promedio
Materia Textil Borra	1	1,76	0,28	1,19	1,07
	2	1,54	0,09	1,06	
	3	1,76	0,07	1,05	
	4	1,54	0,05	1,03	
	5	2,18	0,04	1,02	

El valor obtenido de la densidad de las 5 probetas del composite Materia Textil Borra ha sido de 1,071 g /cm³.

3. Caracterización mecánica y dinámica

3.1 Ensayos máquina de tracción

El comportamiento mecánico a tracción de un material, refleja la relación entre el estado o nivel de tensiones que soporta el material y su respuesta ante tal perturbación, reflejada a través de una deformación de naturaleza elástica o plástica.

Uno de los ensayos mecánicos más importantes para conocer el comportamiento mecánico de un material es el ensayo de tracción, que permite obtener el diagrama de tensiones-deformaciones unitarias, a partir del cual se puede extraer información sobre los tramos de deformación elástica y plástica, así como algunos parámetros que definen el comportamiento a tracción tales como el módulo elástico, tensión de rotura y % de alargamiento a la rotura.

En el ensayo de tracción se somete una probeta de determinada geometría a la acción de un esfuerzo axial, habitualmente hasta la fractura.

La información que aporta el ensayo de tracción es muy completa en tanto en cuanto permite cuantificar la respuesta elástica y plástica del material a través de sus propiedades resistentes (módulo elástico o de young y la tensión de rotura) y dúctiles (% de alargamiento a la rotura).

Las formas de trabajo en un ensayo de tracción son múltiples permitiendo incluso trabajar en condiciones de fatiga. Lo habitual es realizar un control por carrera, es decir estableciendo una velocidad constante de separación de las mordazas, aunque algunos equipos también permiten trabajar con un control por fuerza manteniendo una velocidad de incremento de fuerza constante a lo largo de todo el ensayo.

La energía de rotura es útil para estimar la tenacidad de un material, entendida como el trabajo o energía que consume un material en el proceso de deformación y fractura.

En la máquina universal Ibertest, se van a realizar los siguientes ensayos:

- Tracción.
- Coeficiente de Poisson.
- Flexión.

El primero de los ensayos que se va a llevar a cabo será el de tracción. Con este ensayo se podrán determinar de forma directa:

- Resistencia máxima a la tracción.
- Deformación máxima a la rotura.

Y aplicando unos extensómetros:

- El módulo de Poisson y módulo de elasticidad.

Y produciendo un cambio de accesorio para la fijación de las probetas, se obtendrá:

- La resistencia máxima a la flexión.

Las dimensiones de las probetas que se utilizan para estos ensayos serán de 26,20 mm x 260 mm.

Con un espesor medio próximo a los 5 mm, excepto la de coco cuyo espesor oscila entre los 7,44 y 8,62 mm. El número de probetas a ensayar será de 10.

De las diez probetas, solamente se evaluarán cinco. La Figura 158 muestra el dimensionado y la geometría rectangular de 5 probetas del composite de yute.

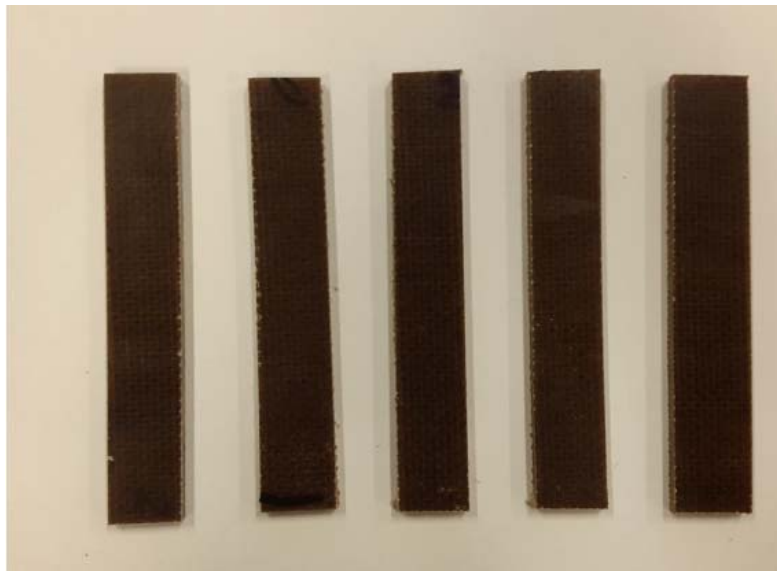


Figura 158. Forma de las probetas a ensayar.

En general las probetas deberán tener una forma de alterio, en la que los extremos posean más sección que en su zona central, para garantizar que la rotura se produzca en esta zona.

La Figura 159 muestra la forma de alterio, así como la zona donde se debe producir la rotura en la probeta.

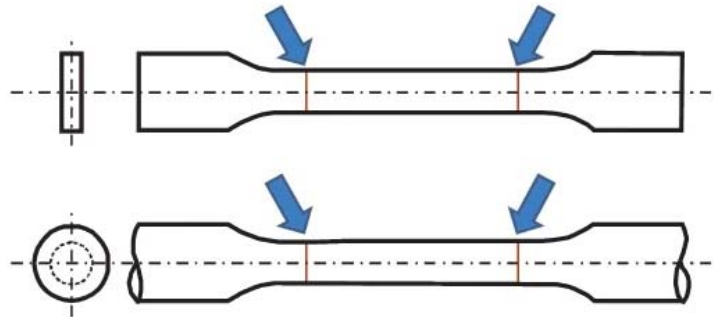


Figura 159. Imagen de la forma de alterio de una probeta y su zona de rotura.

Debido a que las probetas no se han realizado en molde, sino que proceden del corte directo de las placas de composite elaboradas, no tendrán la forma de alterio en su parte central.

El ensayo de tracción consiste en mantener una probeta entre dos mordazas de la máquina de ensayo y someterla a un esfuerzo en la dirección de su eje principal.

La probeta se alarga a lo largo de su eje principal, a una velocidad constante, hasta producirse su rotura.

En el ensayo se miden la carga soportada por la probeta y el alargamiento de ésta.

De todas las probetas que se vayan a ensayar, es necesario anotar previo al ensayo su anchura y su espesor, utilizando para ello el pie de rey.

Una vez anotados estos valores, se deberá colocar la probeta ensayar entre los extremos de las mordazas Figura 160.

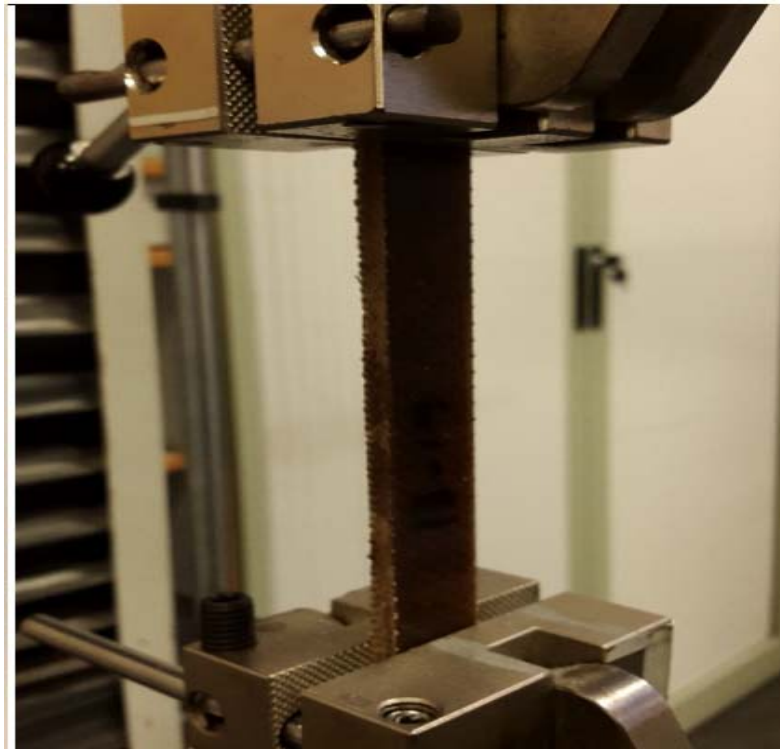


Figura 160. Colocación de la probeta entre las mordazas de la máquina de tracción.

Las mordazas que sujetan las probetas deben fijarse en la máquina de manera que el eje principal de la probeta coincida con la dirección de la línea central de tracción del conjunto del sistema de sujeción. La probeta debe mantenerse de manera que se evite, tanto como sea posible, su deslizamiento con respecto a las mordazas. Esto se debe lograr, preferentemente, con el tipo de mordazas en que la presión sobre la probeta aumenta cuando aumenta la fuerza aplicada. El sistema de sujeción no debe originarla rotura prematura de la probeta en las mordazas.

3.2 Coeficiente de poisson y módulo de elasticidad

En esta sección se va a realizar el estudio de las características mediante el ensayo de tensión y coeficiente de poisson [132].

El ensayo de tracción se basa en la deformación de una probeta por estiramiento uniaxial registrando la deformación frente a la tensión aplicada. Las probetas se sujetan por medio de mordazas que pueden tener un apriete hidráulico para evitar deslizamientos. La máquina de tracción universal está diseñada para realizar el alargamiento de la probeta con una velocidad constante, así como para realizar la medición continua y simultánea de la carga instantánea aplicada (por medio de una celda de carga) y el alargamiento resultante.

Las propiedades mecánicas se evalúan, a partir de las curvas tensión deformación Figura 161.

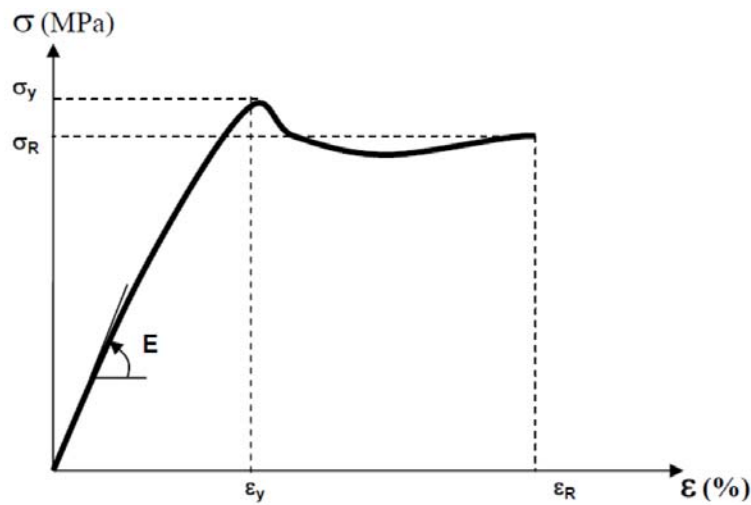


Figura 161. Curva de tensión – deformación de un ensayo de tracción.

Siendo sus parámetros más importantes:

- Límite elástico (σ_y): máxima tensión que el material es capaz de soportar manteniendo la ley de Hooke, es una medida de la resistencia a la deformación elástica. Se expresa en MPa ó N/mm².
- Tensión de la rotura (σ_R): es la tensión de tracción que soporta la probeta en el instante en el que se produce su rotura. Se expresa MPa ó N/mm².
- Módulo de elasticidad o módulo de Young (E): es la relación entre la tensión y la deformación unitaria en la zona elástico-lineal del material. Sus unidades son MPa ó N/mm².

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- Coeficiente de Poisson (μ): indica la relación que existe entre la deformación longitudinal (ε_x) que sufre el material en la dirección perpendicular a la fuerza aplicada y la deformación longitudinal en la dirección de la fuerza (ε_y).

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \right|$$

Deformación o elongación (ε): se define como el incremento de la longitud producido por la tensión de tracción ($\Delta l = l - l_0$) dividido por la longitud original (l_0) antes de aplicar la carga. Se expresa en mm/mm ó %.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

El coeficiente de poisson se puede medir como: la razón entre el alargamiento longitudinal producido, dividido por el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada. Este valor coincide igualmente con el cociente de deformaciones, de hecho, la fórmula usual para el coeficiente de poisson

$$\mu = - \epsilon_{\text{transversal}} / \epsilon_{\text{longitudinal}}.$$

La relación se expresa como " $\mu = - \epsilon_t / \epsilon_l$ ", donde " μ " es el coeficiente de poisson, " ϵ_t " es la fuerza transversal y " ϵ_l " es la fuerza longitudinal.

Mediante la máquina universal de ensayos, IBERTEST modelo ELIB-50, se realiza la medición de este parámetro, con la ayuda de un accesorio de medición de deformación longitudinal y transversal llamado extensómetro.

La Figura 162 muestra la colocación de los extensómetros sobre la probeta a ensayar.

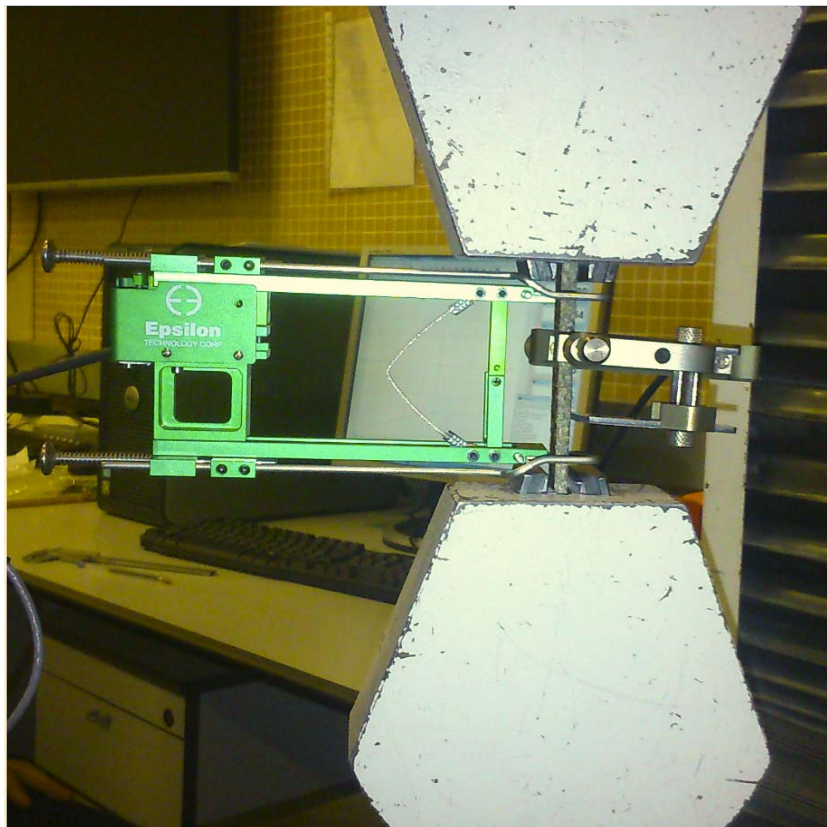


Figura 162. Imagen de las ubicaciones de ambos extensómetros sobre la probeta.

Mediante el ensayo de tracción en la máquina universal con los extensómetros Épsilon y MFQ además de obtener el Coeficiente de poisson se puede obtener el módulo de elasticidad longitudinal de la probeta.

3.3 Resistencia máxima a la flexión

Una vez finalizados los ensayos a tracción, el siguiente tipo de ensayo que se realizará será el de la resistencia máxima a la flexión. La secuencia de operaciones en la máquina universal de ensayos es la misma que se describe en el apartado manipulación de la máquina universal.

La diferencia con la metodología seguida en el ensayo de tracción, en este tipo de ensayos se debe elegir en el comando Gestión de ensayos, el apartado “Modo de ensayo” flexión.

Para diferenciar los ensayos de tracción a los de flexión [212], se recomienda al darles un nombre para su grabación, intercalar detrás del nombre del composite la sigla F, tal como se muestra en la Figura 163.

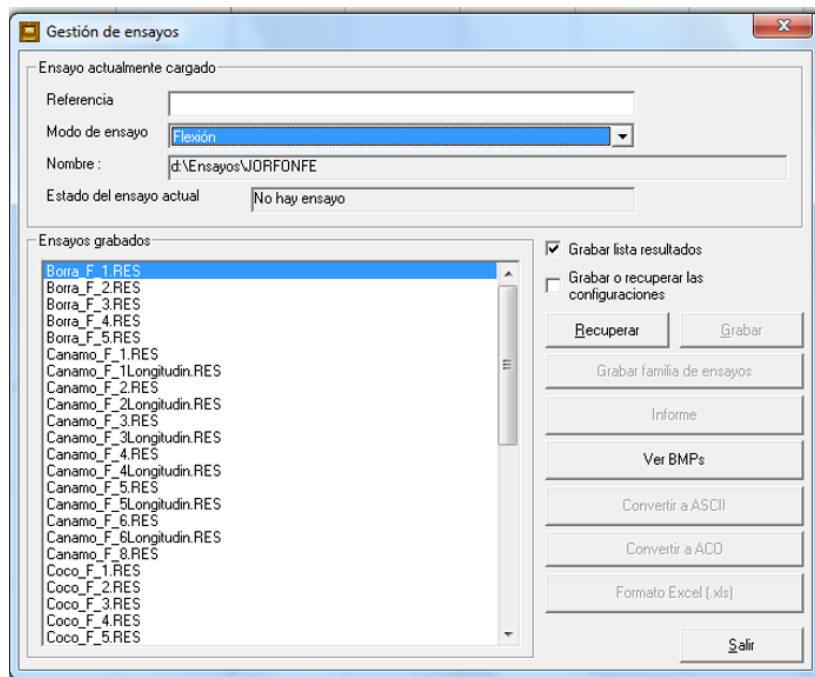


Figura 163. Recuperación o creación del archivo de trabajo en flexión.

Los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el ensayo de flexión, son la velocidad en mm/minuto y la célula a utilizar.

En este caso, el ensayo no permite realizar la opción de introducir los datos del ancho y del espesor para que se realice de forma automática el cálculo de la sección de rotura.

En este ensayo se debe colocar la probeta sobre el accesorio de flexión, centrándola de forma correcta; y con los mandos de ascenso y descenso del bastidor, en versión a sus dos velocidades acercar la célula a la probeta. No se necesitan realizar las mediciones de la longitud de la probeta inicial antes del ensayo y cuando finalice el ensayo.

En este apartado se va a realizar una recopilación en forma de tabla, de un composite como ejemplo para seguir la secuencia de los pasos seguidos en la obtención de la resistencia máxima a la flexión de las probetas que han sido ensayadas.

Las columnas de las que estarán formadas cada una de las tablas de los distintos composites, estarán compuestas:

- Nombre del composite.
- Número de ensayos realizados.
- Ancho en mm de la probeta.
- Espesor en (mm).
- Valor del área transversal.
- Valor de la fuerza aplicada (dado por la máquina).
- Valor de la resistencia máxima a la flexión obtenida.
- Promedio de los valores de la resistencia máxima de cada composite.
- Su desviación estándar.
- Error cometido en el valor elegido del promedio.

Cada uno de los composites se desglosará en tres tablas parciales del mismo, para una mayor visualización e interpretación de los resultados. La Tabla 52 se toma como ejemplo para seguimiento y secuenciación de los pasos a seguir en la obtención de la resistencia máxima a la flexión, tomando como composite el yute.

Tabla 52. Introducción de datos obtenidos por medición y cálculos previos al ensayo.

Datos previos al ensayo de flexión					
Biocomposit e	Numer o	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Espesor de rotura (mm)	Sección (mm²)
Yute	1	18,40	4,70	18,60	86,48
	2	17,60	4,70	17,70	82,72
	3	17,90	5,00	18,00	89,50
	4	18,60	4,65	18,60	86,49
	5	20,00	4,90	20,20	98,00
	6	19,70	5,00	19,80	98,50

Tabla 53. Valores obtenidos en el ensayo en la máquina universal.

Anotación de valores después de realizar el ensayo de flexión			
Biocomposite	Fuerza (kN)	Carrera (mm)	Resistencia (MPa)
Yute	0,46	4,02	136,45
	0,40	3,48	138,06
	0,42	3,68	141,20
	0,36	3,37	137,10
	0,52	10,91	139,56
	0,42	2,94	142,75

Anotación de valores después de realizar el ensayo de flexión			
Composite	Fuerza (kN)	Carrera (mm)	Resistencia (MPa)
Yute	0,39	7,99	134,10
	0,36	6,11	123,80
	0,36	5,74	123,50
	0,31	5,97	106,10
	0,35	6,07	120,50

En la Tabla 54 se anotan los valores obtenidos a través del programa informático WinTest32, de la máquina universal de ensayos. A su vez que se realiza el cálculo del valor promedio de la resistencia máxima a la flexión del composite yute, siendo su valor obtenido de 139,18 MPa.

Tabla 54. Cálculos estadísticos para la obtención del valor de resistencia máxima a la flexión.

Bioresina Promedio (MPa)	
Yute	139,19

Resina poliéster Promedio (MPa)	
Yute	125

Valores obtenidos resistencia máxima a flexión

En la Tabla 55 se recopilan los valores de la resistencia máxima a la tracción obtenidos a través del programa informático WinTest32.

Tabla 55. Valores obtenidos de la resistencia máxima a la tracción del yute.

Resistencia máxima a la flexión (MPa)		
Bioresina	Composite	Poliéster
179,92,	Lino Biaxial	106,42
38,23	Residuo Textil Borra	76,50
49,35	Coco	34,60
139,18	Yute	125,00
64,92	Cáñamo	54,60

3.4 Impacto

Proceso operativo del ensayo impacto

En primer lugar se realizará la nivelación del péndulo de charpy de la marca METROTEC, S.A, por medio de su nivel de burbuja. La determinación de la energía de impacto se ha obtenido bajo la normativa ISO 179:1993.

La escala utilizada en el ensayo es de 1 J por lo que se trabaja con mazas de impacto de 1 julio. Las probetas estimadas para realizar el ensayo tienen unas dimensiones de 10 x 100 mm, siendo de área rectangular.

Como el ensayo se va a realizar por impacto de charpy, la probeta se encuentra biapoyada, siendo la distancia entre los apoyos de 70 mm. Los valores obtenidos en la realización del ensayo se exponen en las siguientes tablas en función de los composites experimentados.

Recopilación de los ensayos de Impacto

Puesto el selector de impacto en 1J se llevan a cabo los distintos ensayos de las probetas de los composites. Una vez finalizados todos los ensayos, se agruparán los resultados por composite en una tabla recopilatoria.

Como el número de columnas que abarca la tabla es elevado, se va a representar en dos tablas consecutivas. En la primera de las tablas representativas de cada uno de los composites, las columnas estarán asignadas a los parámetros de:

- Nombre del composite.
- Número del ensayo de la probeta.
- Ancho de la probeta.
- Espesor de la probeta.
- Área de la probeta a ensayar.
- Valor obtenido tras el impacto expresado en julios.

La segunda de las tablas llevará una distribución de columnas en las que aparecerán los siguientes parámetros:

- Valor del ensayo en Julios / mm².
- Valor del ensayo en kilo julios/ m².
- Valor del promedio de los kilo julios / m².
- Desviación estándar.
- Desviación unitaria.
- Error.

El composite elegido para la realización del procedimiento operativo seguido en la recopilación de los datos de las distintas probetas de los composites; será el de yute, con bioresina Tabla 56.

Tabla 56. Promedio impacto péndulo de charpy composite yute con bioresina.

Composite	Numero ensayos	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm ²)	Valor obtenido (Julios)
Yute	1	10	4,80	48	0,63
	2	10	4,80	48	0,67
	3	10	4,60	46	0,69
	4	10	4,50	45	0,62
	5	10	4,80	48	0,70

Julios/mm ²	kJ/m ²	Promedio
0,013	13,12	14,09
0,013	13,96	
0,015	15,00	
0,013	13,78	
0,014	14,59	

Con la obtención de un valor promedio de 14,90 KJ/m² para el composite de yute con bioresina.

Valores obtenidos del ensayo de impacto.

En la Tabla 57 se recopilan todos los valores de impacto de los distintos composites ensayados.

Tabla 57. Valores de impacto de los distintos composites ensayados.

Péndulo de charpy, (kJ/m²)		
Bio resina	Composite	Poliéster
69,77	Lino Biaxial	70,18
12,80	Residuo Textil Borra	9,87
5,62	Coco	15,85
1408	Yute	16,36
4,31	Cáñamo	6,45

3.5 Dureza shore D

Otra propiedad mecánica de interés es la dureza, que se define como la medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada. En las pruebas de dureza se mide la profundidad o tamaño de huella resultante tras la aplicación de una fuerza constante con un vástago, lo cual se relaciona con un número de dureza; cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella.

Las durezas medidas tienen solamente interés desde el punto de vista relativo (no absoluto); son útiles para comparar comportamientos de diferentes materiales, pero no para diseño y cálculo. Para materiales plásticos de dureza intermedia se emplea el durómetro shore con la escala D ya que la escala A es para materiales de naturaleza elastomérica muy blandos.

Como ya se ha indicado, la dureza es inversamente proporcional a la penetración y depende del módulo de elasticidad del material. En función de cómo sea el material, si es más blando o duro, se utilizarán palpadores o penetradores con puntas distintas. Para materiales duros se utilizará un palpador completo, con una punta de aguja de acero con un tratamiento especial. Para los materiales blandos, el palpador no tiene punta cónica, se encuentra recortada.

El espesor de las probetas deberá de ser aproximadamente de 4 mm, los datos se tomarán en la parte central de las mismas y se realizarán de 4 a 5 mediciones.

Se recomienda realizar las mediciones con el durómetro tipo D (duro), cuando se obtienen valores superiores a 90 con el durómetro tipo A.

Proceso operativo del ensayo dureza shore D

En primer lugar se debe realizar la nivelación del durómetro shore de la marca J. BOT, S.A, por medio de su nivel de burbuja. La escala utilizada en el ensayo es shore D donde se emplea una aguja no roma y cuyo ángulo de la punta es 30° bajo la normativa UNE EN ISO 868:2003.

Las probetas estimadas para realizar el ensayo tienen unas dimensiones de 20 x 20 mm, siendo de área rectangular.

Se debe tener precaución de que la palanca del durómetro shore para realizar el ensayo de dureza cuando descienda en su máxima posición no incida con ninguna superficie colindante. Cada uno de los ensayos se realiza por las dos caras de la probeta.

La obtención de los valores de dureza Shore obtenidos en los ensayos se recopilará por medio de una tabla, en la que cada una de las columnas estará asignada a los siguientes parámetros:

- Nombre del composite.
- Número del ensayo de la probeta.
- Tipo de dureza.
- Cara en la que se realiza el ensayo (A).
- Cara en la que se realiza el ensayo (B).
- Promedio obtenido de la dureza en las dos caras del cada composite.
- Valor del promedio.
- Valor de la desviación estandar.

El composite elegido para la realización del procedimiento operativo seguido en la recopilación de los datos de las distintas probetas de los composites será el lino con bioresina Tabla 58.

Tabla 58. Valores dureza composite lino con bioresina con shore D.

Biocomposite	Numero ensayos	Tipo dureza	Cara A	Cara B	Media cara A Y B	Promedio
Lino biaxial	1	D	71	70	70,50	72,60
	2	D	76	71	73,50	
	3	D	74	70	72	
	4	D	76	71	73,50	
	5	D	75	72	73,50	
Composite	Numero ensayos	Tipo dureza	Cara A	Cara B	Media cara A Y B	Promedio
Lino biaxial	1	D	74	78	76	78,10
	2	D	73	81	77	
	3	D	81	80	80,50	
	4	D	79	79	79,00	
	5	D	78	78	78	

El valor obtenido del impacto por dureza shore D de las 5 probetas del composite lino con bioresina ha sido de 76,20 Shore D

En la Tabla 59 se recopilan los valores de dureza obtenidos.

Tabla 59. Valores de dureza shore D de los distintos composites ensayados.

Dureza shore D		
Biocomposite	Composite	Poliéster
76,20	Lino Biaxial	70,18
70,30	Residuo Textil Borra	70,30
64,70	Coco	77,80
70,20	Yute	79,40
70,20	Cáñamo	75,80

3.6 Métodos dinámicos

Dentro de los métodos dinámicos, se va a realizar los ensayos de viga en voladizo (vibración libre) y vibración forzada (shaker). Para la obtención del módulo de elasticidad de los materiales compuestos.

Las dimensiones de las probetas que se van a utilizar para la realización de los ensayos no destructivos de los materiales son:

Tabla 60. Dimensionado de las probetas.

Dimensionado	Biocomposites	Composites
Longitud (mm)	230	280
Anchura (mm)	23	15

En la Figura 164 se muestra la imagen de las probetas que se van a utilizar para la realización del ensayo dinámico de vibración libre.



Figura 164. Imagen de las probetas utilizadas para la realización de los ensayos dinámicos de biocomposites.

3.6.1. Ensayo por medio de vibración libre

El sistema viga en voladizo se puede representar en forma de un resorte y una masa, mediante la aproximación teórica del análisis modal. Su forma esquematizada se representa en la Figura 165. Normativa ASTM E 756- 05: (2010) [234].

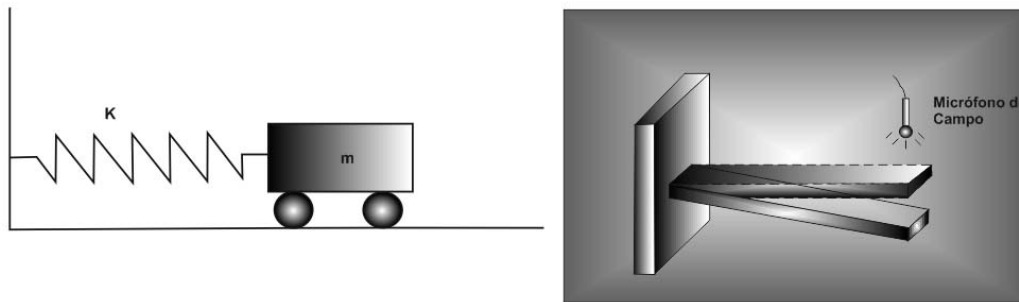


Figura 165. Esquema de la aproximación teórica del análisis modal.

Este tipo de ensayo permite el análisis de la frecuencia del material sin que otro elemento influya en el sistema.

Para la obtención del módulo de elasticidad se utilizan los valores correspondientes de densidad obtenidos por medio de la balanza hidrostática, las dimensiones del área o sección transversal.

Como el espesor de las probetas no presenta una sección regular, se realizarán varias mediciones de la misma, y así obtener valores promedios. Se parte de una sección rectangular, cuyo momento de inercia está definido por la relación entre el ancho y el espesor de la probeta, Figura 166.

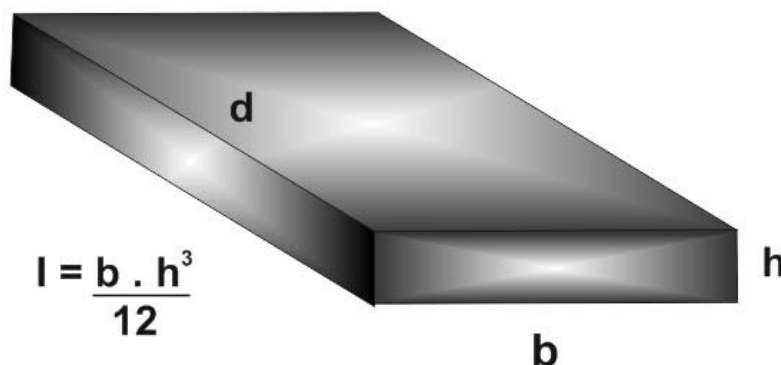


Figura 166. Dimensionado de la probeta para la obtención del momento de inercia.

Para obtener el valor del módulo de elasticidad, se considerará que la relación existente entre la longitud, el ancho y el espesor se mantiene de forma constante a lo largo de toda la probeta, obteniéndose un paralelepípedo como resultado. Atendiendo a esta hipótesis y empleando la ecuación de la norma ASTM E756-05 (2010):

$$E = \frac{4 \pi^2 (f_n)^2 \rho A h^4}{(BnL)^4 I}$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad del material de la viga, expresado en (Pa).
- f_n : Frecuencia de resonancia expresada en (Hz).
- $H = h$: espesor de la viga expresada en (m).
- L: longitud de la barra expresada en (m).
- ρ : densidad del material expresado en (kg/m^3).
- 12: es una constante numérica.
- C_n : coeficiente modelo viga en voladizo.
- A: área de la sección transversal (m^2).
- I: Momento de Inercia (m^4).
- ω_n : es la frecuencia natural expresada en (radianes / s).
- $B = (BnL)^4 = C_n^2$: son constantes que depende de las condiciones de borde, y de distintos valores para cada modo de vibración.

En la Tabla 61 se ponen de manifiesto el valor de las distintas constantes de condiciones de borde [237].

Tabla 61. Recopilación de valores de las constantes de condiciones de borde.

Valores de las constantes en función de su modo de vibración		
C_n : primer modo de vibración	0,55959	Normativa E 756 – 05
B: primer modo de vibración (Voladizo)	3,52	Freberg - Kemler
$(BnL)^4$: primer modo de vibración	1,875104	Normativa ASTM C215 Teorical background

Para la realización del ensayo se debe colocar la probeta por uno de sus extremos en el interior de un tornillo de banco, que previamente se encuentra fijo a un bloque de cemento tal como se muestra en la Figura 167 [235].



Figura 167.

Una vez fijada la probeta sobre el tornillo de banco, se sitúa un micrófono omnidireccional a una distancia horizontal de 50 cm sobre la probeta. La ubicación del micrófono será en el extremo opuesto al de la mordaza que sujeta la probeta.

La probeta tiene una longitud libre comprendida entre los 25 y 28 cm caso de viga en voladizo para los composites con resina de poliéster y de 23 cm para los composites con bioresina.

El problema a resolver es el de una viga en voladizo sometida a una carga puntual en su extremo libre, $P(t)$, tal y como se representa en la Figura 168.

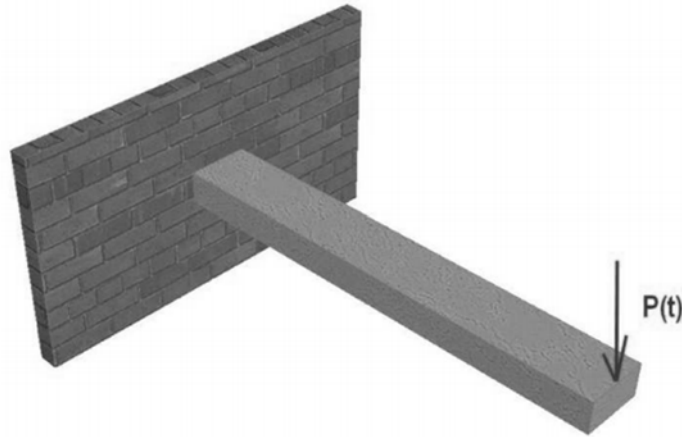


Figura 168. Imagen de la aplicación de la carga puntual.

A continuación, se deja de ejercer la carga puntual sobre la probeta, por lo que esta entra en vibración, debido a su recuperación elástica, actuando como una fuente de sonido, generando ondas acústicas que se propagan a través del aire. El sonido así emitido es captado por el micrófono omnidireccional Figura 169.

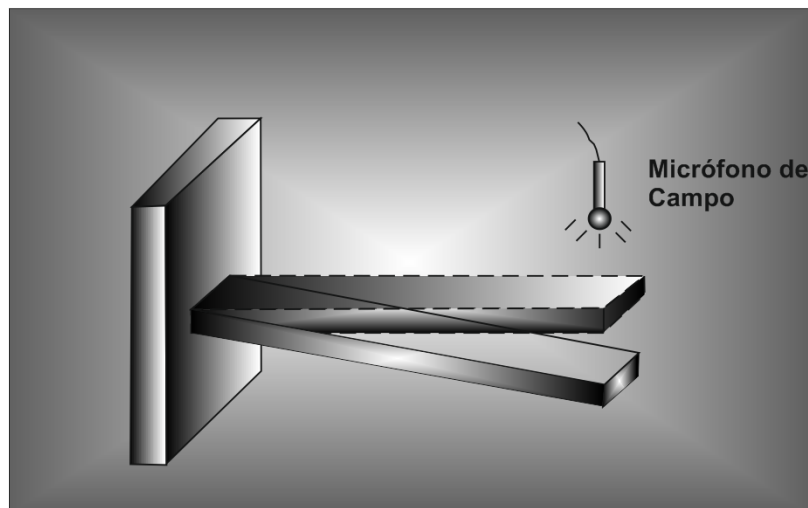


Figura 169. Simulación de la vibración de la probeta en voladizo.

Mientras la probeta está vibrando y el micrófono capta las ondas acústicas se deben de evitar ruidos no deseados que puedan distorsionar la medida, por lo que el análisis experimental se debe de realizar en laboratorio o estancia cerrada.

La señal amplificada por el micrófono es analizada por una tarjeta electrónica; cuyo objetivo es la transformación de la señal acústica en una gráfica de Función de Respuesta de Frecuencia (Amplitud – frecuencia).

El programa informático encargado de realizar dicha función es el Matlab, la duración para el análisis de la señal tiene un periodo de duración de 5 segundos.

3.6.2. Método de vibración forzada (Shaker)

El método shaker se basa en el análisis de la frecuencia de resonancia de cada estructura. Para lo cual se utiliza un equipo de vibración forzada, que permita la variación de frecuencias en un amplio rango. Normativa ASTM E 756 – (1998).

El método de vibración forzada consiste básicamente en encontrar la frecuencia natural del material.

A continuación se presenta la colocación del shaker en la lámina Figura 170. Se tiene que colocar de tal modo que no empuje a la lámina, sino que sólo la toque, lo ideal es que no se produzcan rebotes.

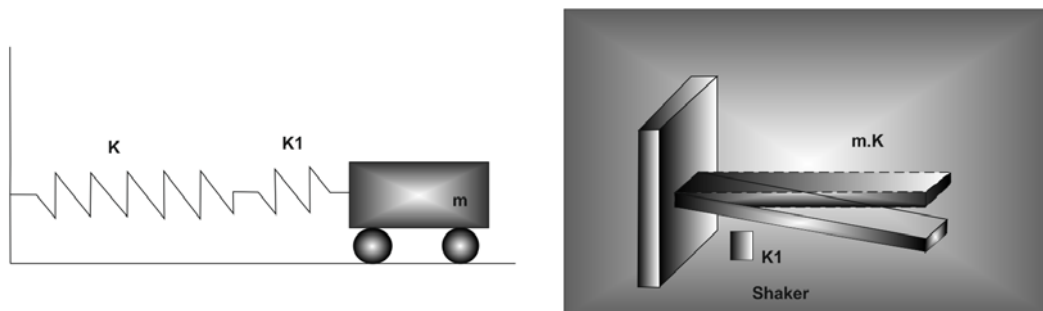


Figura 170. Esquema de la aproximación del análisis modal del ensayo vibración forzada.

Dentro de las opciones que dispone el generador de frecuencia se escogerá la función de rampa negativa, la frecuencia que se elige será de 1 HZ, se debe de ir variando el voltaje aplicado al shaker Figura 170.

El micrófono omnidireccional se va a situar a una distancia de 50 cm.

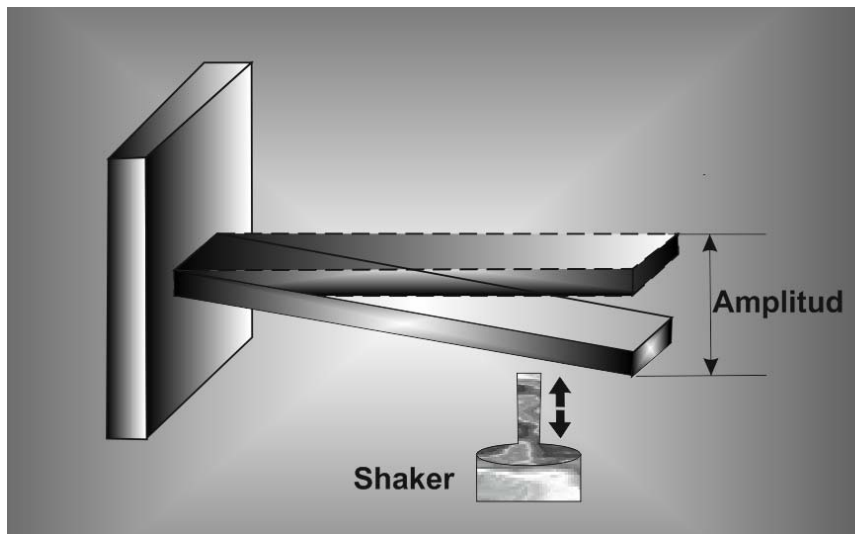


Figura 171. Posicionamiento del shaker en la probeta en voladizo.

El resto del equipamiento para la realización del ensayo es el mismo que el indicado en el análisis de viga en voladizo.

Así como la expresión matemática para el posterior cálculo del módulo de elasticidad.

Este método depende de la observación del analista que realiza el ensayo, siendo muy intuitivo, ya que con otras frecuencias de vibración la lámina no se inmutará.

3.6.3. Método de análisis modal impulso-respuesta

La vibración de las probetas se lleva a cabo por el impacto de un martillo, la vibración que produce la probeta es captada por un acelerómetro.

La señal es analizada por una tarjeta electrónica que transforma la señal y finalmente los datos son presentados en un ordenador a través de la gráfica de función de respuesta de frecuencia.

En la Figura 172 se muestra el esquema del proceso para la obtención del ensayo.

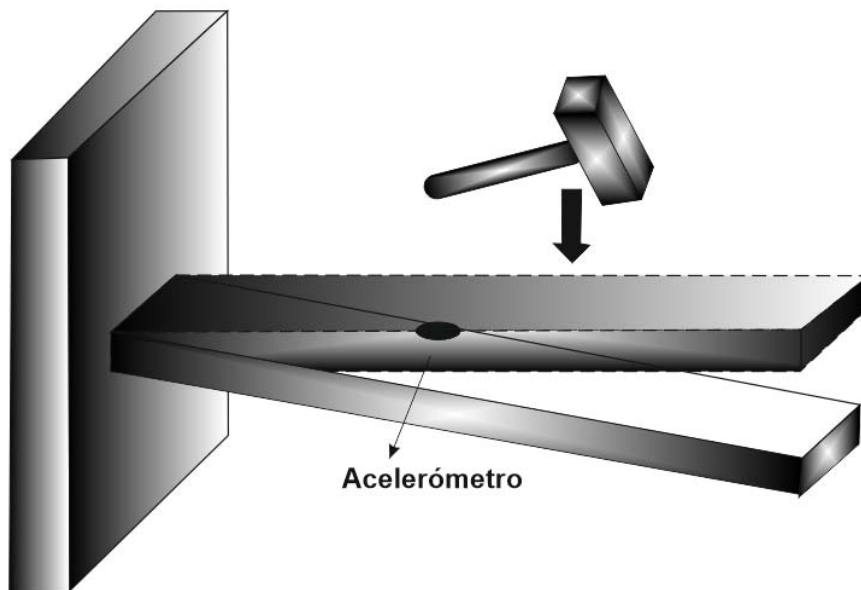


Figura 172. Esquema del ensayo del análisis modal impulso-respuesta.

Con este ensayo se obtendrán las frecuencias naturales correspondientes al primer y segundo modo, así como su amortiguamiento.

Para el cálculo del amortiguamiento de los composites se utiliza la normativa ASTM E 756 – (1998).

Este método de ensayo mide las propiedades de amortiguación de la vibración de los materiales: el factor de pérdida (η), y el módulo de Young (E) o el módulo de cizallamiento (G). Precisa de un rango de frecuencia de 50 a 5.000 Hz y sobre el rango de temperatura útil del material, este método es útil para comprobar materiales que tienen sus aplicaciones en vibraciones estructurales, acústica de edificios y control del ruido audible.

La complicación del ensayo consiste en reproducir de forma exacta, la intensidad del golpe con el martillo sobre la viga, sin que se produzcan rebotes. Al igual que en los métodos anteriores se coloca la probeta en la mordaza con 230 mm de longitud libre, el acelerómetro se ubicará de la forma más cercana posible al apoyo fijo de la probeta realizando el golpe a un tercio de la viga desde la mordaza.

Los valores obtenidos tras la realización del ensayo se presentan en las Figuras 173-177.

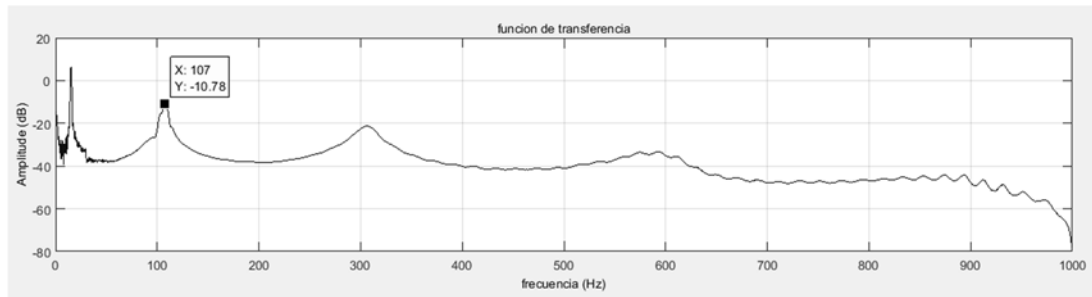


Figura 173. Frecuencias naturales obtenidas del composite de la Materia Textil. Borra.

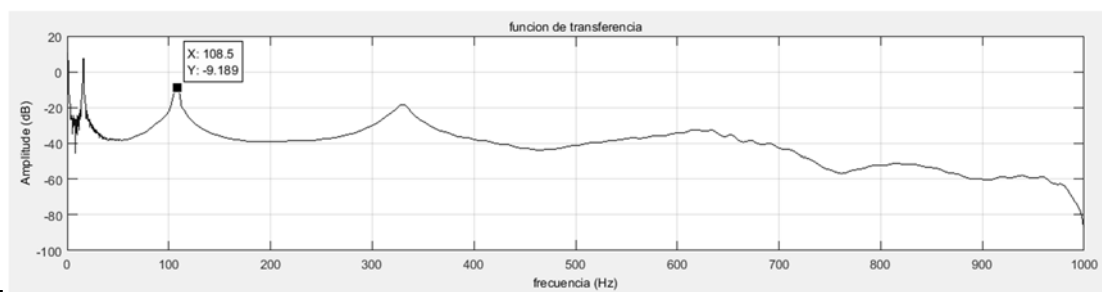


Figura 174. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Cáñamo.

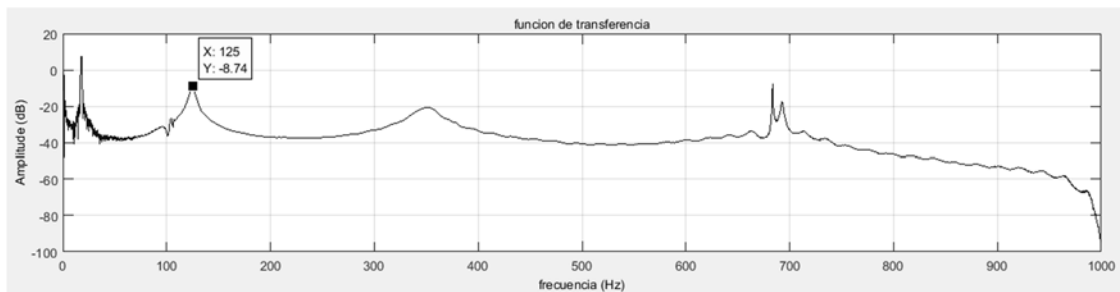


Figura 175. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Coco.

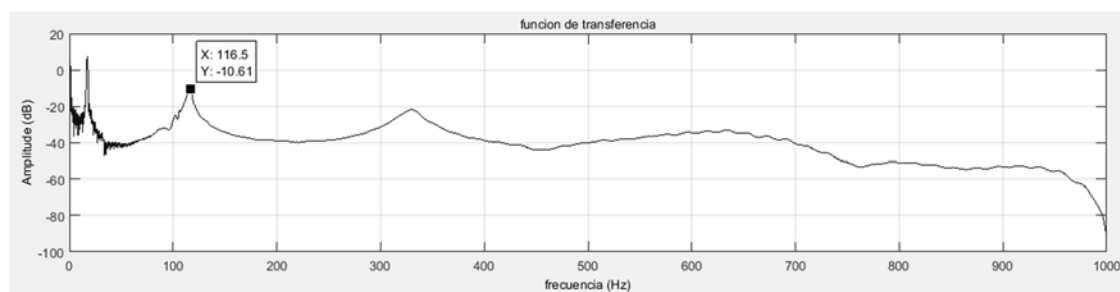


Figura 176. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Lino.

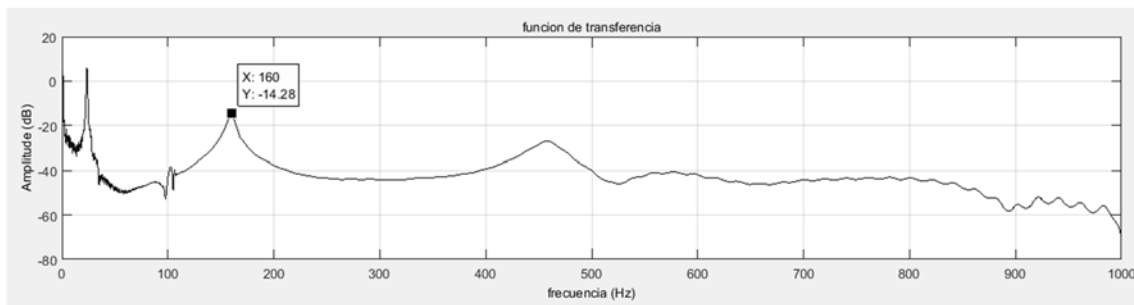


Figura 177. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Yute.

En las gráficas anteriores, los picos de mayor amplitud representan el valor de la frecuencia natural para el primer modo de vibración, y el segundo pico en amplitud indica la frecuencia correspondiente al segundo modo de vibración. Después de los picos se observa como la vibración va disminuyendo en amplitud hasta llegar a su amortiguamiento. Para la obtención del factor de pérdida se utilizan la fórmula de la Norma ASTM C1215 - 92(2012) así como:

$$\eta = \frac{(\Delta f_n)}{f_n}.$$

Donde:

Δf_n : Ancho de banda (Hz).

f_n : Frecuencia de resonancia.

3.6.4. Obtención del módulo de elasticidad

Con la obtención de los valores de las densidades se puede aplicar la fórmula de la norma ASTM C215 – 92:2012.

$$E = \frac{4 \pi^2 f_n^2 \rho A h^4}{B n L^4 I}.$$

Para la verificación de los valores obtenidos de los distintos módulos de elasticidad a través de la fórmula de la norma ASTM C215– 92:2012, se pueden aplicar las siguientes expresiones matemáticas basadas en la:

Normativa E 756 – 05:2010.

$$E = \frac{12 \rho L^4 f_n^2}{H^2 C n^2}.$$

Freberg y Kemler [236].

$$W_n = B \sqrt{\frac{E I}{\rho A L^4}}$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad del material de la viga, expresado en (Pa).
- f_n : Frecuencia de resonancia expresada en (Hz).
- $H = h$: espesor de la viga expresada en (m).
- L: longitud de la barra expresada en (m).
- ρ : densidad del material expresado en (kg/m^3).
- 12: es una constante numérica.
- C_n : coeficiente modelo viga en voladizo.
- A: área de la sección transversal (m^2).
- I: Momento de Inercia (m^4).
- W_n : es la frecuencia natural expresada en (radianes / s).
- $B = (B_n L)^4 = C_n^2$: son constantes que depende de las condiciones de borde, y de distintos valores para cada modo de vibración.

En la Tabla 62 se ponen de manifiesto el valor de las distintas constantes de condiciones de borde [237].

Tabla 62. Recopilación de valores de las constantes de condiciones de borde.

Valores de las constantes en función de su modo de vibración		
C_n : primer modo de vibración	0,55959	Normativa E 756 – 05
B: primer modo de vibración (Voladizo)	3,52	Freberg - Kemler
$(B_n L)^4$: primer modo de vibración	1,875104	Normativa ASTM C215 Teorical background

4. Caracterización acústica

4.1 Cámara de transmisión

Las soluciones evaluadas están formadas por un composite de fibras de residuo textil y materiales elaborados a partir de fibras naturales como elemento ligero y una lana de oveja como material absorbente. Y como matriz polimérica para su conformado, resina biodegradable o de poliéster.

Este tipo de materiales, se deben diseñar, fabricarse y validarse como materiales susceptibles de convertirse en la solución o parte de la solución al acondicionamiento o aislamiento acústico. En primer lugar, se realizan las composiciones de las distintas láminas y laminados multicapa. Los laminados multicapa estarán formados por paneles de sándwich, con las pieles superiores e inferiores formadas por los materiales composite y con un núcleo absorbente de material de lana, tal como se indica en la Figura 178.

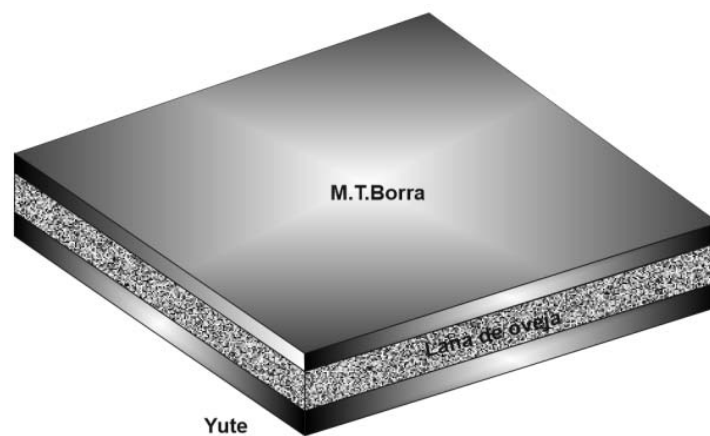


Figura 178. Composición de un laminado multicapa.

Una vez obtenidas las configuraciones deseadas se introducen en la cámara de transmisión, tal y como se muestra en la Figura 179.

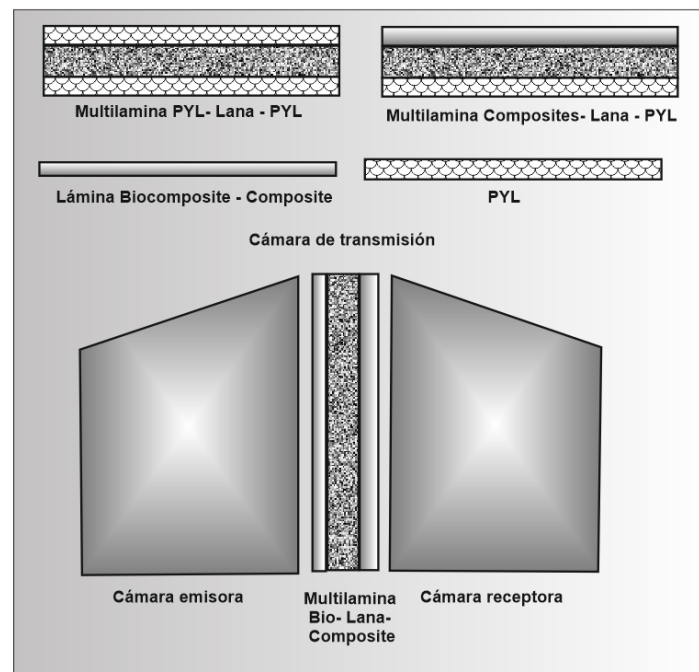


Figura 179. Posicionamiento para la medición del aislamiento al ruido aéreo.

Los composites, se pueden utilizar como materiales absorbentes acústicos o bien como elementos estructurales para soluciones al aislamiento acústico al ruido aéreo. Los análisis se realizarán en dos fases.

La primera fase consistirá en comparar el aislamiento acústico al ruido aéreo de los materiales en forma de apilamiento sándwich, cuyas capas exteriores estarán formadas por composites con bioresina o resina de poliéster y realizar una comparativa con los apilamientos en forma de sándwich formados por capas exteriores de placas de yeso laminado.

En una segunda fase del análisis se compararán los valores de aislamiento acústico al ruido aéreo de apilamientos en forma de sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina y resina de poliéster, yute con bioresina y resina de poliéster y placas de yeso laminado.

Desarrollo del ensayo

Tal como se muestra en la Figura 179, la cámara de transmisión se encuentra formada por dos recintos adyacentes entre los que se va a ubicar la muestra a analizar.

Para realizar el ensayo se parte de una señal de ruido blanco que se produce de forma aleatoria y se caracteriza porque todos sus valores tienen la misma energía o amplitud expresada en niveles de presión o de potencia para toda la banda de frecuencia en tercios de octava, por lo que muestra un espectro plano Figura 181.

Una vez generado este sonido se amplifica por medio de un amplificador y se aplican las vibraciones mecánicas por medio de los altavoces a la sala emisora. Estas vibraciones de origen mecánico son captadas por un micrófono omnidireccional, que se encuentra conectado a un sonómetro. El sonómetro situado en la sala emisora capta el nivel de presión sonora producida por la fuente sonora (L_e).

El micrófono situado en la sala receptora capta, las vibraciones producidas por la fuente sonora tras atravesar la muestra. El segundo micrófono también se encuentra conectado a un sonómetro, por lo que registrará el nivel de presión sonora en la sala receptora (L_r).

Una vez captadas y registradas los niveles de presión sonora, se debe realizar el cálculo del tiempo de reverberación.

Por definición el tiempo de reverberación es el tiempo que tarda en decaer el nivel del sonido en 60 (dB) una vez se haya desconectado la fuente emisora que lo ha producido. El tiempo de reverberación sólo se emplea en recintos cerrados.

En primer lugar, se realizará la medición del tiempo de reverberación de la sala receptora con la muestra ubicada en su posición de ensayo.

Posteriormente, se genera una señal sonora en el interior de la sala emisora, midiéndose los niveles en ambas salas en bandas de tercio de octava.

Las mediciones de este tiempo de reverberación también se obtienen a través del sonómetro, midiendo el tiempo que tarda decaer la señal 60 (dB).

Una vez conocidos los tiempos de reverberación se aplica la fórmula de Sabine:

$$T_R = 0,16 \cdot \frac{V}{A}$$

Donde:

- T_R : Es el tiempo de reverberación en (segundos).
- V : Volumen de la sala emisora en (m^3).
- A : Área de absorción de la sala (m^2).
- 0,16: Constante.

Despejando el área de absorción de la sala de la fórmula de Sabine:

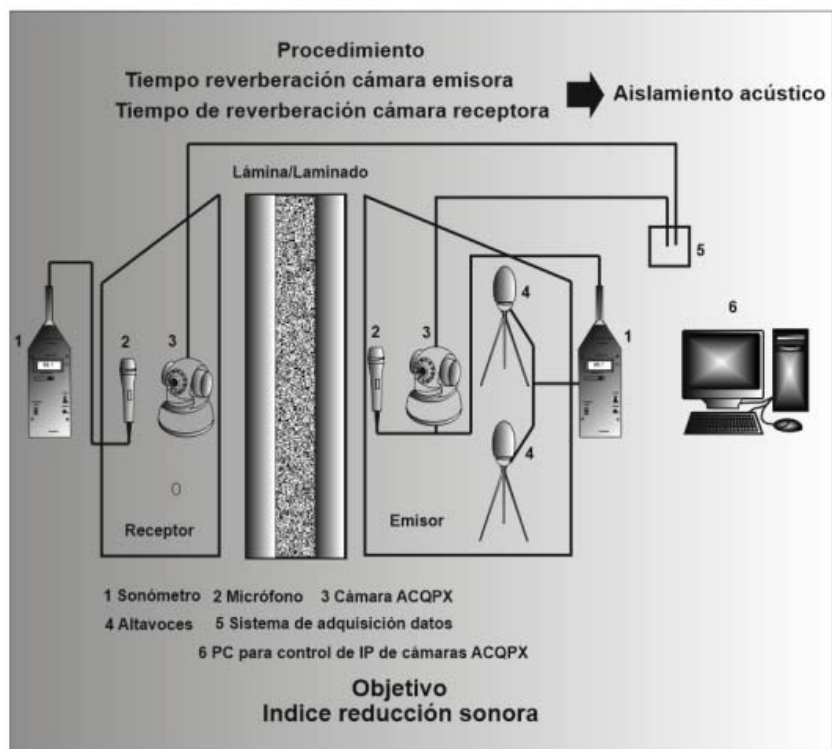
$$A = 0,16 \cdot \frac{V}{T_R}$$

Y aplicando la expresión para poder realizar el cálculo del aislamiento:

$$R \text{ (dB)} = L_e - L_r + 10 \cdot \log \frac{S}{A}$$

Donde:

- S: Es el área de la muestra 50x 60 (mm).



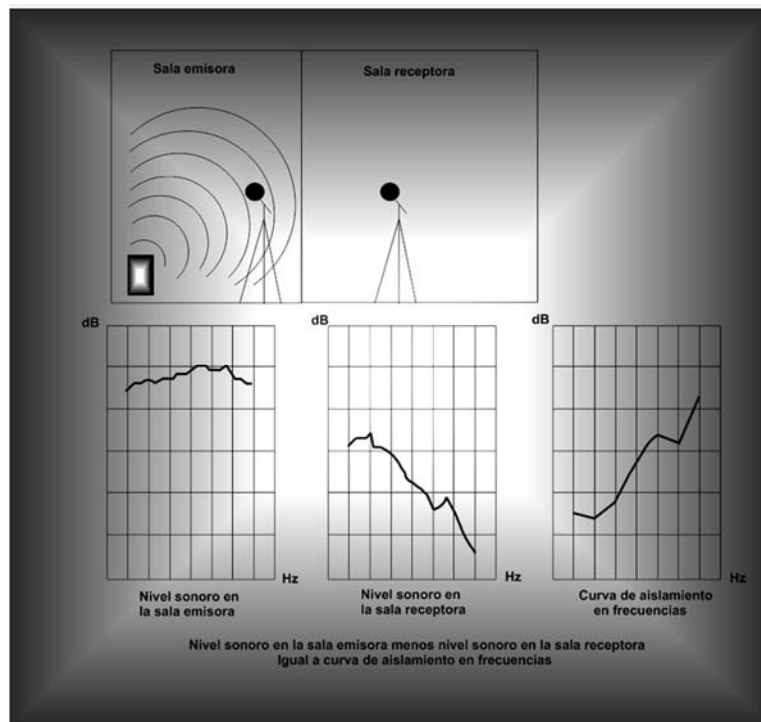


Figura 180. Elementos que componen una cámara de transmisión.

En la Figura 181 se representa el espectro plano del sonido blanco.

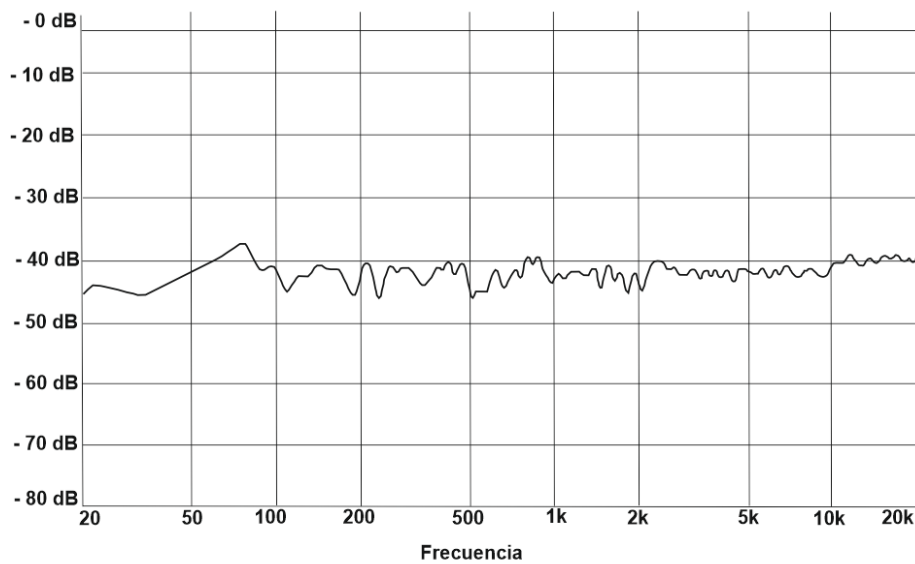


Figura 181. Espectro del ruido blanco.

Expresión de los resultados

Al realizar el ensayo de una partición (pared o forjado) a ruido aéreo, se obtiene como resultado una curva de aislamiento en frecuencias. Este resultado también puede ser traducido a un índice de aislamiento, es decir, un valor expresado en un solo número.

Estos índices proporcionan menos información que la gráfica, pero su manejo es más cómodo. La norma que regula la obtención de estos índices es la EN ISO 717 Acústica: evaluación del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción, Parte 1: aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1: 1996).

Cálculo del valor ponderado R_w (dB)

La Tabla 63 muestra los pasos a seguir para la obtención del valor ponderado R_w (dB) donde en la primera columna (izquierda) se recopilan los valores de las frecuencias de tercio de octava, en la segunda columna, los valores de ponderación que hay que aplicar a cada una de las frecuencia correspondientes al tercio de octava, en la tercera columna los valores obtenidos de R (dB) tras el ensayo) y en la cuarta columna se muestran los valores con los que se va a operar de forma matemática para la obtención del valor ponderado.

Tabla 63. Valores ponderados de la placa de yeso laminado.

Frecuencia (Hz)	de ponderación Factor (dB)	R (dB)	Ponderación (dBi)
100	-19,10	14,50	-4,60
125	-16,10	9,60	-6,50
160	-13,10	12,50	-0,60
200	-10,90	17,30	6,40
250	-8,60	20,00	11,40
315	-6,60	22,00	14,40
400	-4,80	22,50	17,70
500	-3,20	24,30	21,10
630	-1,00	24,60	23,60
800	-0,80	23,00	22,20
1000	0,00	23,20	23,20
1250	-0,60	24,40	23,80
1600	1,00	25,00	26,00
2000	1,20	27,50	28,70
2500	1,30	27,30	28,60
3150	1,20	27,00	28,20
4000	1,00	27,50	28,50
5000	0,50	28,00	28,50

Para la obtención del valor ponderado R_w (B) hay que aplicar la siguiente expresión:

$$R_w(\text{dB}) = 10 \cdot \log \sum 10^{\frac{\text{dB}_i}{10}} .$$

Donde:

dB_i : Corresponde a cada uno de los valores con la ponderación aplicada a la cuarta columna.

4.2 Cámara de reverberación

Para poder validar un laminado multicapa conformado por composites con capas exteriores y convertirlo en un material absorbente acústico ligero, falta dotarle de una lámina intermedia que aporte porosidad.

Dicha porosidad y por lo tanto absorción se la va a proporcionar la lana de oveja.

Con el análisis de los apilamientos laminares de los distintos composites y placas de yeso laminado como recubrimientos exteriores y con un núcleo central de material absorbente en forma de sándwich, se obtiene en la cámara de reverberación el coeficiente de absorción de un material cualquiera según la normativa UNE EN 1793-1:1997 [238]

La cámara de reverberación a escala está construida como una cámara reverberante para el estudio de pantallas acústicas que se evalúan según el método descrito en la norma UNE-EN ISO 354:2004 [239].

En lo que respecta al material absorbente del núcleo del sándwich, se han escogido dos lanas de oveja de denominación M5 y Premium, producto del proyecto de investigación: Eco-Innovation .WOOL4BUILD ECO/13/630249.

Con la aplicación de la lana de oveja se pretende desarrollar un producto que sea sostenible y se pueda aplicar en el sector de la construcción, concretamente como aislante térmico y acústico.

Es un material que por el mero hecho de ser de origen natural es menos agresivo con el medio ambiente, no depende de los derivados del petróleo como es el caso de las lanas minerales. Permitiendo por otra parte el aprovechamiento de los residuos provenientes de los restos de las pieles de las ovejas.

Desarrollo del ensayo

El procedimiento para obtener el coeficiente de absorción de un material en la cámara de reverberación, se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar la muestra objeto del análisis en la cámara Figura 182.

Para ello se parte de un ruido blanco que posteriormente es amplificado y sus vibraciones mecánicas producidas por el altavoz son captadas por un micrófono que las transfiere a un ordenador con el Software Symphonie que permite la obtención de los tiempos de reverberación.

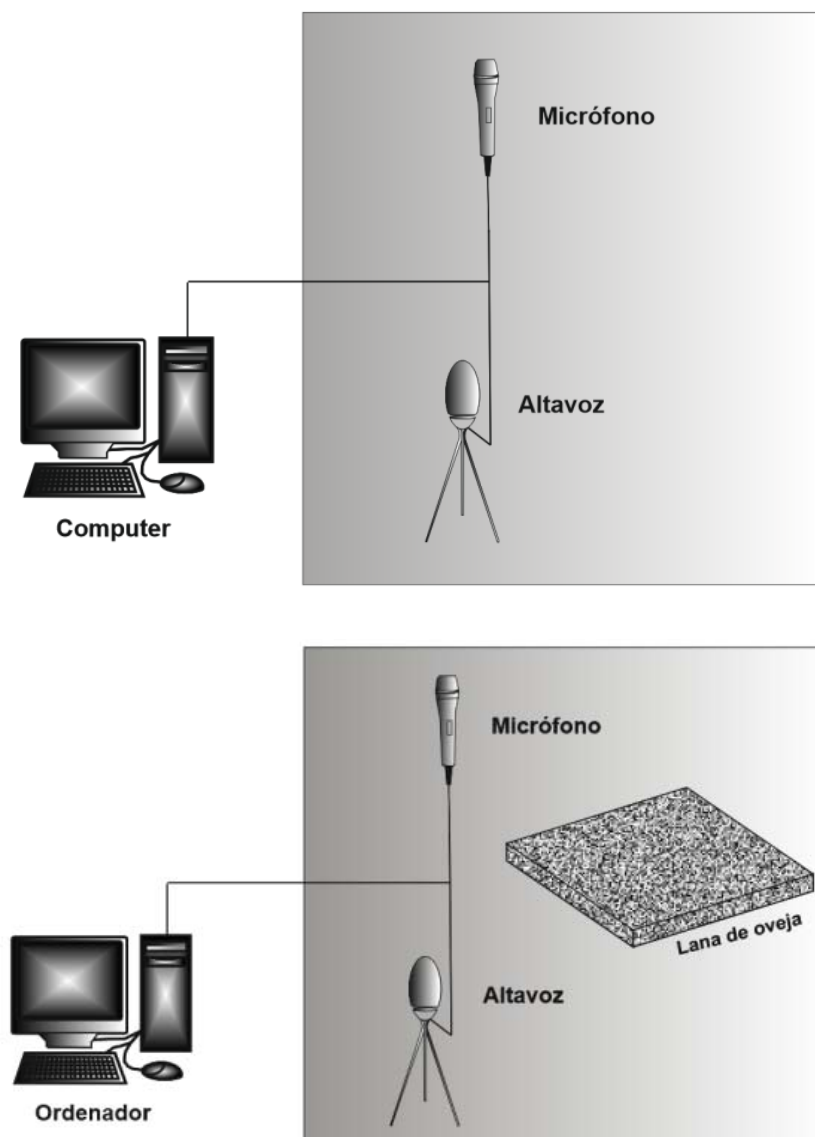


Figura 182. Cálculo del T_R con la cámara vacía y con la muestra.

Con la cámara de reverberación vacía se obtendrá el tiempo de reverberación T_{R1} . A continuación con la cámara de reverberación y con la muestra objeto del análisis se obtendrá el tiempo de reverberación T_{R2} .

Una vez obtenidos los tiempos de reverberación con la cámara vacía y con la muestra, se realiza el cálculo del área de absorción sonora equivalente que se denominaran respectivamente A_1 y A_2 . Para lo cual se aplicará la fórmula de Sabine.

Absorción cámara vacía:

$$A_1 = 55,2.V / c.T_{R1}.$$

Absorción cámara con muestra:

$$A_2 = 55,2.V / c.T_{R2}.$$

Donde:

- V: Volumen (m^3) de la cámara reverberante.
- C: Velocidad de propagación del sonido (m/s).

Una vez obtenidos los valores de las absorciones con la cámara vacía y con muestra, se tiene que obtener el valor del área de absorción sonora, para lo cual se aplica la siguiente expresión:

$$A_T = A_2 - A_1.$$

Conocida el área de absorción sonora se puede determinar el coeficiente de absorción sonora del material o de la muestra, aplicando la siguiente fórmula:

$$\alpha_S = A_T / \text{Área de la muestra}.$$

El área de la muestra tiene un valor de $500 \times 600 \text{ mm}^2$.

5. Simulación numérica

5.1 Análisis modal

En esta sección de la memoria se va a comprobar y desarrollar el análisis modal a través del programa informático Ansys, en sus versiones [240-242]:

- Ansys Mechanical APDL.
- Ansys Workbench.

5.1.1 Programa Ansys Workbench

Programa basado en elementos finitos (FEA) [243] que proporciona una técnica numérica fiable para el análisis de diseños de ingeniería. Con la finalidad de comprobar que los valores obtenidos en los ensayos dinámicos [244] tienen valores fiables, se va a realizar un modelado de cada uno de los composites con bioresina y resina de poliéster. El tipo de análisis será Modal.

El proceso empieza con la creación de un modelo geométrico, que contenga las dimensiones de las probetas Figura 183.

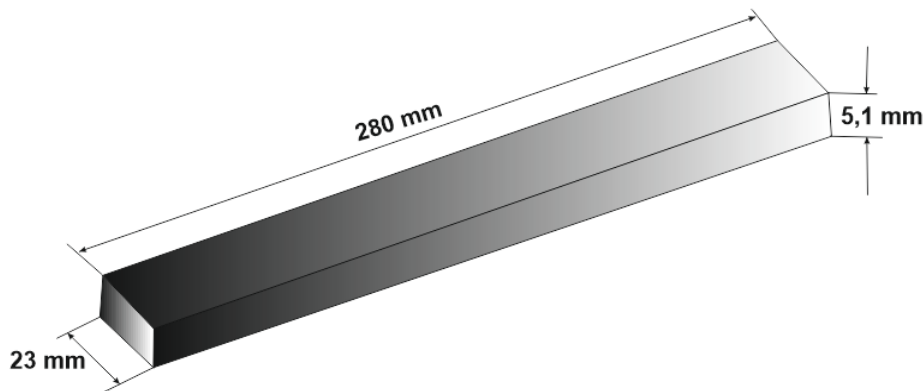


Figura 183: Dimensionado de la probeta de yute con bioresina.

Los programas de análisis de elementos finitos consideran el modelo como una red de elementos discretos interconectados.

5.1.2 Análisis ortotrópico

Se deberá de crear un nuevo material que sea ortotrópico, para lo cual se deberán de introducir los datos indicados en la Figura 184 con los valores obtenidos a través de los cálculos de láminas y laminados realizados con anterioridad.

Properties of Outline Row 3: Lino				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1200	kg m...	
3	Orthotropic Elasticity			
4	Young's Modulus X direction	2,779E+10	Pa	
5	Young's Modulus Y direction	4,692E+09	Pa	
6	Young's Modulus Z direction	4,692E+09	Pa	
7	Poisson's Ratio XY	0,35		
8	Poisson's Ratio YZ	0,36		
9	Poisson's Ratio XZ	0,36		
10	Shear Modulus XY	1,698E+09	Pa	
11	Shear Modulus YZ	8,49E+08	Pa	
12	Shear Modulus XZ	1,698E+09	Pa	
13	Orthotropic Stress Limits			

Figura 184. Celdas que permiten la introducción de las constantes ingenieriles globales del material.

Mallado

El mallado es un paso crucial en el análisis de diseño. El mallado automático en el software genera una malla basándose en un tamaño de elemento global, una tolerancia y especificaciones locales de control de malla. El control de malla le permite especificar diferentes tamaños de elementos de componentes, caras, aristas y vértices. El tamaño de la malla generada (número de nodos y elementos) depende de la geometría y las cotas del modelo, el tamaño del elemento, la tolerancia de la malla, el control de malla y las especificaciones de contacto.

En la Figura 185 se representa la pieza tras la operación del mallado.

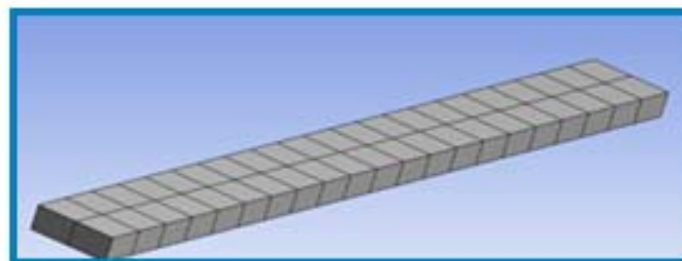


Figura 185. Visualización de la pieza mallada.

Fijación de la pieza

Una vez obtenido el mallado, se realiza la fijación de la pieza, siguiendo el modelo realizado en el ensayo vibracional (viga en voladizo). En la Figura 186 se muestra la imagen que permite la elección de la fijación.

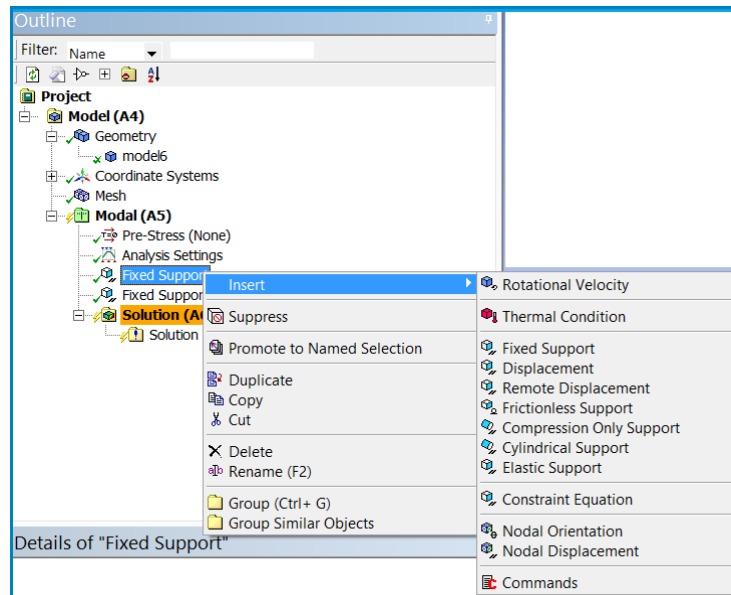


Figura 186. Elección del tipo de fijación que se desea.

Análisis de la pieza

Los materiales tienden a vibrar a determinadas frecuencias denominadas frecuencias naturales o resonantes. Cada frecuencia natural está relacionada a una forma determinada, llamada forma modal, que el modelo tiende a adoptar al vibrar a esa frecuencia. Cuando una estructura es excitada de forma adecuada por una carga dinámica con una frecuencia que coincide con una de sus frecuencias naturales, la estructura va a sufrir grandes desplazamientos y tensiones. Este fenómeno se denomina resonancia.

Elección de la cantidad de modos sé que se desean analizar. La cantidad recomendada de modos está entre los 3 y 6 primeros Figura 187.

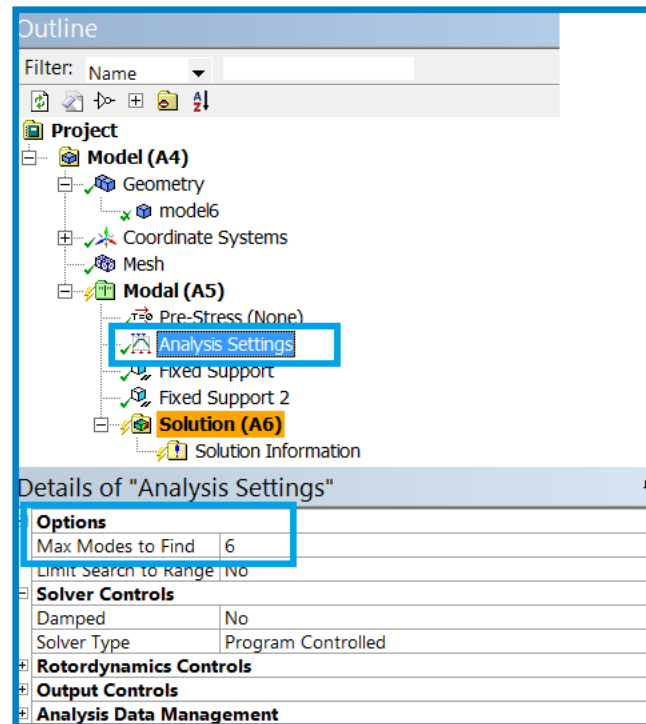


Figura 187. Realización del análisis y elección de modos de vibración.

Obtención de soluciones

Si el programa es correcto aparecen las soluciones de las frecuencias para cada uno de los modos. Figura 188.

En la parte inferior de la Figura 188 en forma de barras verticales se muestran los resultados obtenidos de las frecuencias para los seis primeros modos de vibración.

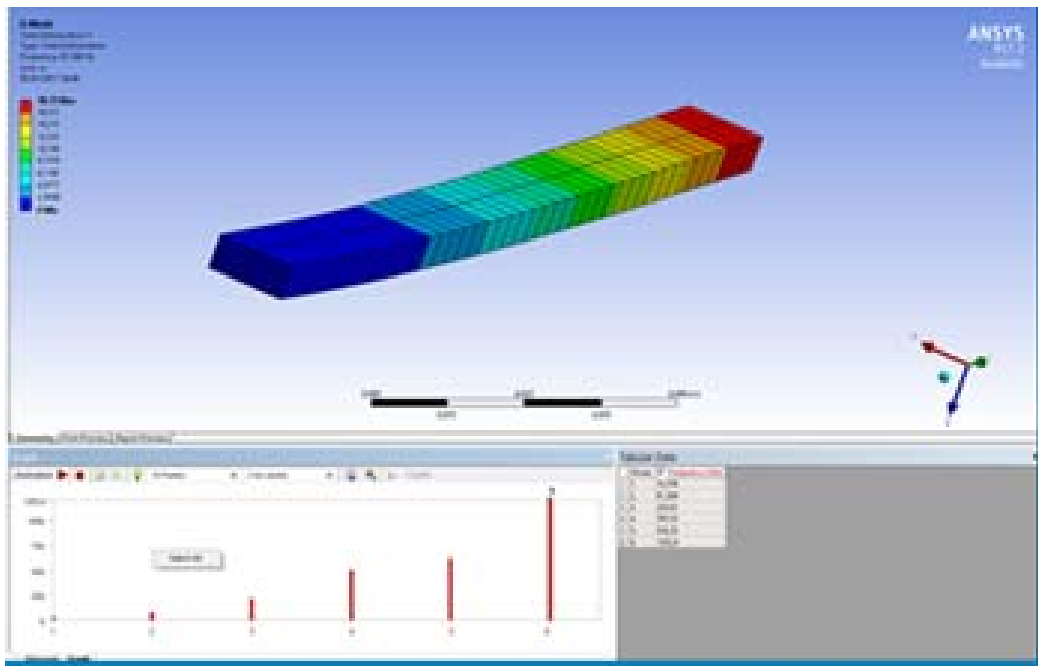


Figura 188. Soluciones de frecuencias a través de diagrama de gráficos.

5.2 Programa informático eLam x².

El programa informático eLamX es de versión libre y gratuito, basado en el cálculo de laminado programado en el lenguaje Java y desarrollado por el Instituto de Tecnología Aeronáutica de la Universidad de Tecnología de Dresde [245].

Con la ejecución de este programa informático de cálculo se podrá comprobar de forma fehaciente si los valores obtenidos de las constantes ingenieriles globales de los composites, así como las matrices [A] y [D] a través de la hoja de cálculo de Excel son los correctos.

Donde:

- [A]: Es la matriz de rigidez extensional.
- [D]: La matriz de rigidez a flexión.

La primera operación que se deber de realizar para llevar a cabo el análisis será la creación de un nuevo material Figura 189.

The screenshot shows a dialog box titled 'Edit' with a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into several sections, each with a collapse/expand icon on the left. The 'General Properties' section contains 'Name' (New Material) and 'Density' (1,7E-9). The 'Stiffness Properties' section contains 'E₁₁' (141000,0), 'E₂₂' (9340,0), 'ν₁₂' (0,350), and 'G₁₂' (4500,0). The 'Hygrothermal Properties' section contains 'α₁₁' (1,0E-6), 'α₂₂' (3,5E-5), 'β₁₁' (1,0E-2), and 'β₂₂' (3,8E-1). The 'Strength Properties' section contains 'X_t' (1500,0), 'X_c' (1000,0), 'Y_t' (180,0), 'Y_c' (240,0), and 'SC' (150,0). The 'Additional Properties' section contains 'F₁₂ (ZTL)' (-0,5) and 'a₀ (Puck)' (0,5). At the bottom, there is a text field labeled 'New Material' and an 'OK' button.

Property	Value
Name	New Material
Density	1,7E-9
E ₁₁	141000,0
E ₂₂	9340,0
ν ₁₂	0,350
G ₁₂	4500,0
α ₁₁	1,0E-6
α ₂₂	3,5E-5
β ₁₁	1,0E-2
β ₂₂	3,8E-1
X _t	1500,0
X _c	1000,0
Y _t	180,0
Y _c	240,0
SC	150,0
F ₁₂ (ZTL)	-0,5
a ₀ (Puck)	0,5

Figura 189. Introducción del nombre del nuevo material y de las constantes ingenieriles del mismo.

En el campo de Name, se introduce el nombre del nuevo material que se desea crear. A continuación, se introducen en los campos el valor de la densidad en toneladas / mm³.

- Density.

Se deben de rellenar los campos de la pestaña Stiffness Properties con los valores de las constantes ingenieriles obtenidas a través de los datos obtenidos en la sección de cálculo de láminas y laminados.

- E₁.
- E₂.
- ν₁₂.
- G₁₂.

Para el caso concreto del composite de Yute con resina de poliéster, le corresponden los siguientes valores Figura 190.

Edit	
General Properties	
Name	yute con poliester
Density	1,12E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	5697,4
E_{\perp}	4052,4
$\nu_{ \perp}$	0,310
$G_{ \perp}$	1533,0
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Helius Hashin)	1,0
R_{\dots} (Autodesk Helius Hashin)	150 n
yute con poliester	

Figura 190. Valores de la densidad y de las constantes ingenieriles del composite yute con resina de poliéster.

Una vez introducidas las constantes ingenieriles y la densidad de los materiales se realiza la composición del laminado. Agregando de forma secuencial los datos de cada lámina que compone el laminado (espesor y orientación de las fibras).

Una vez completado el número de láminas del apilamiento, el programa podrá realizar el cálculo de las constantes ingenieriles globales y de las matrices de rigidez extensional y de flexión.

Los valores calculados de forma automática por el programa eLam x2 de las constantes ingenieriles son los que se muestran en la Figura 191.

		without Poisson		with Poisson	
		Membrane	Flexural	Membrane	Flexural
E_x	=	6115,4	6115,4	5697,4	5697,4
E_y	=	4349,8	4349,8	4052,4	4052,4
G_{xy}	=	1533,0	1533,0	1533,0	1533,0
ν_{xy}	=	-	-	0,310	0,310
ν_{yx}	=	-	-	0,220	0,220
t_{tot}	=		4,5		
Area Weight	=		5,04E-9		

Figura 191. Obtención de los valores de las constantes ingenieriles globales del composite yute con resina de poliéster.

De los valores obtenidos en la Figura 191 se escogen los valores con coeficiente de poisson y membrana.

En la Figura 192 se muestra la imagen obtenida por el programa de los valores de las matrices [A] y [D].

27519,1	6067,9	0,0	-0,0	0,0	0,0
6067,9	19573,9	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	6898,5	0,0	0,0	0,0
-0,0	0,0	0,0	46438,5	10239,6	0,0
0,0	0,0	0,0	10239,6	33030,9	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11641,2

Figura 192. La imagen izquierda superior corresponde a los valores de la matriz [A] y la derecha inferior a los valores de la matriz [D].

5.3 Simulación en Solidworks Premium 2018

La primera de las operaciones que se debe de realizar al utilizar el programa informático Solidworks Premium [246], para la realización de una análisis estructural estático consiste en realizar el dimensionado de la pieza que se desea analizar.

En la imagen de la Figura 193 se muestran los valores de la probeta objeto de este modelado.

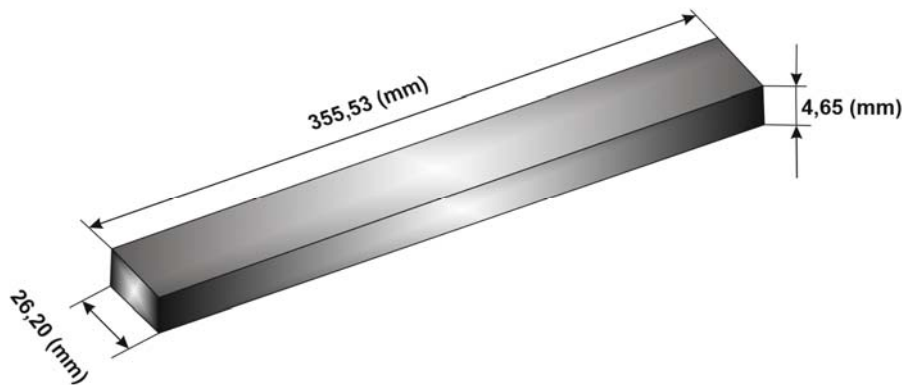


Figura 193. Dimensionado geométrico de la probeta.

Elección adecuada de los ejes de coordenadas en el diseño de la pieza

Para que la introducción de los parámetros del material ortotrópico sea la correcta, es importante su introducción siguiendo los ejes del diseño de la probeta, indicando el espesor al eje de las Z, como se muestra en la Figura 194.

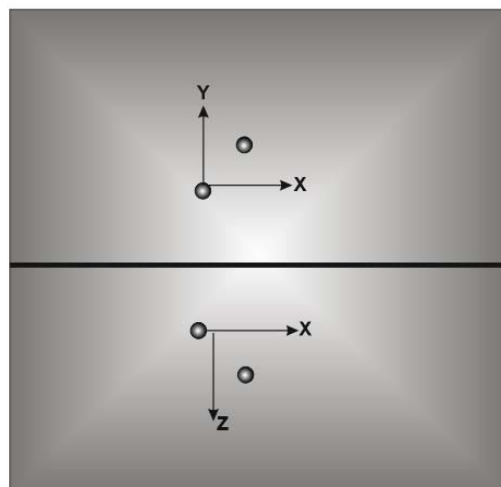


Figura 194. Disposición de los ejes de coordenadas de la probeta.

En caso de no situar los ejes de coordenadas en la posición anterior, los resultados que se obtienen a través del programa informático Solidworks no se ajustarán a los valores reales Figura 195.

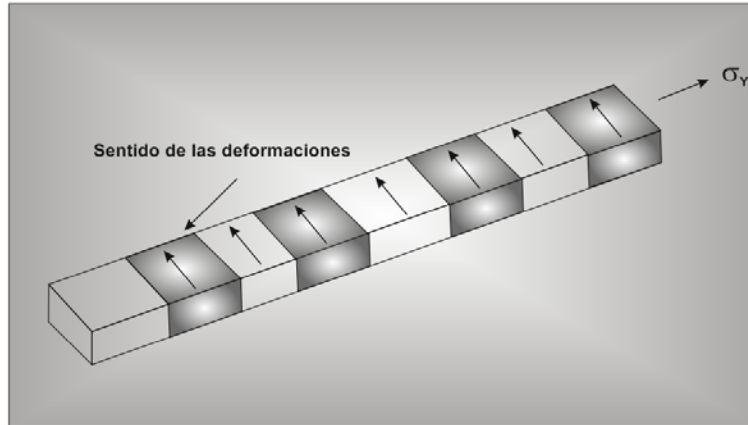


Figura 195. Deformaciones en la dirección de los esfuerzos.

La dirección correcta de los esfuerzos viene indicada en la Figura 196.

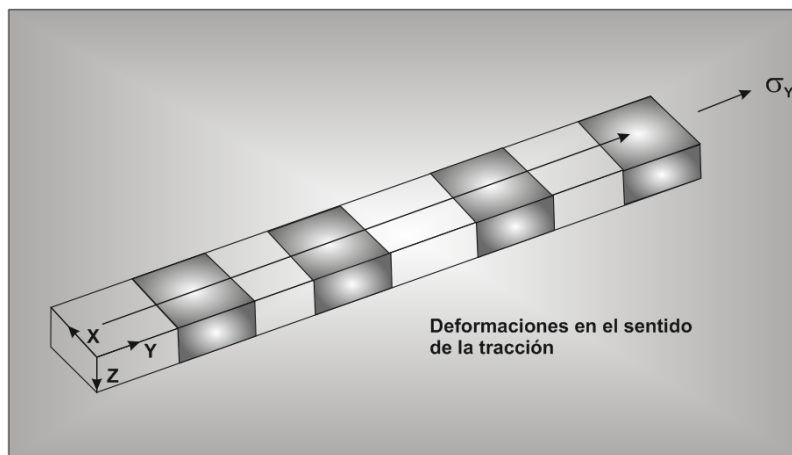


Figura 196. Deformaciones en la dirección transversal a los esfuerzos.

La elección del tipo de estudio que se debe de realizar será ortotrópico elástico lineal Figura197.

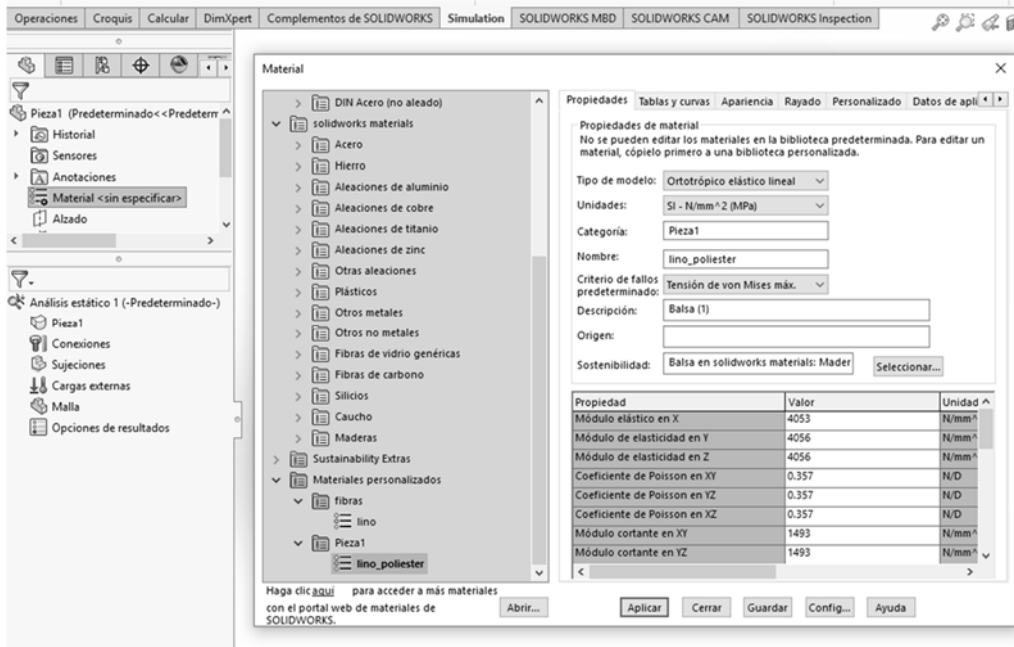


Figura 197. Secuenciación de iconos para el diseño del material de la pieza.

Para lo cual se deberán de añadir a las propiedades del material los valores obtenidos en cálculo de láminas y laminados.

Sujeciones

Como se trata de realizar un análisis de tracción la pieza deberá de encontrarse sujeta por una de sus caras. Figura 198.

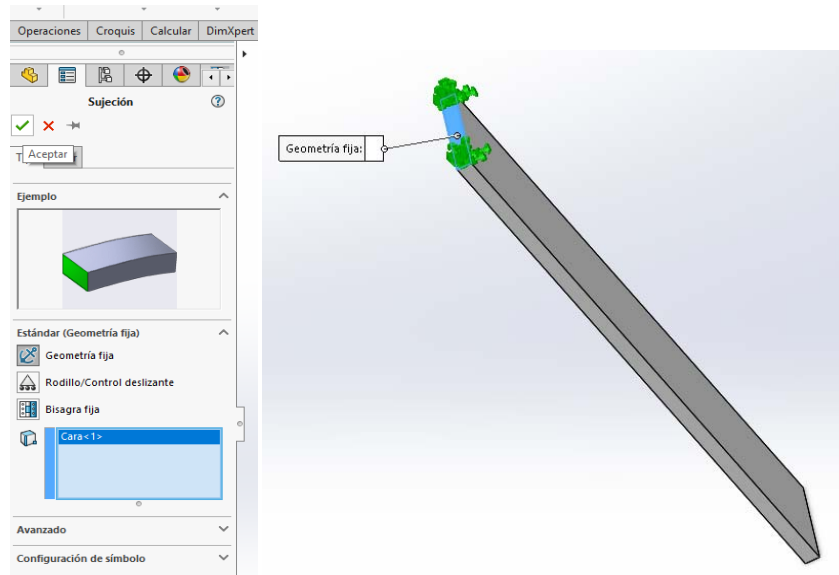


Figura 198. Selección de la cara de la pieza que se debe de fijar.

Una vez fijado un extremo de la pieza, en el otro extremo se debe de aplicar una fuerza teniendo en cuenta la dirección de la fuerza aplicada y el valor de la misma obtenido del ensayo de tracción con la máquina universal de tracción.

Mallado

Una vez finalizadas las sujeciones se debe de llevar a cabo el mallado Figura 199.

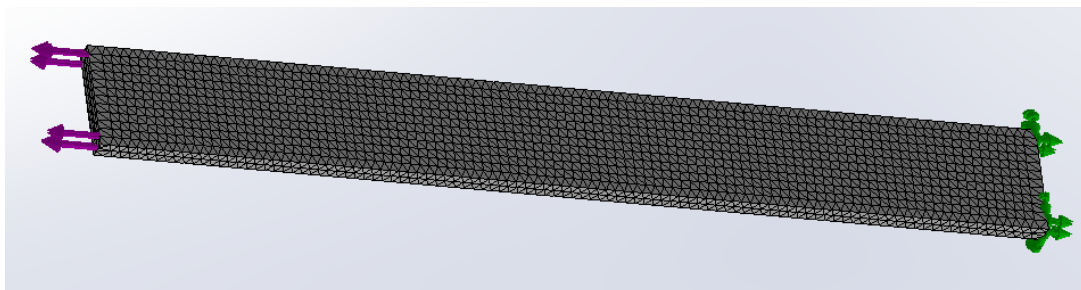


Figura 199. Pieza mallada.

Obtención de soluciones

El programa presenta una serie de soluciones al análisis ortotrópico elástico lineal Figura 200.

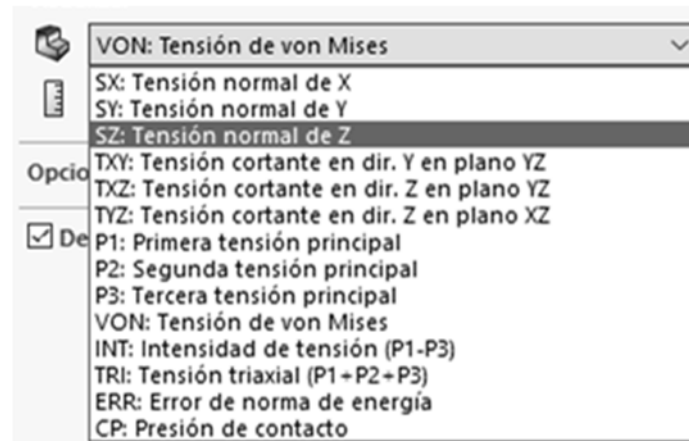


Figura 200. Desplegable para la elección de magnitudes que se deseen analizar.

VII. Resultados y discusión

1. Composición de los composites fabricados

1.1 Composites de fibra de yute

Desde el nivel práctico, la fabricación de las placas con “green composite” de fibras de yute, no presentan mayores inconvenientes en el proceso de infusión de resina, el espesor es reducido y su entramado permite que la resina fluya libremente.

Características de la fibra

Nombre Técnico: Tejido de Fibra de Yute (Tafetán 0-90).

Espesor individual del Tejido/Manto: **0,75 mm.**

Gramaje Promedio Experimental: **315 g/m².**

Disposición de la placa

La Tabla 64 indica la cantidad de capas y el peso por cada capa que se ha utilizado para la formación del manto.

Tabla 64. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa con fibras de yute.

Número de capas	Masa por capa (g)
1	165
2	174,10
3	177,80
4	177,00
5	173,80
6	175,30
Total	1 043,00

En la Tabla 66 se muestran las proporciones geométricas de cada una de las capas empleadas.

Tabla 65. Dimensionado de las capas de yute.

Número de capas	Dimensiones (mm)		Peso capa (g)
1	910	605	165
2	902	612	174,10
3	906	611	177,80
4	910	609	177
5	908	604	173,80
6	906	611	175,30

Resultado de la placa

Peso final: **2,42 kg.**

Espesor final de la placa: **5,1 mm.**

Densidad del compuesto: **1,086 g/cm³.**

La imagen de la Figura 201 visualiza el aspecto del “green composite” de yute.



Figura 201. Placa de fibra de yute con bioresina.

Disposición de la placa de composite yute con resina de poliéster

La Tabla 66 indica la cantidad de capas y el peso del laminado que se ha utilizado para la formación de las capas de “green composite” con yute, para posteriormente realizar la infusión por vacío con resina de poliéster.

Tabla 66. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa con fibras de yute.

Número de capas	Masa total de las capa (g)
6	1 043

Resultado de la placa

Peso final: **2,39 kg.**

Espesor final de la placa: **4,72 mm.**

El laminado de “green composite” de yute con resina de poliéster tiene el mismo aspecto visual que el de la lámina del “green composite” de yute con bioresina.

1.2 Composites de lino biaxial

La segunda fase experimental que se desarrolló, corresponde a la fabricación de las placas de “green composite” con fibras de lino, su complejidad es muy similar a la de la fabricación de las placas de fibras de yute, la capacidad de la absorción de humedad, su bajo espesor, así como su entramado permiten que la resina fluya con facilidad rellenando los huecos entre las fibras.

Características de la fibra

Nombre Técnico: Tejido de Fibra de Lino Biaxial Amplitex (± 45).

Espesor individual del Tejido/Manto: **0,8 mm.**

Gramaje Promedio Experimental: **370 g/m².**

Disposición de la placa

La Tabla 67 indica la cantidad de capas y el peso por cada capa que se ha utilizado para la formación del laminado.

Tabla 67. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa con fibra de Lino Biaxial.

Número de capas	Masa por capa (g)
1	203,50
2	203,30
3	206,80
4	194,30
5	203,00
6	212,50
Total	1 223,40

En la Tabla 68 se muestran las proporciones geométricas de cada una de las capas empleadas.

Tabla 68. Dimensionado de las capas de lino biaxial.

Número de capas	Dimensiones (mm)		Peso capa (g)
1	889	645	203,50
2	870	632	203,30
3	915	605	206,80
4	880	605	194,30
5	900	630	203
6	910	600	212,50

Resultados de la placa.

Peso final: **2,39 kg.**

Espesor final de la placa: **4,62 mm.**

La imagen de la Figura 202 visualiza el aspecto del composite de lino con bioresina.



Figura 202. Placa de fibra de lino biaxial con Bioresina.

Disposición de la placa del composite lino biaxial con resina de poliéster

La Tabla 69 indica la cantidad de capas y el peso del laminado que se ha utilizado para la formación de las capas del “green composite” de lino biaxial, para posteriormente realizar la infusión por vacío con resina de Poliéster.

Tabla 69. Número de capas utilizadas en la fabricación de las placas “green composite” con fibras de lino biaxial.

Número de capas	Masa total de las capa (g)
6	1 280

Resultado de la placa

Peso final: **2.85 kg.**

Espesor final de la placa: **4,35 mm.**

El laminado de lino biaxial con resina de poliéster tiene el mismo aspecto visual que el de la lámina de lino biaxial con bioresina.

1.3 Materia Textil Borra

La fabricación de las placas con Materia Textil Borra es más complicada de realizar que la fabricación de las anteriores láminas, debido a que en parte el manto de Materia Textil Borra no posee un orden y un espesor considerable, lo que implica que la resistencia a la fluidez de la resina aumente en el proceso de infusión.

Características de la fibra

Nombre Técnico: Manto Textil (Borra).

Espesor individual del Tejido/Manto: **1,5 mm.**

Gramaje Promedio Experimental: **225 g/m².**

Disposición de la placa

La Tabla 70 indica la cantidad de capas y el peso por cada capa que se ha utilizado para la formación del manto.

Tabla 70. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de la Materia Textil Borra con bioresina.

Número de capas	Masa por capa (g)
1	112,90
2	116,50
3	129,20
4	127,30
5	132,00
Total	617,90

En la Tabla 71 se muestran las proporciones geométricas de cada una de las capas empleadas.

Tabla 71. Dimensionado de las capas de Materia Textil Borra con bioresina.

Número de capas	Dimensiones (mm)		Peso capa (g)
1	900	600	112,90
2	912	605	116,50
3	903	605	129,20
4	905	603	127,30
5	900	604	132,00

Resultados de la placa.

Peso final: **2,3 kg.**

Espesor final de la placa: **5,1 mm.**

El aspecto de la placa se observa en la Figura 203.



Figura 203. Placa de Materia Textil Borra con bioresina.

Disposición de la placa del composite Materia Textil Borra con resina de poliéster

La Tabla 72 indica la cantidad de capas y el peso del laminado que se ha utilizado para la formación del composite de Materia Textil Borra para posteriormente realizar la infusión por vacío con resina de poliéster.

Tabla 72. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de Materia Textil Borra con resina de poliéster.

Número de capas	Masa total de las capa (g)
5	639

Resultado de la placa

Peso final: **2,35 kg.**

Espesor final de la placa: **4,61 mm.**

El laminado de la Materia Textil Borra con resina de poliéster tiene el mismo aspecto visual que el de la lámina de Materia Textil Borra con bioresina.

1.4 Composites de Coco

La fabricación de las placas de composite con fibra de coco, resulta más complicada de realizar, debido a que las fibras de coco, no tiene un orden establecido y su espesor es relativamente elevado, lo que implica que la resistencia a la fluidez de la resina aumente en el proceso de infusión.

Características de la fibra

Nombre Técnico: Fibra de Coco (S-15).

Espesor individual del Tejido/Manto: **6,5-10 mm**.

Gramaje Promedio Experimental: **1400 g/m²**.

Disposición de la placa

La Tabla 73 indica la cantidad de capas y el peso por cada capa que se ha utilizado para la formación de la lámina.

Tabla 73. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de “green composite” con fibra de coco.

Número de capas	Masa por capa (g)
1	788
Total	788

En la Tabla 74 se muestran las proporciones geométricas de cada una de las capas empleadas.

Tabla 74. Dimensionado de la capa de coco.

Número de capas	Dimensiones (mm)		Peso capa (g)
1	910	615	788

Resultados de la placa.

Peso final: **3,58 kg**.

Espesor final de la placa: **8,14 mm**.

El aspecto visual de la placa se observa en la Figura 204.



Figura 204. Placa de composite de fibra de coco con bioresina.

Disposición de la placa del composite coco con resina de poliéster

La Tabla 75 indica la cantidad de capas y el peso del laminado que se ha utilizado para la formación de la lámina de coco para posteriormente realizar la infusión por vacío con resina de poliéster.

Tabla 75. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de coco.

Número de capas	Masa total de las capa (g)
1	788

Resultado de la placa

Peso final: **4,03 kg.**

Espesor final de la placa: **7,46 mm.**

El laminado de composite de coco con resina de poliéster tiene el mismo aspecto visual que el de la lámina de composite de coco con bioresina.

1.5 Composites de Cáñamo

La fabricación de las placas de fibra de cáñamo, resulta tediosa, debido a que su manto, no posee un orden, teniendo un espesor relativamente elevado, además de poseer un film orgánico que influye en la resistencia de la fluidez de la resina en el proceso de infusión.

Características de la fibra

Nombre Técnico: Fibra de Cáñamo (Technifeutre).

Espesor individual del Tejido/Manto: **5 mm**.

Gramaje Promedio Experimental: **1.210 g/m²**.

Disposición de la placa

La Tabla 75 indica la cantidad de capas y el peso por cada capa que se ha utilizado para la formación del laminado.

Tabla 76. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de composites con fibra de cáñamo y bioresina.

Número de capas	Masa por capa (g)
1	654,80
Total	654,80

En la Tabla 77 se muestran las proporciones geométricas de cada una de las capas empleadas.

Tabla 77. Dimensionado de las capas de cáñamo.

Número de capas	Dimensiones (mm)		Peso capa (g)
1	900	600	654,80

Resultados de la placa.

Peso final: **2,03 kg**.

Espesor final de la placa: **4,24 mm**.

El aspecto de la placa se observa en la Figura 205.

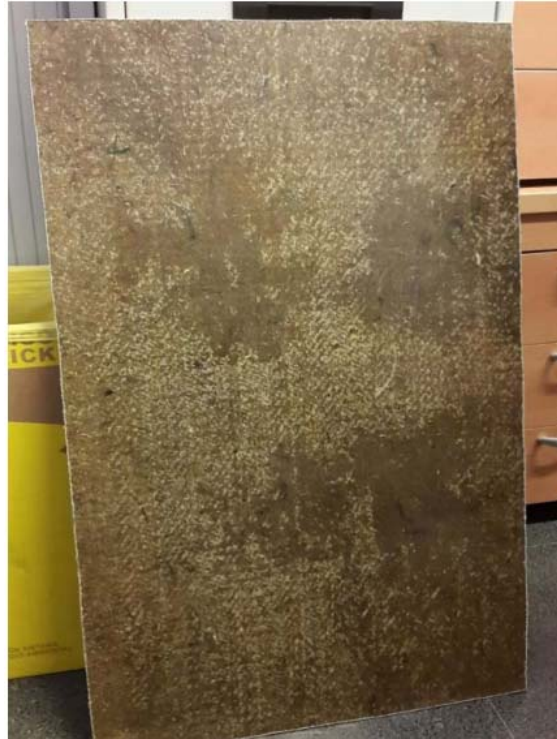


Figura 205. Placa de composite de cáñamo con bioresina.

Disposición de la placa del composite cáñamo con resina de poliéster

La Tabla 78 indica la cantidad de capas y el peso del laminado que se ha utilizado para la formación de la capa del composite de cáñamo, para posteriormente realizar la infusión por vacío con resina de poliéster.

Tabla 78. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa del composite de cáñamo con resina de poliéster.

Número de capas	Masa total de las capa (g)
1	653,40

Resultado de la placa

Peso final: **2,24 kg.**

Espesor final de la placa: **4,44 mm.**

El laminado del composite de cáñamo con resina de poliéster tiene el mismo aspecto visual que el de la lámina de cáñamo con bioresina.

2. Caracterización física

2.1 Densidad hidrostática

La metodología de la medida se basa en obtener la densidad del material objeto del análisis, para lo cual, conociendo el valor de la densidad del fluido, en este caso del agua destilada (agua destilada 1 g/cm³) y el peso de la muestra fuera y dentro del fluido, se puede obtener la densidad del sólido.

Los valores obtenidos tras el ensayo se muestran en la Tabla 79.

Tabla 79 Valores de densidad de los distintos composites ensayados.

Densidad hidrostática			
Composites con bioresina	(g/cm ³)	Composites con resina de poliéster	
1,18	Lino Biaxial		1,22
1,07	Materia textil borra		1,23
1,03	Coco		1,01
1,08	Yute		1,12
1,15	Cáñamo		1,13
1,12	Resina		1,21

2.2 Porosidad

Para la resolución matemática de los porcentajes de porosidad aplicando los dos métodos de cálculo de los composites con resina de poliéster se parte de los parámetros recopilados en Tabla 80.

Tabla 80. Resumen de parámetros para la realización del cálculo teórico de los valores de porosidad de los composites con resina de poliéster.

Composites con resina de poliéster						
Fibra	Fracción de Volumen fibra Vf (%)	Densidad de la matriz (g/cm ³)	Densidad del composite (g/cm ³)	Fracción masa fibra (%)	Fracción masa matriz (%)	Fracción de Volumen matriz Vf (%)
Yute	0,47	1,21	1,12	0,45	0,55	0,52
Lino	0,44	1,21	1,22	0,46	0,54	0,56
Cáñamo	0,33	1,21	1,13	0,29	0,71	0,66
Coco	0,32	1,21	1,03	0,20	0,80	0,68
M.T.Borra	0,28	1,21	1,23	0,30	0,70	0,72

A continuación, se realiza como ejemplo el cálculo del composite yute con resina de poliéster para mostrar cómo se obtiene la fracción de volumen de huecos del mencionado composite.

Cálculo de la densidad de las fibras teóricas

Aplicando la fórmula (1).

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_{f \text{ teórica}}}}{\frac{M_f}{\rho_{f \text{ teórica}}} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (1)$$

Donde:

- M_f : Fracción de masa de las fibras (%).
- ρ_f : Densidad de la fibra (g/cm^3).
- V_f : Fracción de volumen de fibra (%).
- M_m : Fracción de masa de la matriz de poliéster (%).
- ρ_m : Densidad de la matriz de resina de poliéster (g/cm^3).

Cálculo a modo de ejemplo de la obtención de la densidad teórica de la fibra de lino.

$$0,44 = \frac{\frac{0,45}{\rho_{f \text{ teórica}}}}{\frac{0,45}{\rho_{f \text{ teórica}}} + \frac{(1 - 0,55)}{1,21}}$$

Operando y despejando de la fórmula (1), se obtiene el valor teórico de la densidad de la fibra de lino:

$$\rho_{f \text{ teórica}} = 1,26 \text{ g/cm}^3.$$

La Tabla 81 muestra la recopilación de las densidades teóricas obtenidas de los composites con resina de poliéster tras la aplicación de la fórmula de la regla de las mezclas (1).

Tabla 81.Recopilación de las densidades teóricas de las fibras de los “green composites” con bioresina.

Fibras	Densidad teórica de las fibras
Yute	1,03
Lino	1,26
Cáñamo	0,97
Coco	0,61
M.T.Borra	1,33

Cálculo de la fracción de poros o de huecos

Para la obtención de la fracción (f_v) de poros o de huecos que contienen los composites, hay que obtener la densidad teórica del material compuesto aplicando la expresión (2).

$$\rho_{c1} = V_f \cdot \rho_{f\text{teórica}} + V_m \cdot \rho_m \quad (2)$$

Donde:

- ρ_{c1} : Es el valor teórico de la densidad del material compuesto.
- ρ_{expe} : Es el valor obtenido de la densidad del material compuesto.

Para el composite de lino con bioresina:

$$\rho_{c1} = V_f \cdot \rho_{f\text{teórica}} + V_m \cdot \rho_m = 0,44 \cdot 1,54 + 0,56 \cdot 1,21 = \mathbf{1,35 \text{ (g/cm}^3\text{)}}.$$

$$V_v = \frac{\rho_{c1} - \rho_{\text{expe}}}{\rho_{c1}} = \frac{1,35 - 1,21}{1,35} = \mathbf{0,81\%}$$

Aplicando las mismas expresiones para los distintos “green composites”, se obtienen los valores recogidos en la Tabla 82.

Tabla 82. Recopilación de los resultados de las densidades teóricas de los composite con resina de poliéster y fracción volumétrica de poros.

Fibra	Densidades Teóricas (g/cm ³)	Volumen de huecos V _v (%)
Yute	1,16	4
Lino	1,22	0,81
Cáñamo	1,13	0
Coco	1,01	0,61
M.T.Borra	1,24	1,17

Los valores de porosidad comprendidos hasta un 3% se consideran aptos.

Los valores necesarios para la obtención de los valores de porosidad de los composite con bioresina se muestran en la Tabla 84.

Tabla 83. Resumen de parámetros para la realización del cálculo teórica de los valores de porosidad de los composites con bioresina.

Composites con bioresina						
Fibra	Fracción de Volumen fibra Vf (%)	Densidad de la matriz (g/cm ³)	Densidad del composite (g/cm ³)	Fracción masa fibra (%)	Fracción masa matriz (%)	Fracción de Volumen matriz Vf (%)
Yute	0,45	1,126	1,08	0,43	0,57	0,54
Lino	0,48	1,126	1,18	0,51	0,51	0,56
Cáñamo	0,30	1,126	1,15	0,32	0,68	0,66
Coco	0,34	1,126	1,03	0,27	0,73	0,68
M.T.Borra	0,31	1,126	1,07	0,27	0,73	0,69

Una vez aplicadas las ecuaciones correspondientes se obtienen los valores de las densidades teóricas de las fibras Tabla 84.

Tabla 84. Recopilación de las densidades teóricas de las fibras de los composites con resina de poliéster.

Fibra	Densidad teórica de las fibras
Yute	1,03
Lino	1,23
Cáñamo	1,23
Coco	0,97
M.T.Borra	1,08

En la Tabla 86 se recopilan los valores de las densidades teóricas de los composites, así como el volumen de poros o huecos de los mismos.

Tabla 85. Valores de densidades teóricas de los composites con bioresina y fracción de poros.

Fibra	Densidades teóricas de los composites	Volumen de huecos V_v(%)
Yute	1,09	0,59%
Lino	1,17	0%
Cáñamo	1,159	0,78%
Coco	1,070	4,6%
M.T.Borra	1,140	4%

2.3 Representación gráfica de los resultados de densidad

Los resultados tras el ensayo de densidad hidrostática se recopilan en las Figuras 206 y 207.

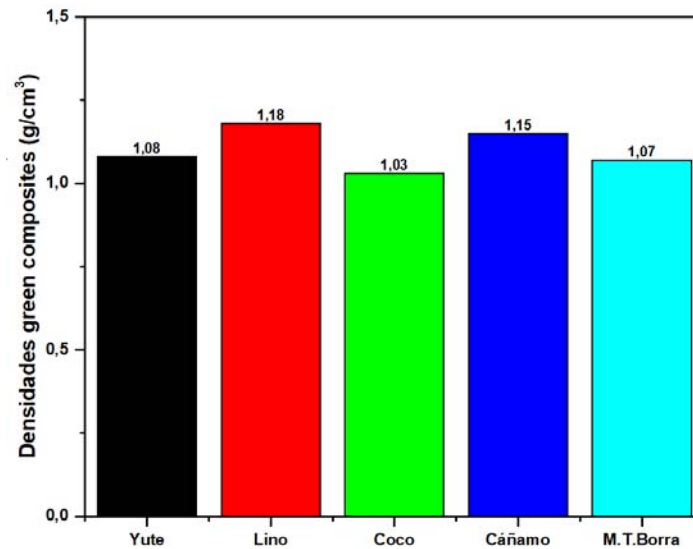


Figura 206. Densidades de los materiales compuestos “green composites” con bioresina.

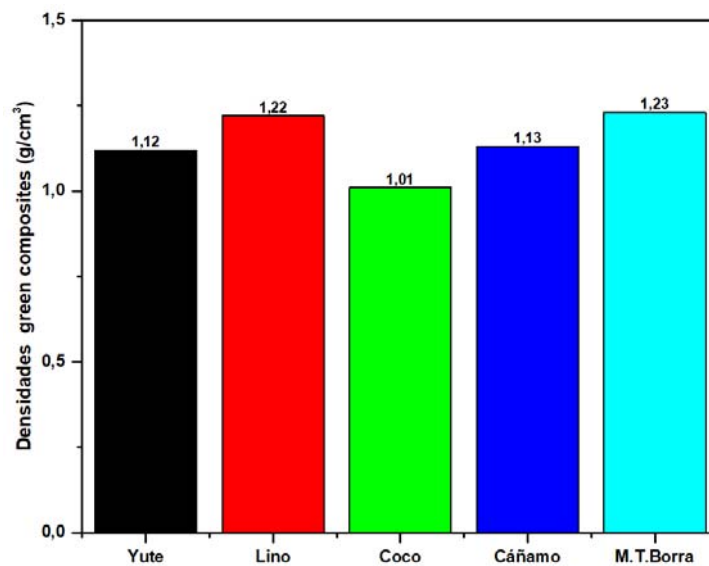


Figura 207. Densidades de los materiales compuestos con resina de poliéster.

En ambos análisis los valores de densidad más elevada, corresponde al composite de lino biaxial.

3. Caracterización mecánica

3.1 Composites yute

La Figura 208 muestra la colocación de una probeta del “green composite” yute entre las pinzas de las mordazas, de la máquina universal de tracción para la realización del ensayo de tracción.

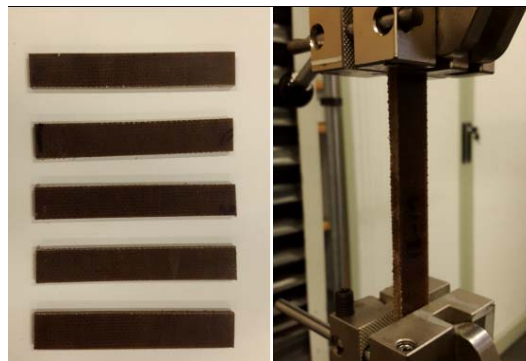


Figura 208. Probetas de “green composite” yute, ubicación en máquina Ibertest.

A la vez que se muestran las formas geométricas de las probetas que se van a ensayar en la zona izquierda de la misma imagen. La velocidad con la que se va a realizar el ensayo es de $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, utilizando una célula de 50 kN.

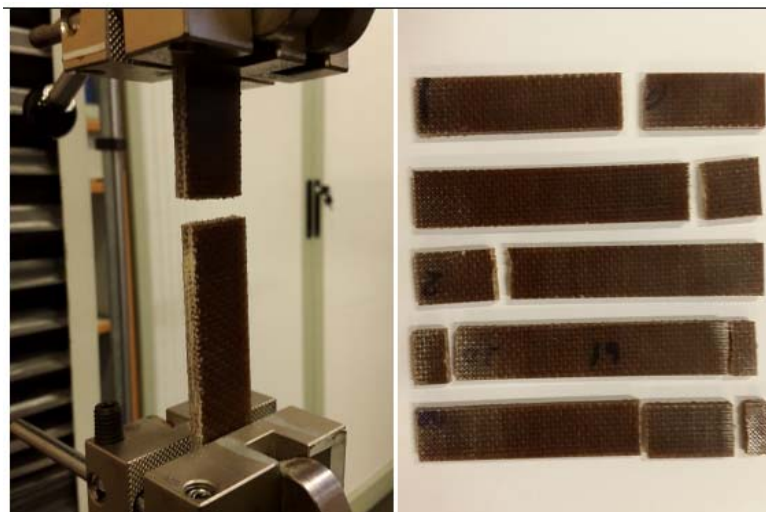


Figura 209. Imagen de la probeta de “green composite” con yute rota en la mordaza, así como las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.

La Figura 209 muestra los efectos sufridos por las probetas de biocomposite yute una vez finalizado el ensayo de tracción. En la imagen de la izquierda se muestra la rotura insitu de la probeta en las mordazas de la máquina de ensayo, mientras que en la imagen de la derecha se muestran las roturas producidas por 5 de las probetas ensayadas.

La Tabla 86 recopila los diferentes resultados obtenidos en el ensayo de tracción al que se le añade el resultado del coeficiente de poisson.

Tabla 86. Resultados de los parámetros de los composites de yute en la máquina de tracción.

Resultados tracción	Green composite yute con bioresina
Resistencia máxima a tracción (MPa)	124,06
Alargamiento a la rotura (%)	1,77
Coefficiente de poisson	0,34

Resultados tracción	Composite yute con resina de poliéster
Resistencia máxima a tracción (MPa)	103,24
Alargamiento a la rotura (%)	1,91
Coefficiente de poisson	0,23

La velocidad a la que se realiza el ensayo de flexión es de $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, se utiliza la misma célula que en el ensayo de tracción.

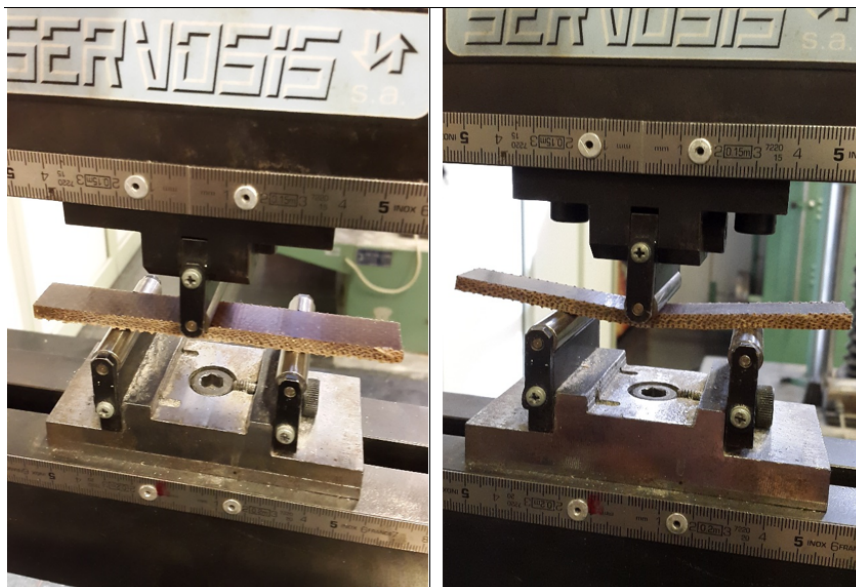


Figura 210. Imagen de la colocación de la probeta del “green composite” yute en el útil de flexión en la máquina de tracción y su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.

En la Figura 210 se visualiza en su imagen izquierda la colocación de la probeta del “green composite” yute sobre el utensilio auxiliar de flexión, así como se produce la flexión de la probeta en la imagen de la derecha.

La Figura 211 visualiza las roturas de 2 de las probetas tras finalizar el ensayo de flexión, así como la flecha sufrida por las mismas.

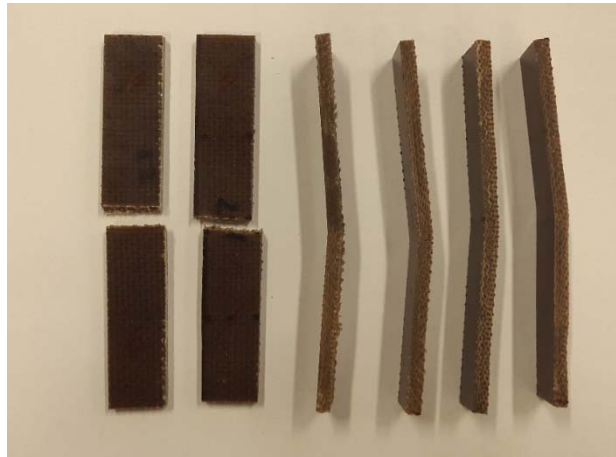


Figura 211. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del composite de yute con bioresina una vez finalizado el ensayo de flexión.

La Tabla 87 recopila los resultados obtenidos tras el ensayo de flexión.

Tabla 87. Resultados obtenidos de resistencia máxima a la flexión del composite yute con bioresina.

Resultado flexión	Green composite yute con bioresina
Resistencia máxima a flexión (MPa)	139,18
Resultado flexión	Composite yute con resina de poliéster
Resistencia máxima a flexión (MPa)	125

La Figura 212 visualiza en su parte inferior la rotura sufrida tras el ensayo de impacto por péndulo de charpy con 1 Julio.

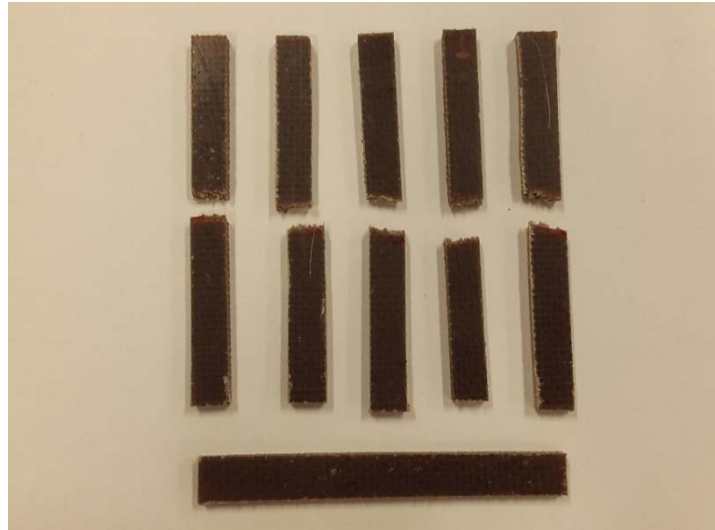


Figura 212. Imagen de las roturas en las probetas del composite de yute una vez finalizado el ensayo de impacto.

La Tabla 88 muestra el valor de la resistencia al impacto que soporta el composite de yute.

Tabla 88. Resultados obtenidos de la resistencia al impacto del composite yute.

Resultado Impacto péndulo charpy	Green composite yute con bioresina
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	14,08
Resultado Impacto péndulo charpy	Composite yute con resina de poliéster
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	16,36

La Tabla 89 recopila el valor que ofrece el composite de yute a la dureza shore D.

Tabla 89. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza shore D del composite yute

Resultado dureza	Green composite yute con bioresina
Dureza shore D	70,20
Resultado dureza	Composite yute con resina de poliéster
Dureza shore D	79,40

3.2 Composites de lino biaxial

La Figura 213 muestra la colocación de una probeta del composite lino biaxial al esfuerzo entre las pinzas de las mordazas, de la máquina universal de tracción para la realización del ensayo de tracción (imagen de la derecha).

A la vez que muestran las formas geométricas de las probetas que se van a ensayar en la imagen de la izquierda.

La velocidad con la que se va a realizar el ensayo es de $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, utilizando una célula de 50 kN.

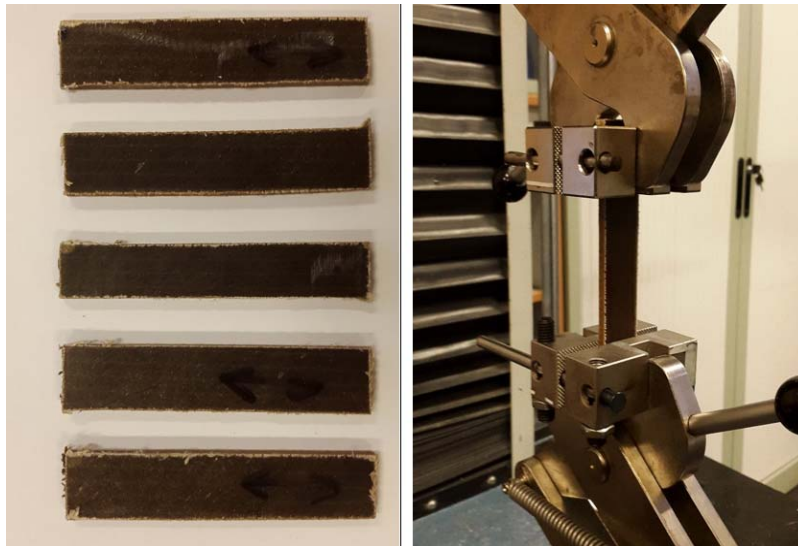


Figura 213. Imagen de las probetas del biocomposite lino biaxial y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.

La Figura 214 muestra los efectos experimentados por las probetas del composite lino biaxial con bioresina una vez finalizado el ensayo de tracción.

En la imagen de la izquierda, se muestra la rotura insitu de la probeta en las mordazas, mientras que en la imagen de la derecha se muestran las roturas producidas por 5 de las probetas ensayadas.

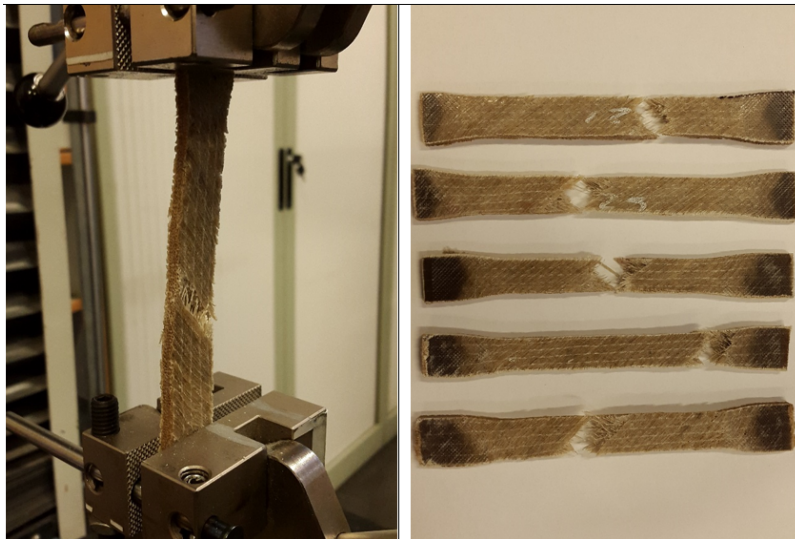


Figura 214. Imagen de las probetas del composite de lino biaxial con bioresina en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.

La Tabla 90 recopila los diferentes resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

Tabla 90. Resultados obtenidos de los parámetros a tracción de los composites lino biaxial con bioresina y resina de poliéster.

Resultados tracción	Green composite lino con bioresina
Resistencia máxima a tracción (MPa)	78,54
Módulo de elasticidad (MPa)	4 104,00
Alargamiento a la rotura (%)	1,91
Coefficiente de poisson	0,44

Resultados tracción	Composite lino con resina de poliéster
Resistencia máxima a tracción (MPa)	78,40
Módulo de elasticidad (MPa)	4 053,00
Alargamiento a la rotura (%)	2,11
Coefficiente de poisson	0,33

En la Figura 215 se visualiza en su imagen de la izquierda la colocación de la probeta del composite lino biaxial sobre el utensilio auxiliar de flexión, y en la imagen de la derecha se visualiza como se produce la flexión de la probeta.

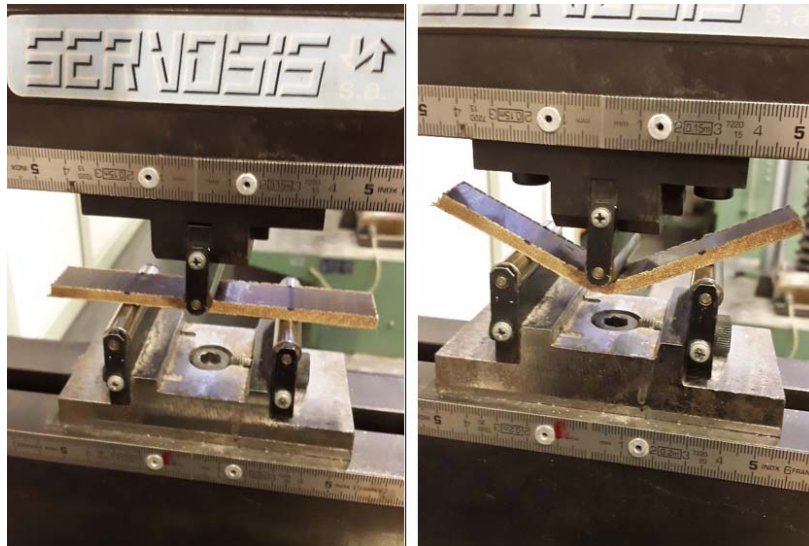


Figura 215. Imagen de la colocación de la probeta de composite lino biaxial en el útil de flexión en la máquina de tracción y de su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.

La Figura 216 visualiza las deformaciones sufridas por las probetas del composite lino biaxial al esfuerzo tras finalizar el ensayo de flexión.



Figura 216. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas de composite lino biaxial una vez finalizado el ensayo de flexión.

La Tabla 91 recopila los resultados obtenidos de la resistencia máxima a la flexión del composite lino biaxial al esfuerzo.

Tabla 91. Resultados obtenidos de resistencia máxima a la flexión del composite de lino biaxial.

Resultado flexión	Biocomposite lino biaxial longitudinal
Resistencia máxima a flexión (MPa)	179,92

Resultado flexión	Composite lino biaxial longitudinal
Resistencia máxima a flexión (MPa)	106,42

La Figura 217 visualiza en su parte inferior la rotura sufrida tras el ensayo de impacto por péndulo de charpy con 1 Julio.



Figura 217. Imagen de las roturas en las probetas del composite lino biaxial una vez finalizado el ensayo de impacto.

La Tabla 92 muestra el valor de la resistencia al impacto que soporta el composite de lino biaxial al esfuerzo.

Tabla 92. Resultado obtenido de la resistencia al impacto del “green composite” lino biaxial.

Resultado Impacto péndulo charpy	Green composite lino con bioresina
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	69,77

Resultado Impacto péndulo charpy	Composite lino con resina de poliéster
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	70,18

La Tabla 93 recopila el valor que ofrece el composite de lino a la dureza shore D.

Tabla 93. Resultados obtenidos de la resistencia a la dureza shore D del composite de lino biaxial.

Resultado dureza	Green composite lino con bioresina
Dureza shore D	76,20

Resultado dureza	Composite lino biaxial con resina de poliéster
Dureza shore D	78,10

3.3 Composites de Materia Textil Borra

La Figura 218 muestra la colocación de una probeta del composite Materia Textil Borra con resina de poliéster entre las pinzas de las mordazas, de la máquina universal de tracción para la realización del ensayo de tracción (imagen de la derecha).

A la vez que se muestran las formas geométricas de las probetas que se van a ensayar en la imagen de la izquierda.

La velocidad con la que se va a realizar el ensayo es de $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, utilizando una célula de 50 kN.

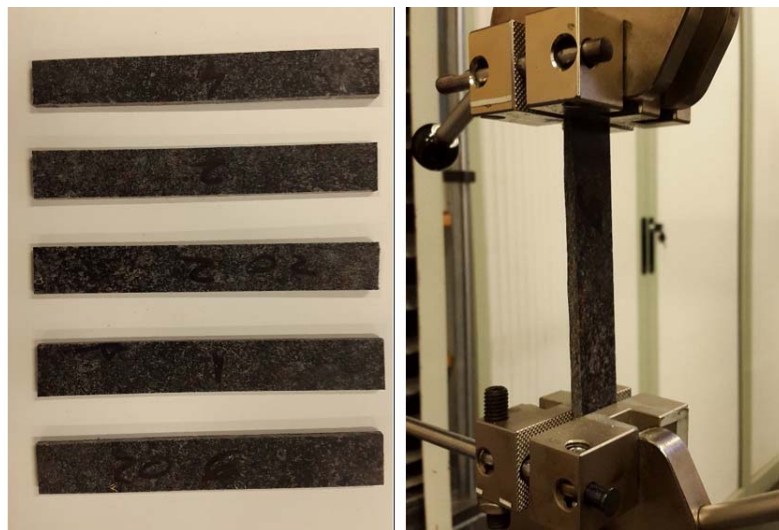


Figura 218. Imagen de las probetas del composite de Materia Textil Borra con resina de poliéster y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.

La Figura 219 muestra los efectos experimentados por las probetas de Materia Textil Borra con resina de poliéster una vez finalizado el ensayo de tracción.

En la imagen de la izquierda de la Figura 219, se muestra la rotura insitu de la probeta en las mordazas, mientras que en la imagen de la derecha se muestran las roturas producidas por 5 de las probetas ensayadas.

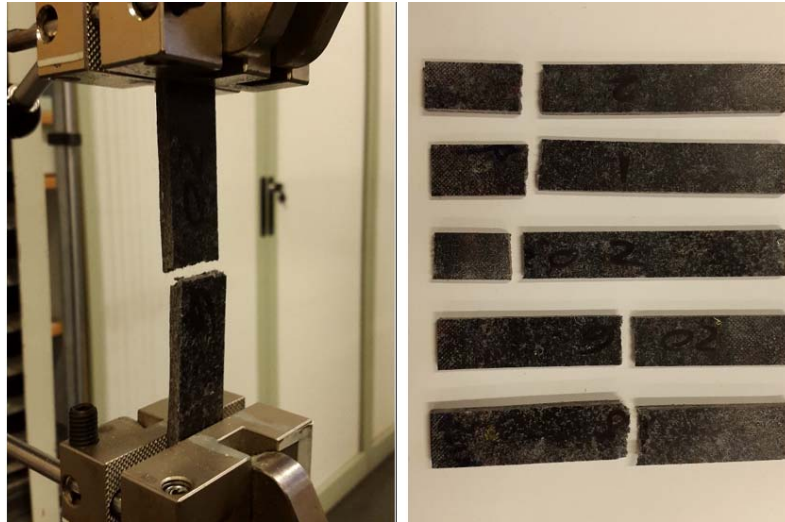


Figura 219. Imagen de la probeta de composite de Materia Textil Borra con resina de poliéster en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.

La Tabla 94 muestra una recopilación de los diferentes resultados obtenidos en el ensayo de tracción al que se le añadió el resultado del coeficiente de poisson.

Tabla 94. Resultados obtenidos de los parámetros de tracción del composite materia textil borra.

Resultados tracción	Composite Materia Textil Borra con bioresina
Resistencia máxima a tracción (MPa)	59,87
Módulo de elasticidad (MPa)	3 650,55
Alargamiento a la rotura (%)	1,64
Coefficiente de poisson	0,48

Resultados tracción	Composite Materia Textil Borra con resina de poliéster
Resistencia máxima a tracción (MPa)	56,94
Módulo de elasticidad (MPa)	3 600,47
Alargamiento a la rotura (%)	1,58
Coefficiente de poisson	0,39

En la Figura 220 se visualiza en su imagen de la izquierda la colocación de la probeta del composite Materia Textil Borra con bioresina sobre el utensilio auxiliar de flexión, y en la imagen de la derecha se visualiza como se produce la flexión de la probeta.

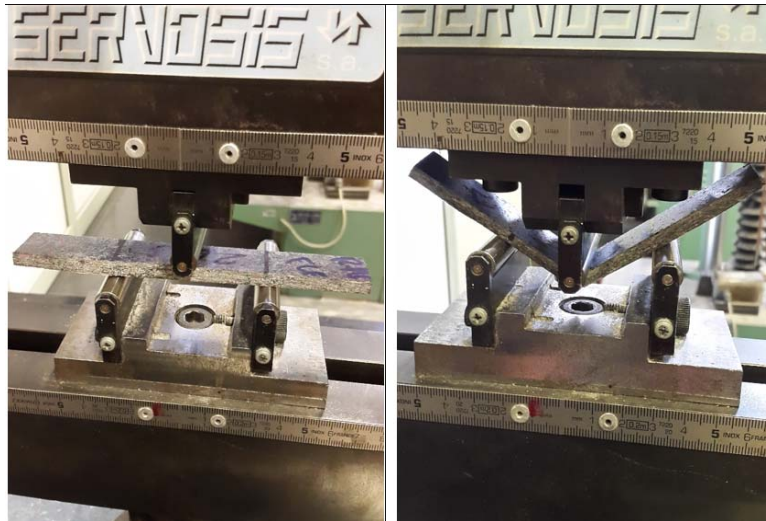


Figura 220. Imagen de la colocación de la probeta del composite Materia Textil Borra en el útil de flexión en la máquina de tracción y de su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.

La Figura 221 visualiza las deformaciones sufridas por las probetas del composite Materia Textil Borra con bioresina al finalizar el ensayo de flexión.



Figura 221. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del composite de Materia Textil Borra con bioresina una vez finalizado el ensayo de flexión.

La Tabla 96 visualiza el resultado obtenido de la resistencia máxima a la flexión del composite materia textil borra.

Tabla 95. Resultado obtenido de la resistencia máxima a la flexión composite materia textil borra.

Resultado flexión	Composite de Materia Textil Borra con bioresina
Resistencia máxima a flexión (MPa)	38,23
Resultado flexión	Composite de Materia Textil Borra con resina de poliéster
Resistencia máxima a flexión (MPa)	76,50

La Figura 222 visualiza en su parte superior la rotura sufrida tras el ensayo de impacto por péndulo de charpy con 1 Julio.

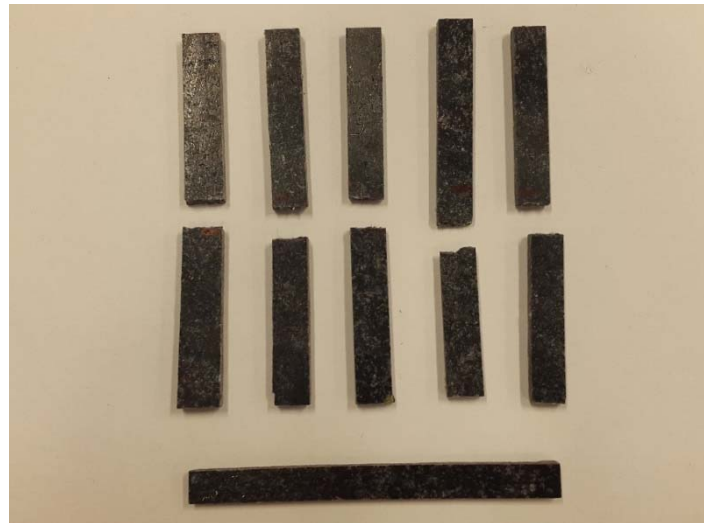


Figura 222. Imagen de las roturas en las probetas del composite Materia Textil Borra una vez finalizado el ensayo de impacto.

La Tabla 96 recopila los valores de la resistencia al impacto que soportan los composites de Materia Textil Borra.

Tabla 96. Resultado obtenido de la resistencia al impacto de la materia textil borra.

Resultado Impacto péndulo charpy	Composite de Materia Textil Borra con bioresina
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	12,80
Resultado Impacto péndulo charpy	Composite de Materia Textil Borra con resina de poliéster
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	9,87

La Tabla 97 visualiza el valor que ofrece el composite Materia Textil Borra a la dureza Shore D.

Tabla 97. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza Shore D del composite de Materia Textil Borra.

Resultado dureza	Composite materia textil borra con bioresina
Dureza shore D	70,30
Resultado dureza	Composite materia textil borra con resina de poliéster
Dureza shore D	70,30

3.4 Composites de coco

La Figura 223 muestra la colocación de una probeta del “green composite” coco con bioresina entre las pinzas de las mordazas, de la máquina universal de tracción para la realización del ensayo de tracción (imagen de la derecha). A la vez que se muestran las formas geométricas de las probetas que se van a ensayar en la imagen de la izquierda. La velocidad con la que se va a realizar el ensayo es de $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando una célula de 50 kN.



Figura 223. Imagen de las probetas de composite de coco y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.

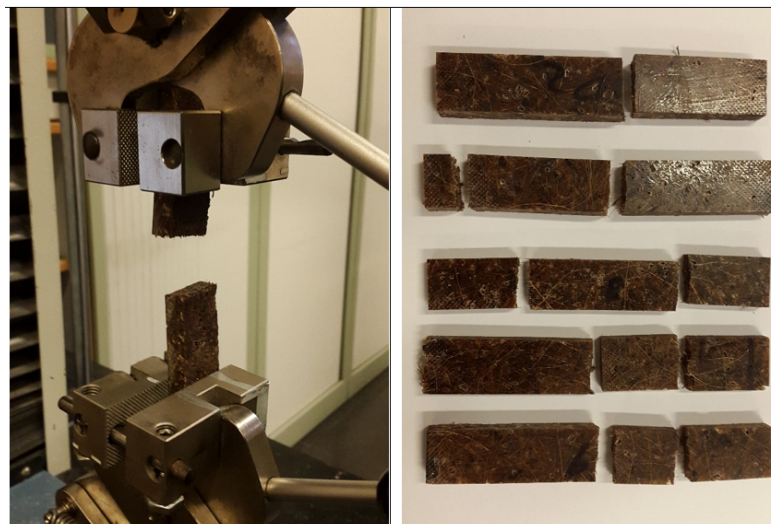


Figura 224. Imagen de la probeta de composite de coco en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.

En la Figura 224 se muestran los efectos experimentados por las probetas de composites de coco una vez finalizado el ensayo de tracción. En la imagen de la izquierda, se muestra la rotura insitu de la probeta en las mordazas, mientras que en la imagen de la derecha se muestran las roturas producidas por 5 de las probetas ensayadas.

La Tabla 98 muestra una recopilación de los diferentes resultados obtenidos en el ensayo de tracción al que se le ha añado el resultado del coeficiente de poisson.

Tabla 98. Resultados obtenidos dos parámetros de tracción del composite coco.

Resultados Tracción	Composite de coco con bioresina
Resistencia máxima a tracción (MPa)	20,78
Módulo de elasticidad (MPa)	2 673,77
Alargamiento a la rotura (%)	0,77
Coefficiente de poisson	0,38
Resultados Tracción	Composite de coco con resina de poliéster
Resistencia máxima a tracción (MPa)	15,62
Módulo de elasticidad (MPa)	2 960,11
Alargamiento a la rotura (%)	0,52
Coefficiente de poisson	0,36

En la Figura 225 se visualiza en su imagen de la izquierda la colocación de la probeta del “green composite” de coco con bioresina sobre el utensilio auxiliar de flexión, y en la imagen de la derecha se visualiza como se produce la flexión de la probeta.



Figura 225. Imagen de la colocación de la probeta de “green composite” de coco en el útil de flexión en la máquina de tracción y su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.

La Figura 226 visualiza las deformaciones sufridas por las probetas del “green composite” coco con bioresina tras la finalización del ensayo a flexión.



Figura 226. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del “green composite” de coco una vez finalizado el ensayo de flexión.

La Tabla 99 recopila los resultados obtenidos de la resistencia máxima a la flexión de los composites de coco.

Tabla 99. Resultados obtenidos de la resistencia máxima a flexión de los composites de coco.

Resultado flexión	Composite de coco con bioresina
Resistencia máxima a flexión (MPa)	49,35
Resultado flexión	Composite de coco con resina de poliéster
Resistencia máxima a flexión (MPa)	34,60

La Figura 227 visualiza en su parte inferior la rotura sufrida tras el ensayo de impacto por péndulo de charpy con la masa de 1 Julio.



Figura 227. Imagen de las roturas en las probetas del “green composite” de coco con bioresina una vez finalizado el ensayo de impacto.

La imagen superior visualiza la geometría de la probeta de “green composite” de coco con bioresina antes de la realización del ensayo por impacto

La Tabla 100 muestra el valor de la resistencia al impacto que soporta el “green composites” de coco.

Tabla 100. Resultados obtenidos de la resistencia al impacto de los composites de coco.

Resultado Impacto péndulo charpy	Composite de coco con bioresina
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	5,62
Resultado Impacto péndulo charpy	Composite de coco con resina de poliéster
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	6,85

La Tabla 101 visualiza el valor de que ofrecen los composites de coco a la dureza shore D.

Tabla 101. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza shore D de los composites coco.

Resultado dureza	Composite de coco con bioresina
Dureza shore D	64,70
Resultado dureza	Composite de coco con resina de poliéster
Dureza shore D	77,80

3.5 Composites de cáñamo

La Figura 228 muestra la colocación de una probeta del “green composite” cáñamo con bioresina al esfuerzo entre las pinzas de las mordazas, en la máquina universal de tracción para la realización del ensayo de tracción (imagen de la derecha). A la vez que se muestran las formas geométricas de las probetas que se van a ensayar en la imagen de la izquierda. La velocidad con la que se va a realizar el ensayo es de $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando una célula de 50 kN.



Figura 228. Imagen de las probetas del “green composite” cáñamo y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.

La Figura 229 muestra los efectos experimentados por las probetas del “green composite” cáñamo con una vez finalizado el ensayo de tracción.

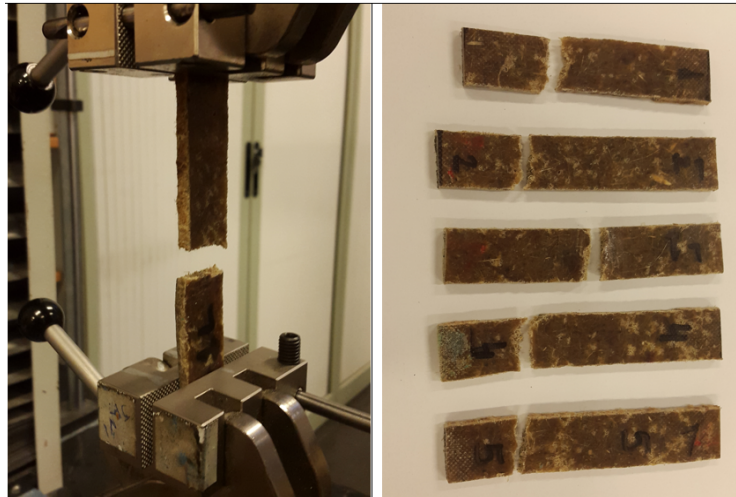


Figura 229. Imagen de la probeta del “green composite” de cáñamo en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.

En la imagen de la izquierda, se muestra la rotura insitu de la probeta en las mordazas, mientras que en la imagen de la derecha se muestran las roturas producidas por cinco de las probetas ensayadas.

La Tabla 102 muestra la recopilación de los diferentes resultados obtenidos en el ensayo de tracción al que se le ha añadido el resultado del coeficiente de poisson.

Tabla 102. Resultados obtenidos de los parámetros a tracción del composite cáñamo con bioresina.

Resultados Tracción	Green composite cáñamo con bioresina
Resistencia máxima a tracción (MPa)	61,52
Módulo de elasticidad (MPa)	4 048,40
Alargamiento a la rotura (%)	1,51
Coefficiente de poisson	0,27
Resultados Tracción	Composite cáñamo con resina de poliéster
Resistencia máxima a tracción (MPa)	54,60
Módulo de elasticidad (MPa)	4 571,34
Alargamiento a la rotura (%)	1
Coefficiente de poisson	0,42

En la Figura 230 se visualiza en su imagen de la izquierda la colocación de la probeta del “green composite” cáñamo sobre el utensilio auxiliar de flexión, y en la imagen de la derecha se visualiza como se produce la flexión de la probeta.

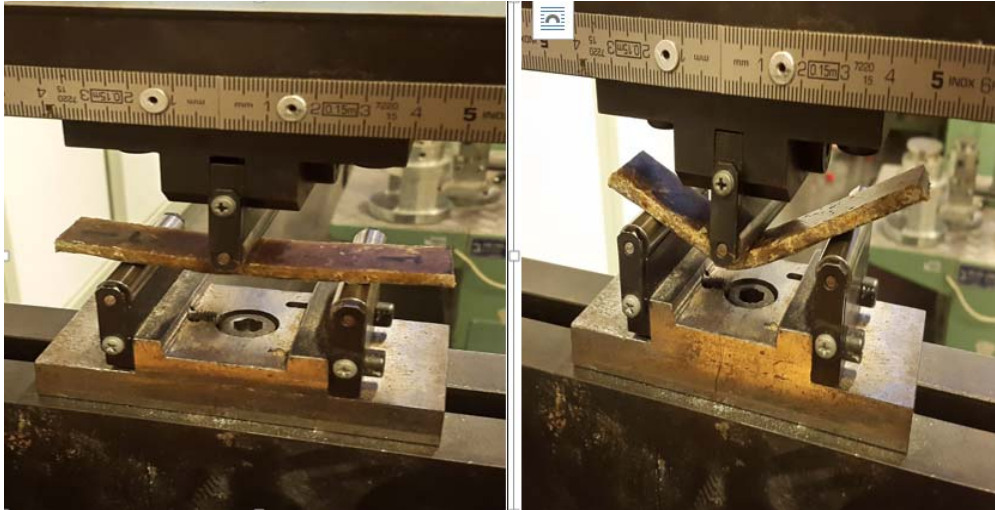


Figura 230. Imagen de la colocación de la probeta del “green composite” de cáñamo en el útil de flexión en la máquina de tracción y su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.

La Figura 231 visualiza las deformaciones sufridas por las probetas del “green composite” cáñamo al esfuerzo tras la finalización del ensayo a flexión.



Figura 231. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del “green composite” de cáñamo una vez finalizado el ensayo de flexión.

En la Tabla 103 se recopilan los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos de los composites en sus versiones de bioresina y resina de poliéster.

Tabla 103. Resultado obtenido de la resistencia máxima a flexión de los composite de cáñamo

Resultado flexión	Green composite de cáñamo con bioresina
Resistencia máxima a flexión (MPa)	61,53
Resultado flexión	Composite de cáñamo con resina de poliéster
Resistencia máxima a flexión (MPa)	54,60

En la Figura 232 se visualiza en su parte inferior la rotura sufrida tras el ensayo de impacto por péndulo de charpy con 1Julio.

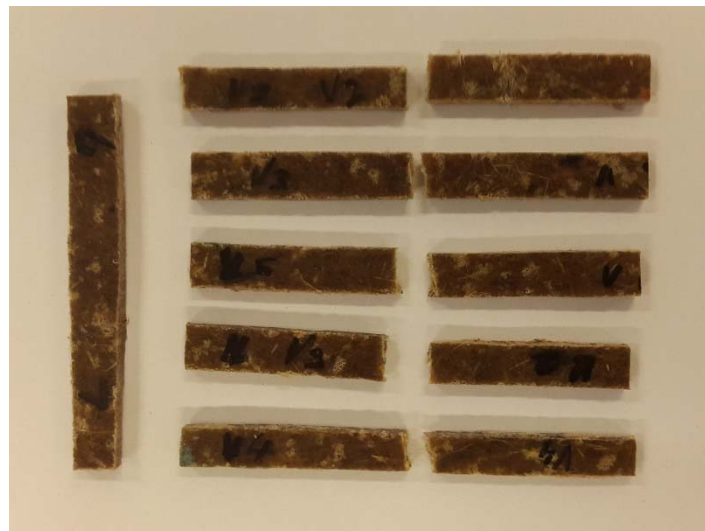


Figura 232. Imagen de las roturas en las probetas de biocomposite de cáñamo una vez finalizado el ensayo de impacto.

Los resultados de la Tabla 104 muestra el valor de la resistencia al impacto que soporta los composite de cáñamo.

Tabla 104. Resultado obtenido de la resistencia al impacto de los composite de cáñamo.

Resultado Impacto péndulo charpy	Green composite de cáñamo con bioresina
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	4,31
Resultado Impacto péndulo charpy	Composite de cáñamo con resina de poliéster
Resistencia al impacto (kJ/m ²)	6,45

Los resultados de la Tabla 105 visualiza el valor de que ofrecen los composite de cáñamo a la dureza shore D.

Tabla 105. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza shore D del composite cáñamo

Resultado dureza	Green composite de cáñamo con bioresina
Dureza shore D	70,20
Resultado dureza	Composite de cáñamo con resina de poliéster
Dureza shore D	75,80

3.6 Módulos de elasticidad de los composites con extensómetros

3.6.1. Obtención de parámetros en la máquina universal con extensómetros

En las Tablas 106 – 115 se recopilan los valores obtenidos a través de la máquina universal de tracción con los accesorios extensométricos.

Tabla 106. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite lino con bioresina.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	1,91	%
Longitud inicial	260	(mm)
Carrera máxima	4,97	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	4,65	(mm)
Sección		Rectangular
Área	121,80	(mm ²)
Fuerza máxima	9 566,60	(N)
Resistencia a la tracción	78,54	(MPa)
Límite elástico	22,21	(MPa)
Módulo de elasticidad	4 104,00	(MPa)

Tabla 107. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite lino con resina de poliéster.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	2,11	%
Longitud inicial	355,31	(mm)
Carrera máxima	6,89	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	4,35	(mm)
Sección		Rectangular
Área	113,97	(mm ²)
Fuerza máxima	9 552,00	(N)
Resistencia a la tracción	78,40	(MPa)
Límite elástico	22,21	(MPa)
Módulo de elasticidad	4 053,24	(MPa)

Tabla 108. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite yute con bioresina.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	1,77	%
Longitud inicial	260,00	(mm)
Carrera máxima	4,60	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	5	(mm)
Sección		Rectangular
Área	131	(mm ²)
Fuerza máxima	16 252,80	(N)
Resistencia a la tracción	124,06	(MPa)
Límite elástico	35,14	(MPa)
Módulo de elasticidad	6 984,00	(MPa)

Tabla 109. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite yute con resina de poliéster.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	1,91	%
Longitud inicial	260,00	(mm)
Carrera máxima	4,96	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	5	(mm)
Sección		Rectangular
Área	131,00	(mm ²)
Fuerza máxima	13 524,50	(N)
Resistencia a la tracción	103,24	(MPa)
Límite elástico	29,24	(MPa)
Módulo de elasticidad	5 697,35	(MPa)

Tabla 110 Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción de la Materia Textil Borracon bioresina.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	1,64	%
Longitud inicial	260	(mm)
Carrera máxima	4,26	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	4,43	(mm)
Sección Rectangular		
Área	116,07	(mm ²)
Fuerza máxima	6 949,80	(N)
Resistencia a la tracción	59,87	(MPa)
Límite elástico	29,08	(MPa)
Módulo de elasticidad	3 650,55	(MPa)

Tabla 111. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción de la Materia Textil Borracon bioresina.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	1,58	%
Longitud inicial	260	(mm)
Carrera máxima	4,10	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	4,61	(mm)
Sección Rectangular		
Área	120,78	(mm ²)
Fuerza máxima	6 877,50	(N)
Resistencia a la tracción	56,94	(MPa)
Límite elástico	30,58	(MPa)
Módulo de elasticidad	3 600,47	(MPa)

Tabla 112. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite cáñamo con bioresina.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	1,51	%
Longitud inicial	260	(mm)
Carrera máxima	3,92	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	4,86	(mm)
Sección		Rectangular
Área	127,33	(mm ²)
Fuerza máxima	7 834,26	(N)
Resistencia a la tracción	61,52	(MPa)
Límite elástico	17,42	(MPa)
Módulo de elasticidad	4 048,00	(MPa)

Tabla 113 Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite cáñamo con resina de poliéster.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	1	%
Longitud inicial	260,00	(mm)
Carrera máxima	2,60	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	4,32	(mm)
Sección		Rectangular
Área	113,32	(mm ²)
Fuerza máxima	5 191,70	(N)
Resistencia a la tracción	45,81	(MPa)
Límite elástico	12,97	(MPa)
Módulo de elasticidad	4 571,34	(MPa)

Tabla 114. . Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite coco con bioresina.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	0,77	%
Longitud inicial	260	(mm)
Carrera máxima	2,02	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	8,62	(mm)
Sección		Rectangular
Área	225,84	(mm ²)
Fuerza máxima	4 694,80	(N)
Resistencia a la tracción	20,78	(MPa)
Límite elástico	5,88	(MPa)
Módulo de elasticidad	2 673,77	(MPa)

Tabla 115. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite coco con resina de poliéster.

Campo	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual	0,52	%
Longitud inicial	260	(mm)
Carrera máxima	1,37	(mm)
Ancho probeta	26,20	(mm)
Espesor probeta	7,44	(mm)
Sección		Rectangular
Área	194,93	(mm ²)
Fuerza máxima	3 046,61	(N)
Resistencia a la tracción	15,62	(MPa)
Límite elástico	4,42	(MPa)
Módulo de elasticidad	2 960,11	(MPa)

3.6.2. Valores de los módulos de elasticidad

En la Tabla 116 se recopilan los valores de los módulos de elasticidad de los distintos laminados.

Tabla 116. Módulos de elasticidad a través de ensayos con extensómetros.

Biocomposites	Máquina Universal (Accesorio) E (MPa)	Composites	Máquina Universal (Accesorio) E (MPa)
Yute	6 984	Yute	5 697
Cáñamo	4 048	Cáñamo	4 571
Lino biaxial	4 104	Lino biaxial	4 053
M.T.Borra	3 650	M.T.Borra	3 600
Coco	2 673,78	Coco	2 960

3.7 Representaciones gráficas de las propiedades mecánicas

En las Figuras comprendidas entre la 233 y 242 se representan las características mecánicas de los composites con bioresina y resina de poliéster.

3.7.1. Resistencia máxima a la tracción

Las Figuras 233 y 234 muestran la resistencia máxima de tracción de los composites con bioresina y resina de poliéster obtenidas tras el ensayo de tracción.

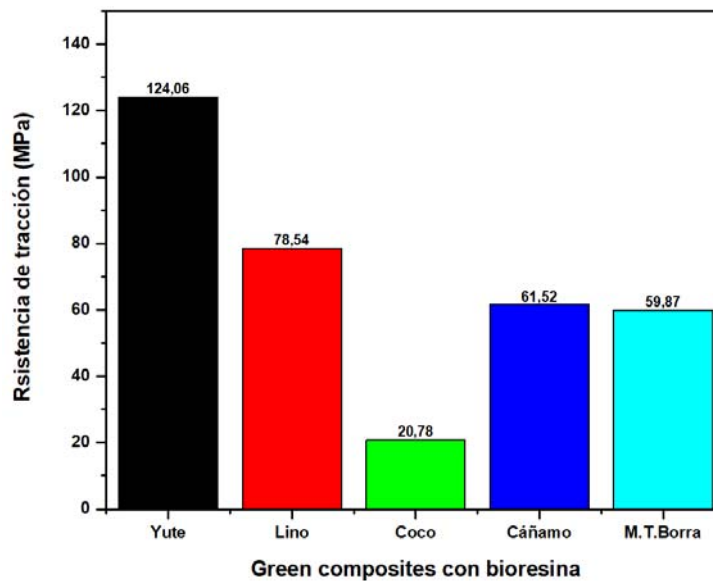


Figura 233. Resistencia máxima a la tracción de los “green composites” con bioresina.

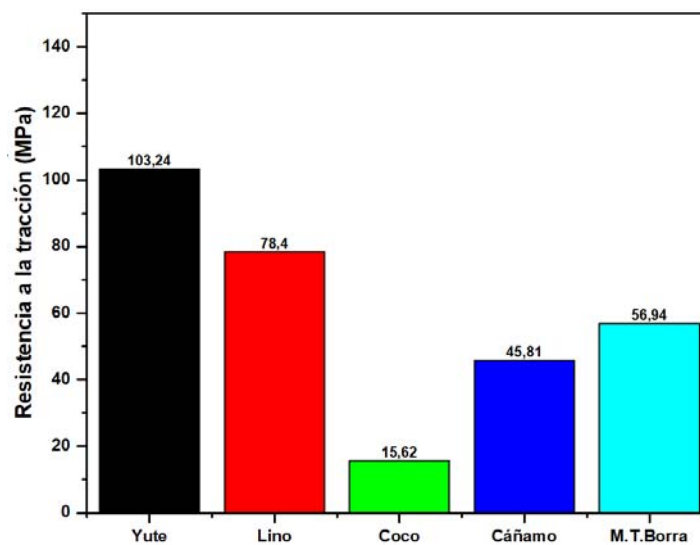


Figura 234. Resistencia máxima a la tracción de los composites con resina de poliéster.

En las Figuras 233 y 234, se observa que el composite que tiene una resistencia máxima a la tracción es el de yute en sus dos versiones con resina de poliéster y bioresina.

3.7.2. Resistencia máxima a la flexión

Las Figuras 235 y 236, muestran la resistencia máxima a la flexión de los composites con bioresina y resina de poliéster obtenidas tras el ensayo de tracción.

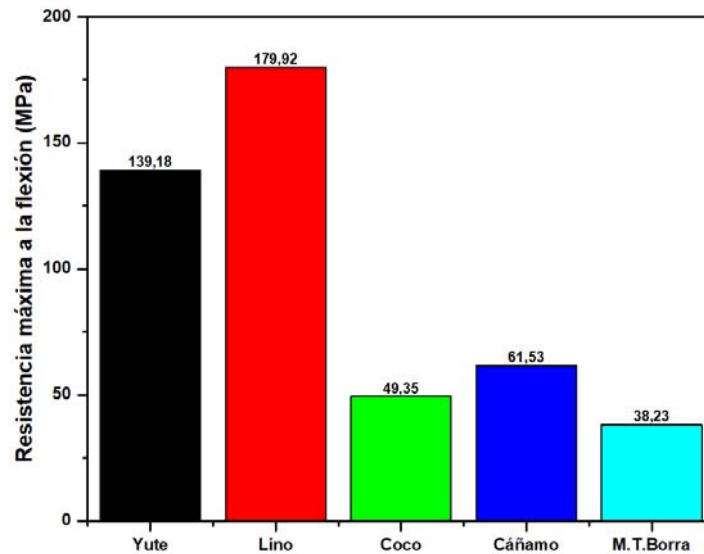


Figura 235. Resistencia máxima a la flexión de los “green composites” con bioresina.

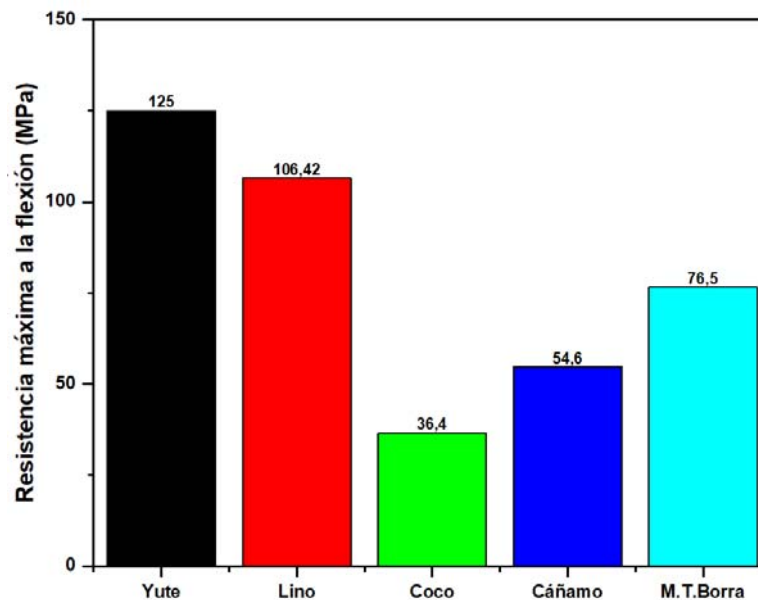


Figura 236 Resistencia máxima a la flexión de los composites con resina de poliéster.

En las Figuras 235 y 236, se observa que el composite que tiene una resistencia máxima a la tracción es el de yute en sus dos versiones con resina de poliéster y bioresina.

3.7.3. Dureza tipo D

Las Figuras 237 y 238 muestran la dureza tipo (D) de los composites con bioresina y resina de poliéster.

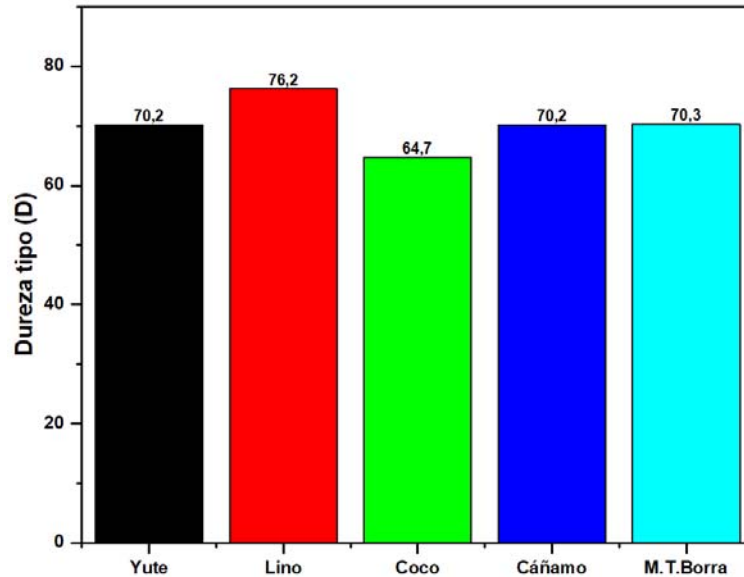


Figura 237. Dureza tipo (D) de los “green composites” con bioresina.

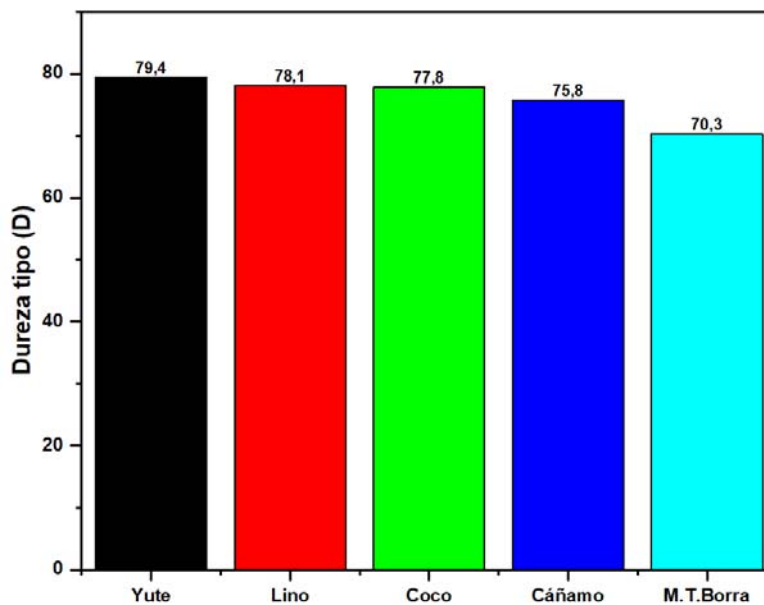


Figura 238. Dureza tipo (D) de los composites con resina de poliéster.

En las Figuras 237 y 238, se observa que para el “green composite” de lino alcanza el máximo valor, mientras que, para los composites con resina de poliéster, el yute alcanza el máximo valor.

3.7.4. Impacto

Las Figuras 239 y 240 muestran los resultados de impacto de los composites con bioresina y resina de poliéster.

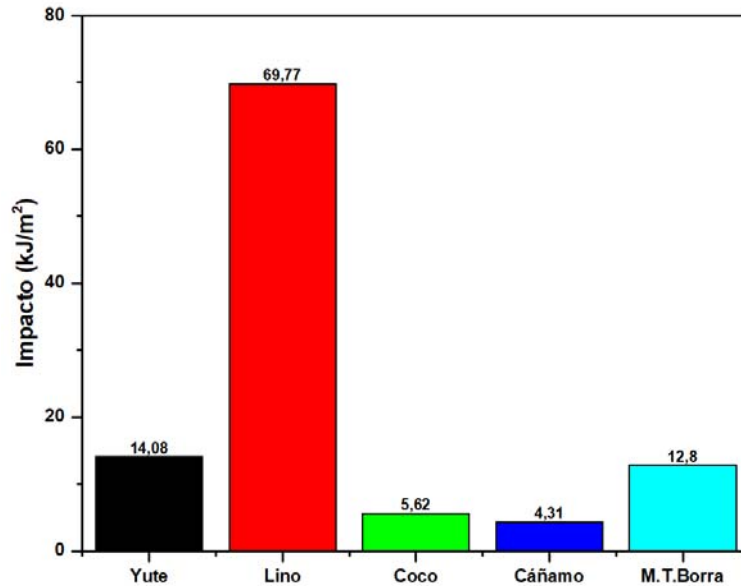


Figura 239. Impacto péndulo de charpy de los “green composites” con bioresina.

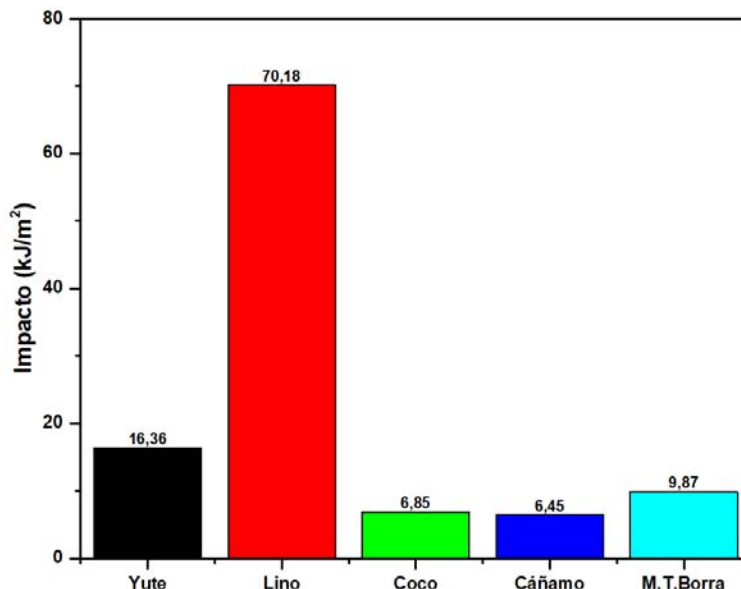


Figura 240. Impacto péndulo de charpy de los composites con resina de poliéster. En las imágenes de las Figuras 239 y 240 se observa que el lino alcanza los máximos valores tanto para los biocomposites como para los composites con resina de poliéster.

3.7.5. Módulos de elasticidad con extensómetros

Las Figuras 241 y 242 muestran los módulos de elasticidad de los composites con bioresina y resina de poliéster.

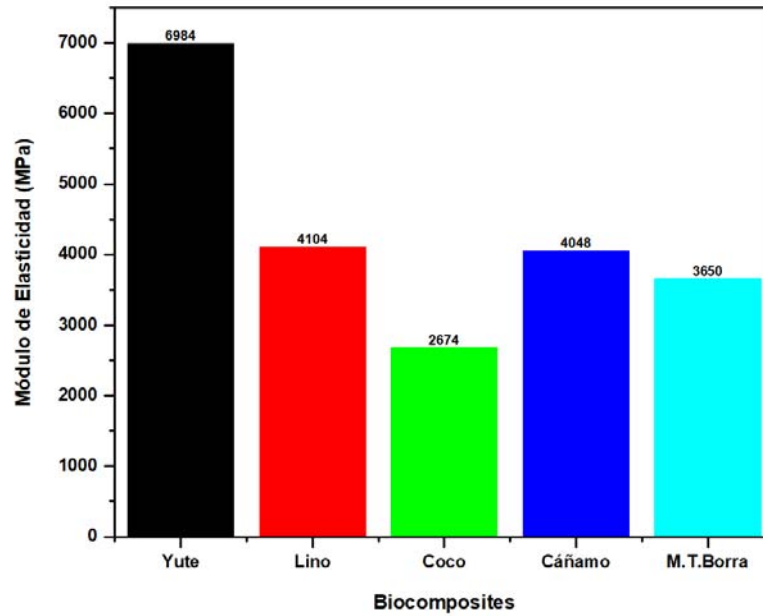


Figura 241. Valores de los módulos de elasticidad de los biocomposites

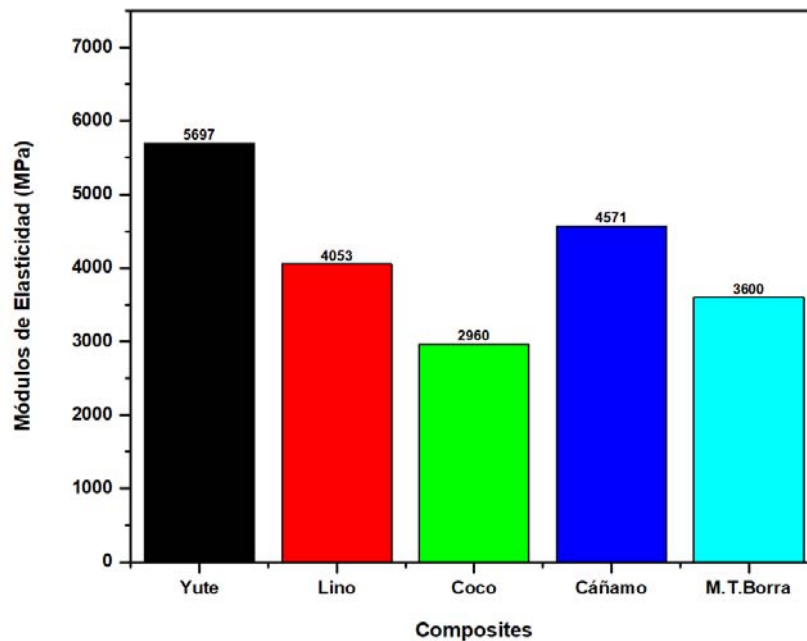


Figura 242. Valores de los módulos de elasticidad de los composites con poliéster.

En las Figuras 241 y 242, se observa que yute alcanza los máximos valores tanto para los biocomposites como para los composites con resina de poliéster.

4. Caracterización dinámica y acústica

4.1 Frecuencia natural de vibración

En la Tabla 117 se recopilan los valores obtenidos a través de los ensayos de vibración libre y de impulso –respuesta.

Tabla 117. Resultados de vibración libre experimentales.

Placas con bioresina	Frecuencia Natural (Hz)
Yute	31
Cáñamo	24,70
Lino Biaxial	26
M.T.Borra	25,30
Coco	21,80

Placas con poliéster	Frecuencia Natural (Hz)
Yute	27,50
Cáñamo	18,20
Lino Biaxial	16,40
M.T.Borra	19,50
Coco	18

4.2 Módulos de elasticidad

Para la obtención del módulo de elasticidad de la fibra, previamente habrá que realizar los cálculos oportunos de las fracciones de volumen de la matriz y de la fibra.

Con la obtención de los valores de las densidades se puede aplicar la fórmula de la norma ASTM C215.

Para la verificación de los valores obtenidos de los distintos módulos de elasticidad a través de la fórmula de la norma ASTM C215, se pueden aplicar las siguientes expresiones matemáticas basadas en la:

Normativa E 756 – 05.

$$E = \frac{12 \rho L^4 f_n^2}{H^2 C n^2} \quad (3)$$

Ecuación de Freberg y Kemler.

$$W_n = B \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \quad (4)$$

En la norma ASTM C215-92:2012

$$E = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot f_n^2 \cdot A \cdot L^4}{I \cdot (B_n L)^4} \quad (5)$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad del material de la viga, expresado en (Pa).
- f_n : Frecuencia de resonancia expresada en (Hz).
- $H = h$: espesor de la viga expresada en (m).
- L: longitud de la barra expresada en (m).
- ρ : densidad del material expresado en (kg/m^3).
- 12: es una constante numérica.
- C_n : coeficiente modelo viga en voladizo.
- A: área de la sección transversal (m^2).
- I: Momento de Inercia (m^4).
- W_n : es la frecuencia natural expresada en (radianes / s).
- $B = (B_n L)^4 = C_n^2$: son constantes que depende de las condiciones de borde, y de distintos valores para cada modo de vibración.

En la Tabla 118 se ponen de manifiesto el valor de las distintas constantes de condiciones de borde.

Tabla 118. Recopilación de valores de las constantes de condiciones de borde.

Valores de las constantes en función de su modo de vibración		
C _n : primer modo de vibración	0,55959	Normativa E 756 – 05
B: primer modo de vibración (Voladizo)	3,52	Ecuación de Freberg y Kemler
(B _n L) ⁴ : primer modo de vibración	1,875104	Normativa ASTM C215

En la Tabla 119 se exponen los valores teóricos versus obtenidos de forma práctica.

Tabla 119. Valores comparativos de los módulos de elasticidad de los distintos materiales.

Biocomposites	Norma ASTM C215 E (MPa) [134]	Norma E 756 – 05 E (MPa) [131]	Ecuación de Freberg y Kemler] E (MPa) [142]
Yute	6.954,81	6.956,30	6.940,55
Cáñamo	4.059,68	4.069,18	4.068,30
Lino biaxial	4.103,77	4.150,20	4.140,79
M.T.Borra	3.562,63	3.563,42	3.555,33
Coco	2.603,25	2.603,82	2.597,91

Composites	Norma ASTM C215 E (MPa)	Norma E 756 – 05 E (MPa)	Ecuación de Freberg y Kemler E (MPa)
Yute	5.689,92	5.691,16	5.594,04
Cáñamo	4.552,97	4.553,96	4.543,63
Lino biaxial	4.083,65	4.084,53	4.075,27
M.T.Borra	3.615,56	3.616,34	3.608,15
Coco	2.962,82	2.963,46	2.956,74

Como se demuestran en los resultados obtenidos en la Tabla 119, la lámina de Biocomposite / Composite con un valor más elevado de módulo elástico es la de yute, debido a que se trata de un tejido ortogonal, con la ubicación de fibras estables.

4.3 Resultados comparativos ensayo dinámico versus ensayo estático

4.3.1 Módulo elasticidad biocomposites

Para obtener el módulo de elasticidad se recurre a los siguientes métodos:

- Método experimental: en la máquina de Tracción a través de extensómetros o captadores Épsilon – MFQ.
- Método experimental dinámico: por medio de vibración libre por la recepción de onda acústica generada por la vibración libre de la probeta, mediante un micrófono omnidireccional.
- Método teórico: Cálculo teórico a través de hojas de Excel.
- Método de simulación numérica: programa informático Ansys Mechanical – Ansys Workbench.
- Método informático: programa de cálculo eLam x².

En la Tabla 120 se recopilan los distintos valores obtenidos a través de los ensayos anteriormente citados en el epígrafe.

Tabla 120. Resultados del módulo de elasticidad a través de ensayos dinámicos versus máquina de tracción universal.

Biocomposites	Método dinámico		Método estático	
	Norma	Norma	Freberg y	Máquina Universal
	E 756 – 05 E (MPa)	ASTM-C1215I E(MPa)	Kemler E (MPa)	(Accesorio) E (MPa)
Yute	6 937,16	6 967,28	6 965,76	6 984
Cáñamo	4 035,53	4 044,69	4 043,81	4 048
Lino biaxial	4 095,36	4 104,66	4 103,77	4 104
M.T.Borra	3 640,15	3 648,42	3 647,63	3 650
Coco	2 634,05	2 640,04	2 639,47	2 673,78

Como se puede comprobar en la Tabla 120, existe una variación entre los valores obtenidos por los dos procedimientos. Esta variación se debe principalmente, a la estabilización de las mordazas que sujetan a la probeta, debido a la aparición de un deslizamiento del material hasta que encuentra los puntos de apoyo necesarios y se inicia realmente el ensayo.

Como datos significativos de los valores recopilados, la Figura 243, se observa que el “green composite” de yute con resina de poliéster alcanza el máximo valor de los resultados obtenidos, mientras que el “green composite” de coco es el que presenta el menor valor, predecible por tener un mayor número de huecos, así como mayor cantidad de resina.

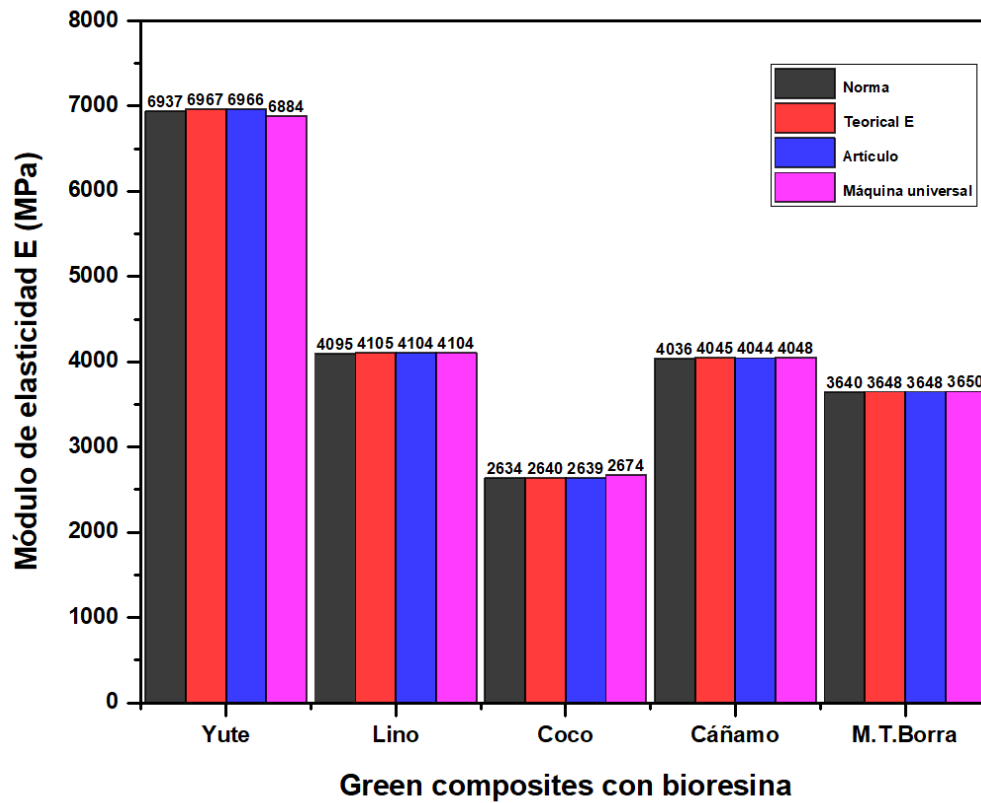


Figura 243. Valores comparativos del módulo elasticidad de los “green composites” con bioresina.

4.3.2 Módulos de elasticidad composites resina de poliéster

En la Tabla 121 se recopilan los valores obtenidos por los procesos dinámicos y de la máquina universal de tracción.

Tabla 121. Resultados de los distintos módulos de elasticidad.

Composites	Método dinámico		Método estático	
	Norma E 756 – 05 E (MPa)	Norma ASTM-C215 E(MPa)	Freberg y Kemler E (MPa)	Máquina Universal (Accesorio) E (MPa)
Yute	5 802,82	5 816,01	5 814,74	5 697
Cáñamo	4 555,61	4 565,96	4 564,97	4 571
Lino biaxial	4 125,12	4 134,45	4 133,60	4 053
M.T.Borra	3 608,15	3 616,35	3 615,56	3 600
Coco	2 956,74	2 963,46	2 962,82	2 960

En la Figura 244 se muestra una comparativa entre los distintos valores de los composites con resina de poliéster de los módulos de elasticidad.

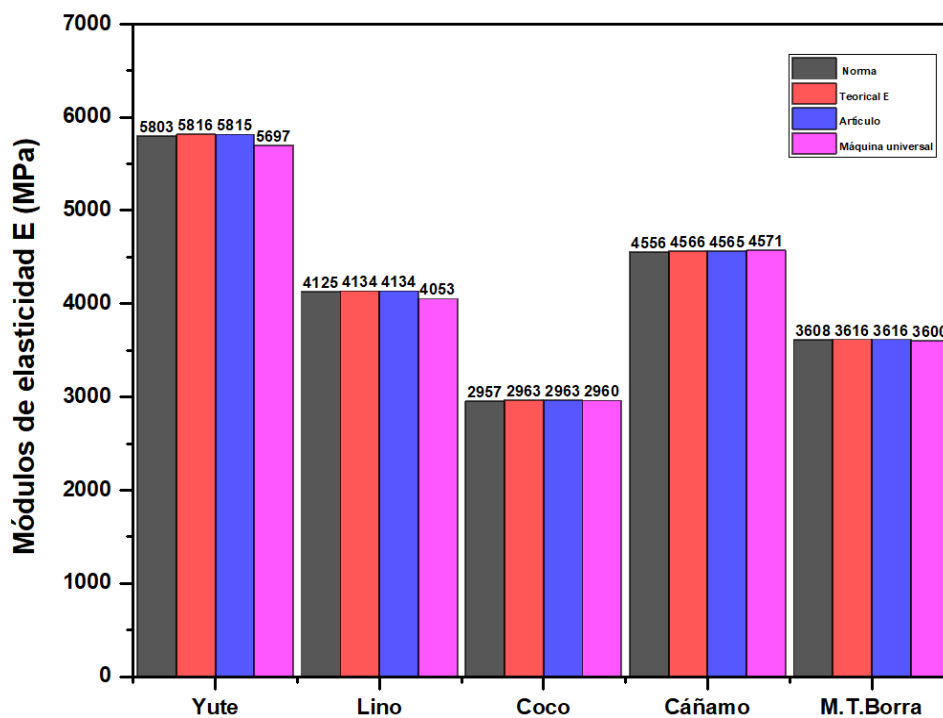


Figura 244. Valores comparativos del módulo elasticidad de los composites con resina de poliéster.

4.4 Aislamiento acústico en cámara de transmisión

4.4.1 Frecuencias críticas y rango de frecuencia cámara transmisión

En la Tabla 122, se ponen de manifiesto los distintos valores de las frecuencias naturales de vibración en la cámara de transmisión y las críticas para los distintos composites y/o biocomposites.

Tabla 122. Comparación entre frecuencias naturales, rango de frecuencias de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido y frecuencias críticas

Placa Biocomposite	Rango frecuencias cámara de transmisión	Frecuencia crítica (f_c)(Hz)
Yute	600 – 5.000	25,85
Cáñamo		25,60
Lino Biaxial		31,06
M.T.Borra		22,09
Coco		24,67

Placa Composite	Rango frecuencias cámara de transmisión	Frecuencia crítica (f_c)(Hz)
Yute	600 – 5.000	16,33
Cáñamo		19,45
Lino Biaxial		27,51
M.T.Borra		17,98
Coco		18,38

4.4.2 Aislamiento acústico de láminas

Los resultados que se van a reflejar en esta sección del capítulo corresponden a los resultados obtenidos tras los ensayos de las láminas de los distintos composites y placas de yeso laminado. En la Figura 245 se indican los materiales con los que se realizan los ensayos de aislamiento acústico al ruido aéreo en la cámara de transmisión a escala reducida.

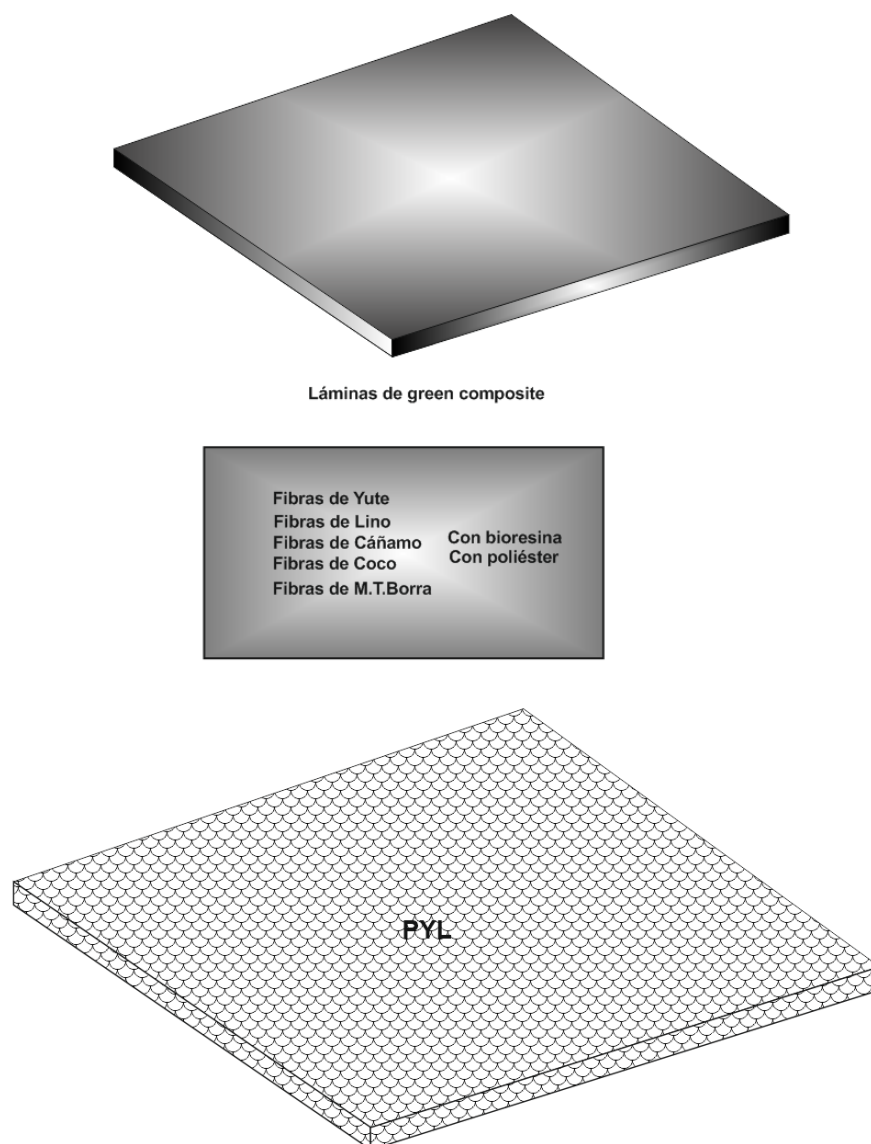


Figura 245. Imagen de las láminas de los composites con bioresina y resina de poliéster así como de la placa de yeso laminado que se van a someter a ensayos en la cámara de transmisión.

Los valores obtenidos del aislamiento acústico al ruido aéreo de los composites en sus versiones de bioresina y de resina de poliéster para estructuras laminares, se muestran en las Tablas 123 y 124.

En la Tabla 123, se recopilan los valores obtenidos tras los ensayos en la cámara de transmisión a escala de aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con bioresina para todo el ancho de banda de frecuencias de tercio de octava.

Tabla 123. Valores del aislamiento acústico al ruido aéreo de toda la banda de tercio de octava para composites con bioresina.

R (dB) Composites con bioresina					
Frecuencia (Hz)	Lino Biaxial	M.T.Borra	Yute	Coco	Cáñamo
100	10,30	10,80	10,40	9,90	11,20
125	7,20	9,80	7	7,20	6,70
160	8,60	8,80	8,70	7,90	4,80
200	7,90	8,80	8,70	8,80	10,90
250	10	12,00	10,10	8,20	11,90
315	14,15	18,20	17,80	15,50	14,60
400	9,10	11,10	12,30	11,40	11,70
500	19	20,50	21,40	18,30	24,80
630	16,50	19,50	16,30	12,10	19,80
800	14,40	15,30	13,60	10,90	17,10
1000	14,10	18,70	16,50	14,20	18,50
1250	16,20	19,90	17,80	15,50	19,30
1600	16,10	19,80	18,60	16,20	22,40
2000	18,70	23,10	20,80	18	23,10
2500	18,50	22,20	20,10	17,30	22,70
3150	18,80	22,40	20,80	18,30	24,30
4000	19,10	23,60	21	19,30	25,10
5000	20,30	23,70	22,20	19,80	25,90

De los resultados obtenidos de la Tabla 123, el valor que presenta el aislamiento acústico al ruido aéreo más elevado corresponde al composite de cáñamo con bioresina.

En la Tabla 125, se recopilan los valores obtenidos tras los ensayos en la cámara de transmisión a escala de aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con resina de poliéster para todo el ancho de banda de frecuencias de tercio de octava.

Tabla 124. Valores del aislamiento acústico al ruido aéreo de toda la banda de tercio de octava para composites con resina de poliéster.

R (dB) Composites con resina de poliéster					
Frecuencia (Hz)	Lino Biaxial	M.T.Borra	Yute	Coco	Cáñamo
100	13,60	17,20	14,80	13	13,80
125	9,60	7,60	9,80	9,10	6
160	11,80	11,10	12,30	13,70	8,20
200	13,40	12,50	12,10	8,60	10,70
250	16,60	17,10	16,30	13	14,10
315	23,30	23,50	21,60	16,70	20
400	13,40	18,80	15	11,40	13,70
500	25,70	27,20	25,50	21,70	24,60
630	24,40	26,30	23,60	19,90	22,10
800	22,60	22,40	20	15,40	20,40
1000	22,50	24,10	21,10	19,40	21,10
1250	21,80	24,40	20,70	18,80	20,40
1600	24,00	27,30	23,60	21,60	22,90
2000	25,90	28,60	22,70	22,70	24,30
2500	26,20	29,10	21,90	21,90	25,20
3150	26,60	29,70	22,70	22,70	25,70
4000	26,90	30,20	26	22,80	26,60
5000	25,50	29,90	26,80	22,40	26,80

De los resultados obtenidos de la Tabla 124, el valor que presenta el aislamiento acústico al ruido aéreo más elevado corresponde al composite de Materia Textil Borra con resina de poliéster.

En la Figura 246, se muestran los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con bioresina en la banda de frecuencia de tercio de octava.

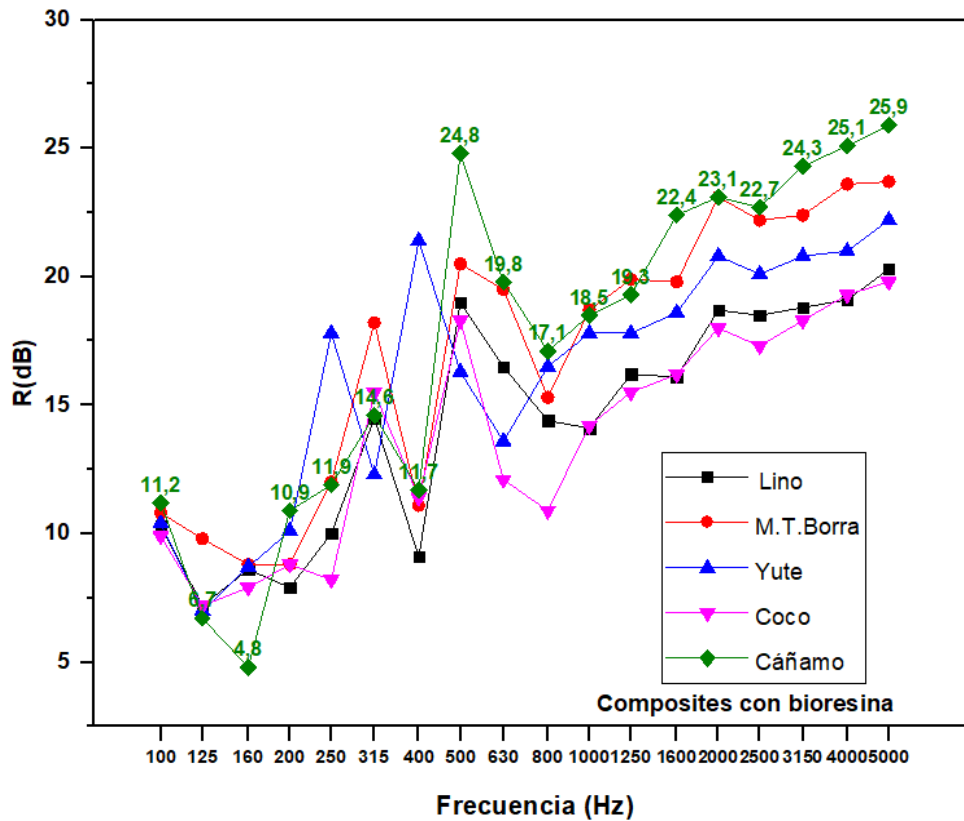


Figura 246. Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo de los composites con bioresina en toda la banda de frecuencia de tercio de octava.

De los resultados obtenidos en Figura 246, se observa que el mayor valor al aislamiento acústico con bioresina corresponde al composite de cáñamo.

En la Figura 247, se indican los valores del aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con bioresina desde la frecuencia de corte hasta los 5000 Hz. Con estos valores de frecuencia de tercio de octava, se facilita la interpretación de los valores de aislamiento acústico de la representación gráfica.

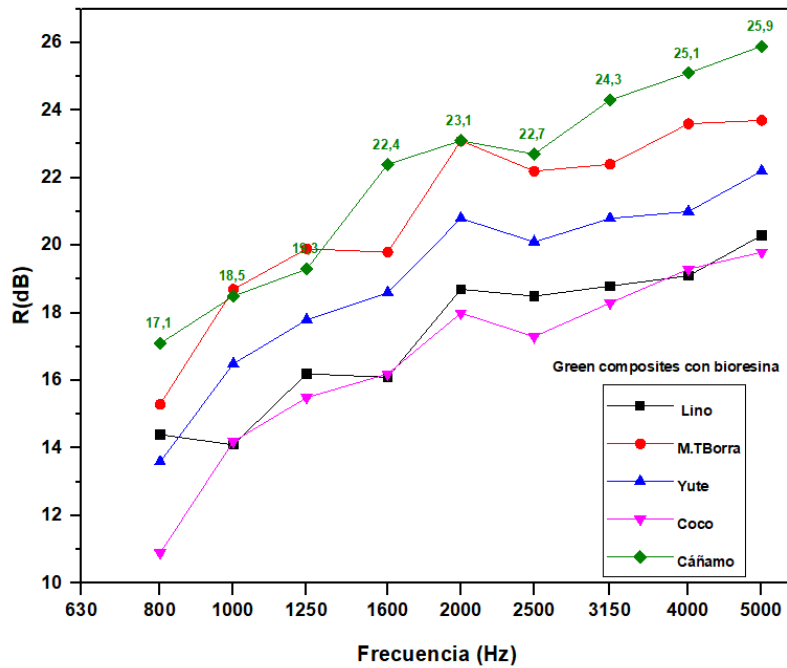


Figura 247. Valores del aislamiento acústico composites con bioresina desde la frecuencia desde la frecuencia de corte hasta 5 kHz.

En la Figura 248, se muestran los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con resina de poliéster en la banda de frecuencia de tercio de octava.

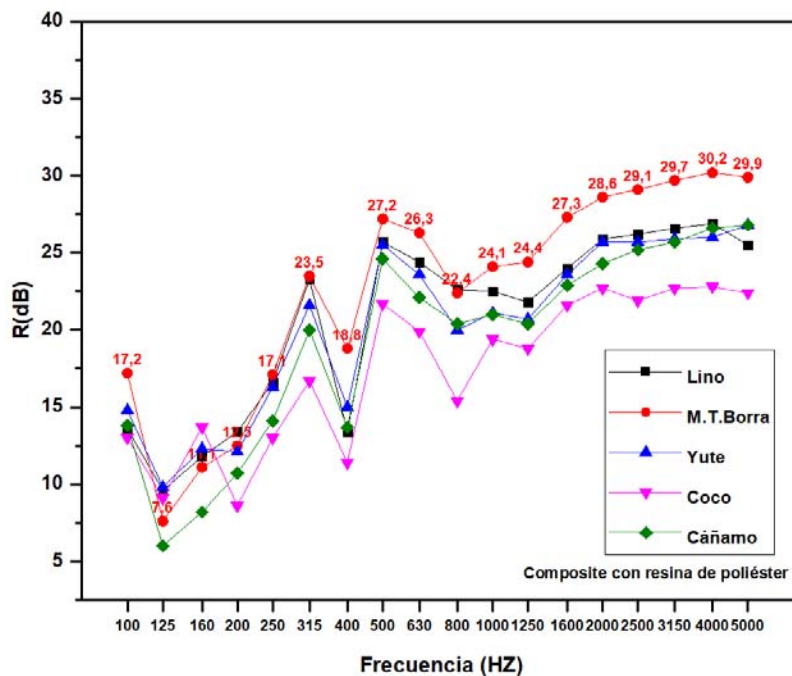


Figura 248. Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo de los composites con resina de poliéster en toda la banda de frecuencia de tercio de octava.

De los resultados obtenidos en Figura 248, se observa que el mayor valor al aislamiento acústico con resina de poliéster corresponde a la M.T. Borra.

En la Figura 249, se indican los valores del aislamiento acústico al ruido aéreo de los composites con resina de poliéster desde la frecuencia de corte hasta los 5 000 Hz. Con estos valores de frecuencia de tercio de octava, se facilita la interpretación de los valores de aislamiento acústico de la representación gráfica.

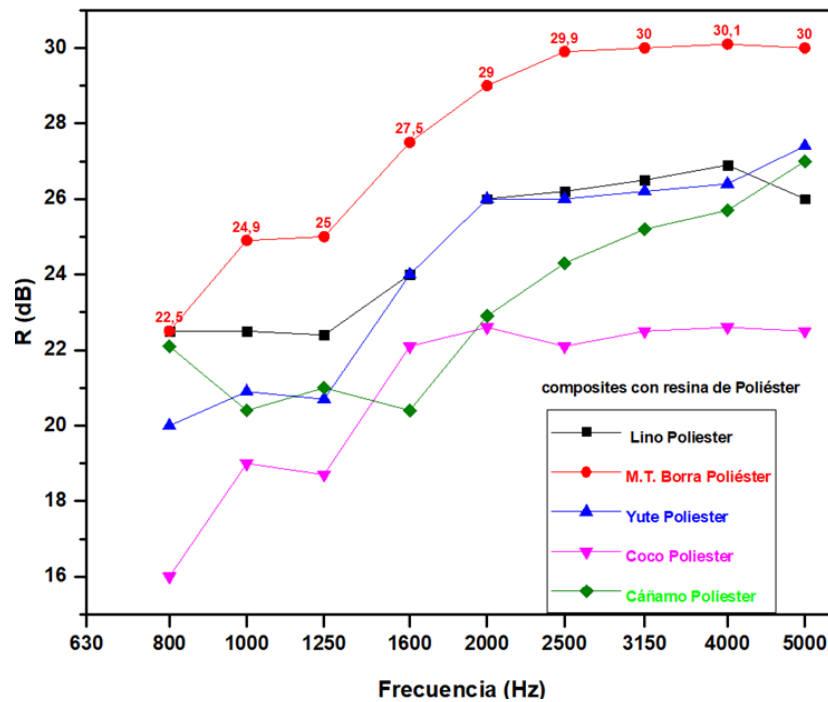


Figura 249. Comparativa del aislamiento acústico al ruido aéreo R de las placas de composite.

4.4.3 Valores ponderados del aislamiento acústico al ruido aéreo

Para la obtención de los valores ponderados de cada una de las láminas se debe aplicar la siguiente expresión:

$$R_w(\text{dB}) = 10 \cdot \log \sum 10^{\frac{\text{dBi}}{10}}.$$

Donde:

- $R_w(\text{dB})$: Valor ponderado del aislamiento acústico.
- dBi : Cada uno de los valores de aislamiento acústico ponderados en función de su frecuencia de tercio de octava.

En la Tabla 125, se muestran los valores de atenuación aplicados a toda la banda de frecuencia en tercio de octava.

Tabla 125. Tabla de sustracciones y adiciones ponderadas en la banda de frecuencia de tercio de octava.

Frecuencia (Hz)	Factor de ponderación (dB)
100	-19,10
125	-16,10
160	-13,10
200	-10,90
250	-8,60
315	-6,60
400	-4,80
500	-3,20
630	-1
800	-0,80
1000	0
1250	-0,60
1600	1
2000	1,20
2500	1,30
3150	1,20
4000	1
5000	0,50

En la Tabla 126, se recopila la secuencia en forma de columnas de izquierda a derecha para la obtención del valor de ponderación que se deberá de aplicar a la fórmula que relaciona el aislamiento acústico aéreo R (dB) con el ponderado R_w (dB).

En la primera columna de la Tabla 126, se encuentran las frecuencias de banda de tercio de octava. En la segunda columna se encuentra ubicados los valores de atenuación para las bajas frecuencias y los de adición para las frecuencias superiores a 1000 Hz. En la tercera columna se ubican los valores de aislamiento acústico R (dB). En la cuarta columna tras las operaciones de sustracción y adición entre la segunda y tercera columna, se obtienen los valores de aislamiento (dBi) que se deberán de sustituir en la fórmula que relaciona el aislamiento acústico R (dB) con R_w (dB)

Donde se confirma que para los composites con resina de poliéster la Materia Textil Borra alcanza el valor más elevado. Mientras que en los composites con bioresina el valor máximo de aislamiento acústico corresponde al cáñamo.

Tabla 126. Ubicación de valores por columna para la obtención del valor de ponderación aplicada

Frecuencia (Hz)	Factor de ponderación (dB)	R (dB)	Ponderación aplicada (dBi)
100	-19,10	10,40	-8,70
125	-16,10	7	-9,10
160	-13,10	8,70	-4,40
200	-10,90	8,70	-2,20
250	-8,60	10,10	-0,80
315	-6,60	17,80	11,20
400	-4,80	12,30	7,50
500	-3,20	21,40	18,20
630	-1	16,30	15,30
800	-0,80	13,60	12,80
1000	0	16,50	16,50
1250	-0,60	17,80	17,20
1600	1	18,60	19,60
2000	1,20	20,80	22
2500	1,30	22,70	20
3150	1,20	24,30	25,50
4000	1	25,10	26,10
5000	0,50	25,90	26,40

En la Tabla 127, se recopilan los valores ponderados de aislamiento acústico al ruido aéreo de los composites con resina de poliéster y bioresina.

Tabla 127. Valores ponderados de composites – biocomposites.

Composites con resina de poliéster	R _w (dB)
Cáñamo	34,85
Lino	35,38
Yute	35,28
Coco	31,79
M.T.Borra	38,65
Composites con bioresina	R _w (dB)
Cáñamo	33,27
Lino	23,38
Yute	30,12
Coco	27,93
M.T.Borra	31,95

4.4.4 Comparativas entre láminas

En este apartado se lleva a cabo la comparativa del aislamiento al ruido aéreo de las distintas láminas de composite con bioresina y con resina de poliéster (realizadas en la cámara de transmisión a escala).

En la Figura 250, se exponen los valores de aislamiento acústico al ruido aéreo tras el ensayo en cámara de transmisión para los composites de lino con bioresina y resina de poliéster para el ancho de banda de tercio de octava.

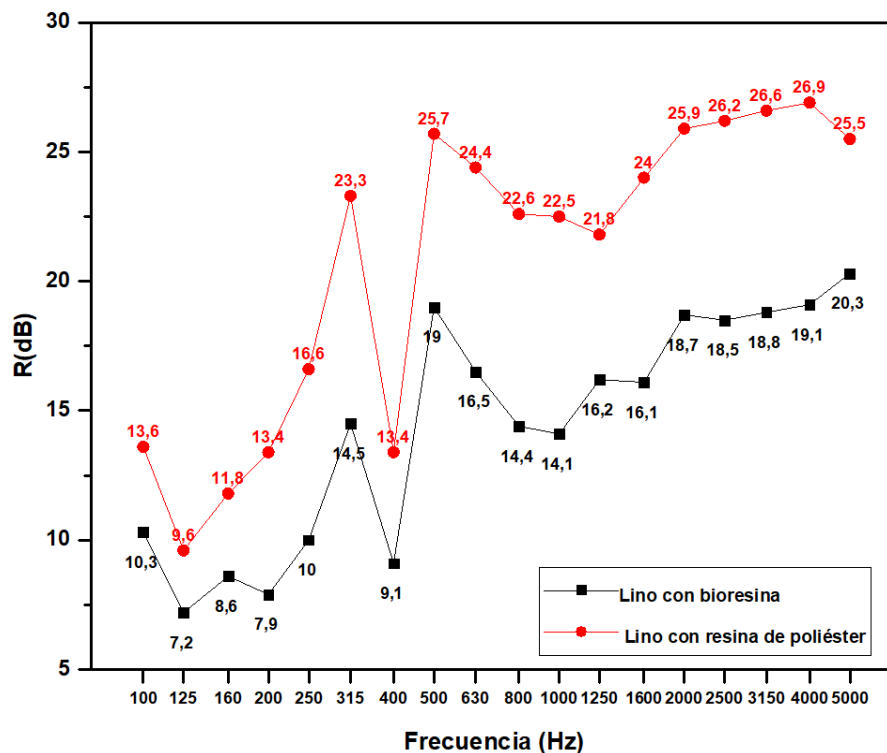


Figura 250. Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de lino con bioresina y resina de poliéster para toda la banda de frecuencia de tercio de octava.

Debido a que los valores de las frecuencias de tercio de octava inferiores a 800 Hz apenas modifican o influyen en la obtención del valor ponderado de los composites con bioresina y resina de poliéster, así como para la placa de yeso laminado, en las gráficas y tablas a partir de este punto sólo se trabaja con las frecuencias de corte hasta los 5000 Hz.

Para verificar la validez del párrafo anterior, en la Tabla 128, se recopilan la secuencia de operaciones necesaria para obtener a partir del aislamiento acústico en función de su frecuencia de tercio de octava, el valor ponderado del aislamiento acústico.

Tabla 128. Obtención del valor ponderado de aislamiento acústico para toda la banda de frecuencia de tercio de octava.

Frecuencia	Ponderación	R(dB)	R(dB)Po	dBi/10	$10^{dBi/10}$	$\Sigma 10^{dBi/10}$	Log Σ	$10^{Log \Sigma}$
100	-19,10	10,30	-8,80	-0,88	0,13			
125	-16,10	7,20	-4,50	-0,45	0,35			
160	-13,10	8,60	-4,50	-0,45	0,35			
200	-10,90	7,90	-3	-0,30	0,50			
250	-8,60	10	1,40	0,14	1,38			
315	-6,60	14,15	7,55	0,76	5,69			
400	-4,80	9,10	4,30	0,43	2,69			
500	-3,20	19	15,8	1,58	38,02			
630	-1	16,50	15,5	1,55	35,48			
800	-0,80	14,40	15,5	1,55	35,48	749,16	2,87	28,74
1000	0	14,10	14,1	1,41	25,70			
1250	-0,60	16,20	15,6	1,56	36,31			
1600	1	16,10	17,1	1,71	51,29			
2000	1,20	18,70	19,9	1,99	97,72			
2500	1,30	18,50	19,8	1,98	95,50			
3150	1,20	18,80	20	2	100			
4000	1	19,10	20,1	2,01	102,33			
5000	0,50	20,30	20,8	2,08	120,23			

En la Tabla 129, se obtiene el valor ponderado del aislamiento acústico a ruido aéreo para la frecuencia de 800 Hz a 5 000 Hz

Tabla 129. Obtención del valor ponderado al aislamiento acústico a ruido aéreo con banda de frecuencia de 800 Hz a 5 000 Hz.

Frecuencia (Hz)	Ponderación	R(dB)	R(dB) (dBi)	dBi/10	$10^{dBi/10}$	$\Sigma 10^{dBi/10}$	10. Log Σ
800	-0,80	14,40	15,50	1,55	35,48		
1000	0	14,10	14,10	1,41	25,70		
1250	-0,60	16,20	15,60	1,56	36,31		
1600	1	16,10	17,10	1,71	51,29		
2000	1,20	18,70	19,90	1,99	97,72	664,55	28,22
2500	1,30	18,50	19,80	1,98	95,50		
3150	1,20	18,80	20	2	100		
4000	1	19,10	20,10	2,01	102,33		
5000	0,50	20,30	20,80	2,08	120,23		

Como se puede observar en las Tablas 129 y 130, el resultado obtenido para el aislamiento acústico a ruido aéreo tiene prácticamente el mismo valor.

En la Figura 251, se realiza la comparativa de los valores de aislamiento a frecuencias de corte hasta 5000 Hz obtenidos del composite lino con bioresina versus composite con resina de poliéster.

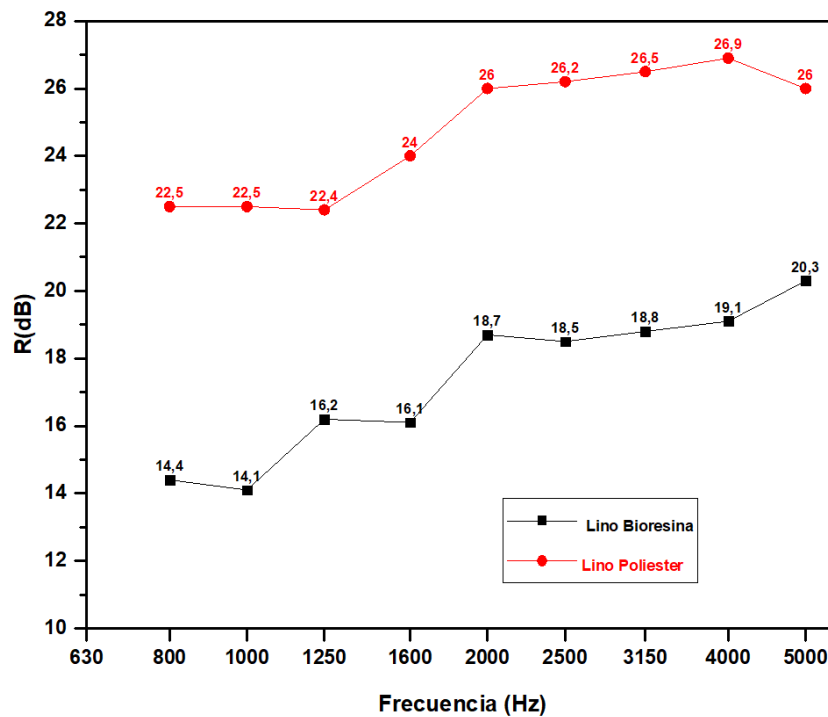


Figura 251. Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de lino con bioresina y con resina de poliéster.

Como se observa en las gráficas de la Figura 251 los valores del composite con lino de poliéster varían entre un valor mínimo de 22,5 a un valor máximo de 30 R (dB).Mostrando un mejor aislamiento acústico a ruido aéreo

En la Figura 252 se comparan los valores de aislamiento acústico entre las láminas de composite Materia Textil Borra con bioresina y resina de poliéster.

Como se observa en las gráficas de la Figura 252, los valores de aislamiento acústico de la Materia Textil Borra con poliéster, son superiores a los valores obtenidos para la Materia Textil Borra con bioresina.

En la Figura 253 se comparan los valores de aislamiento acústico entre las láminas de composite yute con bioresina y resina de poliéster.

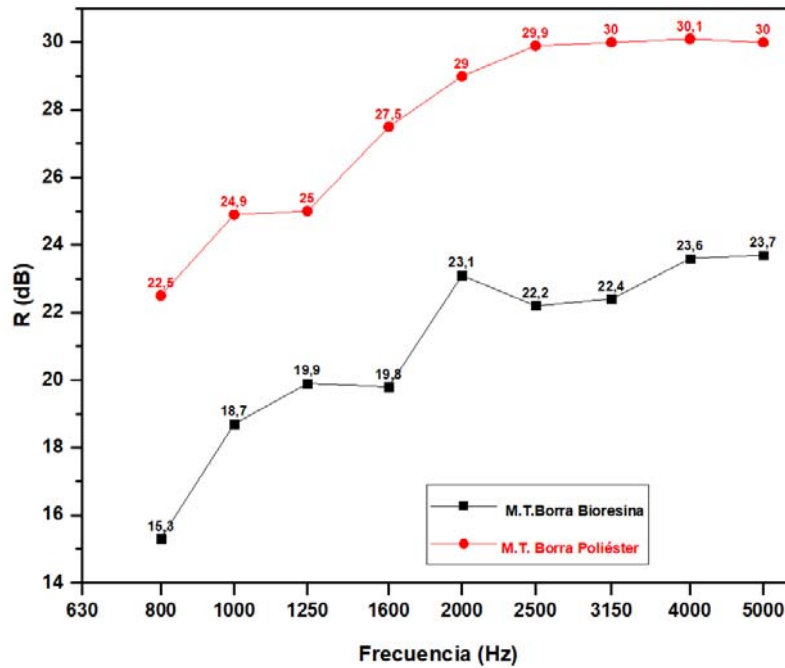


Figura 252. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre láminas de Materia Textil Borra con bioresina y con resina de poliéster.

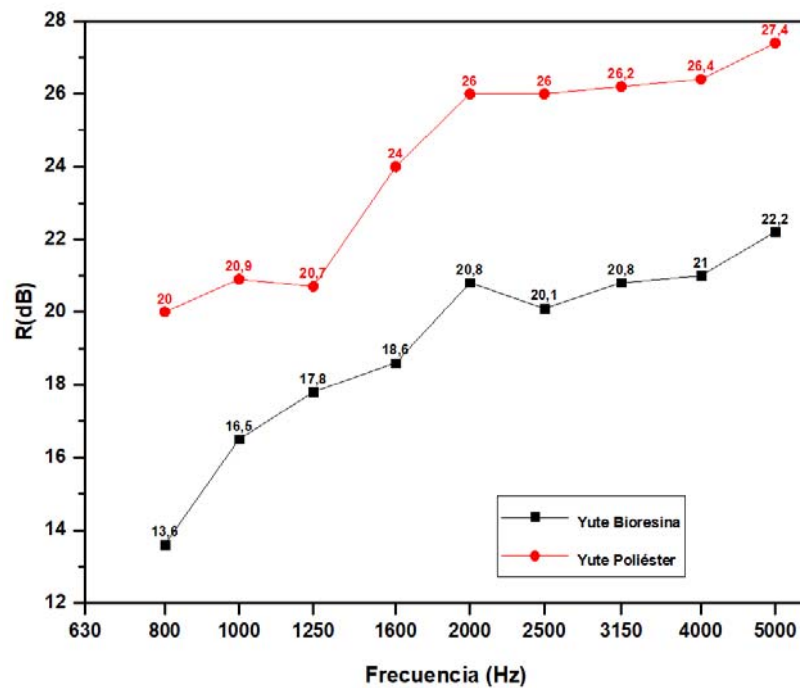


Figura 253. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre láminas de yute con bioresina y con resina de poliéster.

Como se observa en las gráficas de la Figura 253, los valores de aislamiento acústico del composite yute con resina de poliéster, son superiores a los valores obtenidos con bioresina.

En la Figura 254 se comparan los valores de aislamiento acústico entre las láminas de composite coco con bioresina y resina de poliéster.

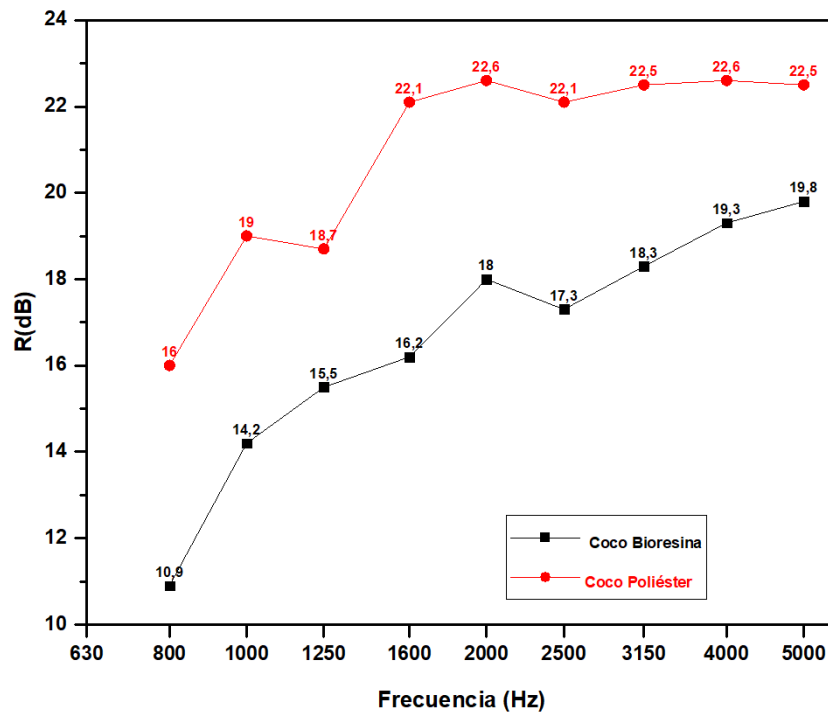


Figura 254. Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de coco con bioresina y con resina de poliéster.

Como se observa en las gráficas de la Figura 255, los valores de aislamiento acústico del composite coco con resina de poliéster, son superiores a los valores obtenidos con bioresina.

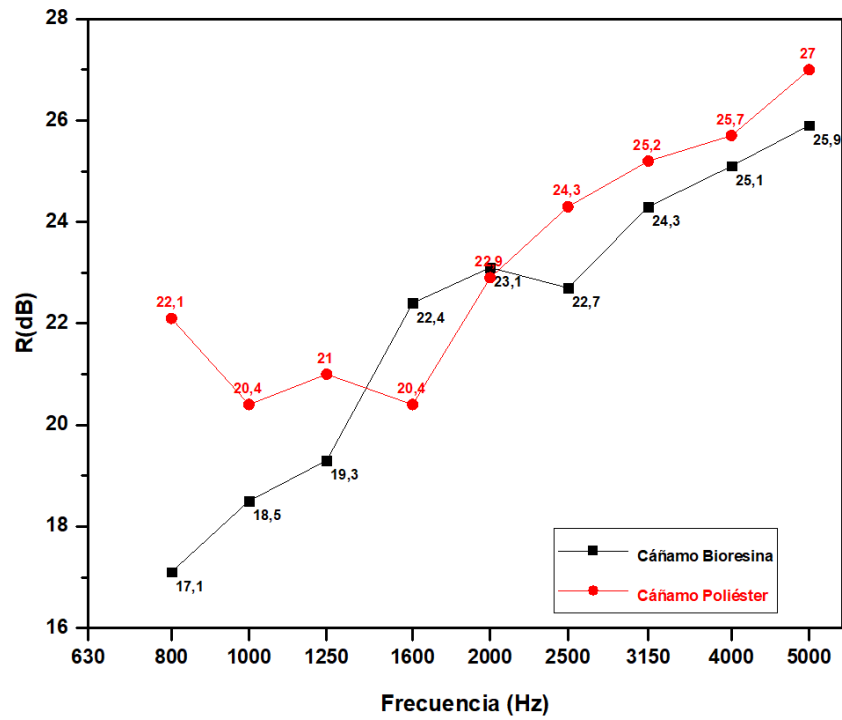


Figura 255, Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de cáñamo con bioresina y con resina de poliéster.

De la información obtenida de las gráficas de las Figuras 250 – 255, los resultados de los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo, de los composites con matriz de poliéster presentan valores superiores a los “green composites” con bioresina.

4.4.5 Valores acústicos frente al ruido aéreo de la lámina de yeso laminado.

En la Tabla 130, se exponen los valores obtenidos en la cámara de transmisión del aislamiento acústico al ruido aéreo de una placa de yeso laminado de espesor 13 mm.

Tabla 130. Valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de una placa de yeso laminado.

Placa de Yeso laminado de 13 mm de espesor	
Frecuencia (HZ)	R (dB)
800	23,80
1000	24
1250	25
1600	26,30
2000	27,60
2500	27,50
3150	27,50
4000	27,50
5000	27,70

4.4.6 Valores ponderados de la placa yeso laminado

En la Tabla 131, se recopilan los valores de ponderación aplicada en tercio de octava para la placa de yeso laminado desde la frecuencia de 800 (Hz) a 5 000 (Hz).

Tabla 131. Valores de ponderación aplicada de la placa de yeso laminado.

Frecuencia (Hz)	Factor de ponderación (dB)	R (dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	23,80	23
1000	0	24	24
1250	-0,60	25	24,40
1600	1	26,30	27,30
2000	1,20	27,60	28,80
2500	1,30	27,50	28,80
3150	1,20	27,50	28,70
4000	1	27,50	28,50
5000	0,50	27,70	28,20

En la Tabla 132, se muestra el valor de aislamiento acústico a ruido aéreo ponderado de la placa de yeso laminado.

Tabla 132. Valor ponderado de la placa de yeso laminado.

Placa de yeso laminado	R_w (dB)
PYL	36,89

4.4.7 Comparativas láminas green composite - yeso laminado

En este apartado se realiza la comparativa del aislamiento al ruido aéreo de las distintas láminas de “green composite” con matriz de resina biodegradable con el material ligero más empleado en la construcción (placas de yeso laminado). El espesor de las placas de yeso laminado (PYL) es de 13 mm.

Los resultados de las diversas comparativas se encuentran recopiladas en las Figuras 256 - 260.

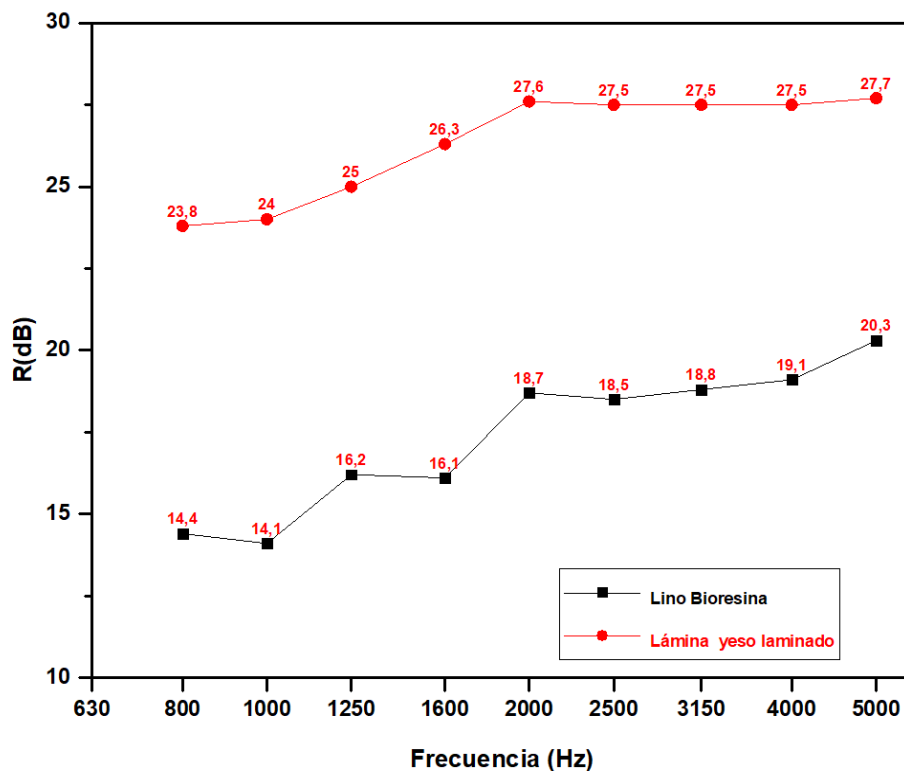


Figura 256. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” lino con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.

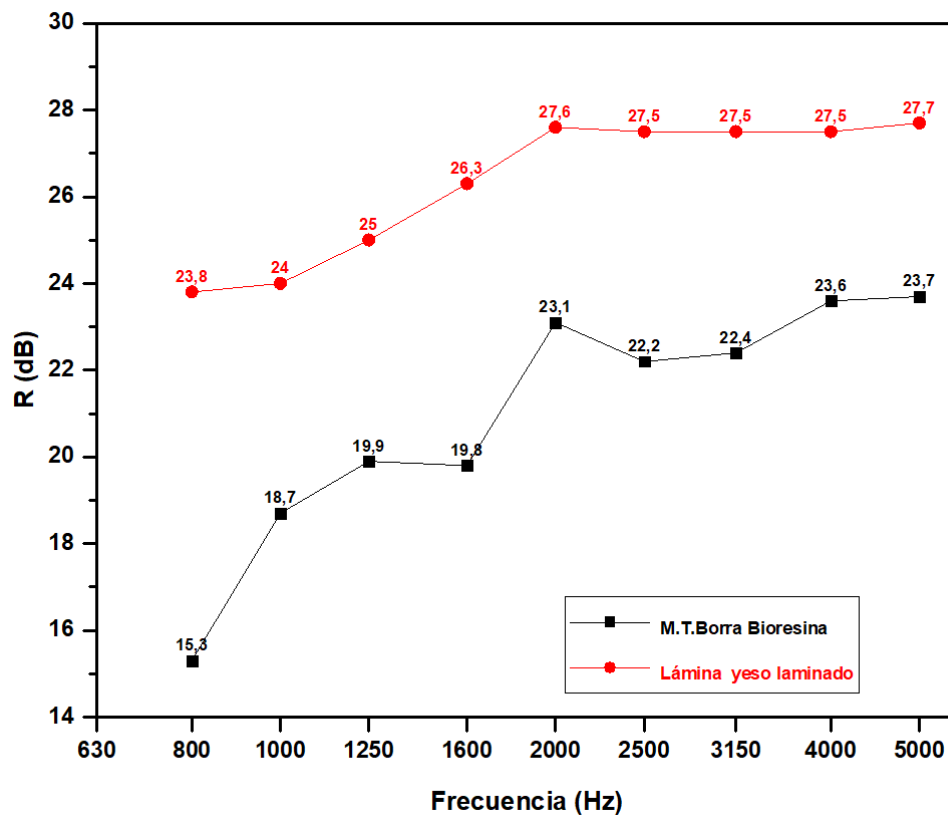


Figura 257. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de la Materia de residuo textil Borra con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.

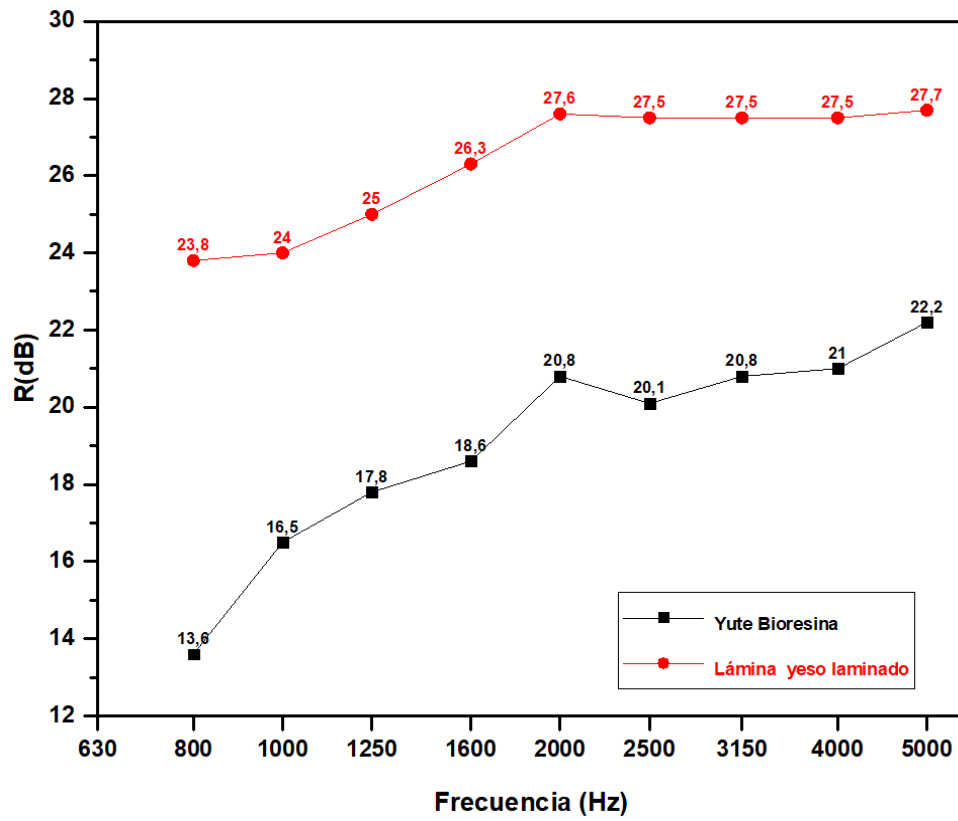


Figura 258. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” yute con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.

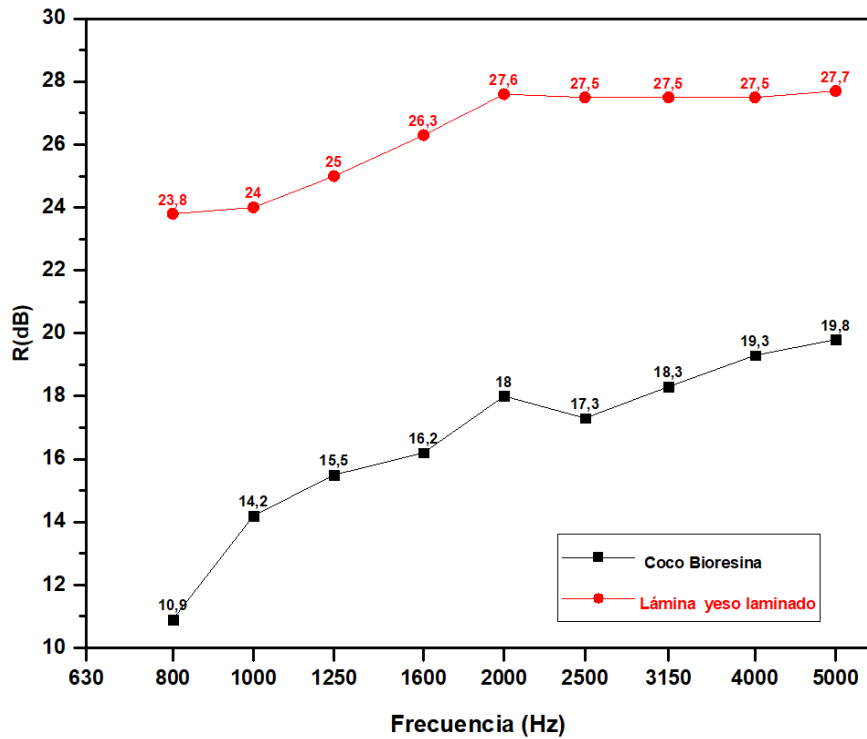


Figura 259. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” coco con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.

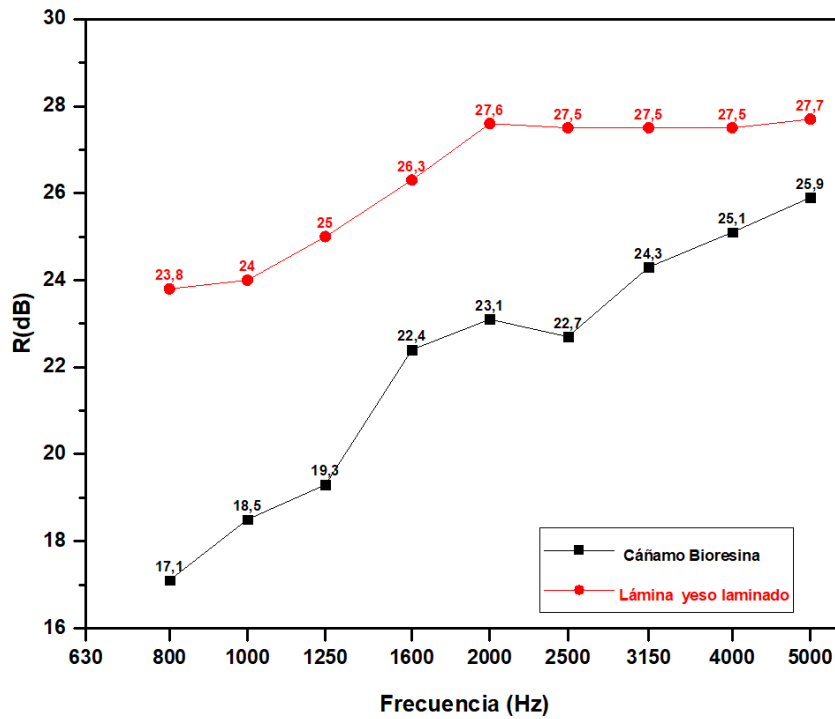


Figura 260. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” cáñamo con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.

4.4.8 Recopilación de resultados

En las Figuras 261 y 262, se recopilan las gráficas que engloban los composites con bioresina y resina de poliéster con la placa de yeso laminado.

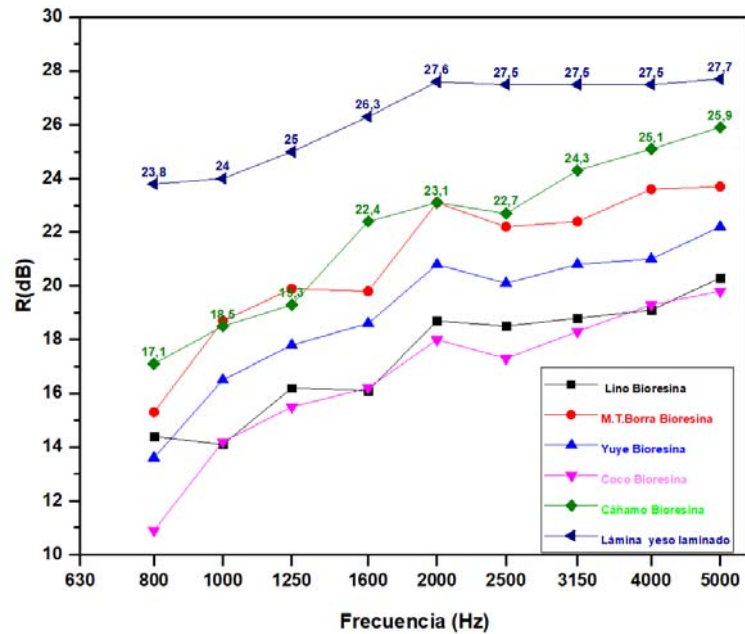


Figura 261. Recopilación de “green composites” con bioresina versus placa de yeso laminada.

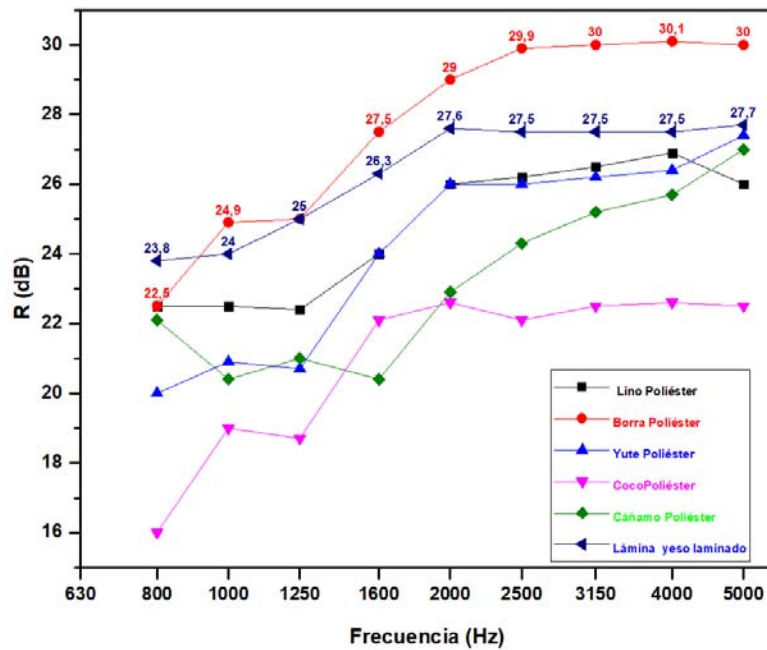


Figura 262. Recopilación de los composites con resina de poliéster versus placa de yeso laminada.

Como se puede observar en las Figuras 261 y 262, el valor del aislamiento acústico a ruido aéreo de la placa de yeso laminado presenta en todos los casos un valor superior al obtenido para todos los “green composites” analizados con bioresina. Sin embargo, para los composites con resina de poliéster, la Materia Textil Borra presenta unos valores de aislamiento acústico a ruido aéreo superiores a la placa de yeso laminado.

Ahora bien, hay que subrayar que los espesores de los “green composites” son inferiores a los de la placa de yeso laminada.

En las Tablas 133 y 134, se exponen los valores numéricos del aislamiento acústico a ruido aéreo de los “green composites” con bioresina y resina de poliéster respectivamente.

Tabla 133. Resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido para las placas evaluadas elaboradas con bioresina.

Composites con bioresina R (dB)					
Frecuencia (HZ)	Lino Biaxial	M.T.Borra	Yute	Coco	Cáñamo
800	14,40	15,30	13,60	10,90	17,10
1000	14,10	18,70	16,50	14,20	18,50
1250	16,20	19,90	17,80	15,50	19,30
1600	16,10	19,80	18,60	16,20	22,40
2000	18,70	23,10	20,80	18	23,10
2500	18,50	22,20	20,10	17,30	22,70
3150	18,80	22,40	20,80	18,30	24,30
4000	19,10	23,60	21	19,30	25,10
5000	20,30	23,70	22,20	19,80	25,90

Tabla 134. Resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido para las placas elaboradas con resina de poliéster.

Composites con resina de poliéster R (dB)					
Frecuencia (HZ)	Lino Biaxial	M.T.Borra	Yute	Coco	Cáñamo
800	22,50	22,50	20	16	22,10
1000	22,50	24,90	20,90	19,00	20,40
1250	22,40	25	20,70	18,70	21
1600	24	27,50	24	22,10	20,40
2000	26	29	26	22,60	22,90
2500	26,20	29,90	26	22,10	24,30
3150	26,50	30	26,20	22,50	25,20
4000	26,90	30,10	26,40	22,60	25,70
5000	26	30	27,40	22,50	27

De los resultados obtenidos en las tablas anteriores, se aprecia que de los composites con bioresina el que alcanza un mayor aislamiento al ruido aéreo acústico es el cáñamo.

Mientras que para los composites con resina de poliéster la Materia Textil Borra es el que alcanza el valor mayor.

4.4.9 Elección de materiales para placas sándwich

Dentro de los “green composites” con bioresina, los que presentan unos valores más elevados a ruido aéreo son la Materia Textil Borra seguida por el cáñamo y el yute.

Los espesores de los composites están comprendidos entre 4,20 mm para el cáñamo y 8,14 mm para el coco, frente a los mencionados 13 mm de la placa de yeso laminado. Los espesores correspondientes al yute y la Materia Textil Borra toman un valor de 5,1 mm.

En la Figura 263, se muestran las tres gráficas de los “green composites” con bioresina que se van a emplear para los apilamientos sándwich.

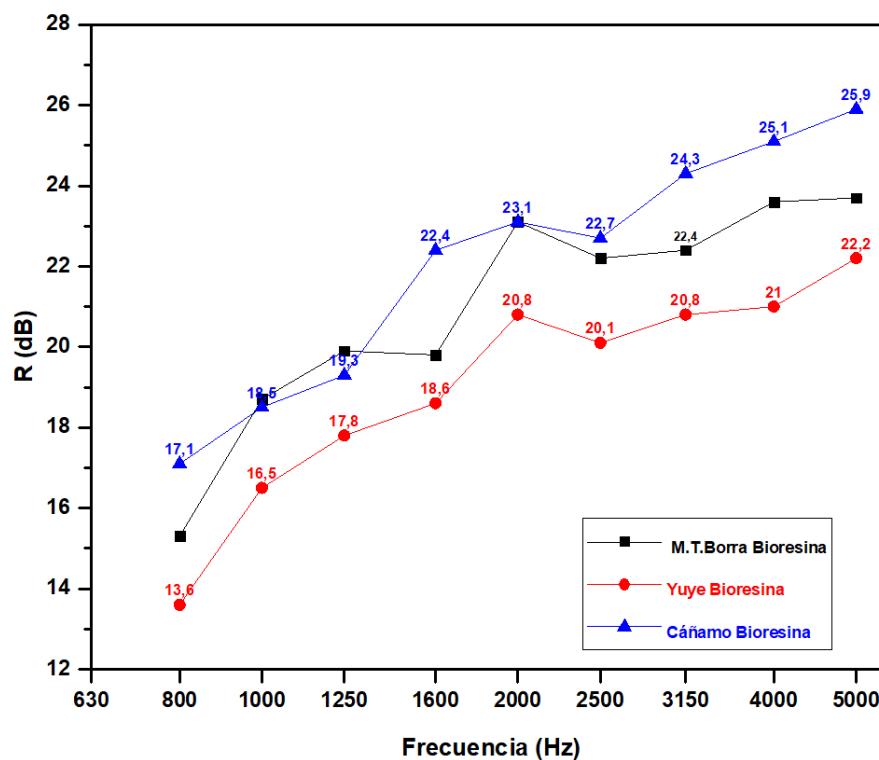


Figura 263. Elección de los mejores “green composites” y Materia Textil Borra con bioresina al aislamiento acústico a ruido aéreo.

Como los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo entre los “green composites” de cáñamo y yute son muy similares, basándose en las propiedades mecánicas del yute que son superiores a las del cáñamo, se eligen finalmente como láminas para el apilamiento en forma de sándwich los “green composites” de yute y Materia Textil Borra.

En la Tabla 135 se observan los valores de aislamiento a ruido aéreo ponderado R_w (dB) para los composites estudiados y la placa de yeso laminado.

Tabla 135. Valores de aislamiento acústico global ponderado de las placas evaluadas y de la placa de yeso de 13 mm de espesor ensayada en la misma cámara de transmisión.

Composite con resina de poliéster	R_w (dB)
Cáñamo	34,85
Lino	35,38
Yute	35,28
Coco	31,79
M.T.Borra	38,65
Composite con bioresina	R_w (dB)
Cáñamo	33,27
Lino	28,38
Yute	30,12
Coco	27,93
M.T.Borra	31,95
Placa de yeso laminado	36,89

De los resultados obtenidos en la Tabla 135, se observa que el composite con matriz de resina biodegradable de Materia Textil Borra presenta las mejores propiedades para el aislamiento a ruido aéreo ponderado R_w (dB).

En la Figura 264, se muestran las gráficas con los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con bioresina que se van a ensayar para la obtención de apilamientos sándwich.

De los composites con resina de poliéster, los que presentan unos valores más elevados al aislamiento acústico a ruido aéreo son la Materia Textil Borra seguida por el lino. Siguiendo el mismo criterio de escoger el material con resina de poliéster con el mayor módulo de elasticidad se elige el yute con resina de poliéster, Figura 265.

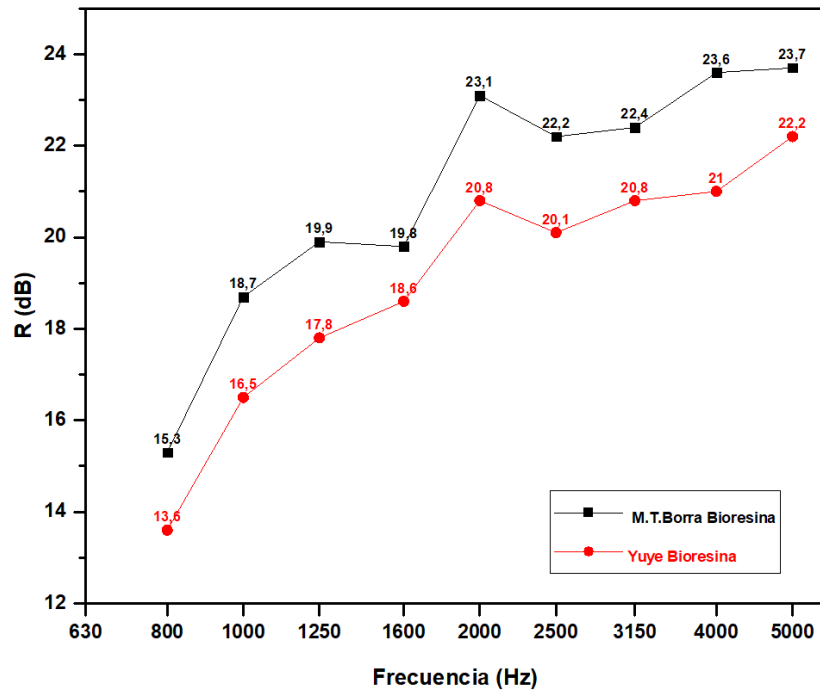


Figura 264. Valores obtenidos de los composites con bioresina para los materiales tipo sándwich.

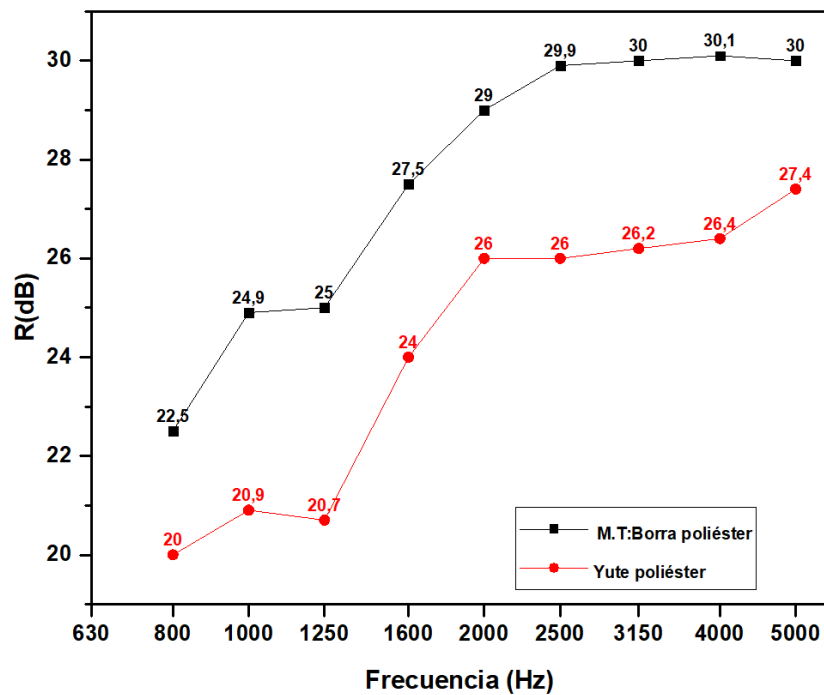


Figura 265. Valores obtenidos de los composites con resina de poliéster para los materiales tipo sándwich.

4.4.10 Apilamientos multicapa

Para la validación del laminado multicapa conformado por composites con bioresina de yute y Materia Textil Borra así como para los formados con resina de poliéster y convertirlos en un material absorbente acústico ligero, falta dotarle de una lámina intermedia que aporte porosidad. Para lo cual se utiliza la lana de oveja, Figura 266.

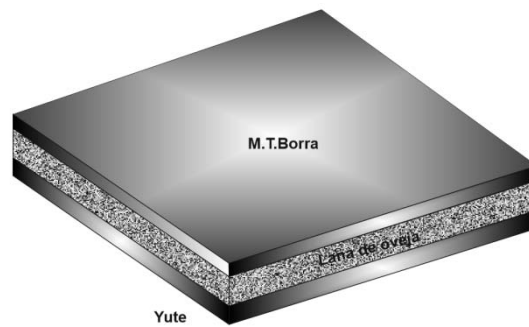
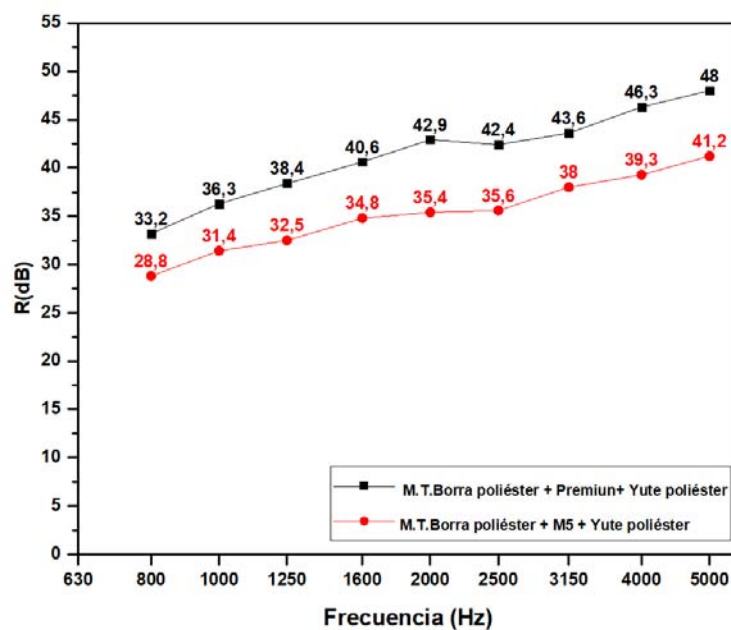


Figura 266. Multicapa en forma de sándwich con capas externas de composite y núcleo de lana de oveja.

4.4.11 Sándwich con composites y lana de oveja

En la Figura 267, se muestran las gráficas obtenidas de los distintos laminados multicapa en forma de sándwich con composites con bioresina y resina de poliéster en sus capas exteriores, tras la realización de los ensayos en la cámara de transmisión de tamaño reducido.



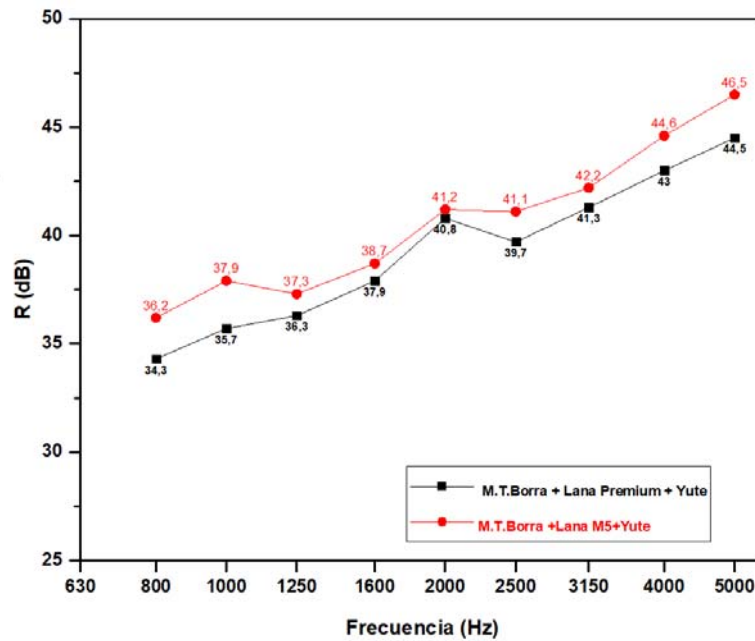


Figura 267. Valores al aislamiento acústico al ruido aéreo con las multicapas en forma de sándwich.

En la Tabla 136, se recopilan los valores de ponderación a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra y yute con bioresina y núcleo de lana M5.

Tabla 136. Valores de ponderación aplicada de los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- yute con bioresina y lana M5.

Composites con bioresina + Lana M5.			
Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	36,20	35,40
1000	0	37,90	37,90
1250	-0,60	37,30	36,70
1600	1	38,70	39,70
2000	1,20	41,20	42,40
2500	1,30	41,10	42,40
3150	1,20	42,20	43,40
4000	1	44,60	45,60
5000	0,50	46,50	47

En la Tabla 137, se recopilan los valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de materia textil borra y yute con bioresina y núcleo de lana premium.

Tabla 137. Valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra y yute con bioresina y lana premium.

Composites con bioresina + lana premium.			
Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	34,30	33,50
1000	0	35,70	35,70
1250	-0,60	36,30	35,70
1600	1	37,90	38,90
2000	1,20	40,80	42
2500	1,30	39,70	41
3150	1,20	41,30	42,50
4000	1	43	44
5000	0,50	44,50	45

En la Tabla 138, se recopilan los valores ponderados de los materiales tipo sándwich de bioresina con lana M5 y lana premium.

Tabla 138. Valores ponderados para los apilamientos sándwich con bioresina.

Composites con bioresina	R_w (dB)
M.T.Borra + M5 + Yute	52,21
M.T.Borra + Premium + Yute	50,80

En la Tabla 139, se recopilan los valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra y yute con resina de poliéster y núcleo de lana M5.

Tabla 139. Valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- yute con resina de poliéster con lana M5.

Composites con resina poliéster + lana M5.			
Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	28,80	28
1000	0	31,40	31,40
1250	-0,60	32,50	31,90
1600	1	34,8	35,80
2000	1,20	35,40	36,60
2500	1,30	35,60	36,90
3150	1,20	38,00	39,20
4000	1	39,30	40,30
5000	0,50	41,20	41,70

En la Tabla 140, se recopilan los valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra y yute con resina de poliéster y núcleo de lana premium.

Tabla 140. Valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- yute con resina de poliéster y lana premium.

Composites con resina poliéster + Lana Premium.			
Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	33,20	32,40
1000	0	36,30	36,30
1250	-0,60	38,40	37,80
1600	1	40,60	41,60
2000	1,20	42,90	44,10
2500	1,30	42,40	43,70
3150	1,20	43,60	44,80
4000	1	46,30	47,30
5000	0,50	48,00	48,50

En la Tabla 141, se recopilan los valores ponderados de los materiales tipo sándwich de resina de poliéster con lana M5 y lana premium.

Tabla 141. Valores ponderados para los materiales tipo sándwich con resina de poliéster.

Composites con resina de poliéster	R_w (dB)
M.T.Borra + M5 + Yute	47,04
M.T.Borra + Premium + Yute	53,62

Materiales tipo sándwich con Materia Textil Borra con bioresina – Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana M5

En la Tabla 142, se recopilan los valores de ponderación de las capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina y Materia Textil Borra con resina de poliéster y en el núcleo lana M5.

Tabla 142. Valores de la ponderación aplicada a las placas de Materia Textil Borra de bioresina + Materia Textil Borra resina de poliéster + lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	45,10	44,30
1000	0	46,30	46,30
1250	-0,60	44,50	43,90
1600	1	47,60	48,60
2000	1,20	49,40	50,60
2500	1,30	50,90	52,20
3150	1,20	51,40	52,60
4000	1	53,70	54,70
5000	0,50	54,30	54,80

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster - bioresina y lana M5 se recopilan en la Tabla 143.

Tabla 143. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina – resina de poliéster y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
M.T.Borra (bioresina) + M5 + M.T.Borra (poliéster)	60,88

Materiales tipo sándwich yute con bioresina - yute con resina de poliéster y lana M5

En la Tabla 144 se recopilan los valores de la ponderación aplicada a las capas exteriores de yute con bioresina - yute con resina de poliéster y en el núcleo lana M5.

Tabla 144. Valores de la ponderación aplicada a las placas con yute con bioresina + yute con resina de poliéster + lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	29,80	29
1000	0	33,50	33,50
1250	-0,60	34,40	33,80
1600	1	33,30	34,30
2000	1,20	36	37,20
2500	1,30	35,20	36,50
3150	1,20	36,80	38
4000	1	39,20	40,20
5000	0,50	41,30	41,80

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de yute con resina de poliéster - bioresina y lana M5 se recopilan en la Tabla 145.

Tabla 145. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de yute con bioresina – resina de poliéster y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
yute (bioresina) + M5 + yute (poliéster)	46,96

Materiales tipo sándwich Materia Textil Borra con bioresina - yute con resina de poliéster y lana M5

En la Tabla 146, se recopilan los valores de ponderación aplicada a las capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina - yute con resina de poliéster y en el núcleo lana M5.

Tabla 146. Valores de ponderación aplicada de las placas con Materia Textil Borra con bioresina + yute con resina de poliéster + lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	42,60	41,80
1000	0	42,30	42,30
1250	-0,60	40,20	39,60
1600	1	44,10	45,10
2000	1,20	46,40	47,60
2500	1,30	47	48,30
3150	1,20	47,60	48,80
4000	1	50	51
5000	0,50	51,70	52,20

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina – yute con resina de poliéster y lana M5 se recopilan en la Tabla 147.

Tabla 147. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina – yute con resina de poliéster y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
M.T.Borra (bioresina) + M5 + yute (poliéster)	57,53

Materiales tipo sándwich Materia Textil Borra con resina de poliéster - yute con bioresina y lana M5

En la Tabla 148, se recopilan los valores de ponderación aplicada a las capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster - yute con bioresina y en el núcleo lana M5.

Tabla 148 Valores de ponderación aplicada de la placas con Materia Textil Borra con resina de poliéster + yute con bioresina + lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	22,40	21,60
1000	0	27	27
1250	-0,60	29,60	29
1600	1	29,40	30,40
2000	1,20	30,20	31,40
2500	1,30	29,70	31
3150	1,20	32,60	33,80
4000	1	33,90	34,90
5000	0,50	36,10	21,60

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster - yute con bioresina y lana M5 se recopila en la Tabla 149.

Tabla 149. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster – yute con bioresina y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
M.T.Borra (poliéster) + M5 + yute (bioresina)	41,79

Materiales tipo sándwich Materia Textil Borra con bioresina –y Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana premium

En la Tabla 150, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina y Materia Textil Borra con resina de poliéster y en el núcleo lana premium.

Tabla 150. Valores de ponderación aplicadas de las placas de Materia Textil Borra con bioresina y Materia Textil Borra con resina de poliéster + lana premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	43,20	42,40
1000	0	44,10	44,10
1250	-0,60	43,50	42,90
1600	1	46,80	47,80
2000	1,20	49	50,20
2500	1,30	49,50	50,80
3150	1,20	50,50	51,70
4000	1	52,10	53,10
5000	0,50	52,30	52,80

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster – y Materia Textil Borra con bioresina y lana premium se recopila en la Tabla 151.

Tabla 151. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster – yute con bioresina y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
M.T.Borra (poliéster) + Premium + M.T.Borra (bioresina)	59,49

Combinaciones de apilamientos con yute con bioresina - yute con resina de poliéster y lana premium

En la Tabla 152, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de yute con bioresina - yute con resina de poliéster y en el núcleo lana premium.

Tabla 152. Valores de ponderación aplicada de las placas yute con bioresina - yute con resina de poliéster + lana premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	39	38,20
1000	0	37,90	37,90
1250	-0,60	37,10	36,50
1600	1	42,10	43,10
2000	1,20	43,70	44,90
2500	1,30	43,50	44,80
3150	1,20	45,10	46,30
4000	1	45,80	46,80
5000	0,50	48,20	48,70

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de yute resina de poliéster – yute con bioresina y lana premium se recopila en la Tabla 153.

Tabla 153. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de yute con resina de poliéster – yute con bioresina y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
yute (poliéster) + Premium + yute (bioresina)	54,20

Combinaciones de apilamientos con Materia Textil Borra con bioresina - yute con resina de poliéster y lana premium

En la Tabla 154 se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina - yute con resina de poliéster y en el núcleo lana premium.

Tabla 154. Valores de ponderación aplicada de la placas y Materia Textil Borra con bioresina - yute con resina de poliéster + lana premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	40,70	39,90
1000	0	40,10	40,10
1250	-0,60	39,20	38,60
1600	1	43,30	44,30
2000	1,20	46	47,20
2500	1,30	45,60	46,90
3150	1,20	46,70	47,90
4000	1	48,40	49,40
5000	0,50	49,70	50,20

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina – yute con resina de poliéster y lana premium se recopila en la Tabla 155.

Tabla 155. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de y Materia Textil Borra con bioresina– yute con resina de poliéster y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
M.T.Borra (bioresina) + Premium + yute (poliéster)	56,11

Combinaciones de apilamientos con Materia Textil Borra con resina de poliéster - yute con bioresina y lana premium

En la Tabla 156 se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster - yute con bioresina y en el núcleo lana premium.

Tabla 156. Valores de ponderación aplicada de la placas Materia Textil Borra con resina de poliéster y yute con bioresina + lana premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	26,80	26
1000	0	31,90	31,90
1250	-0,60	35,50	34,90
1600	1	35,20	36,20
2000	1,20	37,70	38,90
2500	1,30	36,50	37,80
3150	1,20	38,20	39,40
4000	1	40,90	41,90
5000	0,50	42,80	43,30

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra resina de poliéster – yute con bioresina y lana premium se recopila en la Tabla 157.

Tabla 157. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de y Materia Textil Borra con bioresina– yute con resina de poliéster y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
M.T.Borra (poliéster) + Premium + yute (bioresina)	48,36

4.4.12 Combinaciones de láminas de yeso laminado con composites - biocomposites y lana de oveja

En estos ensayos se van a sustituir las pieles exteriores de los laminados multicapa de los composites por placas de yeso laminado Figura 268.

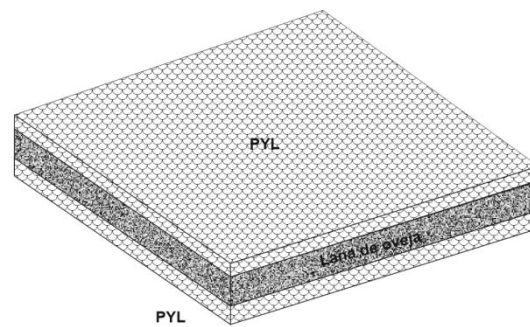


Figura 268. Estructura en forma de sándwich de placas de yeso laminado y lana de oveja.

Tras la realización de los ensayos en la cámara de transmisión de tamaño reducido, se obtienen los valores del aislamiento acústico al ruido aéreo representados en la Figura 269.

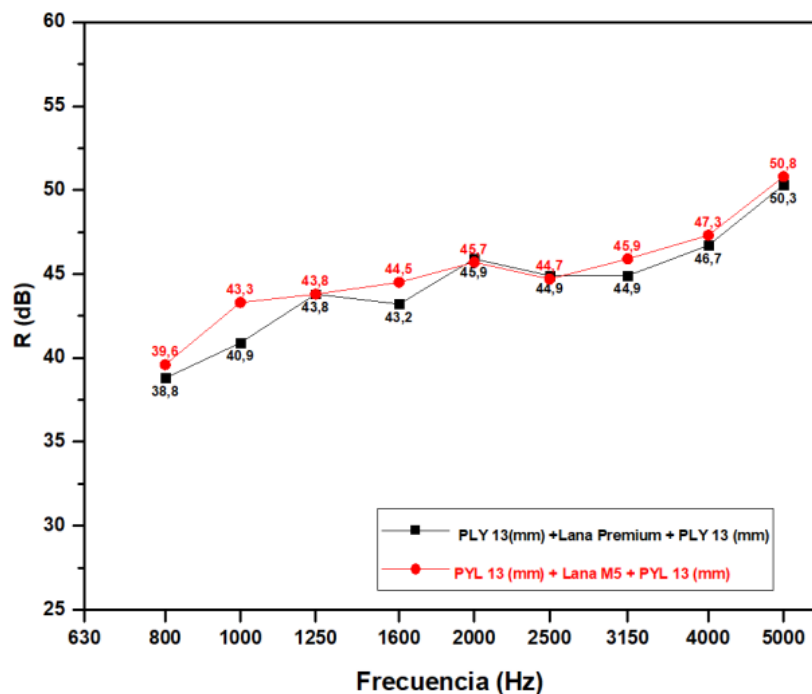


Figura 269. Resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido para todas las configuraciones dobles de láminas de yeso y lanas de oveja

En la Tabla 158, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado y en el núcleo lana premium.

Tabla 158. Valores de ponderación aplicada de las placas de yeso laminado + lana premium.

Placas de yeso laminado + lana premium.			
Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	38,80	38
1000	0	40,90	40,90
1250	-0,60	43,80	43,20
1600	1	43,20	44,20
2000	1,20	45,90	47,10
2500	1,30	44,90	46,20
3150	1,20	44,90	46,10
4000	1	48,70	49,70
5000	0,50	50,30	50,80

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado y lana premium se recopila en la Tabla 159, donde: (PYL): Placa de yeso laminado

Tabla 159. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado y Lana Premium.

Sándwich	R_w (dB)
(PYL) + Premium + (PYL)	56,16

En la Tabla 160, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado y en el núcleo lana M5.

Tabla 160. Valores de ponderación aplicada de las placas de yeso laminado + lana premium.

Placas de yeso laminado + lana M5.			
Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	39,60	38,80
1000	0	43,30	43,30
1250	-0,60	43,80	43,20
1600	1	44,50	45,50
2000	1,20	45,70	46,90
2500	1,30	44,70	46
3150	1,20	45,90	47,10
4000	1	47,30	48,30
5000	0,50	50,80	51,30

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado y lana M5 se recopila en la Tabla 161.

Tabla 161. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + M5 + PYL	56,31

Como se puede observar en las Tabla 159 y 161, el material tipo sándwich que presenta mejores propiedades al aislamiento acústico a ruido aéreo es el formado por la placa yeso laminado 13 mm + lana M5 60 mm + placa de yeso laminado de 13 mm.

Valores ponderados de las combinaciones de los composites con bioresina-resina de poliéster - placa de yeso laminado con lana M5

En la Tabla 162 se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - Materia Textil Borra con bioresina y lana M5.

Tabla 162. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - Materia Textil Borra con bioresina + lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	31,10	30,30
1000	0	38	38
1250	-0,60	38	38,10
1600	1	38	39
2000	1,20	41,20	42,40
2500	1,30	39,40	40,70
3150	1,20	40,80	42
4000	1	43,40	44,40
5000	0,50	46,80	47,30

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – Materia Textil Borra con bioresina y lana M5 se recopila en la Tabla 163.

Tabla 163. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- Materia Textil Borra con bioresina y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + M5 + M.T.Borra (bioresina)	51,70

En la Tabla 164, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con bioresina y lana M5.

Tabla 164. Valores de ponderación aplicada de la Placa yeso laminado - yute con bioresina + Lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	29,40	28,60
1000	0	35,80	35,80
1250	-0,60	36,60	36
1600	1	36,80	37,80
2000	1,20	38,90	40,10
2500	1,30	37,30	38,60
3150	1,20	39,20	40,40
4000	1	40,80	41,80
5000	0,50	45,30	45,80

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – yute con bioresina y lana M5 se recopila en la Tabla 165.

Tabla 165. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- yute con bioresina y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + M5 + yute (bioresina)	48,82

En la Tabla 166, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - y Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana M5.

Tabla 166. Valores de ponderación aplicada de la Placa yeso laminado - y Materia Textil Borra con resina poliéster + lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	40,90	40,10
1000	0	42,40	42,40
1250	-0,60	43,80	43,20
1600	1	43,30	44,30
2000	1,20	44,30	45,50
2500	1,30	42,30	43,60
3150	1,20	43,40	44,60
4000	1	44,70	45,70
5000	0,50	48,50	49

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – y Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana M5 se recopila en la Tabla 167.

Tabla 167. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- y Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + M5 + M.T.Borra (poliéster)	54,45

En la Tabla 168 se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con resina de poliéster y lana M5.

Tabla 168. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - yute con resina poliéster + lana M5.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	35,80	35
1000	0	40,20	40,20
1250	-0,60	39,50	38,90
1600	1	42,20	43,20
2000	1,20	44,20	45,40
2500	1,30	43,20	44,50
3150	1,20	44,60	45,80
4000	1	46,20	47,20
5000	0,50	50,50	51

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – yute con resina de poliéster y lana M5 se recopila en la Tabla 169.

Tabla 169. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con resina de poliéster y lana M5.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + M5 + yute (poliéster)	55,07

Valores ponderados de las combinaciones de los composites con bioresina-resina de poliéster y placa de yeso laminado con lana premium

En la Tabla 170, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - y Materia Textil Borra con bioresina y lana premium.

Tabla 170. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - y Materia Textil Borra con bioresina + lana Premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	30,30	29,50
1000	0	35,60	35,60
1250	-0,60	38,70	38,10
1600	1	36,70	37,70
2000	1,20	41,50	42,70
2500	1,30	39,60	40,90
3150	1,20	39,80	41
4000	1	42,80	43,80
5000	0,50	46,30	46,80

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – y Materia Textil Borra con bioresina y lana premium se recopila en la Tabla 171.

Tabla 171. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - y Materia Textil Borra con bioresina y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + Premium + Materia Textil Borra(bioresina)	51,21

En la Tabla 172 se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con bioresina y lana premium.

Tabla 172. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - yute con bioresina + Lana premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	28,60	27,80
1000	0	33,40	33,40
1250	-0,60	36,60	36
1600	1	35,50	36,50
2000	1,20	39,20	40,40
2500	1,30	37,50	38,80
3150	1,20	38,20	39,40
4000	1	40,20	41,20
5000	0,50	44,80	45,30

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – yute con bioresina y lana premium se recopila en la Tabla 173.

Tabla 173. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con bioresina y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + Premium + yute (bioresina)	49,32

En la Tabla 174, se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - y Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana premium.

Tabla 174. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - y Materia Textil Borra con resina de poliéster + lana premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	37,50	39,30
1000	0	41,80	40
1250	-0,60	43,80	43,20
1600	1	44,40	43
2000	1,20	47,30	45,70
2500	1,30	47,30	43,80
3150	1,20	47,40	43,60
4000	1	49,30	45,10
5000	0,50	52,60	48,50

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – y Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana premium se recopila en la Tabla 175.

Tabla 175. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - y Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + Premium + M.T.Borra (poliéster)	53,91

En la Tabla 176 se recopilan los valores de ponderación aplicada de las capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con resina de poliéster y lana premium.

Tabla 176. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - yute con resina de poliéster + lana premium.

Frecuencia (Hz)	Ponderación (dB)	R(dB)	Ponderación aplicada (dBi)
800	-0,80	35	34,20
1000	0	37,80	37,80
1250	-0,60	39,50	38,90
1600	1	40,90	41,90
2000	1,20	44,30	45,50
2500	1,30	43,40	44,70
3150	1,20	43,60	44,80
4000	1	45,60	46,60
5000	0,50	50	50,50

El valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado – yute con resina de poliéster y lana premium se recopila en la Tabla 177.

Tabla 177. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- yute con resina de poliéster y lana premium.

Sándwich	R _w (dB)
PYL + Premium + yute (poliéster)	54,54

4.4.13 Comparativa entre apilamientos

Los valores ponderados se obtienen a partir de los valores por frecuencias que se obtienen de los ensayos en cámara de transmisión y con respecto a una curva de referencia estandarizada, según UNE EN ISO 717-1:2013 [247] En la Tabla 178 se realiza una comparativa entre los apilamientos multicapa sándwich con lana M5.

Tabla 178. Recopilación de los valores globales ponderados de los distintos apilamientos laminares tipo sándwich con lana M5.

Lana M5	
Apilamientos combinados	R_w (dB)
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	52,21
M.T.Borra (poliéster) + Yute (poliéster)	47,04
M.T.Borra (bioresina) M.T.Borra (poliéster)	60,88
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	46,96
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	57,53
M.T.Borra (poliéster) + Yute (bioresina)	41,79
Apilamiento multicapa con placas de yeso laminado	R_w (dB)
PYL + PYL	56,31
PYL + M.T.Borra (biocomposite)	51,70
PYL + Yute (biocomposite)	49,82
PYL + M.T.Borra (poliéster)	54,45
PYL + Yute (poliéster)	55,07

En la Tabla 179, se realiza una comparativa entre los apilamientos multicapa sándwich con lana premium.

Tabla 179. Recopilación de los valores globales ponderados de los distintos apilamientos laminares tipo sándwich con lana premium.

Lana Premium	
Apilamientos combinados	R_w (dB)
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	50,80
M.T.Borra (poliéster) + Yute (poliéster)	53,62
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	59,49
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	50,80
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	54,20
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	56,11
M.T.Borra (poliéster) + Yute (bioresina)	48,36
Apilamiento multicapa con placas de yeso laminado	R_w (dB)
PYL + PYL	56,16
PYL + M.T.Borra (biocomposite)	51,21
PYL + Yute (biocomposite)	49,32
PYL + M.T.Borra (poliéster)	53,91
PYL + Yute (poliéster)	54,54

En la Tabla 180, se recopilan los valores de los apilamientos multicapa tipo sándwich más elevados de aislamiento acústico a ruido aéreo.

Tabla 180. Recopilación de los valores al aislamiento acústico a ruido aéreo de los materiales compuestos y placas de yeso laminadas con mayor aislamiento.

Lana M5	
Apilamientos combinados	Rw (dB)
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	60,88
Apilamiento multicapa con placas de yeso laminado	Rw (dB)
PYL + PYL	56,31
Lana Premium	
Apilamientos combinados	Rw (dB)
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	59,49
Apilamiento con placas de yeso laminado	Rw (dB)
PYL + PYL	56,16

Donde se observa que el laminado en forma de sándwich con un valor más elevado al aislamiento acústico a ruido aéreo es el formado por las capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina y con resina de poliéster con núcleo de lana M5.

Valor que es lógico debido al mayor espesor de lana M5 frente al espesor de la lana premium, y mayor masa superficial de la Materia Textil Borra con resina de poliéster, frente a la masa superficial de las (PYL).

Espesores de las distintas combinaciones de los apilamientos multicapa sándwich

En la Tabla 181, se recopilan los valores de los espesores de los apilamientos sándwich con bioresina - resina de poliéster y las placas de yeso laminado con lana M5.

Tabla 181. Valores de espesores de los distintos apilamientos sándwich con lana M5.

Lana M5 60 (mm)	
Apilamientos combinados	Espesor (mm)
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	69,71
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	69,82
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	69,82
M.T.Borra (poliéster) + Yute (bioresina)	69,71
Apilamiento con placas de yeso laminado	Espesor (mm)
Placa PYL + Placa PYL	86
Placa PYL + M.T.Borra (biocomposite)	78,10
Placa PYL + Yute (biocomposite)	78,10
Placa PYL + M.T.Borra (poliéster)	77,61
Placa PYL + Yute (poliéster)	77,72

En la Tabla 182, se recopilan los valores de los espesores de los apilamientos sándwich con bioresina - con resina de poliéster y placas de yeso laminado con lana premium.

Tabla 182. Valores de espesores de los distintos apilamientos sándwich con lana premium.

Lana Premium 50 (mm)	
Apilamientos combinados	Espesor (mm)
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	59,71
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	59,82
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	59,82
M.T.Borra (poliéster) + Yute (bioresina)	59,71
Apilamiento con placas de yeso laminado	Espesor (mm)
Placa PYL + Placa PYL	76
Placa PYL + M.T.Borra (biocomposite)	68,10
Placa PYL + Yute (biocomposite)	68,10
Placa PYL + M.T.Borra (poliéster)	67,61
Placa PYL + Yute (poliéster)	67,72

4.4.14 Cálculo de la velocidad de propagación del sonido en los materiales compuestos con bioresina – resina de poliéster y placa de yeso laminado

Para la obtención de la velocidad de propagación del sonido longitudinal en un sólido se aplica la expresión (6).

$$V_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 - 2\mu) \cdot (1 + \mu)}} \quad (6)$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad (Pa).
- μ : Coeficiente de poisson.
- ρ : Densidad (kg/m³)

Obtención de la velocidad de propagación longitudinal y transversal de los composites con bioresina

En la Tabla 183, se recopilan los parámetros necesarios para la obtención de la velocidad de propagación del sonido longitudinal en un medio sólido para los composites con bioresina.

Tabla 183. Valores correspondientes al módulo de elasticidad, coeficiente de poisson y densidad de los composites con bioresina.

Material	Módulo de elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad del composite (kg/m³)
Yute	6 984	0,34	1 080,55
Lino	4 104	0,39	1 180,72
Cáñamo	4 048	0,38	1 177,80
Coco	2 674	0,33	1 029,70
M.T.Borra	3 651	0,39	1 070,80

Para obtener el valor de la velocidad transversal en el sólido se aplicará la siguiente expresión matemática:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (7)$$

Donde:

- G: Módulo de cortadura o cizalladura (Pa).
- ρ : Densidad del composite (kg/m³).

Los parámetros necesarios para el cálculo de la velocidad transversal del sonido en un sólido de los composites con bioresina se recopilan en la Tabla 184.

Tabla 184. Valores de los módulos de cortadura y densidades de los composites con bioresina.

Material	Módulo de Cortadura (MPa)	Densidad del composite (kg/m³)
Yute	1 936	1 080,55
Lino	1 411	1 180,72
Cáñamo	1 411	1 177,80
Coco	968	1 029,70
M.T.Borra	1 271	1 070,80

En la Tabla 185, se recopilan los valores de las velocidades longitudinales y transversales de los distintos materiales compuestos con bioresina.

Tabla 185. Recopilación de las velocidades de propagación longitudinales- transversales del sonido en los composites con bioresina.

Material	V _L (m/s)	V _T (m/s)
Yute con bioresina	3 154,09	1 338,53
Lino con bioresina	2 633,15	1 093,18
Cáñamo con bioresina	2 536,50	1 094,53
Coco con bioresina	1 961,53	969,57
M.T.Borra con bioresina	2 607,94	1 089,48

Obtención de la velocidad de propagación longitudinal y transversal de los composites con resina de poliéster

En la Tabla 186, se recopilan los parámetros necesarios para la obtención de la velocidad de propagación longitudinal del sonido en un medio sólido para los composites con resina de poliéster.

Tabla 186. Recopilación de los parámetros necesarios para la obtención de la velocidad de propagación longitudinal del sonido en los composites con resina de poliéster.

Material	Módulo de elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad del composite (kg/m ³)
Yute	5 697	0,29	1 118,80
Lino	4 053	0,36	1 218,80
Cáñamo	4 571	0,39	1 130,80
Coco	2 960	0,35	1 007,50
M.T.Borra	3 600	0,38	1 229,60

En la Tabla 187, se recopilan los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la velocidad transversal del sonido en los composites con resina de poliéster.

Tabla 187. Valores de los módulos de cortadura y densidades de los composites con resina de poliéster.

Material	Módulo de Cortadura (Pa)	Densidad del composite (kg/m ³)
Yute	2 077. 10 ⁶	1 118,80
Lino	1 493. 10 ⁶	1 218,80
Cáñamo	1 617. 10 ⁶	1 130,80
Coco	935. 10 ⁶	1 007,50
M.T.Borra	1 280. 10 ⁶	1 229,60

En la Tabla 188, se recopilan los valores de las velocidades longitudinales y transversales de los distintos materiales compuestos con resina de poliéster.

Tabla 188. Recopilación de las velocidades de propagación longitudinales- transversales del sonido en los composites con resina de poliéster.

Material	V _L (m/s)	V _T (m/s)
Yute con poliéster	2 583,19	1 362,51
Lino con poliéster	2 364,09	1 106,79
Cáñamo con poliéster	2 839,61	1 195,80
Coco con poliéster	2 171,46	963,35
M.T.Borra con poliéster	2 341,10	1 020,28

Obtención de la velocidad de propagación longitudinal y transversal de la placa de yeso laminado - lana

En la Tabla 189, se recopilan los valores de los módulos de elasticidad, coeficiente de poisson y densidad de la placa de yeso laminado y de la lana.

Tabla 189. Valores de los módulos de elasticidad- coeficiente de poisson – densidad de la placa de yeso laminado y lana.

Material	Módulo de elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad del composite (kg/m ³)
PYL	348,33	0,10	1 000
Lana	1,600	0,25	30

En la Tabla 190, se recopilan los valores de las velocidades longitudinales y transversales de propagación del sonido de la placa de yeso laminada y lana.

Tabla 190. Recopilación de la velocidad longitudinal y transversal del sonido de la placa de yeso laminado.

Material	V _L (m/s)	V _T (m/s)
Placa de yeso laminado	596,86	439,90
Lana	253	146,07

4.4.15 Cálculo de las impedancias acústicas de los composites- PYL- Lana

Para la obtención de las impedancias acústicas de los materiales compuestos con bioresina – resina de poliéster – placa de yeso laminado y lana, se debe aplicar la siguiente expresión matemática:

$$Z_L = V_L \cdot \rho. \quad (8)$$

Donde:

- Z_L : Es la impedancia acústica del material (Pa. s/m).
- V_L : Velocidad de propagación del sonido en el medio (m/s).
- ρ : La densidad del material (kg/m^3).

En la Tabla 191, se recopilan los valores de las impedancias longitudinales de los composites con bioresina.

Tabla 191. Valor de las impedancias de los composites con bioresina.

Material	Z_L ($\text{kg /m}^2 \cdot \text{s. } 10^6$)
Yute con bioresina	3,41
Lino con bioresina	3,11
Cáñamo con bioresina	2,98
Coco con bioresina	2,02
M.T.Borra con bioresina	2,80

En la Tabla 192, se recopilan los valores de las impedancias longitudinales de los composites con resina de poliéster.

Tabla 192. Valor de las impedancias de los composites con resina de poliéster.

Material	Z _L (kg /m ² .s. 10 ⁶)
Yute con resina de poliéster	2,89
Lino con resina de poliéster	2,88
Cáñamo con resina de poliéster	3,21
Coco con resina de poliéster	2,19
M.T.Borra con resina de poliéster	2,88

En la Tabla 193, se recopilan los valores de las impedancias longitudinales de la placa de yeso laminada y lana.

Tabla 193. Recopilación de la impedancia acústica de la placa de yeso laminada y lana.

Material	Z _L (kg /m ² .s. 10 ⁶)
Placa yeso laminado	0,59
Lana	0,00759

4.4.16 Cálculo teórico del aislamientos en paredes simples y dobles

En esta sección se va a realizar el cálculo teórico del aislamiento acústico a ruido aéreo de las paredes simples y dobles, con el fin de verificar los resultados obtenidos en la cámara de transmisión a escala de los apilamientos multicapa tipo sándwich con composites de bioresina – resina de poliéster y placas de yeso laminado en las capas exteriores del material tipo sándwich y con núcleo de lana de oveja en sus versiones M5 y premium.

Paredes simples

En los siguientes párrafos se van a exponer las ecuaciones matemáticas necesarias para la realización de los cálculos teóricos en paredes simples.

La expresión que determina la frecuencia crítica o de coincidencia de una pared simple viene determinada por la ecuación (9).

$$f_c = \frac{c^2}{2 \cdot \pi \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot \rho_w}{E} \cdot (1 - \mu^2)}. \quad (9)$$

Donde:

- ρ_w : Densidad del material de la pared (kg/m^3).
- h : Espesor de la pared (m).
- f_c : Frecuencia crítica (Hz).
- ρ : Densidad del sonido en el aire (kg/m^3).
- c : Velocidad de propagación del sonido en el aire (m/s).
- E : Módulo de elasticidad material (Pa).
- μ : Coeficiente de poisson.

La frecuencia de coincidencia se define como aquella frecuencia donde la absorción acústica de un material se ve afectada de forma negativa, debido a que la longitud de la onda del sonido incidente proyectado sobre el paramento coincide con la longitud de onda de flexión del material, por lo cual la onda entra en fase y aumenta su amplitud.

La ecuación (10) se utiliza para el cálculo de la masa superficial de los materiales.

$$MS = \rho_w \cdot h. \quad (10)$$

Donde:

- ρ_w : Densidad del material de la pared (kg/m^3).
- h : Espesor de la pared (m).

Para la obtención del valor de aislamiento acústico en la zona de Key de masas se aplica la expresión (11).

$$R \text{ (dB)} = 20 \cdot \log(M_s \cdot f) - 44. \quad (11)$$

Donde:

- f : Frecuencia de la banda de tercio de octava (Hz).

Para la obtención del aislamiento acústico en la zona de dominio del amortiguamiento interno, se aplica la expresión (12).

$$R \text{ (dB)} = 20 \cdot \log(M_s \cdot f) + 10 \cdot \log\left(\frac{f}{f_c}\right) + 10 \cdot \log(\eta) - 44. \quad (12)$$

Donde:

- f_c : Frecuencia crítica (Hz).
- η : Factor de amortiguamiento del material.
- ρ : Densidad del sonido en el aire (kg/m^3).
- $f_{\text{central banda 1 000}}$ (Hz).

Para una mejor clarificación de cómo se han obtenidos los valores tras el cálculo teórica, Tabla 195, se especifica la secuencia de pasos para la obtención del valor al aislamiento acústico a ruido del composite cáñamo con resina de poliéster.

En la Tabla 194, se recopilan los parámetros necesarios para la obtención de las frecuencias de coincidencia de los distintos composites con resina de poliéster.

Tabla 194. Datos para la obtención de la frecuencia de coincidencia.

Material	ρ (kg/m^3)	c (m/s)	ρ_w (kg/m^3)	h (m)	M_s (kg/m^2)	E (Pa)	μ
Yute			1 118,80	0,00472	5,28	$5\,697 \cdot 10^6$	0,29
Lino			1 218,80	0,00435	5,30	$4\,053 \cdot 10^6$	0,36
Cáñamo	1,20	340	1 130,80	0,00444	5,02	$4\,571 \cdot 10^6$	0,39
Coco			1 007,50	0,00746	7,51	$2\,960 \cdot 10^6$	0,35
M.T.Borra			1 229,60	0,00461	5,66	$3\,600 \cdot 10^6$	0,38

En la Tabla 195, se recopilan las operaciones matemáticas utilizadas para la obtención del valor del aislamiento acústico a ruido aéreo del composite yute con resina de poliéster.

Tabla 195. Obtención de los valores necesarios para el cálculo de aislamiento acústico en la banda de tercio de octava.

f (Hz)	$M_s \cdot f$	Log $M_s \cdot f$	20 Log $M_s \cdot f$	f_c	f/f_c	10 Log (f/f_c)	10.Log η	- 44	R(dB)
800	4224	3,62	71,71	5 726,68	0,14	-8,55	-0,01		20
1000	5280	3,72	74,45		0,17	-7,58	-2,27		20,90
1250	6600	3,82	75,79		0,22	-6,61	-3,89		20,70
1600	8448	3,93	79,54		0,28	-5,54	-7,01		24
2000	10560	4,02	81,67		0,35	-4,57	-8,30		26
2500	13200	4,12	83,71		0,44	-3,60	-11,41		26
3150	16632	4,22	85,62		0,55	-2,60	-14,02		26,20
4000	21120	4,32	87,49		0,70	-1,56	-15,53		26,40
5000	26400	4,42	88,93	0,87	-0,59	-17,44		27,40	

En la Tabla 196, se recopilan las operaciones para transformar el aislamiento acústico a ruido aéreo en valor global ponderado.

Tabla 196. Secuencia de operaciones para la obtención del valor global ponderado.

Frecuencia	Ponderación	R(dB)	(dBi)	dBi/10	10 ^{dBi/10}	$\Sigma 10^{dBi/10}$	Log Σ	Rw(dB)
800	-0,8	20	19,2	1,92	83,18			35,31
1000	0	20,90	20,9	2,09	123,03			
1250	-0,6	20,70	20,1	2,01	102,33			
1600	1	24	25	2,50	316,23			
2000	1,2	26	27,2	2,72	524,81	3 402,27	3,531	
2500	1,3	26	27,3	2,73	537,03			
3150	1,2	26,20	27,4	2,74	549,54			
4000	1	26,40	27,4	2,74	549,54			
5000	0,5	27,40	27,9	1,92	616,60			

En la Tabla 197, se recopilan los valores obtenidos tras los cálculos necesarios para la obtención del valor del aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con resina de poliéster.

Tabla 197. Valores de aislamiento global ponderado de los composites con resina de poliéster.

Composites con resina de poliéster	Rw (dB)
Yute	35,13
Lino	35,94
Cáñamo	35,49
Coco	32,21
M.T.Borra	38,85

En la Tabla 198 se recopilan los parámetros necesarios para la obtención de las frecuencias de coincidencia de los distintos composites con bioresina.

Tabla 198. Parámetros necesarios para el cálculo de la frecuencia de coincidencia.

Material	ρ (kg/m ³)	c (m/s)	ρw (kg/m ³)	h (m)	M_s (kg/m ²)	E (Pa)	μ
Yute			1 080,55	0,00510	5,51	6 984.10 ⁶	0,34
Lino			1 180,72	0,00462	5,45	4 104.10 ⁶	0,39
Cáñamo	1,20	340	1 177,80	0,00424	4,99	4 048.10 ⁶	0,38
Coco			1 029,70	0,00814	8,38	2 674.10 ⁶	0,33
M.T.Borra			1 070,80	0,00510	5,46	3 651.10 ⁶	0,39

En la Tabla 199, se recopilan los valores obtenidos tras los cálculos teóricos necesarios para la obtención del valor del aislamiento global ponderado acústico a ruido aéreo de los composites con bioresina.

Tabla 199. Valores de aislamiento acústico ponderados de los composites con bioresina.

Composites con bioresina	R _w (dB)
Yute	33,73
Lino	28,67
Cáñamo	30,54
Coco	27,93
M.T.Borra	32,37

Paredes dobles

El principio físico sobre el que se sustenta la efectividad acústica de las paredes dobles es la vibración desfasada entre las caras del cerramiento, a este principio se le conoce también como el sistema “masa-muelle-masa”, que es de gran efectividad acústica. Un planteamiento estrictamente teórico permite determinar el comportamiento acústico de las paredes dobles.

En los siguientes párrafos se van a exponer las expresiones matemáticas que se emplean para el cálculo teórico de los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de paredes dobles.

Para la realización de la obtención de las masas de las paredes se emplea la expresión (13).

$$M1 = M2 = \rho_w \cdot h \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right). \quad (13)$$

Donde:

- M1: Masa del primera pared o elemento.
- M2: Masa del segundo elemento o pared.

Para la obtención de la rigidez del medio separados entre las dos paredes (núcleo de Lana de oveja) se emplea la expresión (14).

$$K = \frac{\rho \cdot c^2}{e_{\text{cavidad}}}. \quad (14)$$

Donde:

- e: Distancia de la cavidad (m).
- K: Rigidez del medio separador distinto al aire (N/m³).

Para la obtención de la frecuencia de resonancia se debe de emplear la expresión (15).

$$f_o(\text{Hz}) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{M1 + M2}{M1 \cdot M2}\right)} \cdot K. \quad (15)$$

Donde:

- f_o: Frecuencia de resonancia (Hz).

Para frecuencias inferiores a la frecuencia de resonancia del sistema $f < f_o$. Se emplea la expresión (16).

$$R(\text{dB}) = 20 \cdot \log(M_1 + M_2) \cdot f - 48 - (\text{dBi}). \quad (16)$$

Para frecuencias superiores a la de resonancia del sistema $f > f_o$. Se emplea la expresión matemática (17).

$$R(\text{dB}) = 20 \cdot \log(M_1 + M_2) \cdot f - 48 - 10 \cdot \log \left[\left(\frac{\pi}{16 \cdot \eta^3} \right) \cdot \left(\frac{f_o}{f} \right)^4 \cdot \left(\frac{f_c}{f} \right) \cdot \left(\frac{1}{\left(1 - \left(\frac{f_c}{f} \right) \right)^{0.5}} \right)^2 \right] - (\text{dBi}). \quad (17)$$

Donde:

- M₁ y M₂: Masas superficiales de las respectivas paredes exteriores (kg/m²).
- f: Frecuencia de trabajo de la banda de tercio de octava 1 000 (Hz).
- f_c: Frecuencia de la cavidad (Hz).
- f_o: Frecuencia de resonancia (Hz).

Para la obtención de la frecuencia de cavidad se emplea la expresión (18).

$$f_c = \frac{170}{e_{\text{cavidad}}} \quad (\text{Hz}). \quad (18)$$

Donde:

- η : Factor de amortiguamiento del material.
- f_c: Frecuencia de cavidad (Hz).

En la Tabla 200, se recopilan los valores de los parámetros del espesor de las lanas de oveja M5 y premium, así como sus respectivas rigideces.

Tabla 200. Espesores y rigideces de las lanas de oveja M5 y premium.

Material	Espesor (m)	K (N/m ³)
Lana M5	0,06	2 360 166,67
Lana Premium	0,05	2 832 200

En la Tabla 201, se recopilan los valores de los parámetros del apilamiento multicapa con capas exteriores de Materia Textil Borra (bioresina) – placa de yeso laminado y núcleo central de lana premium, necesarios para el cálculo del aislamiento acústico a ruido aéreo de dicho sándwich.

Tabla 201. Parámetros necesarios para el cálculo de aislamiento acústico a ruido aéreo del apilamiento multicapa tipo sándwich Materia Textil Borra- placa de yeso laminado con lana premium.

Material	f _o (Hz)	M ₁ +M ₂ (kg/m ²)	M ₁ .M ₂ (kg/m ²)	f _c (Hz)	f(Hz)
M.T.Borra (bioresina) -PYL	136,59	18,46	70,98	3400	1 000

En la Tabla 202, se recopilan los valores de la densidad, velocidad e impedancia acústica del aire.

Tabla 202. Valores de la densidad - velocidad de propagación del sonido e impedancia acústica en el aire.

Material	ρ (kg/m ³)	c (m/s)	Z (kg/m ² .s)
Aire	1,225	340	416,50

En la Tabla 203, se recopilan los valores de los parámetros para la obtención del aislamiento acústico a ruido aéreo en tercio de octava del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra y (PYL) con lana premium.

Tabla 203. Recopilación de valores para la obtención del aislamiento acústico a ruido aéreo en la banda superior de tercio de octava.

f 1/3 octava (Hz)	20. Log (M1+M2). f	Ponderación	Ponderación aplicada (dBi)	-48	R (dB)
800	83,39	-0,80	82,59		34,59
1000	85,32	0	85,32		37,32
1250	87,26	-0,60	86,66		38,66
1600	89,41	1	90,41		42,41
2000	91,35	1,20	92,55	-48	44,55
2500	93,28	1,30	94,58		46,58
3150	95,29	1,20	96,49		48,49
4000	97,37	1	98,37		50,37
5000	99,30	0,50	99,80		51,80

En la Tabla 204, se recopilan las operaciones matemáticas utilizadas para la obtención del valor global de aislamiento acústico a ruido aéreo, para frecuencias inferiores a la frecuencia de resonancia del sistema $f < f_0$.

Tabla 204. Operaciones para la obtención del valor global ponderado para frecuencias inferiores a la frecuencia de coincidencia.

(dBi/10)	10 (dBi/10)	$\Sigma 10$ dBi/10	10 .Log $\Sigma 10$ dBi/10
3,46	2875,04	5,64	56,41
3,73	5400,87		
3,87	7349,93		
4,24	17406,18		
4,45	28478,91		
4,66	45534,80		
4,85	70645,50		
5,04	108788,60		
5,18	151496,78		

En la Tabla 205, se recopilan las operaciones matemáticas para la obtención del valor global de aislamiento acústico a ruido aéreo, para frecuencias superiores a la de resonancia del sistema $f > f_0$.

Tabla 205. Operaciones para la obtención del valor global ponderado para frecuencias superiores a la frecuencia de coincidencia.

(f_o/f)	(f_c/f)	$(f_c/f)^4$	$\left(\frac{1}{\left(1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)\right)^{0,5}}\right)^2$	η	$\left(\frac{\pi}{16 \cdot \eta^3}\right)$
0,14	3,40	0,00034	0,55	0,0337	5 130,27
$-10 \cdot \text{Log} \left(\frac{1}{\left(1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)\right)^{0,5}} \right) \cdot \left(\frac{\pi}{16 \cdot \eta^3}\right) \cdot \left(\frac{f_o}{f}\right)^4 \cdot \left(\frac{f_c}{f}\right)$					RW (dB)
-5,20					51,21

Tras la aplicación y realización de los cálculos teóricos, en la Tabla 206 se recopilan los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de los apilamientos en forma de sándwich con capas exteriores de composites de yute – Materia Textil Borra y placa de yeso laminado y con núcleo central de lana de oveja en sus versiones M5 y premium.

Tabla 206. Recopilación de los valores globales ponderados teóricos de los distintos apilamientos laminares tipo sándwich con lana M5 y premium.

Lana M5	
Apilamientos combinados	R_w (dB)
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	52,21
M.T.Borra (poliéster) + Yute (poliéster)	47,04
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	60,88
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	46,96
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	57,53
M.T.Borra (poliéster) + Yute (bioresina)	41,79
Apilamiento multicapa con placas de yeso laminado	R_w (dB)
PYL + PYL	56,31
PYL + M.T.Borra (biocomposite)	51,70
PYL + Yute (biocomposite)	49,82
PYL + M.T.Borra (poliéster)	54,45
PYL + Yute (poliéster)	55,07

Lana Premium	
Apilamientos combinados	R_w (dB)
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	50,80
M.T.Borra (poliéster) + Yute (poliéster)	53,62
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	59,49
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	50,80
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	54,20
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	56,11
M.T.Borra (poliéster) + Yute (bioresina)	48,36
Apilamiento multicapa con placas de yeso laminado	R_w (dB)
PYL + PYL	56,16
PYL + M.T.Borra (biocomposite)	51,21
PYL + Yute (biocomposite)	49,32
PYL + M.T.Borra (poliéster)	53,91
PYL + Yute (poliéster)	54,54

5. Cálculos de los laminados

Para poder realizar una comparativa entre los valores obtenidos a través del ensayo estático por medio de los extensómetros Épsilon y MFQ, el método dinámico, el programa informático eLam x², Ansys Workbench.

Hay que realizar un cálculo teórico de laminados ortotrópicos, donde se tienen que determinar las constantes globales, las matrices respectivas de rigidez local y global, así como las de flexibilidad, las matrices [A], [B] y [D] denominadas matriz de rigidez extensional, matriz de acoplamiento y matriz de rigidez de flexión respectivamente y las fuerzas y momentos resultantes en términos de las deformaciones en el plano medio y las curvaturas:

Para seguir la metodología seguida en el proceso de la obtención y verificación de los valores obtenidos en forma experimental y teórica, se va a desarrollar en el presente apartado como ejemplo de aplicación el cálculo del “green composite” lino.

Con frecuencia los datos de partida para la realización de cálculos de índole teórico en láminas o laminados, parten de una serie de parámetros conocidos como son:

- La fracción de Volumen de la fibra.
- Los coeficientes de Poisson de la fibra y de la matriz.
- El módulo longitudinal de la fibra E_f .
- El módulo longitudinal de la matriz E_m .

O en su defecto:

- El módulo de elasticidad E_1 .
- El módulo de elasticidad transversal E_2 .

En el presente cálculo, no se posee información verídica de estos parámetros. Ya que los valores de las bibliográficas de referencia, o bien dados proporcionados por los fabricantes sobre los módulos de elasticidad de las fibras no indican si se han obtenido con fibras en forma de hilo o de tejido y la cantidad de gramaje por metro cuadrado en el caso de las telas.

Para poder realizar los cálculos, se va a partir inicialmente de los parámetros de las placas de biocomposite obtenidas tras la infusión y los posteriores ensayos mecánicos y de densidad fundamentalmente.

Otros datos de partida serán el peso inicial de las capas de fibra que forman el laminado y el peso final del biocomposite una vez curado.

5.1 Cálculo del composite lino con resina de poliéster

Comprobaciones de las constantes ingenieriles globales y de las matrices de rigidez de extensión y flexibilidad del composite lino con resina de poliéster.

5.1.1 Datos de partida

En la Tabla 207, se recopilan los datos conocidos tras el pesaje de las fibras/ tejidos y la realización de los ensayos físicos y mecánicos.

Tabla 207. Recopilación primeros datos de partida.

Densidad de la matriz (g / cm ³)	1,21
Densidad del composite (g / cm ³)	1,22
Masa final del composite (g)	2 850
Masa de las láminas de fibra	1 280,40

Donde:

- M_c : Masa del composite.
- M_f : Masa de la fibra.
- ρ_M : Densidad de la matriz.
- ρ_c : Densidad del composite.

Tras la aplicación de las fórmulas recopiladas en la Tabla 207 se obtiene los valores recopilados en la Tabla 208.

Tabla 208. Recopilación de fórmulas para la obtención del volumen del composite, masa de la matriz, volumen de la matriz y volumen de las fibras.

$V_c = M_c / \rho_c$ (cm ³)	2 336,07
$M_M = M_c - M_f$ (g)	1 569,60
$V_M = M_M / \rho_M$ (cm ³)	1 297,19
$V_F = V_c - V_M$ (cm ³)	1 038,88

En las Tablas 209 y 210, en las columnas de la derecha, se recopilan los resultados obtenidos tras la aplicación de las fórmulas correspondientes (columnas de la izquierda).

En la Tabla 209, se muestra el valor de la densidad del composite lino con resina de poliéster.

Tabla 209. Valor de la densidad de la fibra de yute.

$\rho_F = M_F / V_F$ (g / cm ³)	1,23
---	------

5.1.2 Regla de las mezclas

Para la aplicación de esta expresión matemática a parte de los datos del apartado anterior, es necesario conocer los valores de los módulos de elasticidad del composite y de la matriz. Dichos valores se recopilan en la Tabla 210.

Tabla 210. Módulos de elasticidad composite y matriz de resina de poliéster.

Módulo de elasticidad composite (E _C) (MPa)	4 053
Módulo de elasticidad matriz (E _M) (MPa)	4 014,10

Obtención de la fracción de volumen de la fibra, de la matriz

Para la obtención de estos porcentajes de volumen se aplica la expresión matemática (19).

$$V_F(\%) = \frac{\frac{M_F}{\rho_F}}{\frac{M_F}{\rho_F} + \frac{M_M}{\rho_M}} \quad (19)$$

Donde el valor del porcentaje de volumen de la matriz se puede obtener aplicando la expresión (20).

$$V_F(\%) + V_M(\%) = 1 \quad (20)$$

Para la obtención de los porcentajes de masa de la fibra y de la matriz, respectivamente se aplican las siguientes expresiones matemáticas:

$$M_F(\%) = \frac{M_F}{M_C} \quad (21)$$

$$M_F(\%) + M_M(\%) = 1 \quad (22)$$

Sustituyendo en las expresiones (19) – (22) se obtienen los resultados de la Tabla 211.

Tabla 211. Resultados obtenidos de los porcentajes de volumen y masa.

V_F (%)	0,44
V_M (%)	0,55
M_F (%)	0,45
M_M (%)	0,55

Donde:

- V_F (%): Fracción volumétrica de la fibra.
- V_M (%): Fracción volumétrica de la matriz.
- M_F (%): Fracción másica de la fibra.
- M_M (%): Fracción másica de la matriz.

Una vez obtenidos estos valores se puede llevar a cabo el cálculo del módulo de elasticidad de la fibra, aplicando expresión (23)

$$E_C = V_F \cdot E_F + V_M \cdot E_M \quad (23)$$

Sustituyendo y despejando se obtiene:

$$E_F = 4\,101,57 \text{ (MPa)}.$$

5.1.3 Cálculo de las constantes locales

Módulo de elasticidad en la dirección longitudinal

Para la obtención del módulo de elasticidad en la dirección longitudinal local se emplean las expresiones (24) y (25).

$$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M \quad (24)$$

$$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M (1 - V_F) \quad (25)$$

Módulo de elasticidad en la dirección transversal

Para el cálculo del módulo de elasticidad en la dirección transversal y del módulo de cizalladura o cortadura en la dirección 1-2, se emplearán las expresiones de Halpin – Tsai (26) y (27).

$$E_2 = E_M \left(\frac{1 + \xi \eta V_F}{1 - \eta V_F} \right). \quad (26)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_F}{E_M} \right) - 1}{\left(\frac{E_F}{E_M} \right) + \xi}. \quad (27)$$

$$\xi = 2.$$

Módulo de cortadura

Para la obtención del módulo de cortadura se utiliza las expresiones (28) y (29).

$$G_{12} = G_M \frac{1 + \xi \eta V_F}{1 - \eta V_F}. \quad (28)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{G_F}{G_M} \right) - 1}{\left(\frac{G_F}{G_M} \right) + \xi}. \quad (29)$$

$$\xi = 1.$$

Previo al cálculo del módulo de cortadura en la dirección 1-2, es necesario conocer los valores de los módulos de cortadura de la fibra y de la matriz que vienen determinados por las expresiones (30) y (31).

$$G_F = \frac{E_F}{2 \cdot (1 + \mu_F)}. \quad (30)$$

Donde:

- G_F : Módulo de cizalladura de la fibra.
- μ_F : Coeficiente de poisson de la fibra.

$$G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)}. \quad (31)$$

Donde:

- G_F : Módulo de cizalladura de la fibra.
- μ_F : Coeficiente de poisson de la fibra.

Coeficientes de poisson

Para la obtención de los coeficientes de poisson en la dirección longitudinal 1-2 y 2-1 se emplean las expresiones (32) - (34).

$$\mu_{12} = \mu_F \cdot V_F + \mu_M \cdot V_M. \quad (32)$$

$$\mu_{12} = M_F \cdot V_F + \mu_M (1 - V_F). \quad (33)$$

$$\mu_{21} = \mu_{12} \cdot \left(\frac{E_2}{E_1} \right). \quad (34)$$

Sustituyendo y operando en todas las ecuaciones anteriores se obtienen los resultados de la Tabla 212.

Tabla 212. Recopilación de las constantes locales del laminado.

$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M$ (MPa).	4 053
$\eta = \frac{\left(\frac{E_F}{E_M}\right)^{-1}}{\left(\frac{E_F}{E_M}\right)^{-1} + \xi} \quad \xi = 2$	0,0072
$E_2 = E_M \left(\frac{1 + \xi \eta V_F}{1 - \eta V_F} \right)$ (MPa)	4 052,84
$G_F = \frac{E_F}{2 \cdot (1 + \mu_F)}$ (MPa)	1 541,94
$G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)}$ (MPa)	1 454,38
$\eta = \frac{\left(\frac{G_F}{G_M}\right)^{-1}}{\left(\frac{G_F}{G_M}\right)^{-1} + \xi} \quad \xi = 1$	0,0292
$G_{12} = G_M \frac{1 + \xi \eta V_F}{1 - \eta V_F}$ (MPa)	1.492,68
$\mu_{12} = \mu_F \cdot V_F + \mu_M \cdot V_M$	0,3578
$\mu_{21} = \mu_{12} \cdot \left(\frac{E_2}{E_1} \right)$	0,3578

Recopilación de las constantes ingenieriles locales

En la Tabla 213, se recopilan los valores de las constantes ingenieriles locales.

Tabla 213. Recopilación de constantes locales.

Constantes ingenieriles globales	
E_1 (MPa)	4 053
E_2 (MPa)	4 052,84
G_{12} (MPa)	1 492,68
μ_{12}	0,36
μ_{21}	0,36

5.1.4 Cálculo de las matrices de rigidez locales y globales del laminado

El siguiente paso consiste en el cálculo de las matrices Q correspondiente a todas las orientaciones presentes en el laminado, Figura 270.

Para obtener el valor de las orientaciones en el laminado es preciso realizar el cálculo de las matrices de tensiones y transformaciones. Estas matrices establecen las relaciones entre las tensiones en las direcciones 1-2 y las direcciones X-Y. De la misma manera, permiten establecer las relaciones entre las deformaciones 1-2 y las deformaciones X-Y. Pero la capa puede ser cargada en una dirección arbitraria.

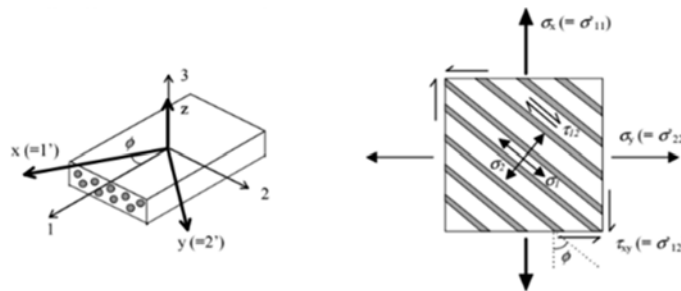


Figura 270. Direcciones arbitrarias de una capa.

Matriz de tensiones locales

Para la obtención de la matriz de tensiones se aplica la expresión (35).

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ \frac{\mu_{12} E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Sustituyendo en (35):

$$[Q] = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0 \\ 0 & 0 & 1\,492,68 \end{bmatrix} (\text{MPa}).$$

Matriz de transformación de tensiones globales

La matriz de transformación de tensión, como la matriz de transformación de deformaciones, depende exclusivamente del ángulo formado por las fibras.

En la fibra del lino las capas tienen una orientación con respecto al eje de tracción de 45° . En las matrices de tres por tres; los términos que intervienen en las mismas corresponden a las siglas S y C.

Donde dichas siglas corresponden a los términos:

$$C = \cos \theta.$$

$$S = \sin \theta.$$

Matriz de transformación de tensión (36)

$$[T\sigma] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2SC \\ S^2 & C^2 & -2SC \\ -2CS & SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Valores de los términos de la matriz de transformación de tensión para un ángulo de 45° .

$$[T\sigma] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -1 & 0,5 & 0 \end{bmatrix}.$$

Matriz de transformación de deformaciones

Viene expresada por la expresión matricial (37).

$$[T\varepsilon] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & SC \\ S^2 & C^2 & -SC \\ -2CS & 2SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Valores de los términos de la matriz de transformación de deformaciones para un ángulo de 45°.

$$[T\varepsilon] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Matriz de transformación de tensiones globales

La matriz de transformación de tensión, como la matriz de transformación de deformaciones, depende exclusivamente del ángulo formado por las fibras.

En la fibra del lino las capas tienen una orientación con respecto al eje de tracción de 45°. En las matrices de tres por tres; los términos que intervienen en las mismas corresponden a las siglas S y C.

Donde dichas siglas corresponden a los términos:

$$C = \cos \theta.$$

$$S = \sin \theta.$$

Sustituyendo y operando:

$$[T\sigma] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2SC \\ S^2 & C^2 & -2SC \\ -2CS & SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix}.$$

Valores de la matriz de transformación de tensiones para un ángulo de 45°.

$$[T\sigma] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -1 & 0,5 & 0 \end{bmatrix}.$$

Matriz de transformación de deformaciones

Viene expresada por la siguiente matriz:

$$[T\varepsilon] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & SC \\ S^2 & C^2 & -SC \\ -2CS & 2SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix}.$$

Valores de la matriz de transformación de deformaciones para un ángulo de 45°.

$$[T\varepsilon] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Matriz inversa de transformación de deformaciones

La matriz inversa de transformación de deformaciones viene expresada por la matriz (38).

$$[T\sigma]^{-1} = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & -2CS \\ S^2 & C^2 & 2CS \\ CS & -CS & C^2 - S^2 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Sustituyendo por los valores del ángulo de 45°:

$$[T\sigma]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \end{bmatrix}.$$

Cálculo de la matriz de rigidez en los ejes globales

Viene determinada por el siguiente producto de matrices (39).

$$[\bar{Q}] = [T_\varepsilon(\theta)] \cdot [Q] \cdot [T_\sigma(\theta)]^{-1}. \quad (39)$$

Operando en el producto de las matrices de forma ordenada según la expresión matemática (39).

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix} \text{ (MPa)}.$$

Distintos métodos para la obtención del cálculo de la matriz de rigidez global

Una versión distinta para la obtención de la matriz de rigidez global es utilizando la matriz de Reuter (40).

$$[\bar{Q}] = [T_\sigma(\theta)]^{-1} [Q] [R] [T_\sigma(\theta)] [R]^{-1}. \quad (40)$$

Donde $[R]$ y $[R]^{-1}$ Toman los siguientes valores matriciales:

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

$$[R]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

Sustituyendo cada matriz por sus valores y realizando el producto de ellas de forma ordenada siguiendo la secuencia de la fórmula se obtiene el valor de la matriz de rigidez en la dirección de los ejes globales.

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix} \text{ (MPa)}.$$

Comprobación

Teniendo en cuenta los valores trigonométricos del ángulo de direccionamiento de las fibras, con respecto a los ejes Tabla 214.

Tabla 214. Valores de las principales razones trigonométricas para un ángulo de 45°.

$-2 \cos 45^\circ \sin 45^\circ$	-1	$\sin 45^\circ$	0,70
$2 \cos 45^\circ \sin 45^\circ$	1	$\cos 45^\circ$	0,70
$\cos 45^\circ \sin 45^\circ$	0,50	$\cos^3 45^\circ$	0,35
$-\cos 45^\circ \sin 45^\circ$	-0,50	$\sin^3 45^\circ$	0,35
$\cos^2 45^\circ$	0,50	$\cos^4 45^\circ$	0,25
$\sin^2 45^\circ$	0,50	$\sin^4 45^\circ$	0,25
$\cos^2 45^\circ - \sin^2 45^\circ$	0	$\cos^2 45^\circ \cdot \sin^2 45^\circ$	0,25
$\cos^4 45^\circ \cdot \sin^4 45^\circ$	0,06	$\cos^4 45^\circ + \sin^4 45^\circ$	0,50

Una vez conocidos los valores trigonométricos y el valor de la matriz de rigidez local $[Q]$ se aplican las expresiones matemáticas (41) – (46).

$$[\bar{Q}_{11}] = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta. \quad (41)$$

$$[\bar{Q}_{22}] = Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta. \quad (42)$$

$$[\bar{Q}_{12}] = (Q_{11} + Q_{22} - 4 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12}(\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \quad (43)$$

$$[\bar{Q}_{16}] = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta. \quad (44)$$

$$[\bar{Q}_{26}] = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta. \quad (45)$$

$$[\bar{Q}_{66}] = (Q_{11} + Q_{22} - 2 Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta \cos^4 \theta). \quad (46)$$

Donde el valor del ángulo $\theta = 45^\circ$.

Los valores obtenidos tras la realización de las operaciones de calculo pertinentes se muestran a continuación:

$$[\bar{Q}_{11}] = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta = 4\,647,97 \text{ (MPa)}.$$

$$[\bar{Q}_{22}] = Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta = 1\,662,60 \text{ (MPa)}.$$

$$[\bar{Q}_{12}] = (Q_{11} + Q_{22} - 4 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) = 4\,647,97 \text{ (MPa)}.$$

$$[\bar{Q}_{16}] = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta = 0,044 \text{ (MPa)}.$$

$$[\bar{Q}_{26}] = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2 Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta = 0,044 \text{ (MPa)}.$$

$$[\bar{Q}_{66}] = (Q_{11} + Q_{22} - 2 Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta \cos^4 \theta) = 1\,492,50 \text{ (MPa)}.$$

Sabiendo que el orden que ocupan los terminos de la matriz de rigidez global viene determinada por la ecuación matriacial (47).

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} [\bar{Q}_{11}] & [\bar{Q}_{12}] & [\bar{Q}_{16}] \\ [\bar{Q}_{12}] & [\bar{Q}_{22}] & [\bar{Q}_{26}] \\ [\bar{Q}_{16}] & [\bar{Q}_{26}] & [\bar{Q}_{66}] \end{bmatrix}. \quad (47)$$

Sustituyendo en (47).

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix} \text{ (MPa)}.$$

5.1.5 Cálculo de las matrices de flexibilidad local y global

Como el ángulo de las fibras con respecto al eje es distinto de cero ya no se cumple la condición de:

$$[S] \neq [\bar{S}].$$

Donde los valores de los términos matriciales de la matriz de flexibilidad local vienen determinados por la expresión (48)

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ \frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}. \quad (48)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0,0002467308 & -0,0000882715 & 0 \\ -0,0000882715 & 0,00024673 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0006699346 \end{bmatrix} (1/\text{MPa}).$$

Matriz de flexibilidad global

La matriz de flexibilidad global viene determinada por la expresión (49).

$$[\bar{S}] = [T_\varepsilon]^{-1} \cdot [S] \cdot [T_\sigma]. \quad (49)$$

Sustituyendo:

$$[T_\varepsilon]^{-1} = \begin{vmatrix} C^2 & S^2 & -S C \\ S^2 & C^2 & S C \\ 2 C S & -2 S C & C^2 - S^2 \end{vmatrix}$$

Valores de la matriz de transformación de deformaciones para un ángulo de 45°.

$$[T_\varepsilon]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Valores de la matriz de transformación de tensiones para un ángulo de 45°.

$$[T\sigma] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2SC \\ S^2 & C^2 & -2SC \\ -C\theta S\theta & SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix}$$

Sustituyendo y operando:

$$[T\sigma] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix}.$$

Resolviendo el producto matricial de forma ordenada según la expresión (49) se obtiene la matriz de flexibilidad global:

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} 0,0002467157 & -0,0000882516 & -0,0000000048 \\ -0,0000882516 & 0,0002467157 & -0,0000000048 \\ -0,0000000048 & -0,0000000048 & 0,0006700142 \end{bmatrix} (1/\text{MPa}).$$

Comprobación

Teniendo en cuenta los valores trigonométricos del ángulo de direccionamiento de las fibras, con respecto a los ejes Tabla 215.

Tabla 215. Valores de las principales razones trigonométricas para un ángulo de 45°.

$-2 \cos 45^\circ \sin 45^\circ$	-1	$\sin 45^\circ$	0,70
$2 \cos 45^\circ \sin 45^\circ$	1	$\cos 45^\circ$	0,70
$\cos 45^\circ \sin 45^\circ$	0,50	$\cos^3 45^\circ$	0,35
$-\cos 45^\circ \sin 45^\circ$	- 0,50	$\sin^3 45^\circ$	0,35
$\cos^2 45^\circ$	0,50	$\cos^4 45^\circ$	0,25
$\sin^2 45^\circ$	0,50	$\sin^4 45^\circ$	0,25
$\cos^2 45^\circ - \sin 45^\circ{}^2$	0	$\cos^2 45^\circ \cdot \sin 45^\circ{}^2$	0,25
$\cos^4 45^\circ \cdot \sin 45^\circ{}^4$	0,06	$\cos^4 45^\circ + \sin^4 0^\circ$	0,50

En las expresiones (50) – (55) se exponen las fórmulas de las razones trigonométricas utilizadas en la obtención de los términos de la matriz de flexibilidad global.

Donde:

$$[\bar{S}_{11}] = (S_{11} \cdot \cos^4 \theta) + (2 S_{12} + S_{66}) (\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta) + (S_{22} \cdot \sin^4 \theta). \quad (50)$$

$$[\bar{S}_{22}] = (S_{11} \cdot \sin^4 \theta) + (2S_{12} + S_{66})(\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta) + (S_{22} \cdot \cos^4 \theta). \quad (51)$$

$$[\bar{S}_{12}] = (S_{11} + S_{22} - S_{66}) (\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta) + S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta). \quad (52)$$

$$[\bar{S}_{16}] = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})(\sin \theta \cdot \cos^3 \theta) + (2S_{12} - 2S_{22} + S_{66}) (\sin^3 \theta \cos \theta). \quad (53)$$

$$[\bar{S}_{26}] = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})(\sin^3 \theta \cos \theta) + (2S_{12} - 2S_{22} + S_{66})(\sin \theta \cdot \cos^3 \theta). \quad (54)$$

$$[\bar{S}_{66}] = 2(2S_{11} + 2 S_{22} - 4 S_{12} - S_{66}) (\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{66}) (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta). \quad (55)$$

Sustituyendo en las expresiones matriciales (50) – (55):

$$[\bar{S}_{11}] = \mathbf{0,0002467308 (1/MPa)}.$$

$$[\bar{S}_{22}] = \mathbf{0,0002467157 (1/MPa)}.$$

$$[\bar{S}_{12}] = \mathbf{-0,0000882516 (1/MPa)}.$$

$$[\bar{S}_{16}] = \mathbf{-0,0000000048 (1/MPa)}.$$

$$[\bar{S}_{26}] = \mathbf{-0,0000000048 (1/MPa)}.$$

$$[\bar{S}_{66}] = \mathbf{0,0006700142 (1/MPa)}.$$

Aplicando la fórmula de la matriz de flexibilidad global (56):

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix}. \quad (56)$$

Sustituyendo en (56):

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} \mathbf{0,0002467157} & \mathbf{-0,0000882516} & \mathbf{-0,0000000048} \\ \mathbf{-0,0000882516} & \mathbf{0,0002467157} & \mathbf{-0,0000000048} \\ \mathbf{-0,0000000048} & \mathbf{-0,0000000048} & \mathbf{0,0006700142} \end{bmatrix} (\mathbf{1/MPa}).$$

5.2 Cálculo del apilamiento del composite con resina de poliéster

5.2.1 Cálculo de la matriz de rigidez extensional

Como el apilamiento del laminado está formado por seis láminas del mismo espesor y del mismo material se aplicará la expresión (57), para el cálculo de la matriz de flexibilidad.

$$[A] = \sum_{K=1}^6 t_K [\bar{Q}]_K \quad t([\bar{Q}]_1 + [\bar{Q}]_2 + [\bar{Q}]_3 + [\bar{Q}]_4 + [\bar{Q}]_5 + [\bar{Q}]_6) \quad 6 \cdot t([\bar{Q}]_1). \quad (57)$$

Donde t es el espesor.

$$t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t_5 = t_6.$$

$$[\bar{Q}]_1 = [\bar{Q}]_2 = [\bar{Q}]_3 = [\bar{Q}]_4 = [\bar{Q}]_5 = [\bar{Q}]_6.$$

Sustituyendo en (57) se obtiene la fórmula de la matriz de rigidez extensional (58).

$$[A] = 6 \cdot t \cdot [\bar{Q}]_1. \quad (58)$$

Conociendo que el espesor individual de cada lámina vale 0,80 (mm) que es equivalente a 0,00080 (m).

$$[A] = 6 \cdot t \cdot [\bar{Q}]_1 = 0,0048 \cdot \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix}.$$

Operando:

$$[A] = \begin{bmatrix} 22,31 & 7,98 & 0,0002 \\ 7,98 & 22,31 & 0,0002 \\ 0,0002 & 0,0002 & 7,16 \end{bmatrix} \text{ (MPa} \cdot \text{m)}.$$

5.2.2 Cálculo de la matriz normalizada

La expresión matricial de la matriz normalizada queda reflejada en (59).

$$[A^*] = \frac{[A]}{t.k} = \frac{t.k \cdot [\bar{Q}]}{t.k} = [\bar{Q}]. \quad (59)$$

Como para este apilamiento:

$$[A^*] = [\bar{Q}].$$

Sustituyendo por la expresión (47):

$$[A^*] = [\bar{Q}] = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix} (\text{MPa}).$$

5.2.3 Cálculo de la inversa de la matriz plana normalizada

La matriz inversa de la matriz plana normalizada se representa por la sigla $[a^*]$.

Y la disposición de sus términos viene determinada por la matriz (60).

$$[a^*] = \begin{bmatrix} a^*_{11} & a^*_{12} & a^*_{16} \\ a^*_{21} & a^*_{22} & a^*_{26} \\ a^*_{16} & a^*_{26} & a^*_{66} \end{bmatrix}. \quad (60)$$

Sustituyendo en los términos por sus valores respectivos:

$$[a^*] = \begin{bmatrix} a^*_{11} & a^*_{12} & a^*_{16} \\ a^*_{21} & a^*_{22} & a^*_{26} \\ a^*_{16} & a^*_{26} & a^*_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,000246716 & -0,000088252 & -0,000000005 \\ -0,000088252 & 0,000246716 & -0,000000005 \\ -0,000000005 & -0,000000005 & 0,000670014 \end{bmatrix} (1/\text{MPa}).$$

Que como se puede observar corresponden a los términos de $[\bar{S}]$.

$$[a^*] = [\bar{S}] = \begin{bmatrix} 0,0002467157 & -0,0000882516 & -0,0000000048 \\ -0,0000882516 & 0,0002467157 & -0,0000000048 \\ -0,0000000048 & -0,0000000048 & 0,0006700142 \end{bmatrix} (1/\text{MPa}).$$

5.2.4 Cálculo de las constantes ingenieriles globales

Las relaciones entre los términos de la inversa de la matriz plana normalizan y las constantes ingenieriles globales vienen determinadas por las expresiones (61) - (65).

$$\bar{E}_X = \frac{1}{a^*_{11}} . \quad (61)$$

$$\bar{E}_Y = \frac{1}{a^*_{22}} . \quad (62)$$

$$\bar{G}_{XY} = \frac{1}{a^*_{66}} . \quad (63)$$

$$\bar{\mu}_{XY} = - a^*_{21} \cdot \bar{E}_Y . \quad (64)$$

$$\bar{\mu}_{YX} = - \frac{a^*_{12}}{a^*_{22}} . \quad (65)$$

Sustituyendo en las expresiones (61) – (65) se obtienen los valores de las constantes ingenieriles globales, Tabla 216.

Tabla 216. Recopilación de las constantes ingenieriles globales del laminado.

Constantes ingenieriles globales	
$\bar{E}_X = \frac{1}{a^*_{11}} \text{ (MPa)}$	4 053,24
$\bar{E}_Y = \frac{1}{a^*_{22}} \text{ (MPa)}$	4 053,24
$\bar{G}_{XY} = \frac{1}{a^*_{66}} \text{ (MPa)}$	1 492,50
$\bar{\mu}_{XY} = - a^*_{21} \cdot \bar{E}_Y$	0,35
$\bar{\mu}_{YX} = - \frac{a^*_{12}}{a^*_{22}}$	0,35

5.2.5 Cálculo de la matriz de rigidez flexibilidad

La primera operación para la obtención de la matriz [D], será obtener las distancias de los espesores de cada lámina a su eje de simetría.

En este caso concreto se dispone de seis láminas que son idénticas en espesor y material.

En la Figura 271, se muestran las distancias al eje de simetría de las láminas inferiores.

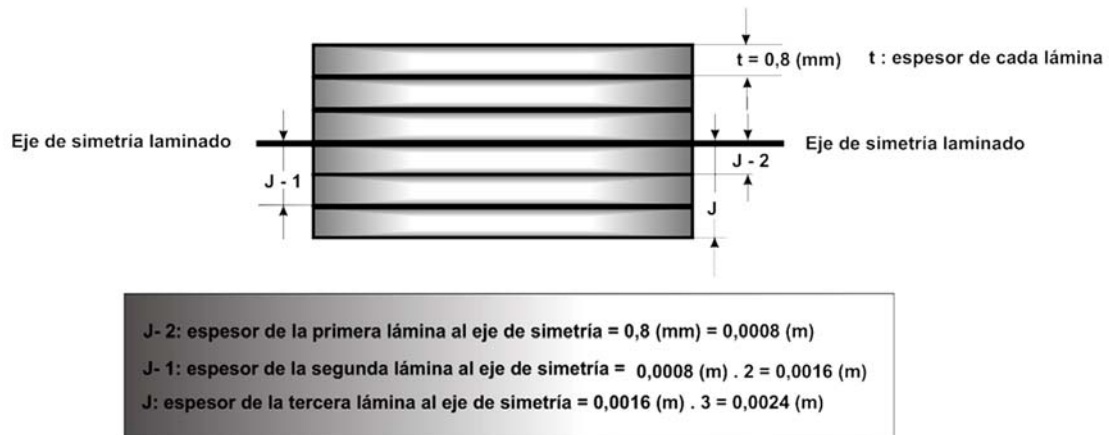


Figura 271. Distancias las láminas inferiores al eje de simetría del laminado.

La fórmula para realizar el cálculo de la matriz viene determinada por la expresión (66).

$$[D] = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{m/2} [Q]^{(k)} \left[(j^{(k)})^3 - (j^{(k-1)})^3 \right]. \quad (66)$$

Donde:

$$\left[(j^{(k)})^3 - (j^{(k-1)})^3 \right].$$

Es la distancia entre la lámina J y la lámina inmediatamente inferior a esta, es decir $J - 1$.

Operando de forma ordenada.

Distancia al eje de simetría laminado (m)	
J	0,0024
J - 1	0,0016
J - 2	0,00080

Una vez obtenidos estos valores se elevan al cubo:

Distancia al eje de simetría laminado (m)	
$(J)^3$	1,38 E-08
$(J - 1)^3$	4,10 E-09
$(J - 2)^3$	5,12 E-10

A continuación, se realiza la diferencia entre las láminas contiguas:

Distancia al eje de simetría laminado (m)	
$(J)^3 - (J - 1)^3$	9,73 E-09
$(J - 1)^3 - (J - 2)^3$	3,58 E-09
$(J - 2)^3 - 0$	5,12 E-10

Finalmente, en la Tabla 217, se recopilan los valores por los que hay que multiplicar a las matrices de rigidez:

Tabla 217. Valores por los que hay que multiplicar a las matrices de rigidez.

Distancia al eje de simetría laminado (m)	
$2 \cdot [(J)^3 - (J - 1)^3] / 3$	6,49 E-09
$2 \cdot [(J - 1)^3 - (J - 2)^3] / 3$	2,39 E-09
$2 \cdot [(J - 2)^3 - 0] / 3$	3,41 E-10

El término 2 de las ecuaciones de la Tabla 219 es debido a que son dos las láminas que se encuentran a la misma distancia del eje de simetría.

En la Figura 272 se representan las láminas y sus matrices de rigidez local y global.



Figura 272. Disposiciones de las láminas y sus matrices de rigidez.

Viendo la disposición del laminado, se cumple que:

$$[\bar{Q}]_1 = [\bar{Q}]_6 .$$

$$[\bar{Q}]_2 = [\bar{Q}]_5 .$$

$$[\bar{Q}]_3 = [\bar{Q}]_4 .$$

Lo que implica:

$$[\bar{Q}]_1 = [\bar{Q}]_6 = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix} \text{ (MPa).}$$

$$[\bar{Q}]_2 = [\bar{Q}]_5 = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix} \text{ (MPa).}$$

$$[\bar{Q}]_3 = [\bar{Q}]_4 = \begin{bmatrix} 4\,647,88 & 11\,662,78 & 0,04479512 \\ 1\,662,78 & 4\,647,70 & 0,04479512 \\ 0,04479512 & 0,04479512 & 1\,492,68 \end{bmatrix} \text{ (MPa).}$$

Operando:

$$[D]_1 = ([\bar{Q}]_1 = [\bar{Q}]_6) \cdot 2 \cdot \frac{[(J)^3 - (J-1)^3]}{3} = ([\bar{Q}]_1 = [\bar{Q}]_6) \cdot 6,49E-09 .$$

$$[D]_1 = \begin{bmatrix} 0,0000301 & 0,0000108 & 0 \\ 0,0000108 & 0,0000301 & 0 \\ 0 & 0 & 0,000097 \end{bmatrix} \text{ (MPa} \cdot \text{m}^3 \text{).}$$

$$[D]_2 = ([\bar{Q}]_2 = [\bar{Q}]_5) \cdot 2 \cdot \frac{[(J-1)^3 - (J-2)^3]}{3} = ([\bar{Q}]_1 = [\bar{Q}]_6) \cdot 2,39E-09 .$$

$$[D]_2 = \begin{bmatrix} 0,0000111 & 0,0000040 & 0 \\ 0,0000040 & 0,0000111 & 0 \\ 0 & 0 & 0,000036 \end{bmatrix} \text{ (MPa} \cdot \text{m}^3 \text{).}$$

$$[D]_3 = ([\bar{Q}]_3 = [\bar{Q}]_4) \cdot 2 \cdot \frac{[(J-2)^3 - (0)^3]}{3} = ([\bar{Q}]_3 = [\bar{Q}]_4) \cdot 3,41E-10 .$$

$$[D]_3 = \begin{bmatrix} 0,0000016 & 0,0000006 & 0 \\ 0,0000006 & 0,0000016 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0000005 \end{bmatrix} \text{ (MPa} \cdot \text{m}^3 \text{).}$$

Para la obtención de la matriz D, habrá que realizar el sumatorio de las tres matrices:

$$[D] = [D]_1 + [D]_2 + [D]_3 .$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0,0000428357 & 0,0000153226 & 0,0000000004 \\ 0,0000153226 & 0,0000428357 & 0,0000000004 \\ 0,0000000004 & 0,0000000004 & 0,0000137549 \end{bmatrix} \text{ (MPa} \cdot \text{m}^3 \text{).}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 42,835 & 15,322 & 0,0004129 \\ 15,322 & 42,835 & 0,0004129 \\ 0,0004129 & 0,0004129 & 13,754 \end{bmatrix} (\text{Pa} \cdot \text{m}^3).$$

5.2.6 Cálculo de las tensiones – deformaciones

Para la realización del cálculo se parte del dato de la fuerza aplicada en el ensayo de tracción de los distintos composites, dato obtenido en el ensayo de tracción en la máquina universal con accesorios extensométricos.

Para el caso del composite lino con resina de poliéster el valor de la fuerza vale:

$$F = 9\,552 \text{ (N)}.$$

Área transversal:

$$A = \text{Ancho} \cdot \text{espesor} = 26,2 \text{ (mm)} \cdot 4,65 \text{ (mm)} = 121,83 \text{ (mm}^2\text{)}.$$

Resistencia máxima a la tracción:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{9\,552}{121,83} = 78,40 \text{ (MPa)}.$$

Una vez conocida la resistencia máxima a la tracción aplicando la matriz de la flexibilidad global se obtienen los valores de las deformaciones.

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} 0,0002467157 & -0,0000882516 & -0,0000000048 \\ -0,0000882516 & 0,0002467157 & -0,0000000048 \\ -0,0000000048 & -0,0000000048 & 0,0006700142 \end{bmatrix}.$$

Aplicando la siguiente relación entre matrices:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{bmatrix}.$$

Sustituyendo y operando:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0002467157 & -0,0000882516 & -0,0000000048 \\ -0,0000882516 & 0,0002467157 & -0,0000000048 \\ -0,0000000048 & -0,0000000048 & 0,0006700142 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 78,40 \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00029011 & 0 & 0 \\ -0,0010377 & 0 & 0 \\ -0,0000001 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0193436 \\ -0,0069193 \\ -0,0000004 \end{bmatrix}.$$

Donde los valores negativos de las deformaciones significan que se ha producido contracción.

5.3 Recopilación de resultados teóricos de los green composites

En las Tablas 218 - 220 se exponen todos los resultados obtenidos de los “green composites” con bioresina Super Sap CLR.

Tabla 218. Recopilación de resultados matemáticos teóricos de las constantes locales – globales de composites con bioresina Super sap CLR.

Materiales	E_f (MPa)	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	μ_f	μ_{12}	μ_{21}	E_x (MPa)	E_y (MPa)	G_{xy} (MPa)	μ_{xy}	μ_{yx}
Yute	11 776	6 984	5 600	1 936	0,34	0,34	0,27	6 984	5 600	1 936	0,34	0,27
Lino	5 260	4 104	3 978	1 411	0,44	0,39	0,38	3 954	3 954	1 456	0,40	0,34
Coco	2 050	2 674	2 649	968	0,38	0,36	0,35	2 674	2 649	968	0,36	0,35
Cáñamo	6 443	4 048	3 828	1 411	0,27	0,33	0,30	4 048	3 828	1 411	0,33	0,30
M T (Borra)	5 133	3 651	3 559	1 271	0,47	0,39	0,38	3 651	3 559	1 271	0,39	0,38

Tabla 219. Recopilación de las densidades – fracciones de masa, volumen y módulos de elasticidad y coeficiente de poisson de la matriz de los composites con bioresina.

Magnitudes	Yute	Lino	Coco	Cáñamo	M.T.Borra
Densidad Fibra (g / cm ³)	1,025	1,24	0,67	1,22	0,94
Densidad Matriz(g / cm ³)	1,126				
Fracción masa Fibra (%)	0,43	0,51	0,22	0,32	0,27
Fracción masa Matriz (%)	0,57	0,49	0,78	0,68	0,73
Volumen de Fibras (%)	0,45	0,48	0,33	0,30	0,30
Módulo elasticidad Matriz (MPa)	3 000				
Módulo Poisson Matriz	0,35				

Tabla 220. Valores de tensiones – deformaciones de los composites con bioresina.

Magnitudes	Yute	Lino	Coco	Cáñamo	M.T.Borra
σ_x (MPa)	124,06	78,54	20,78	61,52	59,87
ε_x (mm)	0,01776	0,01986	0,00777	0,01519	0,01686
ε_y (mm)	-0,00613	-0,00796	-0,00280	-0,00494	-0,00656
γ_{xy} (mm)	0	-0,00030	0	0	0

5.4 Resultados teóricos de los composites con resina de poliéster

En las Tablas 221 – 223, se exponen todos los resultados obtenidos de los composites con resina de Poliéster.

Tabla 221. Recopilación de resultados matemáticos teóricos de las constantes locales – globales de composites con resina de Poliéster.

Material	E_f (MPa)	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	μ_f	μ_{12}	μ_{21}	E_x (MPa)	E_y (MPa)	G_{xy} (MPa)	μ_{xy}	μ_{yx}
Yute	7 530	5 697	5 475	2 077	0,23	0,29	0,28	5.697	5 475	2 077	0,29	0,28
Lino	4 102	4 053	4 053	1 493	0,33	0,36	0,36	4 053	4 053	1 492	0,36	0,35
Coco	2 197	2 960	2 730	935	0,37	0,35	0,35	2 960	2 730	935	0,35	0,35
Cáñamo	5 661	4 571	4 525	1 617	0,42	0,39	0,39	4 571	4 525	1 641	0,39	0,39
M T. Borra	2 555	3 600	3 561	1 280	0,39	0,38	0,38	3 600	3 561	1 280	0,38	0,38

Tabla 222. Recopilación de resultados de los composites con resina de poliéster.

Magnitudes	Yute	Lino	Coco	Cáñamo	M.T.Borra
Densidad Fibra (g/cm ³)	1,02	1,23	0,601	0,97	1,28
Densidad Matriz(g/cm ³)	1,21				
Fracción masa Fibra (%)	0,44	0,45	0,19	0,29	0,30
Fracción masa Matriz (%)	0,56	0,55	0,81	0,71	0,70
Volumen de Fibras (%)	0,48	0,44	0,33	0,33	0,28
Módulo elasticidad Matriz (MPa)	4 014				
Módulo Poisson Matriz	0,38				

Tabla 223. Valores de tensiones – deformaciones de los composites con resina de poliéster.

Magnitudes	Yute	Lino	Coco	Cáñamo	M.T.Borra
σ_x (MPa)	103,24	78,40	15,62	45,81	56,94

ε_X (mm)	0,01812	0,01934	0,00528	0,01012	0,01581
ε_Y (mm)	-0,00531	-0,00691	-0,00197	-0,00394	-0,00605
γ_{XY} (mm)	0	-0,0000004	0	0	0

5.5 Recopilación de resultados en forma gráfica de los composites con resina de poliéster

En las Figuras 273 -280, se representan los valores fundamentales de los parámetros obtenidos de forma teórica de los distintos composites con resina de poliéster.

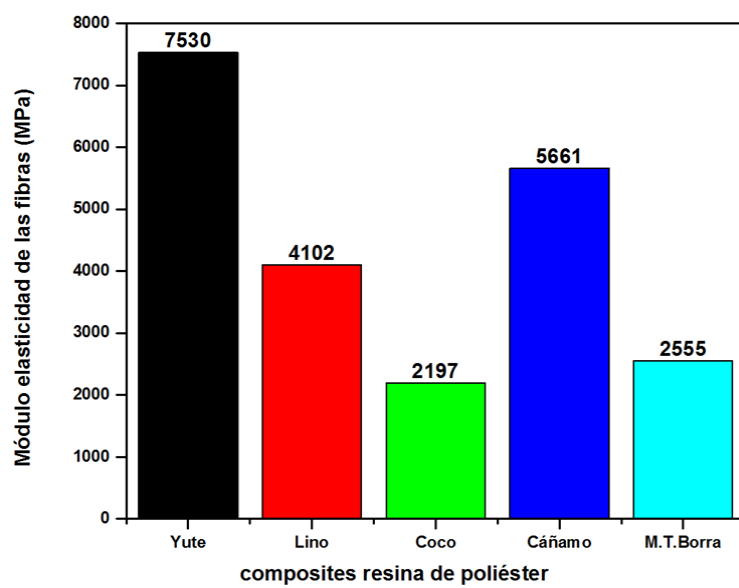


Figura 273. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad de las fibras para los composites con resina de poliéster.

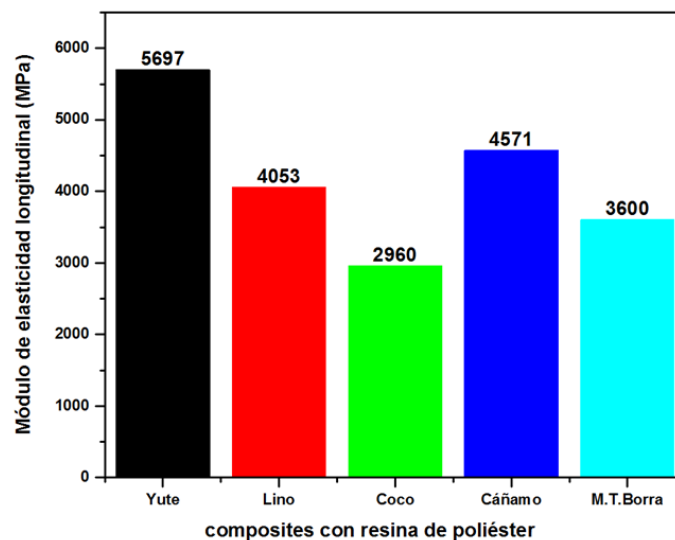


Figura 274. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad longitudinales para los composites con resina de poliéster.

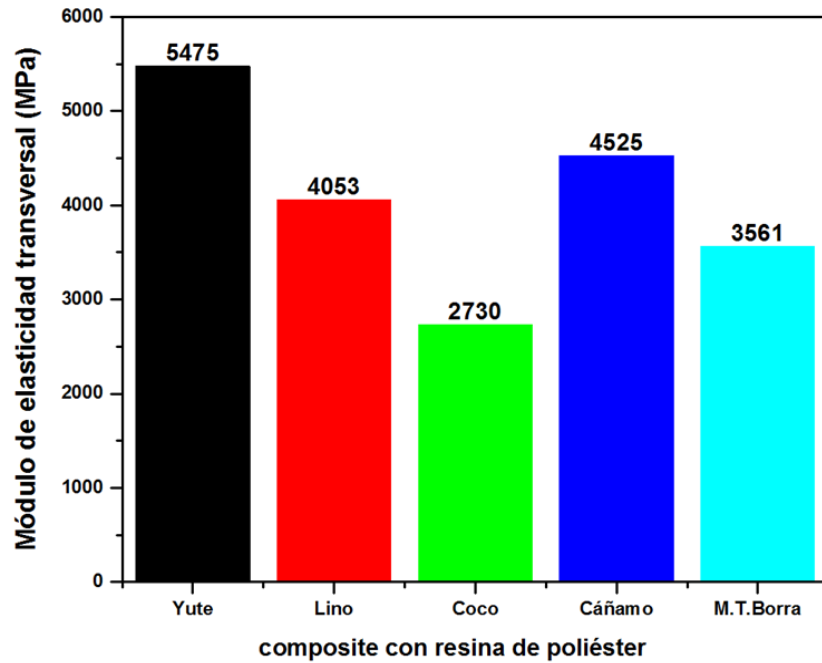


Figura 275. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad transversales para los composites con resina de poliéster.

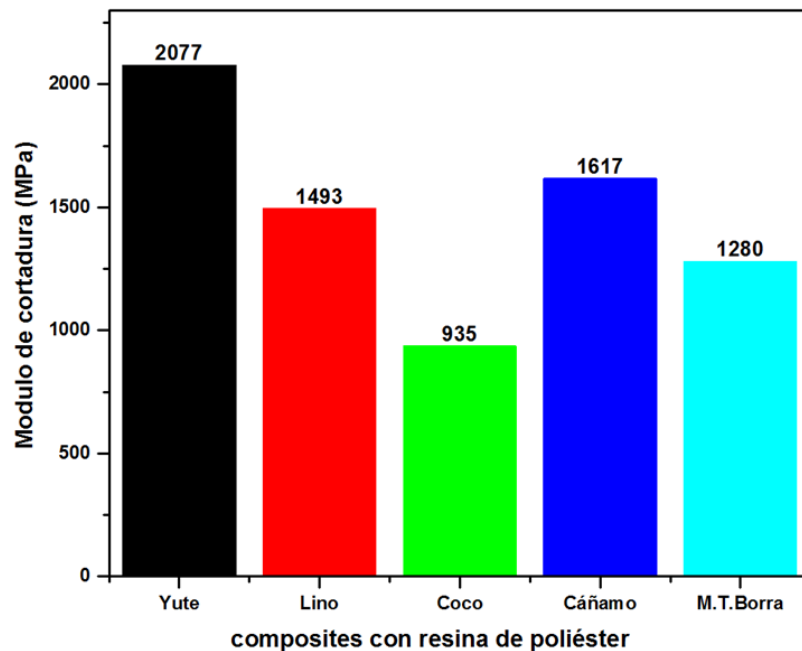


Figura 276. Comparativa de los distintos valores de los módulos de cortadura para los composites con resina de poliéster.

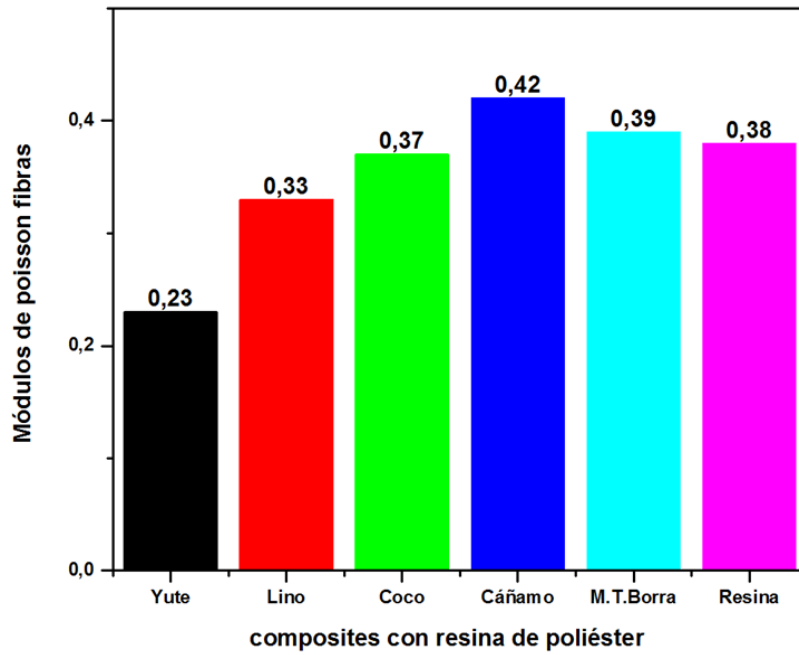


Figura 277. Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson de las fibras para los composites con resina de poliéster.

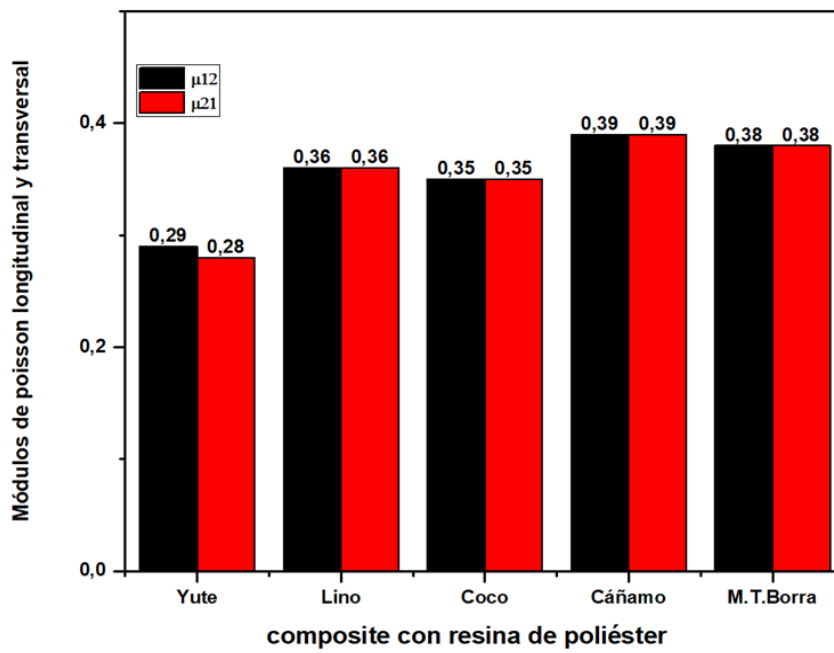


Figura 278. Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson μ_{12} y μ_{21} para los composites con resina de poliéster.

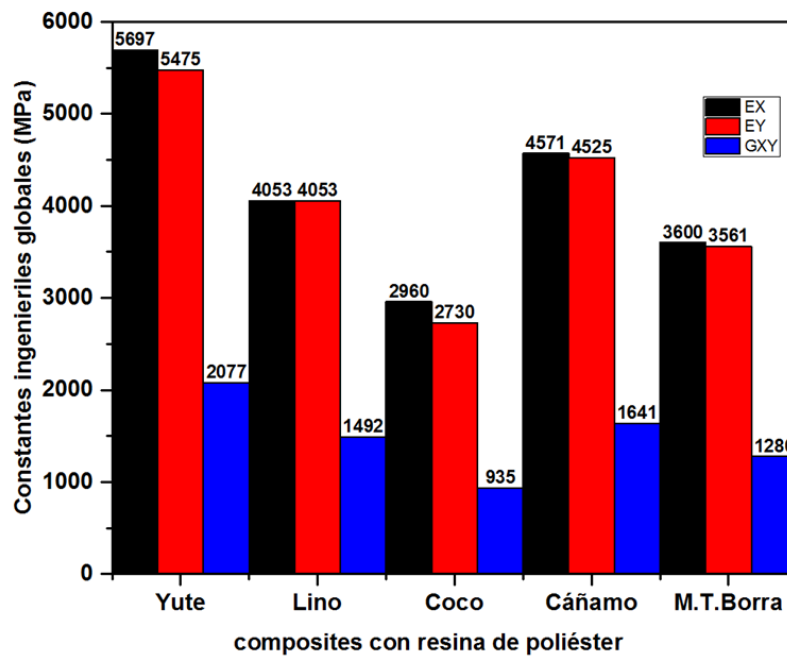


Figura 279. Comparativa de los distintos valores de las constantes ingenieriles globales para los composites con resina de poliéster.

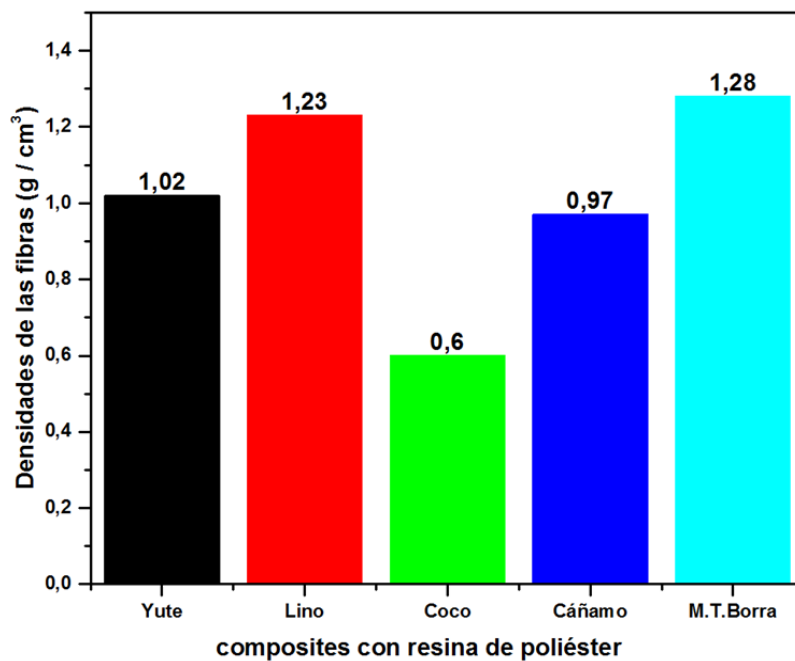


Figura 280. Comparativa de los distintos valores de las densidades de las fibras para los composites con resina de poliéster.

Como se puede observar, en los resultados obtenidos a través de las Figuras 273 - 280 correspondientes a los composites con resina de poliéster, el material de composite que alcanza los valores más elevados es el del yute, excepto en los casos de coeficientes de poisson de las fibras y densidad de las fibras.

5.6 Recopilación de resultados de forma gráfica de green composites con bioresina

En las Figuras 281 – 288 se representan los valores fundamentales de los parámetros obtenidos de forma teórica tras la aplicación de sus ecuaciones matemáticas correspondientes para el cálculo de láminas y laminados de los distintos “green composites” con bioresina.

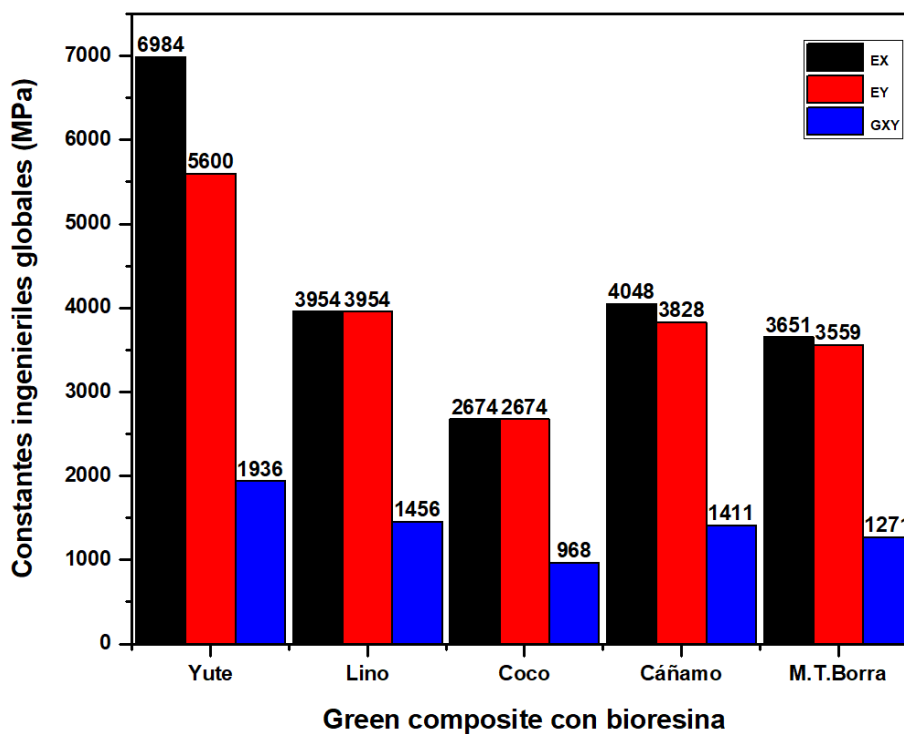


Figura 281 Comparativa de los distintos valores de las constantes ingenieriles globales para los “green composites” con bioresina.

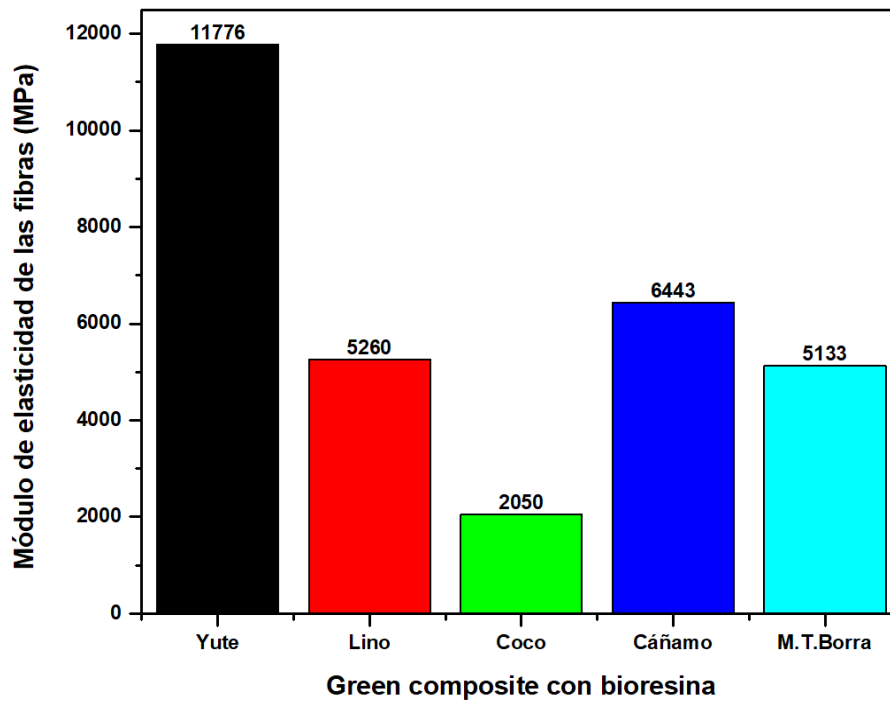


Figura 282 Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad de las fibras para los “green composites” con bioresina.

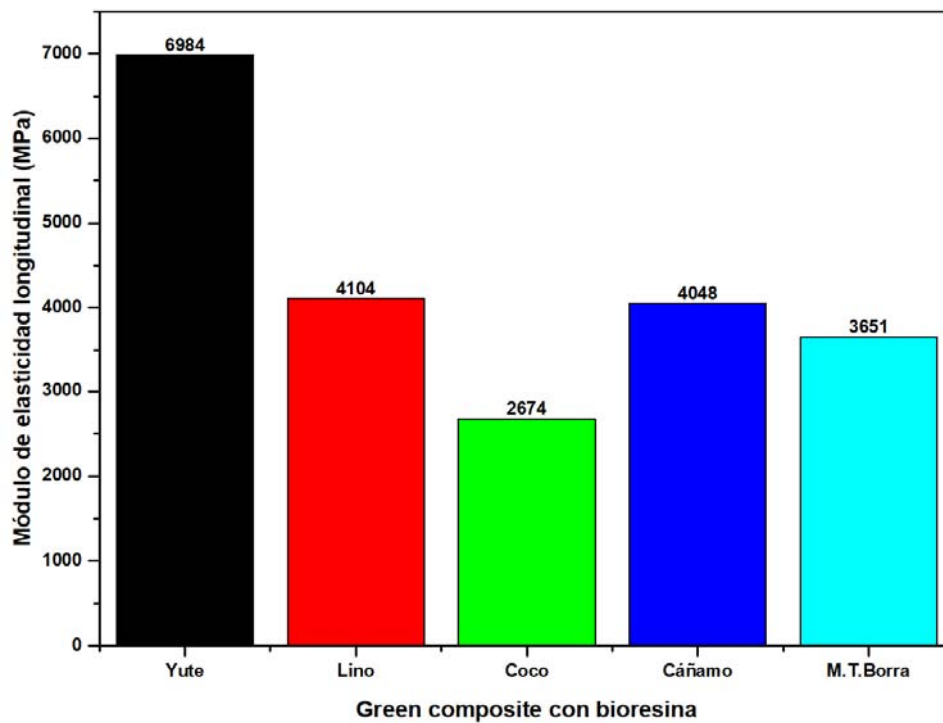


Figura 283 Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad longitudinales para los “green composites” con bioresina.

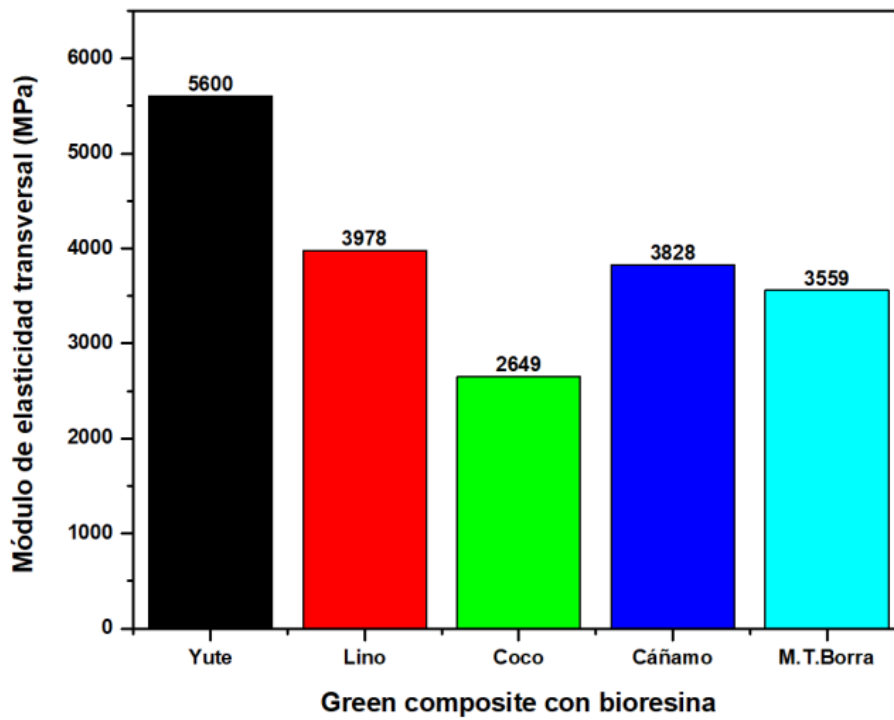


Figura 284 Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad transversales para los “green composites” con bioresina.

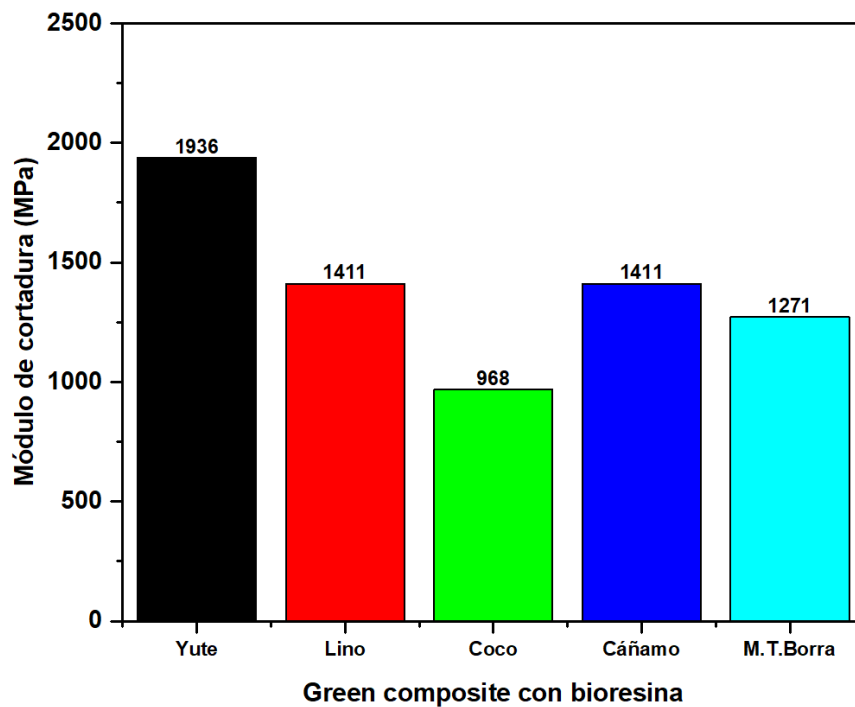


Figura 285. Comparativa de los distintos valores de los módulos de cortadura para los “green composites” con bioresina.

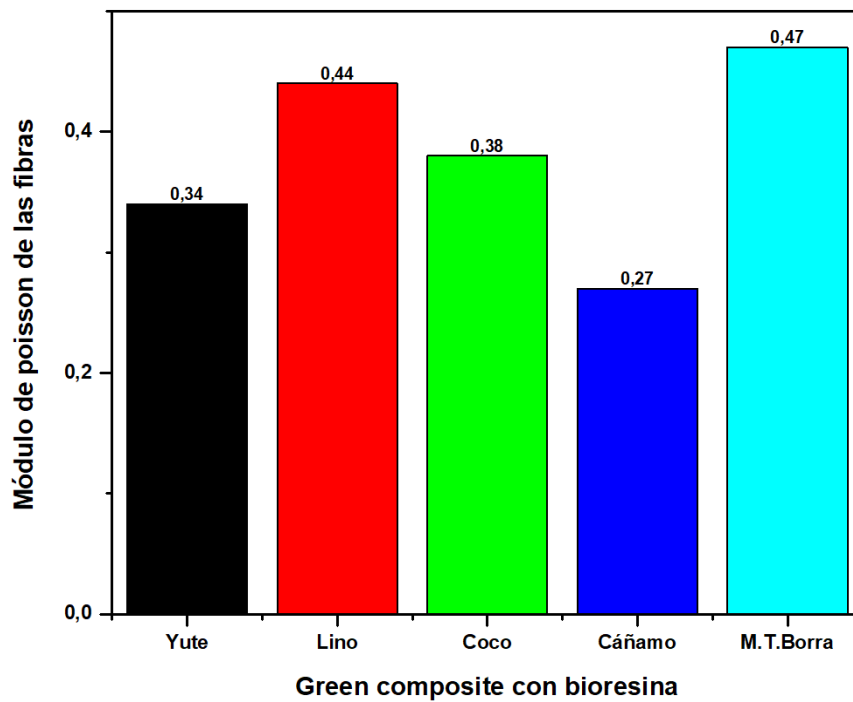


Figura 286. Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson de las fibras para los “green composites” con bioresina.

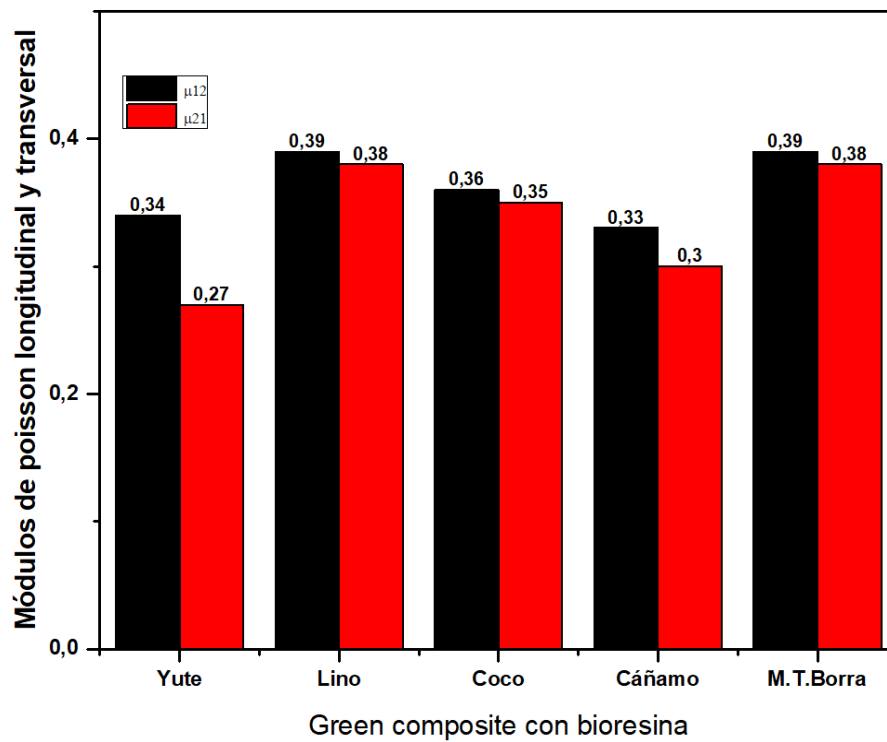


Figura 287. . Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson μ_{12} y μ_{21} para los “green composites” con bioresina.

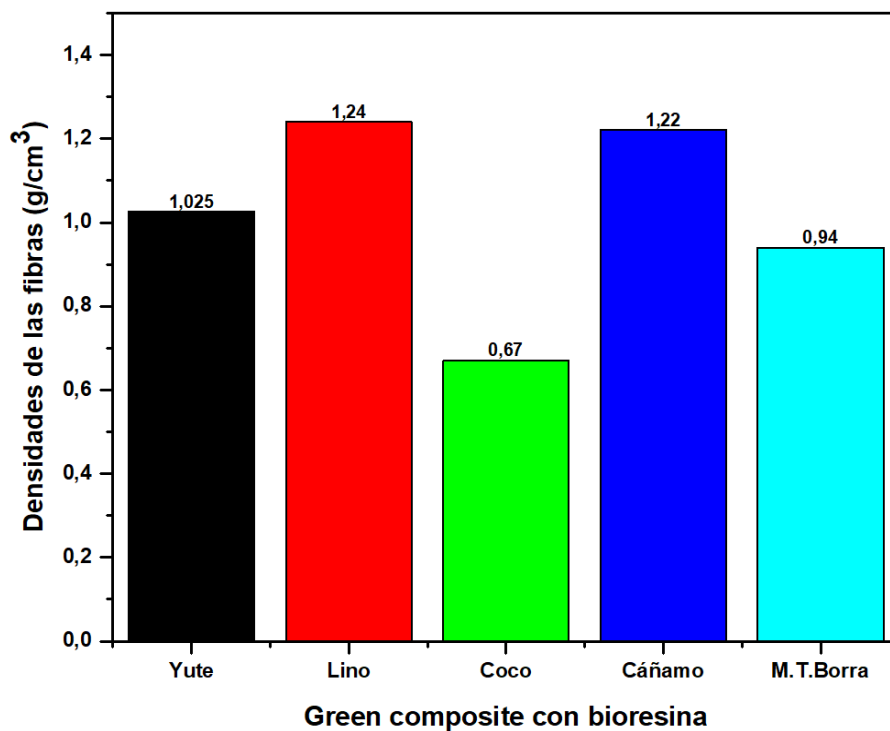


Figura 288. Comparativa de los distintos valores de las densidades de las fibras para los "green composites" con bioresina.

Como se puede observar, en los resultados obtenidos a través de las Figuras 281- 288 correspondientes a los "green composites" con bioresina, el composite que alcanza los valores más elevados es el del yute, excepto en los casos de coeficientes de poisson de las fibras y densidad de las fibras que corresponde al composite con lino.

6. Simulación numérica

6.1 Programa informático eLamX2

Una vez obtenidos los valores de las constantes ingenieriles globales y las matrices de rigidez de flexibilidad y extensional, se pasa a comprobar si estos resultados son correctos con la aplicación del programa informático eLam X2.

Dentro de la pestaña de eLamX Explorer, se debe de elegir la opción Material. Para lo cual se debe de realizar un clic con el botón derecho del ratón en el icono anterior.

Se despliega o se abre un nuevo menú donde ahora se debe de elegir la opción ADD Material. La secuencia se muestra en la Figura 289.

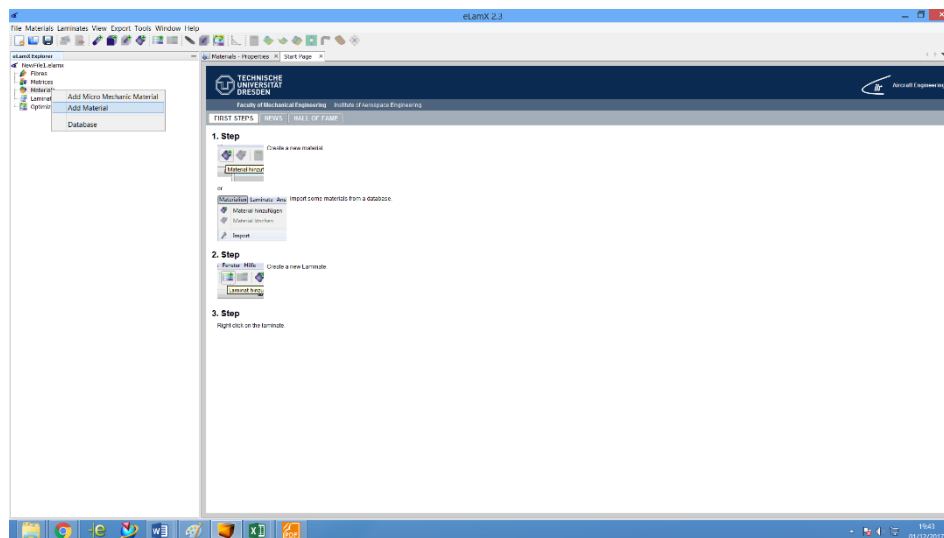


Figura 289. Proceso de creación de un nuevo material.

De forma automática al aceptar en la opción ADD Material, se abre una nueva pantalla donde hay que introducir las características físicas y los parámetros locales de las láminas, etc.

Si no se conocen los valores adicionales a las constantes locales, se dejan por defecto los que presenta el laminado del eLamX2.

La Figura 290, muestra la imagen para la introducción de las constantes ingenieriles locales, criterio de rotura, etc., de una lámina.

General Properties	
Name	lino con poliester
Density	1,12E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	4053,0
E_{\perp}	4052,8
$\nu_{ \perp}$	0,360
$G_{ \perp}$	1492,7
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliu Hashin)	1,0
R_{\dots} (Autodesk Heliu Hashin)	150 n
lino con poliester	

Figura 290. Introducción de los parámetros de las láminas.

Una vez introducidas las constantes locales y la densidad, se debe de realizar el apilamiento o la composición del laminado, para lo cual sobre la opción de Laminates se realiza un clic con el botón derecho del ratón y se despliega un nuevo menú, donde se elige la pestaña ADD laminate.

Al realizar el clic con botón del ratón se despliega una nueva ventana donde se deben de introducir los espesores de cada lámina (mm) y su ángulo de orientación, modos de fallo a la rotura etc. Una vez introducidos los parámetros anteriores para verificar se debe de realizar un clic con el ratón sobre la pestaña ADD Layer(s)

Para el caso del apilamiento que se está analizando, el espesor de cada lámina de yute es de 0,80 mm con un ángulo de orientación de las fibras de 45°.

El número de láminas que forma el laminado es de 6.

Se deben de completar los campos correspondientes a:

- Nombre del apilamiento del laminado.
- Elegir el material de que está constituido.
- Espesor de cada una de las láminas.
- Ángulo de las mismas.

En la Figura 291, se muestran los campos completados del laminado lino con resina de poliéster.

Figura 291. Apilamiento del laminado.

6.2 Criterio de Tsai – Hill

Este criterio está basado en el criterio de plastificación de Hill para materiales anisotrópicos que a su vez es una extensión del criterio de Von Mises para isótropos. Sin embargo, dado que no es posible en materiales ortótropos (y anisotrópicos), separar la dilatación de la distorsión, este criterio de Tsai – Hill no se puede llamarse de la energía de distorsión.

El criterio de plastificación de Von Mises (1900) para materiales isótropos es:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_I - \sigma_{III})^2]}.$$

Criterio de plastificación de Hill (1948) Materiales isótropos.

$$(G + H) \cdot \sigma_{11}^2 + (F + H) \cdot \sigma_{22}^2 + (F + G) \cdot \sigma_{33}^2 - 2 \cdot H \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} - 2 \cdot G \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{33} - 2 \cdot F \cdot \sigma_{22} \cdot \sigma_{33} + 2 \cdot L \cdot \sigma_{23}^2 + 2 \cdot M \cdot \sigma_{13}^2 + 2 \cdot N \cdot \sigma_{12}^2 = 1.$$

Las constantes están asociadas al final del comportamiento elástico lineal y comienzo del comportamiento plástico.

Para una lámina se puede realizar la siguiente simplificación, teniendo en cuenta que los valores de tracción de:

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} = \sigma_{33} = 0.$$

Por lo tanto:

$$(G + H) \cdot \sigma_{11}^2 + (F + H) \cdot \sigma_{22}^2 - 2 \cdot H \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} + 2 \cdot N \cdot \sigma_{12}^2 = 1$$

Donde las constantes estarían asociadas al final del comportamiento elástico lineal y consecuentemente la fractura.

La determinación de estas constantes se hace considerando determinados estados límites:

Tensión tangencial pura

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0 \quad \sigma_{12} \neq 0.$$

Por lo que:

$$(G + H) \cdot \sigma_{11}^2 + (F + H) \cdot \sigma_{22}^2 - 2 \cdot H \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} + 2 \cdot N \cdot \sigma_{12}^2 = 1.$$

Sustituyendo:

$$2 \cdot N \cdot \sigma_{12}^2 = 1.$$

Despejando:

$$2 N = \frac{1}{\sigma_{12}^2}.$$

Sabiendo que:

$$\frac{1}{S^2} = \frac{1}{\sigma_{12}^2}.$$

Sustituyendo se obtiene la siguiente expresión:

$$2 N = \frac{1}{S^2}.$$

Tensión normal en la dirección 1

$$\sigma_{12} = \sigma_{22} = 0 \quad \sigma_{11} \neq 0.$$

Por lo que:

$$(G + H) \cdot \sigma_{11}^2 + (F + H) \cdot \sigma_{22}^2 - 2 \cdot H \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} + 2 \cdot N \cdot \sigma_{12}^2 = 1.$$

Sustituyendo:

$$(G + H) \cdot \sigma_{11}^2 = 1.$$

Despejando:

$$(G + H) = \frac{1}{\sigma_{11}^2}.$$

Y como:

$$\frac{1}{X^2} = \frac{1}{\sigma_{11}^2}.$$

Sustituyendo se obtiene la siguiente expresión:

$$(G + H) = \frac{1}{X^2}.$$

Tensión normal en la dirección 2

$$\sigma_{12} = \sigma_{11} = 0 \quad \sigma_{22} \neq 0.$$

Operando y sustituyendo como en los procesos anteriores:

$$(F + H) = \frac{1}{Y^2}.$$

Como para obtener el valor de F, G y H, se necesita otra ecuación, es razonable suponer que el comportamiento en la dirección 3 es equivalente al de la dirección 2:

$$(F + G) = \frac{1}{Y^2}.$$

De estas tres ecuaciones:

$$(G + H) = \frac{1}{X^2} \text{ Ecuación 1.}$$

$$(F + H) = \frac{1}{Y^2} \text{ Ecuación 2.}$$

$$(F + G) = \frac{1}{Y^2} \text{ Ecuación 3.}$$

Se obtiene:

$$G = H = \frac{1}{2X^2}.$$

$$F = \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{2X^2}.$$

Con lo que el criterio queda definido por la expresión (67).

$$\theta = 0^\circ .$$

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{\sigma_{11} \sigma_{22}}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} = 1 . \quad (67)$$

Donde:

- X: Resistencia a la tracción en la dirección 1 (ejes locales).
- Y: Resistencia a tracción en la dirección 1 (ejes locales) a tracción.
- S: Resistencia a cortadura en el plano 1-2 (ejes locales).

Observando el término dominante se puede predecir el tipo de rotura y en consecuencia se puede inferir si dicha lámina seguirá con capacidad resistente en determinadas direcciones.

Cuando la orientación de las fibras de la lámina sea distinta de cero:

$$\theta \neq 0^\circ .$$

$$\frac{\cos \theta^4}{X^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2} \right) \cos \theta^2 \cdot \sin \theta^2 + \frac{\cos \theta^4}{Y^2} = \frac{1}{\sigma_x^2} .$$

Para un material isótropo

$$X = Y = \sqrt{3} S .$$

El criterio de la máxima tensión será:

$$\sigma_x < \frac{X}{\cos \theta^2} .$$

$$\sigma_x < \frac{X}{\sin \theta^2} .$$

$$\sigma_x < \frac{X}{\sqrt{3} (\cos \theta \sin \theta)} .$$

6.3 Introducción de los laminados del material tipo sándwich

Una vez completados los campos se tiene que ir adhiriendo de forma individual las seis láminas del apilamiento, Figura 292, para lo cual se realiza un clic con el ratón sobre la pestaña Add Layer(s).

	Nombre	Ángulo	Espesor	Material	Criterio de fallo
1	Lamina lino poliéster	45	0,8	Lino con resina de poliéster	Tsai - Hill

Figura 292 Apilamiento de las láminas.

Como el apilamiento del laminado es del mismo material y tiene el mismo espesor se pueden adherir dos láminas más y a continuación, realizar un clic sobre la opción simetría.

El resultado de la composición del laminado se muestra en la Figura 293.

	Nombre	Ángulo	Espesor	Material	Criterio de fallo
1	Lamina lino poliéster	45	0,8	Lino con resina de poliéster	Tsai - Hill
2	Lamina lino poliéster	45	0,8	Lino con resina de poliéster	Tsai - Hill
3	Lamina lino poliéster	45	0,8	Lino con resina de poliéster	Tsai - Hill
4	Lamina lino poliéster	45	0,8	Lino con resina de poliéster	Tsai - Hill
5	Lamina lino poliéster	45	0,8	Lino con resina de poliéster	Tsai - Hill
6	Lamina lino poliéster	45	0,8	Lino con resina de poliéster	Tsai - Hill

Figura 293. Espesores y ángulos de las láminas que forman el apilamiento.

Tras la realización del apilamiento se crea una nueva etiqueta dentro de la ventana de eLamX2 Explorer denominada New Laminate y a continuación aparece la representación del laminado [45/45/45]s. Para poder obtener las constantes ingenieriles globales y las matrices de rigidez plana y flexibilidad, se debe de realizar un clic con el botón derecho del ratón sobre el icono anterior New Laminate [45/45/45] s. Con lo que se despliega una nueva ventana donde se debe de seleccionar la opción Engineering Constants. Apareciendo la hoja de resultados del laminado Figura 294.

[A]			[D]		
22 363,1	8 033,4	0,2	42 937,2	15 424,2	0,4
9 025,0	22 363,1	0,2	15 424,2	42 937,2	0,4
0,2	0,2	7 152,2	0,4	0,4	13 732,3

Constantes ingenieriles	
Con módulo de poisson	
Membrana	
E_x	= 4 057,8
E_y	= 4 057,8
G_{xy}	= 1 490,1
μ_{xy}	= 0,36
μ_{yx}	= 0,35
Espesor total	= 4,80 (mm)

Figura 294. Resultados obtenidos de las constantes ingenieriles globales y de las matrices de rigidez de extensión y flexión.

En la Tabla 224, se exponen los valores de las constantes ingenieriles globales del laminado, obtenidas a través de la teoría clásica.

Tabla 224. Resultados de las constantes ingenieriles globales obtenidas a través de medios matemáticos.

E_X	$1/S_{11}$	4 053,25	(MPa)
E_Y	$1/S_{22}$	4 053,25	(MPa)
G_{XY}	$1/S_{66}$	1 492,50	(MPa)
μ_{XY}	$1/S_{21}$	0,36	
μ_{YX}	$1/S_{12}$	0,35	

En las Tablas 225 - 226 se exponen los valores de las matrices de flexibilidad [A] y de extensión [D] obtenidas tras la realización de los caculos teóricos.

Tabla 225. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x^2 .

22,31	7,98	0,0002
7,98	22,31	0,0002
0,0002	0,0002	7,16

Valor de la matriz D:

Tabla 226. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través del eLam x^2 .

42,83	15,32	0,00041
15,32	42,83	0,00041
0,00041	0,00041	13,75

6.4 Valores obtenidos a través del programa informático eLam x².

Con el programa informático eLamX2 se puede realizar el cálculo de las constantes ingenieriles globales y de las respectivas matrices de flexibilidad [A] y extensional [D] de los composites.

Para la resolución automática de los resultados, se debe de partir como datos de partida de los valores recopilados en la Tabla 227 para “green composites” con bioresina. En la Tabla 228 para la obtención de los composites con resina de poliéster.

Tabla 227. Parámetros para la obtención de resultados deseados en eLam x2.

Green composites con bioresina					
Material	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	G ₁₂ (MPa)	μ ₁₂	μ ₂₁
Yute	6 984	5 600	1 936	0,34	0,27
Lino	4 104	3 978	1 411	0,39	0,38
Cáñamo	4 048	3 828	1 411	0,32	0,30
Coco	2 674	2 649	968	0,36	0,35
M T Borra	3 651	3 559	1 271	0,39	0,38

Tabla 228. Parámetros para la obtención de resultados deseados en eLam x2.

Composites con resina de poliéster					
Material	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	G ₁₂ (MPa)	μ ₁₂	μ ₂₁
Yute	5 697	5 475	2 077	0,29	0,28
Lino	4 053	4 053	1.493	0,36	0,36
Cáñamo	4 048	4 521	1 617	0,39	0,39
Coco	2 960	2 730	935	0,37	0,35
M T Borra	3 647	3 561	1 280	0,38	0,38

Así como los valores de las densidades de los composites y los espesores de cada lámina y número de las mismas.

6.4.1 Composite de yute con resina de poliéster

Los datos de partida de las constantes ingenieriles locales, se recopilan en la Figura 295.

<input type="checkbox"/> General Properties	
Name	yute con poliester
Density	1,12E-9
<input type="checkbox"/> Stiffness Properties	
$E_{ }$	5697,0
E_{\perp}	5474,7
$\nu_{ \perp}$	0,290
$G_{ \perp}$	2077,0
<input type="checkbox"/> hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
<input type="checkbox"/> Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
<input type="checkbox"/> Additional Properties	
α (Autodesk Heliushashin)	1,0
R_{\perp} (Autodesk Heliushashin)	150,0
yute con poliester	

Figura 295. Recopilación de los valores de las constantes ingenieriles locales del composite yute con resina de poliéster a través del programa elamx2.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 229.

Tabla 229. Valores de las constantes ingenieriles globales del composite yute con resina de poliéster.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	5 697	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	4 474,70	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	2 077,20	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,29	
μ_{YX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,28	

En la Figura 296 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

[A]			[D]		
27 890,6	7 772,7	0,0	47 065,3	13 116,4	0,0
7 772,7	26 802,3	0,0	13 116,4	45 228,8	0,0
0,0	0,0	9 346,5	0,0	0,0	15 772,2

Constantes ingenieriles	
Con módulo de poisson	
Membrana	
E_X	= 5 697
E_Y	= 5 474,7
G_{XY}	= 2 077
μ_{XY}	= 0,29
μ_{YX}	= 0,29
Espesor total	= 4,5 (mm)

Figura 296. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite yute con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 230 - 231 se exponen los valores de las matrices de flexibilidad [A] y de extensión [D] obtenidas tras la realización de los caculos teóricos.

Tabla 230. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x².

27,51	6,10	0
6,10	19,6	0
0	0	6,90

Valor de la matriz D:

Tabla 231. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través del eLam x².

46,46	10,24	0
10,24	33,04	0
0	0	11,64

6.4.2 Biocomposite de yute

Los datos de partida de las constantes ingenieriles locales, se recopilan en la Figura 297.

General Properties	
Name	yute con bioresina
Density	1,12E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	6984,0
E_{\perp}	5599,8
$\nu_{ \perp}$	0,340
$G_{ \perp}$	1936,0
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliushashin)	1,0
R_{\dots} (Autodesk Heliushashin)	150 n
yute con bioresina	

Figura 297. Recopilación de los valores de las constantes ingenieriles globales del “green composite” yute con bioresina a través del programa elamx2.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 232.

Tabla 232. Valores de las constantes ingenieriles globales del “green composite” yute con bioresina.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	6 984	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	5 599,76	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	1 936,01	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,34	
μ_{YX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,27	

En la Figura 298 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

[A]			[D]		
34 638,6	9 442,9	0,0	58 452,6	15 934,8	0,0
9 442,9	27 773,2	0,0	15 934,8	46 867,2	0,0
0,0	0,0	8 712,1	0,0	0,0	14 701,7

Constantes ingenieriles	
Con módulo de poisson	
Membrana	
E_x	= 6 984,0
E_y	= 5 599,8
G_{xy}	= 1 936,0
μ_{xy}	= 0,34
μ_{yx}	= 0,27
Espesor total = 4,5 (mm)	

Figura 298. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” yute con bioresina tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 233 – 234, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas en los cálculos teóricos.

Tabla 233. Valores de la matriz [A] (MPa * m) obtenidos a través de eLam x².

34,75	9,62	0
9,62	27,86	0
0	0	8,71

Tabla 234. Valores de la matriz [D] (Pa * m³) obtenidos a través de eLam x².

58,65	16,24	0
16,24	47,02	0
0	0	14,70

6.4.3 Composite de lino con resina de poliéster

En la Figura 299 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del composite lino con resina de poliéster.

General Properties	
Name	lino con poliester
Density	1,12E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	4053,0
E_{\perp}	4052,8
$\nu_{ \perp}$	0,360
$G_{ \perp}$	1492,7
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliuss Hashin)	1,0
$R_{..}$ (Autodesk Heliuss Hashin)	150 n
lino con poliester	

Figura 299. Introducción de las constantes locales.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 235.

Tabla 235. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite lino con resina de poliéster

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	4 053,25	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	4 053,25	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	1 492,50	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,36	
μ_{YX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,35	

En la Figura 300 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

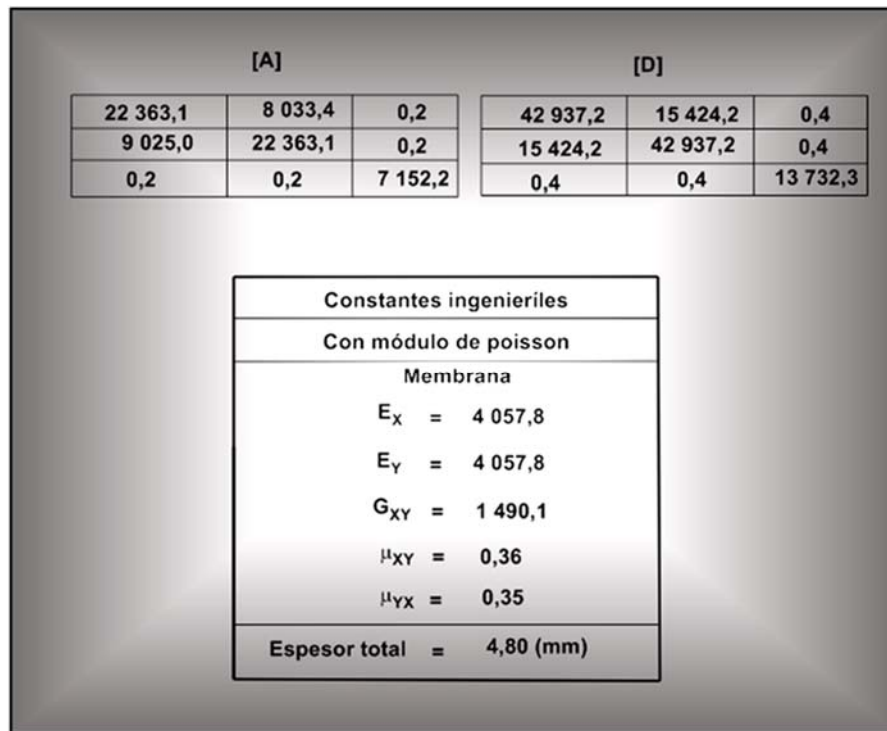


Figura 300. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite lino con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 236 – 237, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas de forma teórica.

Tabla 236. Valores de la matriz [A] (Pa * m) obtenidos a través de eLam x².

22,31	7,98	0,0002
7,98	22,31	0,0002
0,0002	0,0002	7,16

Tabla 237. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través del eLam x².

42,83	15,32	0,00041
15,32	42,83	0,00041
0,00041	0,00041	13,75

6.4.4 Biocomposite de lino

En la Figura 301 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del “green composite” lino con bioresina.

General Properties	
Name	lino con bioresina
Density	1,18E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	4104,0
E_{\perp}	3978,3
$\nu_{ \perp}$	0,390
$G_{ \perp}$	1411,1
hygrothermal Properties	
$\alpha^T_{ }$	1,0E-6
α^T_{\perp}	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliu Hashin)	1,0
R_{\perp} (Autodesk Heliu Hashin)	150,0
lino con bioresina	

Figura 301. Introducción de las constantes locales.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 238.

Tabla 238. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del “green composite” lino con bioresina.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	3 953,77	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	3 953,77	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	1 455,56	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,40	
μ_{YX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,40	

En la Figura 302 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

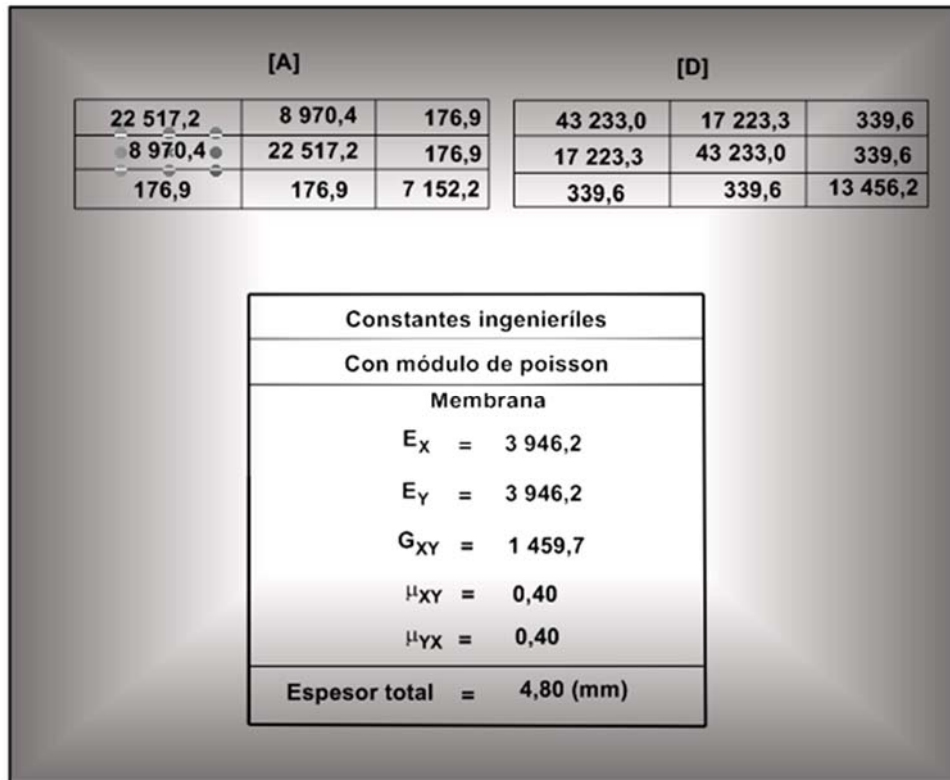


Figura 302. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” lino con bioresina tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 239 – 240, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas de forma teórica.

Tabla 239. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x².

22,61	9,07	0,17	
9,07	22,61	0,17	
0,17	0,17	6,98	

Tabla 240. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través de eLam x².

43,42	17,41	0,34	
16,12	43,42	0,34	
0,34	0,34	13,41	

6.4.5 Materia Textil Borra con resina de poliéster

En la Figura 303 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del composite Materia Textil Borra con resina de poliéster.

General Properties	
Name	MTD:Borra con poliester
Density	1,23E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	3600,5
E_{\perp}	3392,7
$\nu_{ \perp}$	0,380
$G_{ \perp}$	1233,4
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliu Hashin)	1,0
$R_{..}$ (Autodesk Heliu Hashin)	150 n
MTD:Borra con poliester	

Figura 303. Introducción de las constantes locales.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 241.

Tabla 241. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite Materia Textil Borra.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	3 600,47	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	3 392,70	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	1 233,40	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,38	
μ_{YX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,36	

En la Figura 304 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

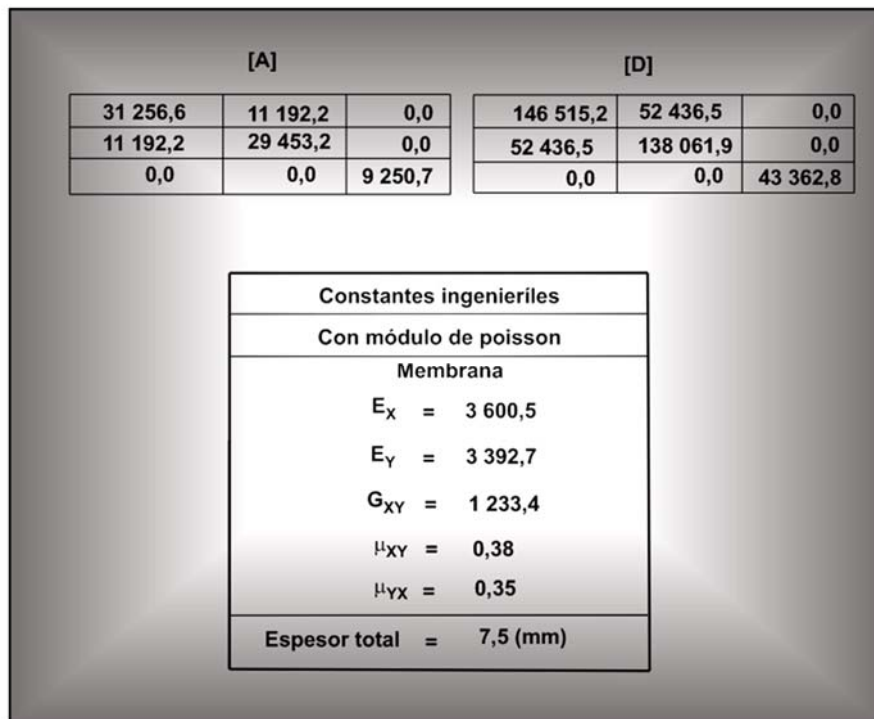


Figura 304. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite M.T. Borra con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 242 – 243, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas de forma teórica.

Tabla 242. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x².

31,29	11,20	0	
11,20	22,48	0	
0	0	9,25	

Tabla 243. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través de eLam x².

146,68	52,52	0	
52,52	138,22	0	
0	0	43,36	

6.4.6 Materia Textil Borra con bioresina

En la Figura 305 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del composite Materia Textil Borra con bioresina.

General Properties	
Name	borra con bioresina
Density	1,07E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	3650,6
E_{\perp}	3558,6
$\nu_{ \perp}$	0,389
$G_{ \perp}$	1270,6
hygrothermal Properties	
$\alpha^T_{ }$	1,0E-6
α^T_{\perp}	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliuss Hashin)	1,0
$R_{..}$ (Autodesk Heliuss Hashin)	150 n
borra con bioresina	

Figura 305. Introducción de las constantes locales.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 244.

Tabla 244. Recopilación de los valores de las constantes ingenieriles globales.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	3 650,60	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	3 558,60	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	1 270,60	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,39	
μ_{yX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,38	

En la Figura 306 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

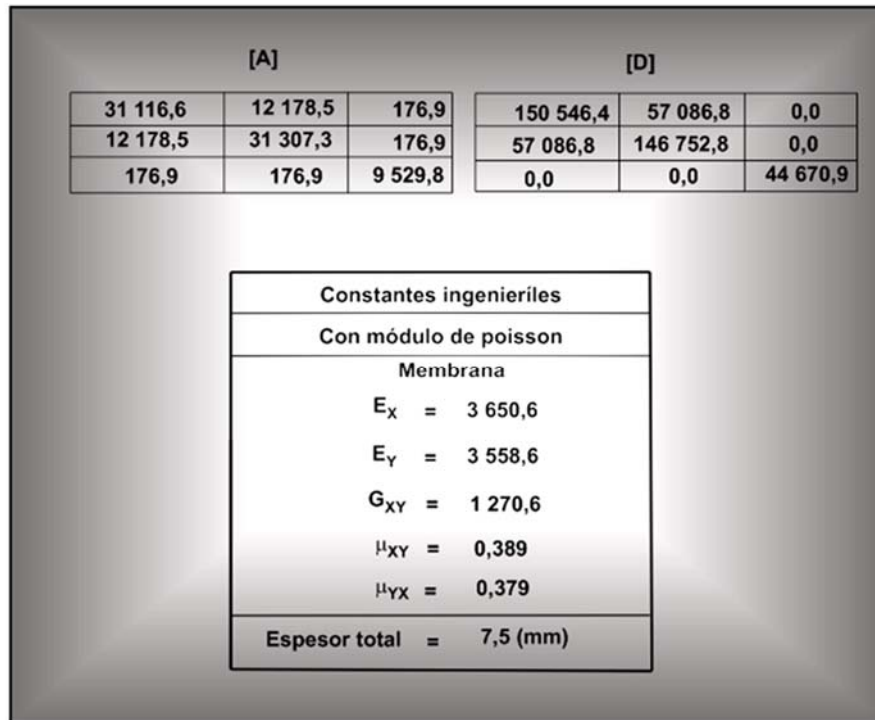


Figura 306. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite Materia Textil Borra con bioresina tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 245 – 246, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas de forma teórica.

Tabla 245. Valores obtenidos de la matriz [A] (Mpa * m) a través de eLamX².

32,11	12,18	0
12,18	31,30	0
0	0	9,53

Valor de la matriz D:

Tabla 246. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través del eLam x².

150,55	57,10	0
57,10	146,75	0
0	0	44,67

6.4.7 Composite cáñamo con resina de poliéster

En la Figura 307 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del composite cáñamo con resina de poliéster.

General Properties	
Name	New Material
Density	1,13E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	4571,3
E_{\perp}	4525,1
$\nu_{ \perp}$	0,390
$G_{ \perp}$	1616,8
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliu Hashin)	1,0
R_{\perp} (Autodesk Heliu Hashin)	150 n
New Material	

Figura 307. Introducción de las constantes locales.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 247.

Tabla 247. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite cáñamo con resina de poliéster.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	4 571	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	4 525	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	1 617	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,39	
μ_{yX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,38	

En la Figura 308 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

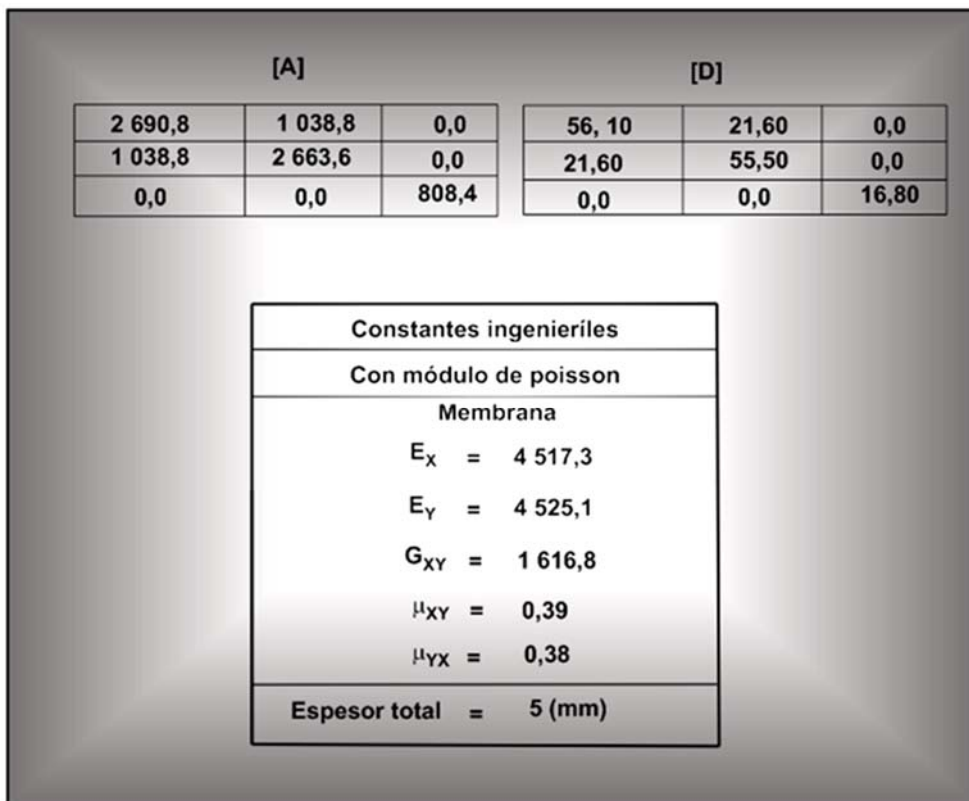


Figura 308. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite cáñamo con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 248 – 249, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas de forma teórica.

Tabla 248. Valores de la matriz [A] (MPa * m) obtenidos a través de eLamX².

26,99	10,51	0
10,51	26,72	0
0	0	8,08

Tabla 249. Valores de la matriz [D] (Pa * m³) obtenidos a través de eLam x².

56,55	20,92	0
21,10	55,43	0
0	0	17,53

6.4.8 Biocomposite de cáñamo

En la Figura 309 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del “green composite” cáñamo con bioresina.

General Properties	
Name	cañamo con bioresina
Density	1,15E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	4048,0
E_{\perp}	3827,8
$\nu_{ \perp}$	0,320
$G_{ \perp}$	1411,2
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliuss Hashin)	1,0
R_{\dots} (Autodesk Heliuss Hashin)	150,0
cañamo con bioresina	

Figura 309. Introducción de las constantes locales.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 250.

Tabla 250. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del “green composite” cáñamo con bioresina.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	4048	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	3 827,80	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	1 411,20	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,33	
μ_{yX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,30	

En la Figura 310 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

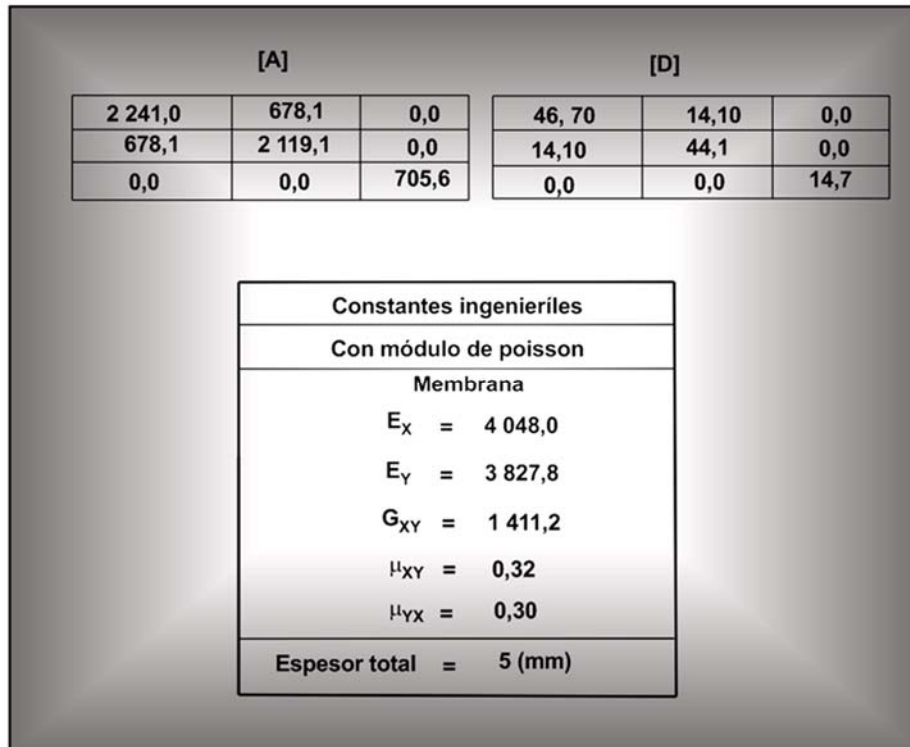


Figura 310. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” cáñamo con bioresina tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 251 – 252, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas de forma teórica.

Tabla 251. Valores de la matriz [A] (MPa * m) obtenidos a través de eLam x².

22,49	6,92	0
6,92	21,27	0
0	0	7,05

Tabla 252. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través del eLam x².

46,87	14,43	0
14,43	44,32	0
0	0	14,70

6.4.9 Composite coco con resina de poliéster

En la Figura 311 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del composite coco con resina de poliéster

General Properties	
Name	coco con poliester
Density	1,01E-9
Stiffness Properties	
$E_{ }$	2960,1
E_{\perp}	2730,2
$\nu_{ \perp}$	0,370
$G_{ \perp}$	934,5
hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
Additional Properties	
α (Autodesk Heliuss Hashin)	1,0
$R_{..}$ (Autodesk Heliuss Hashin)	150 n
coco con poliester	

Figura 311. Introducción de las constantes locales.

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 253.

Tabla 253. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite coco con resina de poliéster.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	2 960,11	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	2 730.20	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	934,50	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,37	
μ_{yX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,35	

En la Figura 312 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

[A]			[D]		
27 950,1	9 538,5	0,0	158 529,7	54 101,0	0,0
9 538,5	25 779,6	0,0	54 101,0	146 218,9	0,0
0,0	0,0	7 709,8	0,0	0,0	43 729,0

Constantes ingenieriles	
Con módulo de poisson	
Membrana	
E_x	= 2 960,1
E_y	= 2 730,2
G_{xy}	= 934,5
μ_{xy}	= 0,37
μ_{yx}	= 0,34
Espesor total	= 8,25 (mm)

Figura 312. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite coco con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 254 – 255, se exponen los valores de las matrices de extensión y flexibilidad obtenidas de forma teórica.

Tabla 254. Valores de la matriz [A] (MPa * m) obtenidos a través de eLam x².

28,04	9,68	0
9,68	25,86	0
0	0	7,71

Tabla 255. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través del eLam x².

159,10	54,93	0
54,93	146,7276	0
0	0	43,73

6.4.10 Biocomposite de coco

En la Figura 313 se recopila la introducción de las constantes ingenieriles globales del “green composite” coco con bioresina.

<input type="checkbox"/> General Properties	
Name	coco bioresina
Density	1,03E-9
<input type="checkbox"/> Stiffness Properties	
$E_{ }$	2673,7
E_{\perp}	2648,6
$\nu_{ \perp}$	0,360
$G_{ \perp}$	968,1
<input type="checkbox"/> hygrothermal Properties	
$\alpha_{ }^T$	1,0E-6
α_{\perp}^T	3,5E-5
$\beta_{ }$	1,0E-2
β_{\perp}	3,8E-1
<input type="checkbox"/> Strength Properties	
X_t	1500,0
X_c	1000,0
Y_t	180,0
Y_c	240,0
SC	150,0
<input type="checkbox"/> Additional Properties	
α (Autodesk Heliuss Hashin)	1,0
$R_{..}$ (Autodesk Heliuss Hashin)	150 n
coco bioresina	

Figura 313. Constantes ingenieriles obtenidas a través del programa informática eLam x².

Los valores de las constantes globales ingenieriles tras la realización de los cálculos matemáticos, se recopilan en la Tabla 256.

Tabla 256. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del “green composite” coco con bioresina.

E_X	$1/\bar{S}_{11}$	2 673,77	(MPa)
E_Y	$1/\bar{S}_{22}$	2 6461	(MPa)
G_{XY}	$1/\bar{S}_{66}$	968,13	(MPa)
μ_{XY}	$1/\bar{S}_{21}$	0,36	
μ_{yX}	$1/\bar{S}_{12}$	0,35	

En la Figura 314 se recopilan los valores obtenidos de las constantes globales ingenieriles, así como las matrices de flexibilidad y extensión tras la ejecución del programa informático eLamX2.

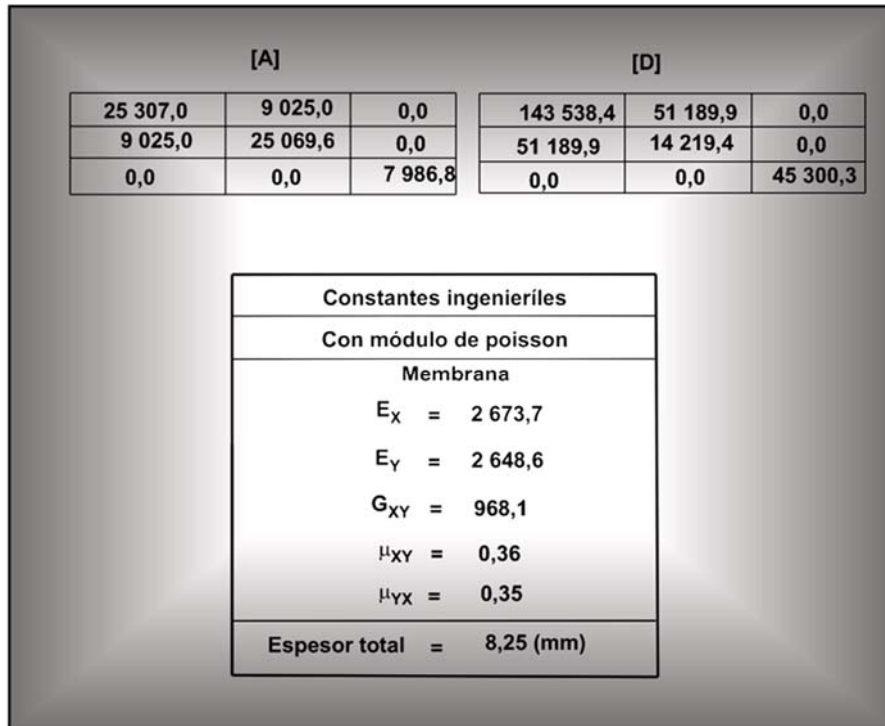


Figura 314. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” cocco con bioresina tras la realización del programa eLamX2.

En las Tablas 257 – 258, se exponen los valores de las matrices de flexibilidad y obtenidas de forma teórica.

Tabla 257. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x².

25,33	9,06	0
9,06	25,09	0
0	0	7,98

Tabla 258. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m³) a través de eLam x².

143,67	51,39	0
51,39,53	142,315	0
0	0	45,30

6.5 Ansys Workbench

6.5.1 Obtención de las frecuencias de los primeros modos de vibración

Tras la realización de los ensayos dinámicos, y a través del programa informático Ansys Workbench, en las Figuras 315 - 319, se presentan los valores de las frecuencias naturales para los 6 primeros modos obtenidas para los composites con bioresina.

Tabular Data	
Mode	Frequency (Hz)
1	31,00
2	103,45
3	173,28
4	483,49
5	635,63
6	629,83

Figura 315. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina de yute.

Tabular Data	
Mode	Frequency (Hz)
1	21,80
2	73,112
3	137,42
4	383,07
5	449,15
6	530,49

Figura 316. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina de coco.

Tabular Data	
Mode	Frequency (Hz)
1	25,477
2	83,82
3	159,22
4	443,91
5	515,49
6	635,0,5

Figura 317. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina Materia Textil Borra.

Tabular Data	
Mode	Frequency (Hz)
1	25,59
2	84,08
3	159,96
4	446,10
5	517,56
6	657,20

Figura 318. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina lino.

Tabular Data	
Mode	Frequency (Hz)
1	24,67
2	85,71
3	154,25
4	430,21
5	526,87
6	615,27

Figura 319. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina cáñamo.

Realizando las mismas operaciones pero ahora solo obteniendo el valor de la frecuencia para el primer modo en los composites con resina de poliéster, se obtienen los resultados recopilados en la Tabla 259.

Tabla 259. Recopilación de la frecuencia natural de los composites con resina de poliéster.

Placas con poliéster	Frecuencia Natural (Hz)
Yute	27,50
Cáñamo	18,40
Lino Biaxial	16,60
Materia textil borra	19,50
Coco	18,00

Los valores obtenidos a través del programa informático Ansys Workbench son prácticamente los mismos que los obtenidos a través de ensayos dinámicos con el método de vibración libre.

6.6 Diseño con Solidwoks Premium.

6.6.1. Análisis estático

Como modelado de cálculo se realiza el ejemplo del composite de lino biaxial con resina de poliéster.

En la Tabla 260 se muestran los parámetros necesarios para el cálculo del módulo de elasticidad de la probeta composite de lino con resina de poliéster.

Tabla 260. Recopilación de parámetros para el cálculo del módulo de elasticidad de la probeta.

Fuerza aplicada	dp (N)	Fuerza máxima	9 552
Variación longitud	dL (m)	Carrera	0,00689
Longitud inicial	L (m)	L _o	0,355318
Ancho	b (m)		0,0262
Espesor	d (m)		0,00465
Área transversal	A (m) ²	L.b	0,0001218

Fórmula del módulo de elasticidad de la probeta

$$E = \left(\frac{dp}{dL}\right) \cdot \left(\frac{L}{A}\right).$$

Sustituyendo:

$$E = \left(\frac{dp}{dL}\right) \cdot \left(\frac{L}{A}\right) = \left(\frac{9\,552}{0,00689}\right) \cdot \left(\frac{0,355318}{0,0001218}\right) = 4060 \text{ (MPa)}.$$

Cálculo del coeficiente de poisson práctico de la probeta

ε_a : Deformación unitaria en el sensor a.

ε_b : Deformación unitaria en el sensor b.

ε_c : Deformación unitaria en el sensor c.

θ_a : Ángulo de posición del sensor a.

θ_b : Ángulo de posición del sensor b.

θ_c : Ángulo de posición del sensor c.

Posicionamiento de los sensores

θ_a : 0°.

θ_b : 120°.

θ_c : 240°.

En la Tabla 272 se recopilan las expresiones para la obtención de las deformaciones.

Tabla 261. Recopilación de fórmulas para los cálculos de las deformaciones.

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2} \cdot \cos(2 \cdot \theta_a) + \frac{\gamma_{XY}}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_a) \\ \varepsilon_b &= \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2} \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) + \frac{\gamma_{XY}}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_b) \\ \varepsilon_c &= \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2} \cdot \cos(2 \cdot \theta_c) + \frac{\gamma_{XY}}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_c) \\ \gamma_{XY} &= \frac{2 \cdot \sqrt{3} (\varepsilon_c - \varepsilon_b)}{3} \end{aligned}$$

Cálculo de ε_X

$$\varepsilon_a = \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2} \cdot \cos(2 \cdot \theta_a) + \frac{\gamma_{XY}}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_a).$$

Sustituyendo por los valores de los ángulos.

$$\varepsilon_a = \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2} \cdot \cos(2 \cdot 0^\circ) + \frac{\gamma_{XY}}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot 0^\circ).$$

$$\varepsilon_a = \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2}.$$

$$\varepsilon_a = \frac{2 \cdot (\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2}.$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_Y.$$

Operando:

$$\sigma_X = \left(\frac{F}{A} \right) = \left(\frac{9\,592}{0,0001218} \right) = 78\,752\,052,54 \left(\frac{N}{m^2} \right) = \mathbf{78,75 \text{ (MPa)}}.$$

$$\sigma_X = E \cdot \varepsilon_X.$$

$$\varepsilon_X = \frac{\sigma_X}{E} = \frac{78,75}{4060} = \mathbf{0,01939} \text{ (mm)}.$$

Por lo tanto:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_X = \mathbf{0,01939} \text{ (mm)}.$$

Las relaciones entre las distancias $\varepsilon_a = \varepsilon_b$, es de 2,29.

Por lo que:

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_a}{2,29} = \frac{0,01939}{2,29} = \mathbf{0,00847033068}.$$

Cálculo de ε_Y

Conociendo el módulo de poisson de la probeta:

$$\mu = \frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_X}.$$

$$\mu = \mathbf{0,3577}.$$

Sustituyendo:

$$\mu = \frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_X} = \frac{\varepsilon_Y}{0,01939}.$$

$$0,3577 = \frac{\varepsilon_Y}{0,01939}.$$

$$\varepsilon_Y = 0,3577 \cdot 0,01939 = \mathbf{0,006935} \text{ (mm)}$$

$$\varepsilon_b = \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2} \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) + \frac{\gamma_{XY}}{2} \cdot \sen(2 \cdot \theta_b).$$

Sustituyendo:

$$\varepsilon_b = \frac{(\varepsilon_X + \varepsilon_Y)}{2} + \frac{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)}{2} \cdot \cos(2 \cdot 120^\circ) + \frac{\gamma_{XY}}{2} \cdot \sen(2 \cdot 120^\circ).$$

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_X + 3 \cdot \varepsilon_Y - \sqrt{3} \cdot \gamma_{XY}}{4}.$$

Sustituyendo y despejando:

$$0,00847033068 = \frac{0,01939 + 3 \cdot (0,006935) - 1,7320 \gamma_{XY}}{4} .$$

$$0,0338813 = 0,040195 - 1,7320 \gamma_{XY} .$$

$$0,0338813 - 0,040195 = - 1,7320 \gamma_{XY} .$$

$$- 0,0063137 = - 1,7320 \gamma_{XY} .$$

$$\gamma_{XY} = \mathbf{0,003645}.$$

Cálculo de los módulos de cortadura

$$\frac{1}{G} = \left(\frac{V_F}{G_F} \right) + \left(\frac{V_M}{G_M} \right) .$$

Sustituyendo:

$$\frac{1}{G} = \left(\frac{V_F}{G_F} \right) + \left(\frac{V_M}{G_M} \right) = \left(\frac{0,44471}{1\,541,9445} \right) + \left(\frac{0,55528}{1\,454,3841} \right) .$$

$$G = 1\,492,063 \text{ (MPa)}.$$

$$G = \mathbf{1\,492,063 \text{ (MPa)}}.$$

Se deberá de realizar un estudio con un análisis estático y con mallado sólido.

Una vez seleccionado el tipo de estudio se deberán de ingresar las características del material de forma personalizada por el usuario, el programa informático pide un ingreso de 24 propiedades físicas mecánicas, como son los módulos de elasticidad en las tres direcciones, módulos de poisson, módulos de corte, densidad, resistencia a tracción, resistencia a compresión etc.

Recopilación de valores obtenidos

Tras la aplicación de las fórmulas de la sección anterior se obtienen los siguientes resultados:

Densidad

Density $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$	1,22
--	------

Valores de los módulos de elasticidad

Parámetro	Valor
Módulo elasticidad en X (MPa)	4.053,24
Módulo elasticidad en Y (MPa)	4.055,86
Módulo elasticidad en Z (MPa)	4.055,86

Valores de los módulos de poisson

Parámetro	Valor
Poisson's Ratio XY	0,357
Poisson's Ratio YZ	0,357
Poisson's Ratio XZ	0,357

Valores de los módulos de cortadura [G]

Parámetro	Valor
Shear Modulus XY (MPa)	1 492,68
Shear Modulus YZ (MPa)	1 492,21
Shear Modulus XZ (MPa)	1 492,68

Cálculo de los parámetros térmicos de la lámina

Las características de la fibra de lino se obtienen a través del programa informático CES EduPack, Tabla 262.

Tabla 262. Recopilación de datos de la fibra de lino y de la resina de poliéster.

Fibra de lino		
Conductividad térmica	0,2 – 0,3	W/m °C
Coefficiente de expansión térmica	15 - 30	μ /°C
Capacidad específica	1 200 – 1 222	J/kg °C
Coefficiente de amortiguamiento	3 - 6	
Resina		
Coefficiente de expansión térmica	100 - 200	μ /°C

Fórmulas para la obtención de los coeficientes de dilatación térmica

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_F \cdot E_F \cdot V_F + \alpha_M \cdot E_M \cdot V_M}{E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_M \cdot V_M + \alpha_F \cdot V_F + [(\mu_F \cdot E_M) - (\mu_M \cdot E_F)] (\alpha_F - \alpha_M)}{\frac{E_M}{V_F} + \frac{E_F}{V_M}}$$

$$\alpha_X = \alpha_1 \cdot \cos^2 \theta + \alpha_2 \cdot \sin^2 \theta .$$

$$\alpha_Y = \alpha_1 \cdot \sin^2 \theta + \alpha_2 \cdot \cos^2 \theta .$$

$$\alpha_X = \alpha_Z .$$

Cálculo de los coeficientes de dilatación

Como el coeficiente de dilatación térmica de la fibra de lino varía entre 15 y 30. $10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Se estima oportuno tomar un valor promedio de $20 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Para la matriz de resina de poliéster un valor promedio de $150 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Aplicando los valores recopilados en la Tabla 263.

Tabla 263. Recopilación de los parámetros necesarios para la realización del cálculo de los coeficientes de dilatación térmica.

V_F (%)	0,4447
V_M (%)	0,5553
E_F (MPa)	4 101,57
E_M (MPa)	4 014,10
μ_F	0,33
μ_M	0,38
ρ_F ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	1,23
ρ_M ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	1,21
θ	45°

Valores de los coeficientes de dilatación térmica en las direcciones 1 - 2:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_F \cdot E_F \cdot V_F + \alpha_M \cdot E_M \cdot V_M}{E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M} = 0,90 / ^\circ\text{C}.$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_M \cdot V_M + \alpha_F \cdot V_F + [(\mu_F \cdot E_M) - (\mu_M \cdot E_F)] (\alpha_F - \alpha_M)}{\frac{E_M}{V_F} + \frac{E_F}{V_M}} = 0,861 / ^\circ\text{C}.$$

Cálculo de los coeficientes de dilatación térmica en las direcciones globales

$$\alpha_X = \alpha_1 \cdot \cos^2 \theta + \alpha_2 \cdot \sin^2 \theta .$$

$$\alpha_Y = \alpha_1 \cdot \sin^2 \theta + \alpha_2 \cdot \cos^2 \theta .$$

$$\alpha_X = \alpha_Z .$$

Sustituyendo valores.

$$\alpha_X = \alpha_1 \cdot \cos^2 \theta + \alpha_2 \cdot \sin^2 \theta = 0,90 \cdot 0,5 + 0,861 \cdot 0,5 = 0,8805/^{\circ}\text{C}.$$

$$\alpha_Y = \alpha_1 \cdot \sin^2 \theta + \alpha_2 \cdot \cos^2 \theta = 0,861 \cdot 0,5 + 0,90 \cdot 0,5 = 0,8805/^{\circ}\text{C}.$$

$$\alpha_X = \alpha_Z = 0,8805/^{\circ}\text{C}.$$

Transformación en grados absolutos o kelvin

$$\alpha_Y = 274/^{\circ}\text{K}.$$

$$\alpha_X = \alpha_Z = 274/^{\circ}\text{K}.$$

Introducción de datos en la lámina ortotrópica

En la Tabla 264 se muestra la recopilación de datos que han utilizado para la generación del material composite con lino resina de poliéster.

Tabla 264. Parámetros del composite lino con resina de poliéster.

Módulo elástico en X	4 053,24	N/mm ²
Módulo de elasticidad en Y	4 055,86	N/mm ²
Módulo de elasticidad en Z	4 055,86	N/mm ²
Coefficiente de Poisson en XY	0,357	
Coefficiente de Poisson en YZ	0,357	
Coefficiente de Poisson en XZ	0,357	
Módulo cortante en XY	1 492,68	N/mm ²
Módulo cortante en YZ	1 492,21	N/mm ²
Módulo cortante en XZ	1 492,68	N/mm ²
Densidad de masa	1 220	kg/m ³
Límite de tracción en X	78,73	N/mm ²
Límite de tracción en Y	0,3924	N/mm ²
Límite de compresión en X	100	N/mm ²
Límite de compresión en Y	10	N/mm ²
Límite cortante en XY	157	N/mm ²

Límite elástico	22,21	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica en X	274	/K
Coefficiente de expansión térmica en Y	274	/K
Coefficiente de expansión térmica en Z	274	/K
Conductividad térmica en X	0,2256	W/(m·K)
Conductividad térmica en Y	0,2256	W/(m·K)
Conductividad térmica en Z	0,2256	W/(m·K)
Calor específico	1 2213	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material	4	

6.6.2. Resultados obtenidos tras el análisis

En la Figura 320 se recopila de forma gráfica y con valores numéricos los datos obtenidos para la tensión equivalente de Von Mises.

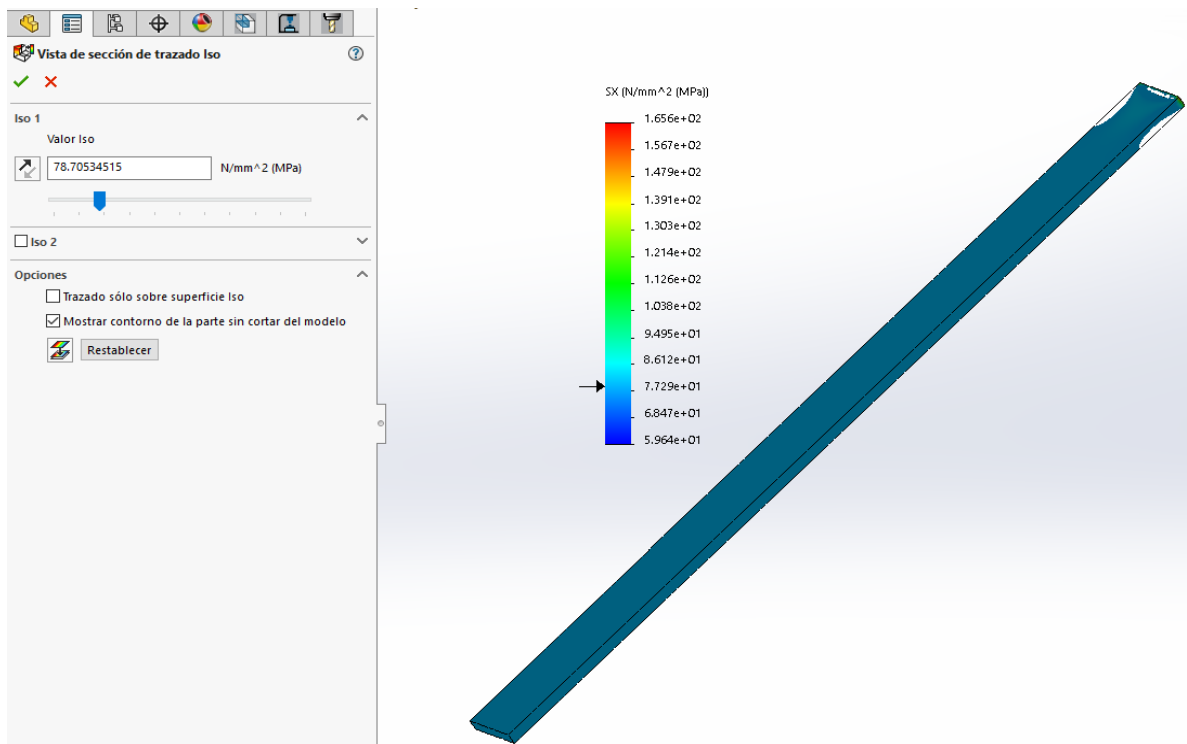


Figura 320. Tensión de Von Mises.

Valor que coincide con el del cálculo analítico:

$$\sigma_x = \frac{F}{\text{Sección transversal}} = \frac{9\,552}{26,2 \cdot 4,65} = 78,75 \text{ (MPa)}.$$

En la Figura 321 se muestra el valor del desplazamiento obtenido tras el análisis informático.

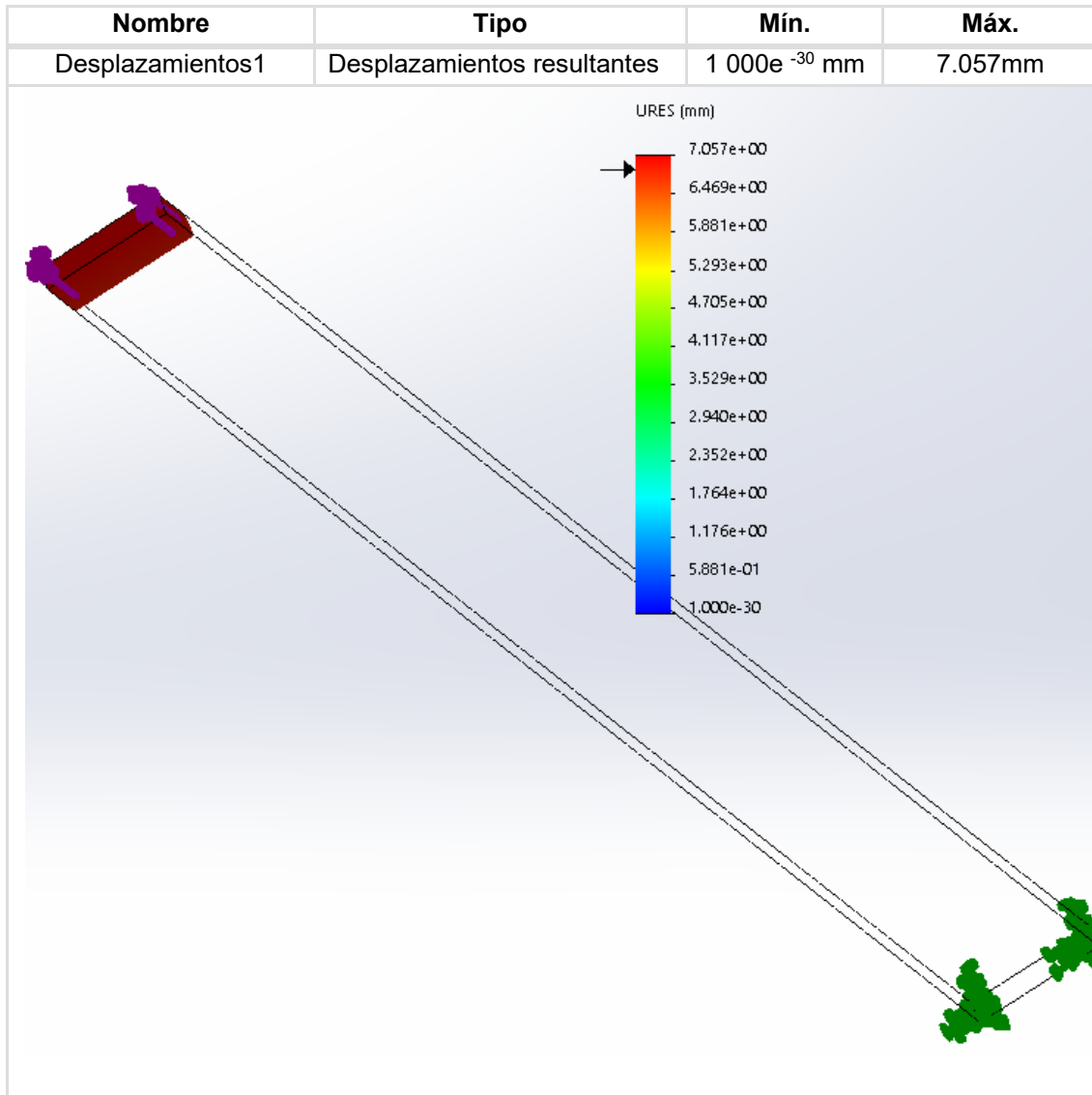


Figura 321. Análisis estático 3-Desplazamientos-Desplazamientos1.

El desplazamiento máximo se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Carrera} = \delta = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} = \frac{9\,592.355,318}{4\,060 \cdot 121,83} = \mathbf{6,86 \text{ (mm)}}.$$

Donde:

F = Carga axial .

L = longitud obtenida al aplicarse la carga axial .

E = Módulo de elasticidad..

A = Sección transversal .

En la Figura 322 se muestra el valor de la deformación unitaria normal obtenida de forma informática.

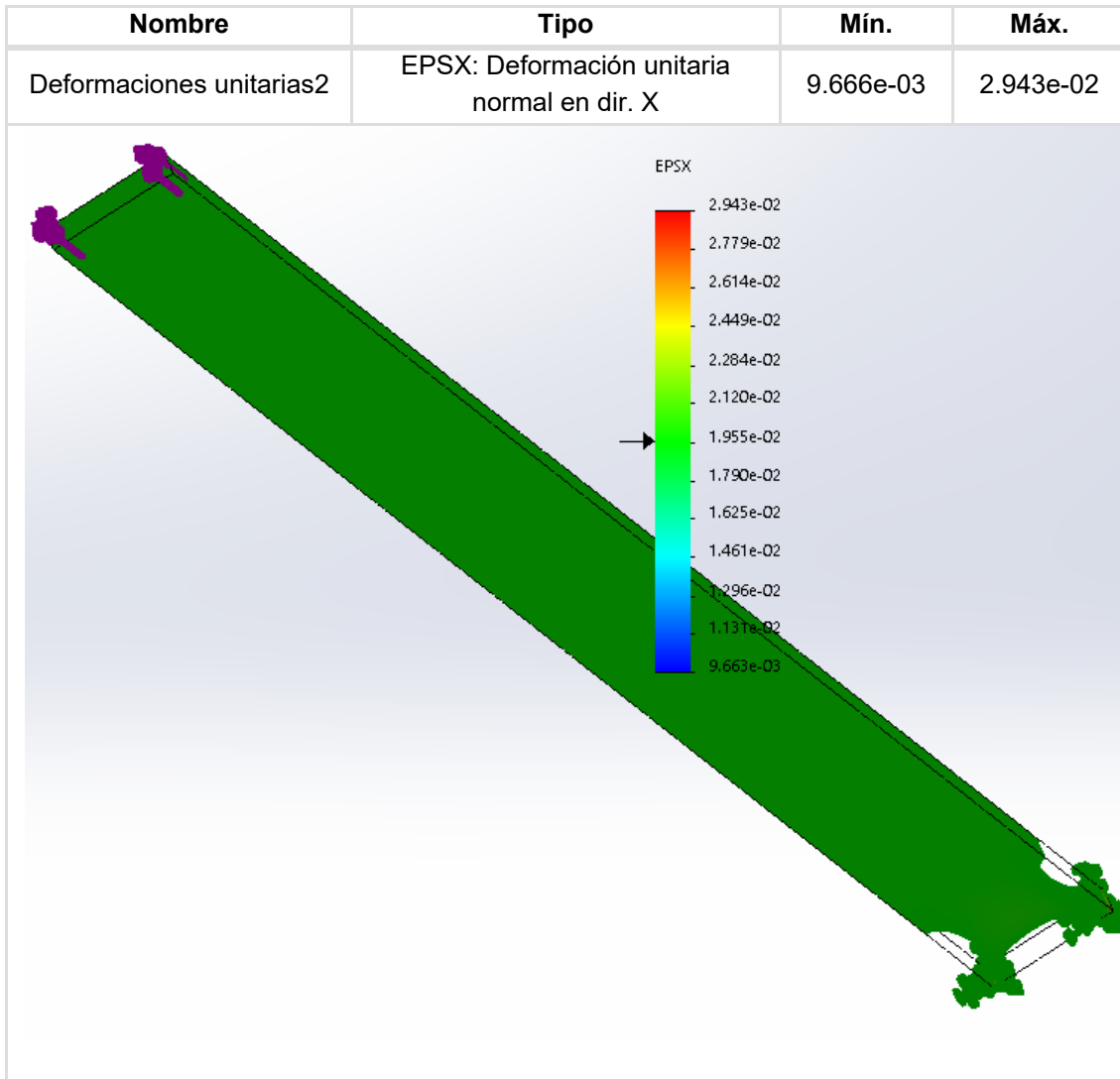


Figura 322. Deformación unitaria normal en dir. X

$$\varepsilon_X = 0,0195 \text{ (mm)}.$$

La deformación unitaria normal en la dirección X, se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_X = \frac{\sigma_X}{E_X} = \frac{78,73}{4\,053} = 0,0194 \text{ (mm)}.$$

En la Figura 323 se muestra el valor de la de deformación unitaria en el eje global Y.

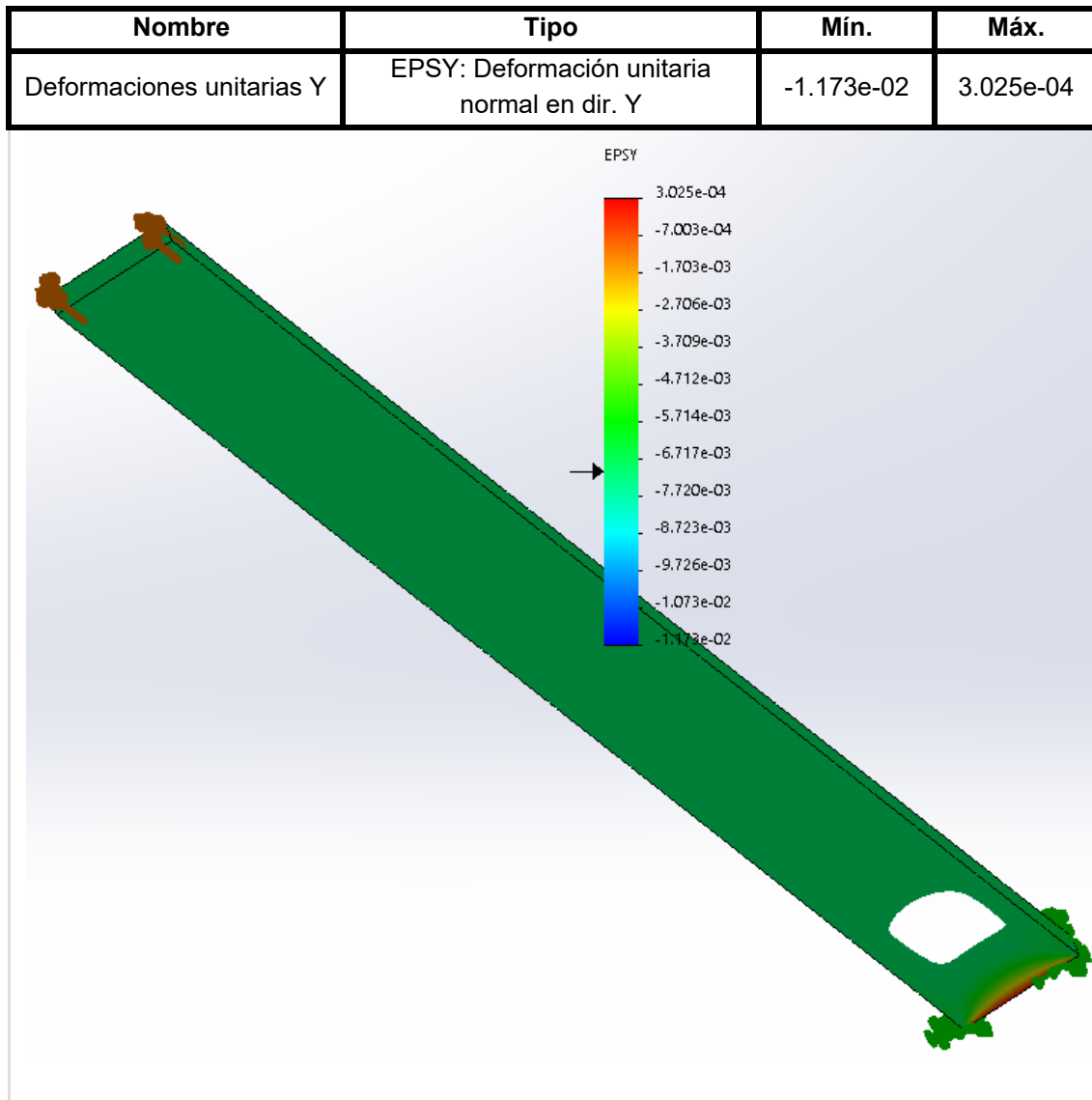


Figura 323. Deformaciones unitarias eje Y

$$\varepsilon_Y = -0,0070 \text{ (mm)}.$$

Cálculo de σ_Y

Conociendo el módulo de poisson de la probeta:

$$\mu = \frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_X}.$$

$$\mu = 0,3577.$$

Sustituyendo:

$$\mu = \frac{\epsilon_Y}{\epsilon_{Xunitaria}} = 0,3577 = \frac{\epsilon_Y}{0,0194}$$

$$\epsilon_Y = 0,3577 \cdot 0,0194 = \mathbf{0,0069} \text{ (mm)}$$

En la Figura 324 se muestra el valor de la de tensión en el eje global X.

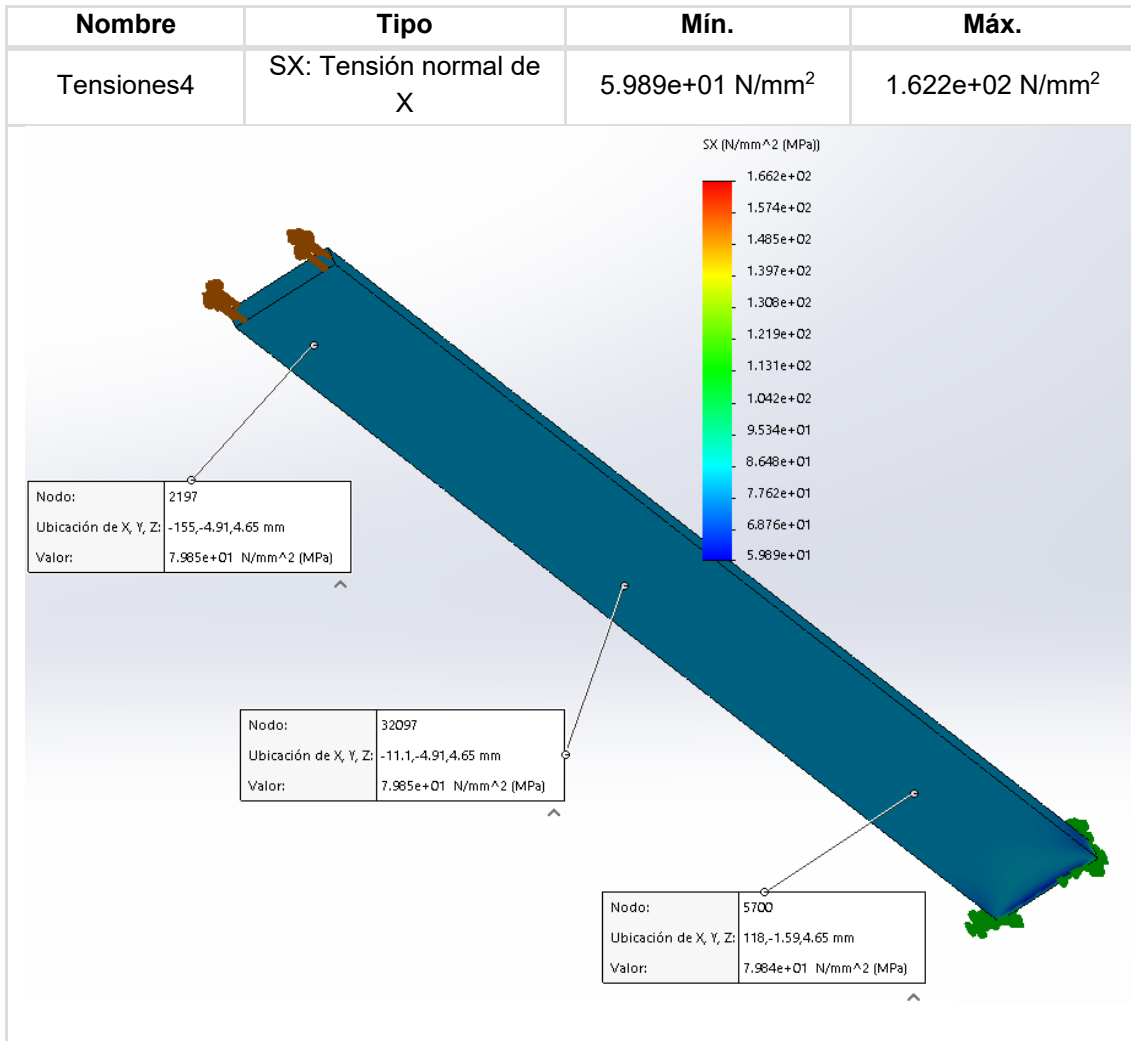


Figura 324 Tensiones en el eje global X.

$$\sigma_X = \mathbf{79} \text{ (MPa)}$$

Coincidente con el valor calculado por procedimiento analítico matemático.

En la Figura 325 se muestra el valor obtenido para la tensión de cortadura TXY.

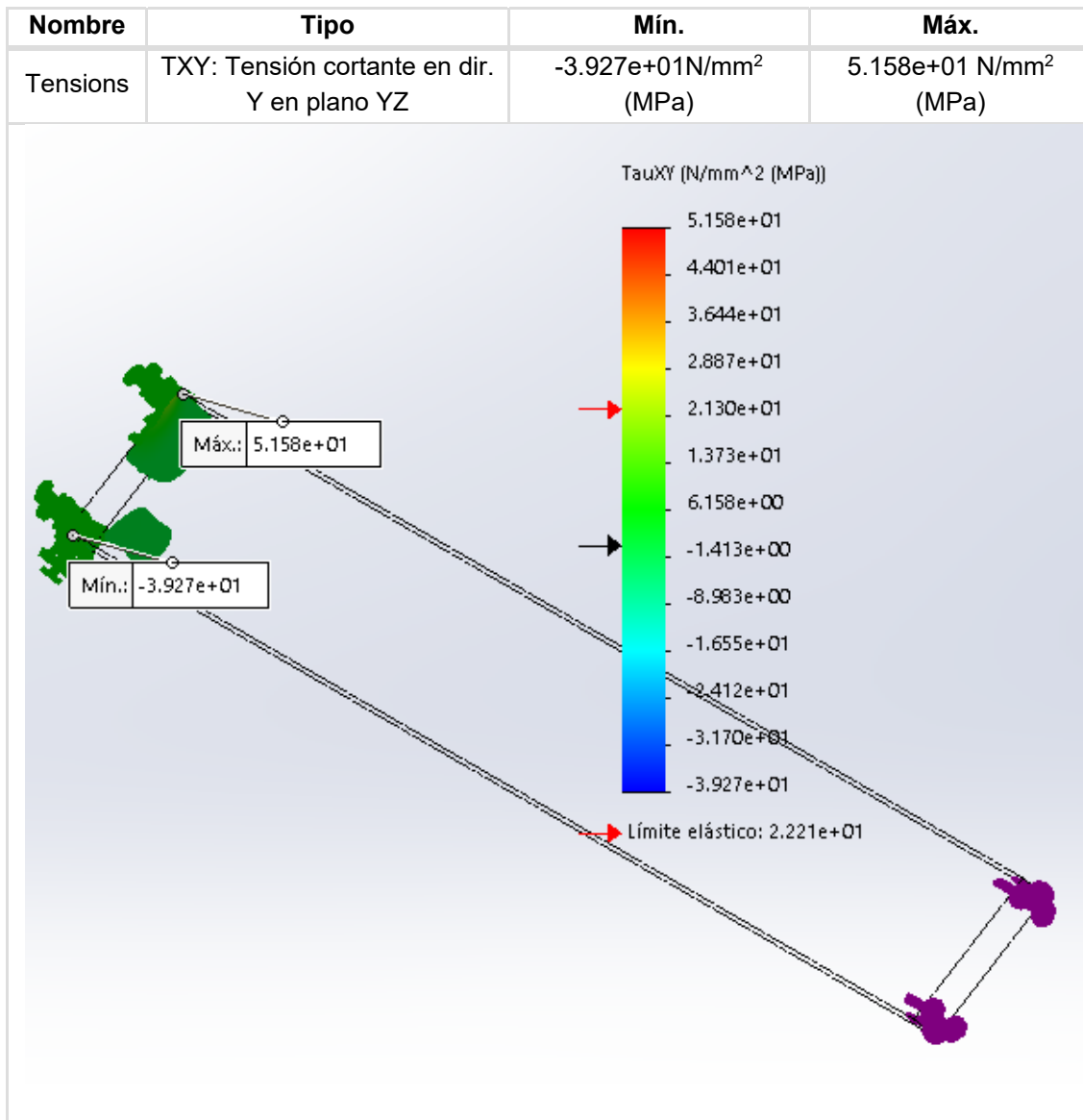


Figura 325. Tensión de cortadura en el eje global XY.

$$\tau_{XY} = \frac{\tau_{\text{máx}} + \tau_{\text{mín}}}{2} = \frac{51,58 - 39,27}{2} = \mathbf{6,1} \text{ (MPa)}.$$

Comprobación de la tensión de cizalladura XY por medio analítico matemático:

$$\gamma_{XY} = \mathbf{0,003645} \text{ (mm)}.$$

$$\gamma_{XY} = \frac{\tau_{XY}}{G_{XY}}.$$

$$\tau_{XY} = 1\,492,063 \cdot 0,003645 = 5,961 \text{ (MPa)}.$$

Existe la opción de realizar un ajuste de valores con la pestaña ISO superficies. Para lo cual se debe de situar el cursor del ratón en la función que se quiera realizar, en este caso se colocará en tensión de cortadura XY, Figura 326.

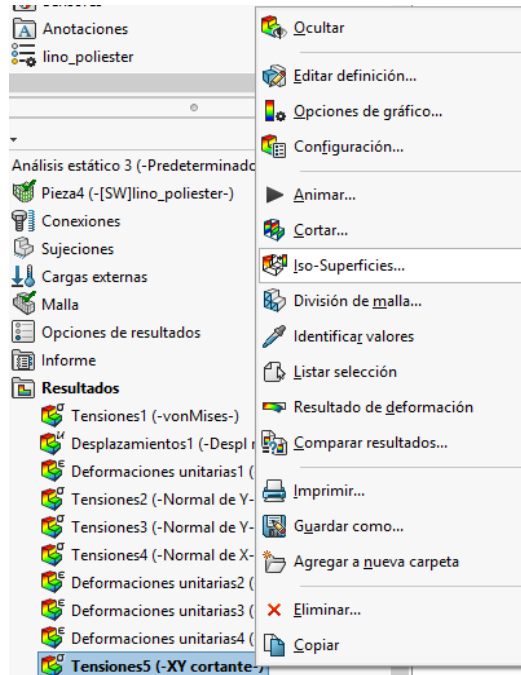


Figura 326. Elección de la tensión de cortadura.

En la Figura 327 se obtiene el valor de la tensión de cortadura con un valor de 6 991 (MPa).

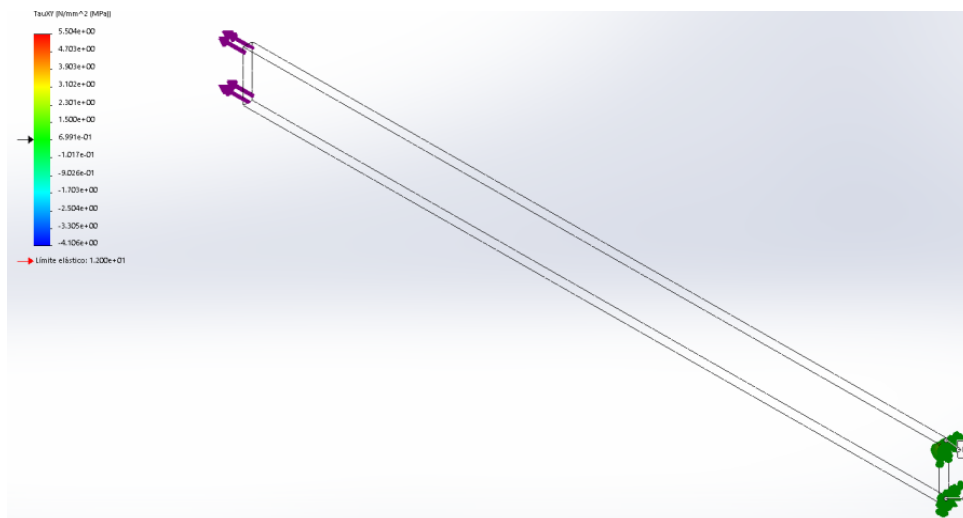


Figura 327. Obtención del valor de la tensión de cizalladura.

En la Figura 328 se confirma el valor de la tensión de cortadura, mediante el método sección trazado ISO.

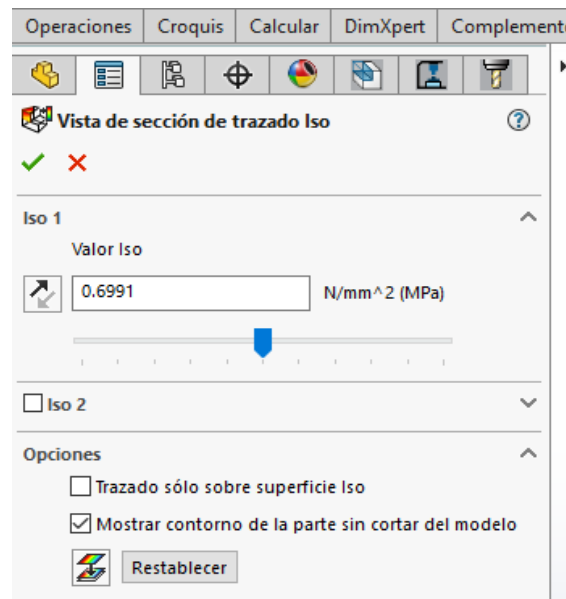


Figura 328. ISO superficies.

En la Figura 329 se indica el valor obtenido central de los valores del módulo de cizalladura, ahora bien se puede obtener distintos valores del módulo realizando un desplazamiento del curso de la imagen de la izquierda de esta misma figura.

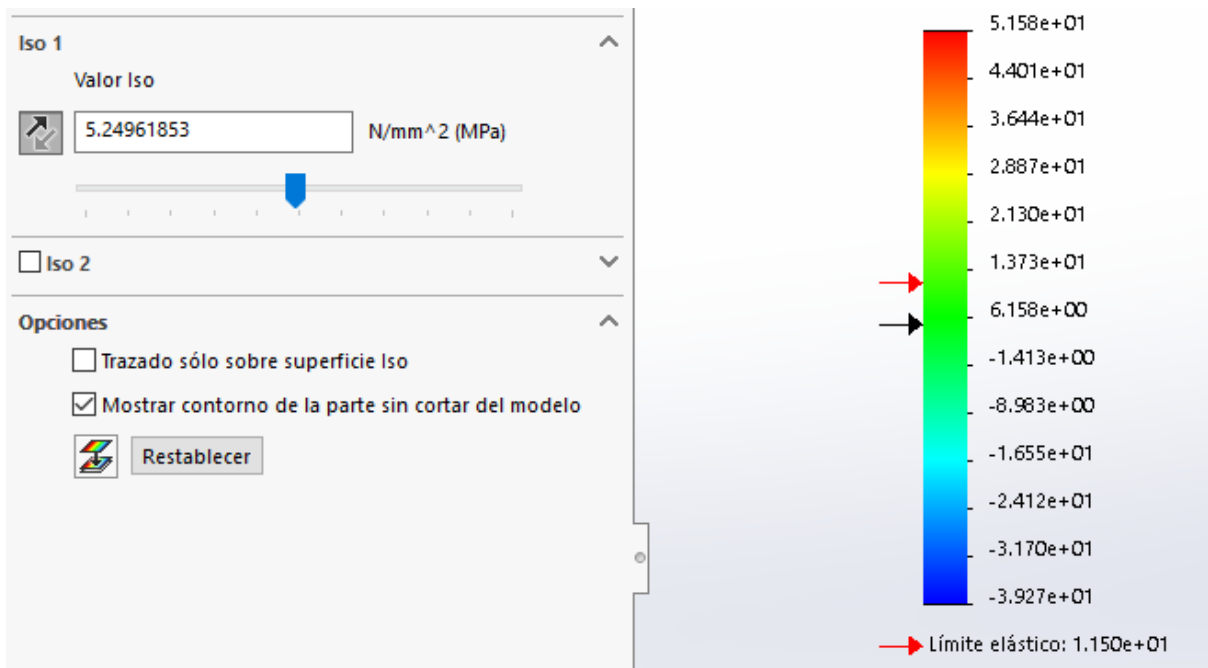


Figura 329. Desplazamiento del cursor hacia el valor que se ha calculado de forma analítica.

Cálculo de la tensión cortante en la dirección, Z en el plano YZ (GMXZ)

En la Figura 330 se muestra el resultado obtenido tras realizar el análisis de diseño.

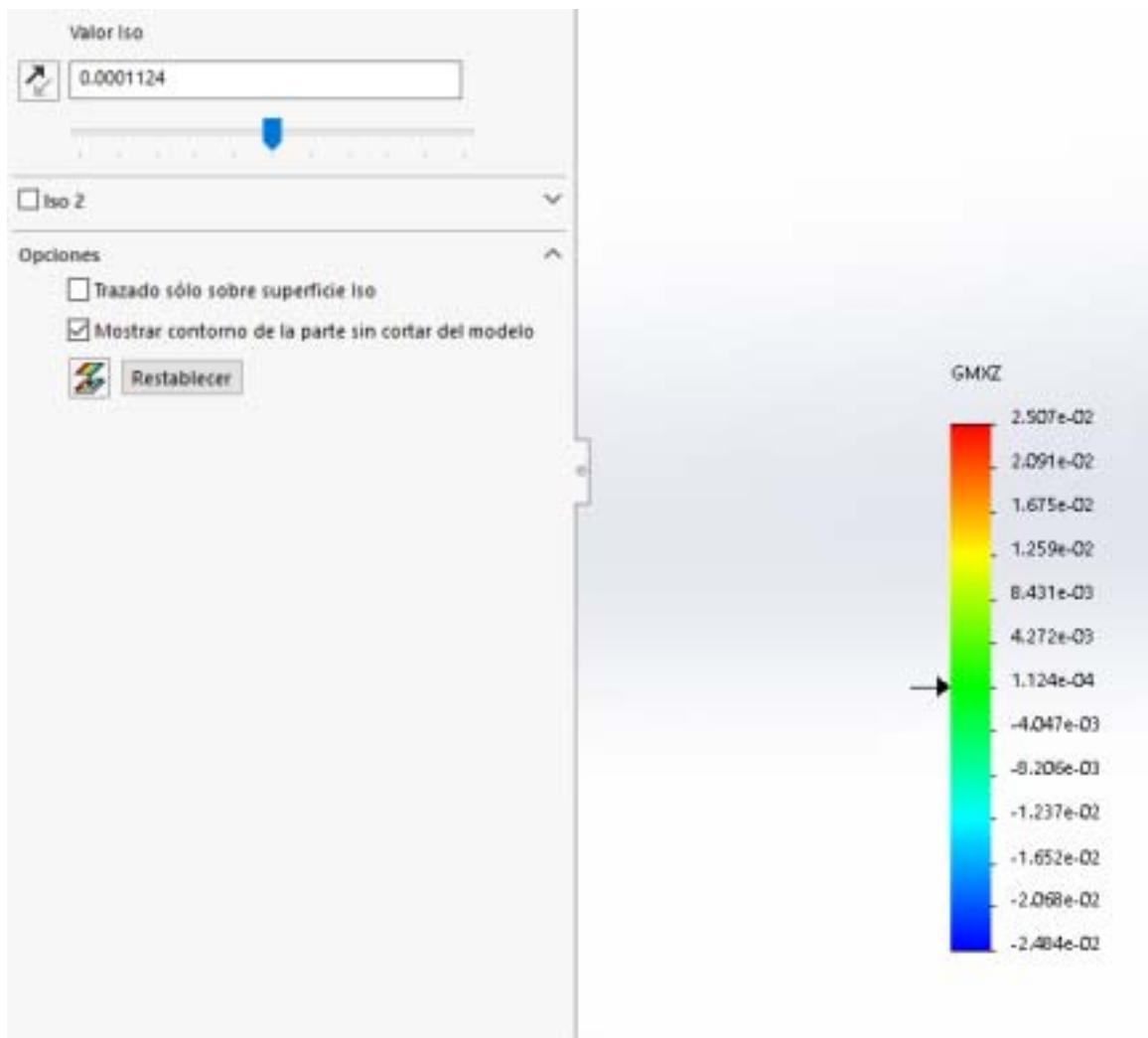


Figura 330. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano YZ.

Cálculo de la tensión cortante en la dirección Z, en el plano YZ (TXZ)

En la Figura 331 se muestra el resultado obtenido tras realizar el análisis de diseño.

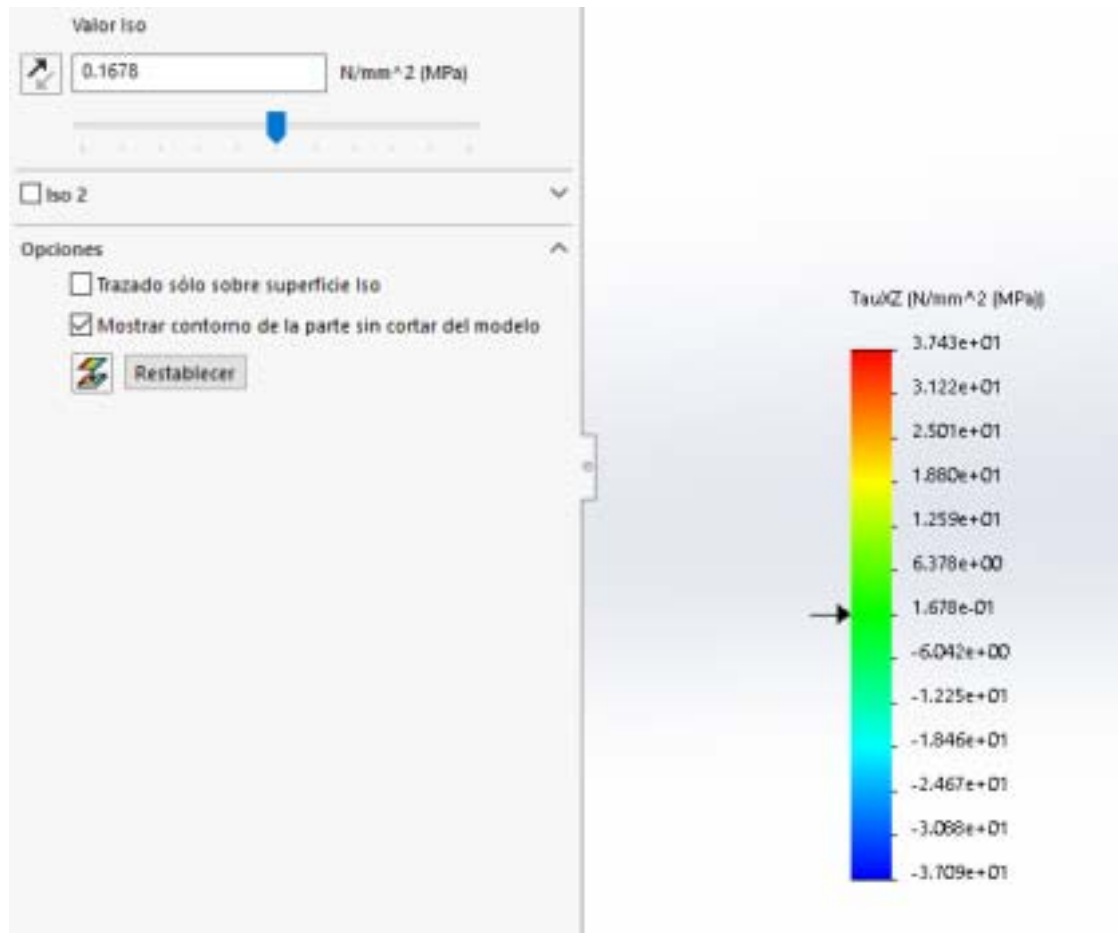


Figura 331. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano YZ.

Deformación eje Z

En la Figura 332 se muestra el resultado obtenido tras realizar el análisis de diseño.

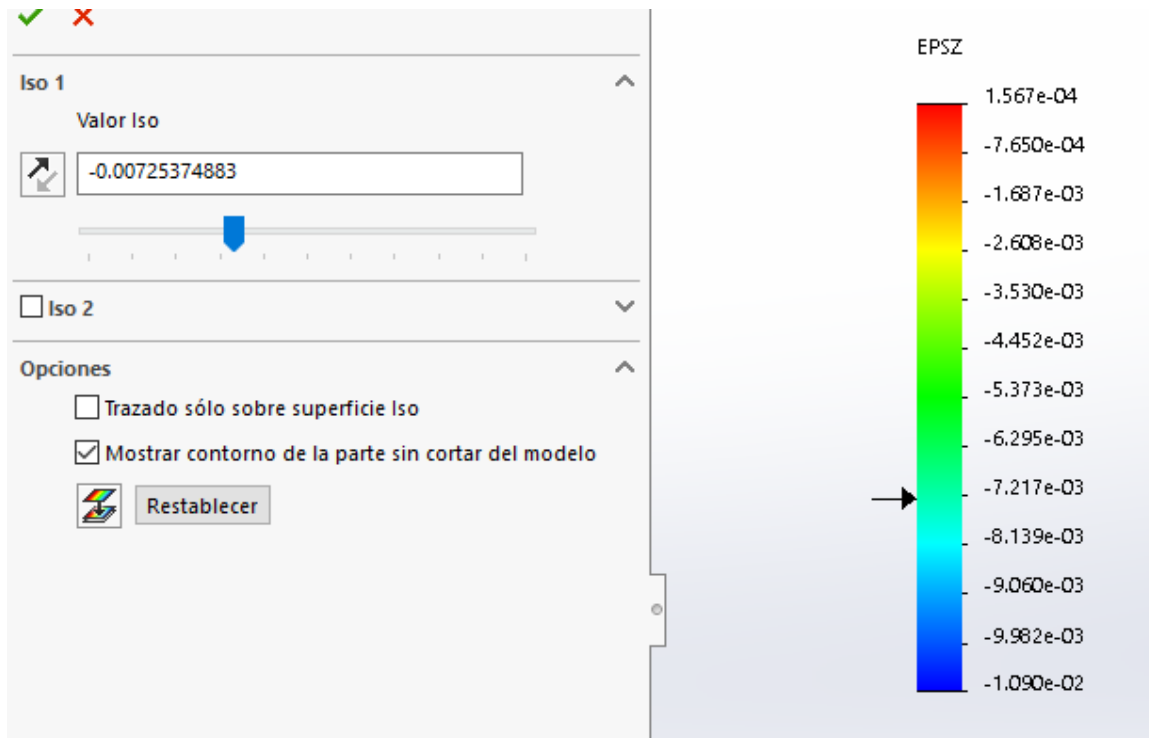


Figura 332. Valor de la deformación en el eje global Z.

Tensión cortante en la dirección Z en el plano XZ (GMYZ)

En la Figura 333 se muestra el resultado obtenido tras realizar el análisis de diseño.

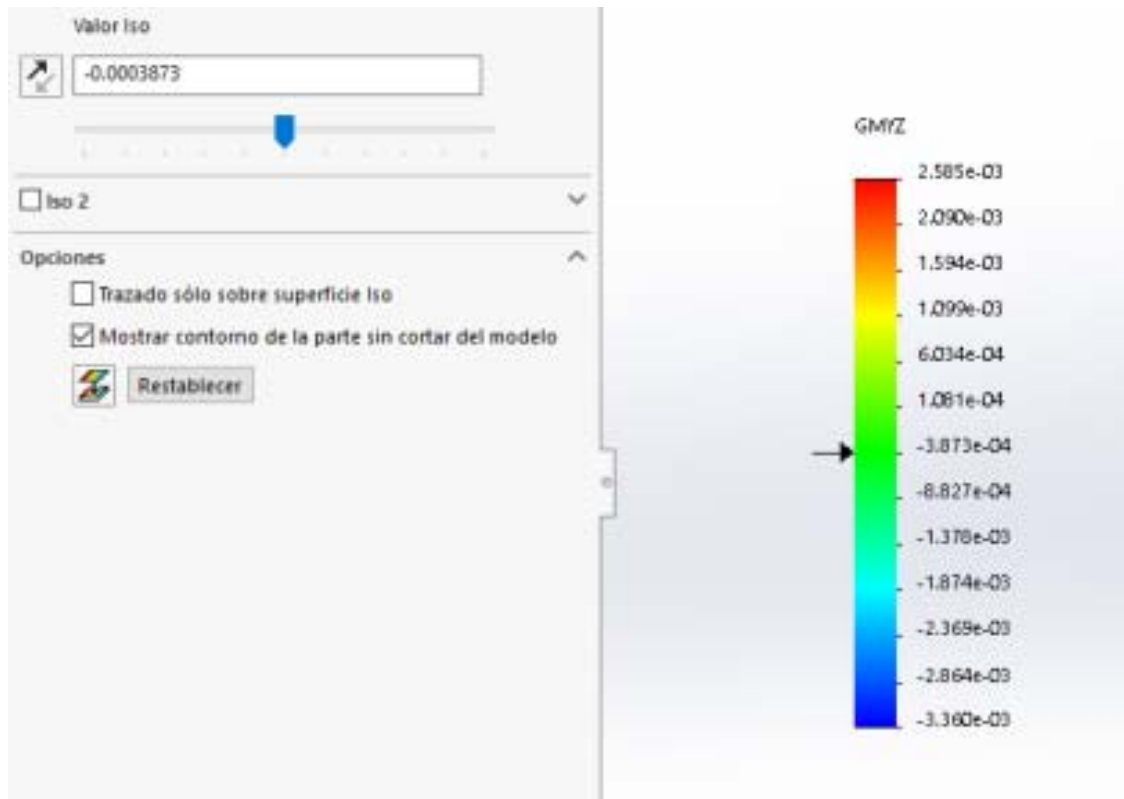


Figura 333. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano XZ.

Tensión cortante en la dirección Z en el plano XZ (TYZ)

En la Figura 334 se muestra el resultado obtenido tras realizar el análisis de diseño.

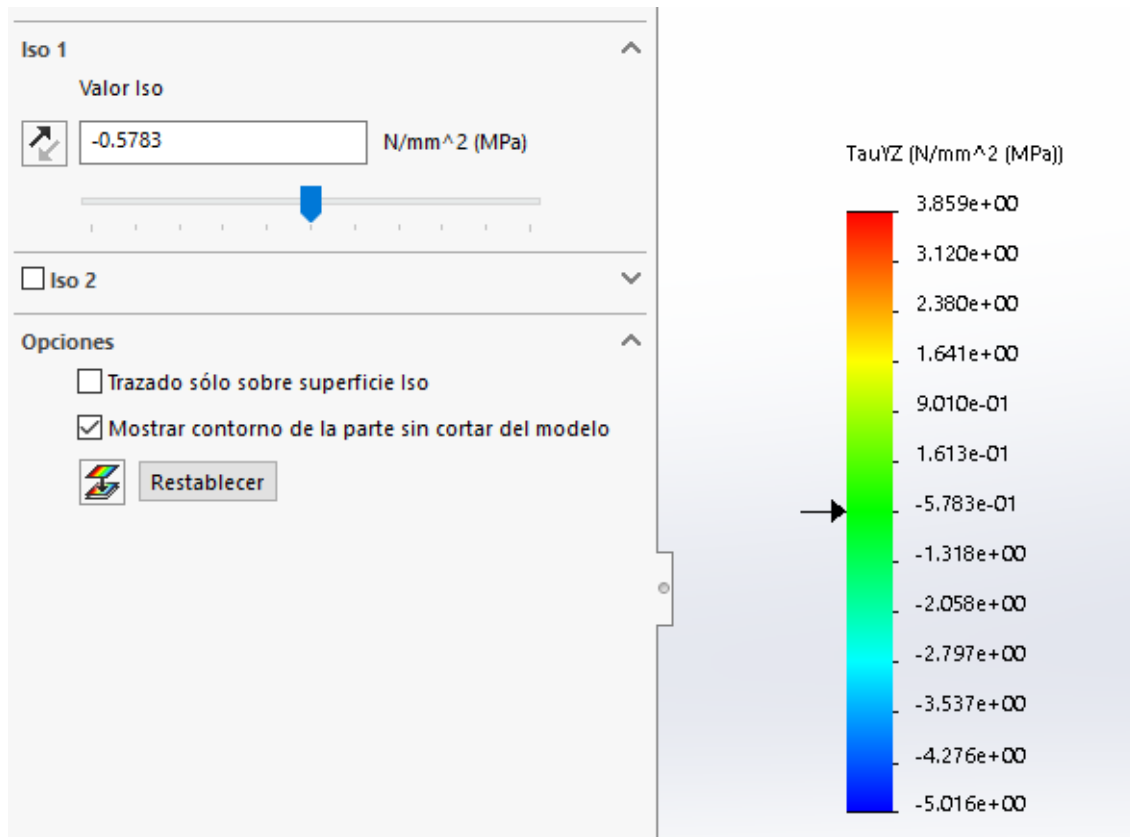


Figura 334. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano XZ.

Cálculo de la tensión normal en la dirección Z

En la Figura 335 se muestra el resultado obtenido tras realizar el análisis de diseño.

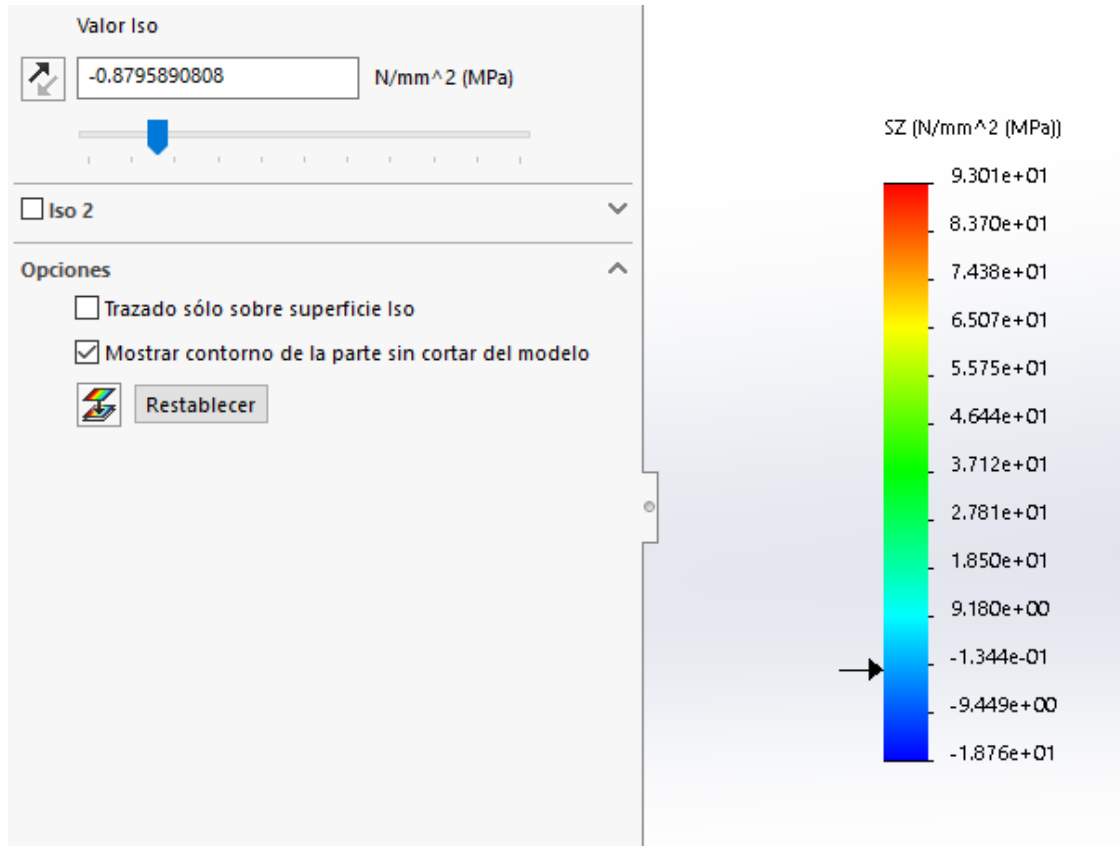


Figura 335. Valor de la tensión normal en el eje Z.

6.6.3. Correlación entre valores calculados por análisis matemático y de diseño

En la Tabla 276 se recopilan las principales expresiones matemáticas para el cálculo analítico de los parámetros elásticos de una lámina.

Tabla 265. Recopilación de expresiones matemáticas para el cálculo de una lámina.

$E_X = E_Z$	
$E_Y = E_Z$	$E_F \frac{\left(1 + \left(\frac{E_F}{E_M} - 1\right) \cdot V_F\right)^2}{V_F + \left(\frac{E_F}{E_M} \cdot V_M\right)} - \left(\frac{E_F}{E_M} \cdot \mu_{M-} \cdot \mu_F\right)^2 \cdot (V_F \cdot V_M)$
$G_{XY} = G_{XZ}$	$\frac{G_F \cdot (1 + V_F) + V_M}{\left(\frac{G_F}{G_M} \cdot V_M\right) + (1 + V_F)}$
G_{YZ}	$\frac{E_Y = E_Z}{2 \cdot (1 + \mu_{YZ})}$
μ_{YZ}	$\frac{(V_F \cdot \mu_F) + \left(\frac{E_F}{E_M} \cdot (V_M \cdot \mu_M)\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{E_F}{E_M} - 1\right) \cdot V_F\right) + \left(\frac{E_F}{E_M} \cdot \mu_{M-} \cdot \mu_F\right)^2 \cdot (V_F \cdot V_M)}{\left(\frac{E_F}{E_M} \cdot \mu_{M-} \cdot \mu_F\right)^2 \cdot (V_F \cdot V_M)}$
$\mu_{XY} = \mu_{XZ}$	$(V_F \cdot \mu_F) + (V_M \cdot \mu_M)$

Recopilación de resultados obtenidos tras el análisis de diseño

En la Tabla 266 se recopilan los valores de las constantes ingenieriles obtenidas tras el análisis de diseño.

Tabla 266. Recopilación de valores obtenidos tras el análisis informático.

σ_X (MPa)	79
σ_Y (MPa)	0,34
σ_Z (MPa)	- 0,8795
τ_{XY} (MPa)	5,44
τ_{XZ} (MPa)	0,1678
τ_{YZ} (MPa)	- 0,5783
GM_{XY} (mm)	0,003645
GM_{XZ} (mm)	0,0001124
GM_{YZ} (mm)	-0,0003873
ε_X (mm)	0,01955
ε_Y (mm)	-0,0069
ε_Z (mm)	-0,007033
μ_{XY}	0,357

Comparativa entre los valores obtenidos a través del cálculo analítico matemático y el del análisis de diseño

Tensión cortante en la dirección Y en el plano YZ (TXY)

La expresión que relaciona la deformación de corte con la tensión de corte es:

$$\gamma_{XY} = G_{XY} = \frac{\tau_{XY}}{G_{XY}}.$$

Sustituyendo y despejando.

$$\tau_{XY} = G_{XY} \cdot \gamma_{XY} = 1\,492,68 \cdot 0,003645 = \mathbf{5,44 \text{ (MPa)}}.$$

Módulo de elasticidad en la dirección Y

$$G_{XY} = \frac{E_Y}{2 \cdot (1 + \mu_{XY})}.$$

$$E_Y = 1\,492,68 \cdot 2 \cdot (1 + 0,357) = \mathbf{4\,051,13 \text{ (MPa)}}$$

Módulo de cortadura en la dirección XZ

La expresión que relaciona la deformación de corte con la tensión de corte es:

$$\gamma_{XY} = G_{XZ} = \frac{\tau_{XZ}}{G_{XZ}}.$$

Sustituyendo y despejando.

$$G_{XZ} = \frac{\tau_{XZ}}{\gamma_{XZ}}$$

$$G_{XZ} = \frac{0,1678}{0,0001124} = \mathbf{1\,492,88 \text{ (MPa)}}.$$

Módulo de elasticidad en la dirección Z

$$G_{XZ} = \frac{E_Z}{2 \cdot (1 + \mu_{XZ})}.$$

$$E_Z = 1\,492,88 \cdot 2 \cdot (1 + 0,357) = \mathbf{4\,051,68 \text{ (MPa)}}$$

Módulo de cortadura en la dirección YZ

$$\gamma_{YZ} = G_{YZ} = \frac{\tau_{YZ}}{G_{YZ}}.$$

$$G_{YZ} = \frac{\tau_{YZ}}{\gamma_{YZ}}.$$

Sustituyendo:

$$G_{YZ} = \frac{-0,5783}{-0,0003873} = \mathbf{1\ 493,15\ (MPa)}.$$

Coefficientes de poisson

$$\mu_{XZ} = \frac{\varepsilon_Z}{\varepsilon_X} = \frac{0,007033}{0,01955} = 0,35.$$

$$\mu_{XY} = \frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_X} = \frac{0,0069}{0,01955} = 0,35.$$

VIII. Cálculo del coste de las placas

1. Introducción

Una vez finalizada la caracterización mecánica y física de los composites, se procede a la obtención del coste total por metro cuadrado de los composites teniendo en cuenta: el coste del material empleado como la materia prima, el material fungible para su fabricación, el coste energético y el coste de la mano de obra de un operario especializado.

2. Cálculo del coste de la resina

A continuación, se especifica el valor de la bioresina y el endurecedor utilizado como matriz en la fabricación de las placas de composite con refuerzo de fibras y/o tejidos. Esta información será tomada en cuenta de manera global para todas las placas de composites fabricadas para calcular el valor total de cada una de las placas.

Tabla 267. Coste de la resina biodegradable utilizada en la fabricación de los “green composites”.

Descripción	Nombre	Precio total (€)	Precio unitario (€)	Precio (€/g)	% IVA	Total (€/g)
6 kits SUPERSAP CLR04	Parte A: 8.032 kg	168,24	113,39	0,0141	21	0,017
11,892 kg. (INFUSION SYSTEM)	Parte B: 3.860 kg		54,85	0,0142	21	0,017

En la Tabla 268 se recopila el valor del coste de la resina aceleradora Norsodyne y su catalizador correspondiente.

Tabla 268. Coste de la resina de poliéster y catalizador utilizado en la fabricación de las placas.

Descripción	Precio unitario (€)	Total (€)	Total (€)	% IVA	Precio total (€)	Precio por lámina (€)
Resina Aceleradora Norsodyne 3 (kg).	11,80	35,40	38,35	21	46,40	9,28
Catalizador resina 0,125(kg))	23,60	2,95		21		

3. Cálculo del coste de las fibras y/o tejidos

Las fibras naturales se presentan en forma de tejidos, y son una de las alternativas más viables en la formación de productos amigables con el medio ambiente.

Los tejidos tienen valores distintos, dependiendo del tipo de fibra, a continuación, se presenta un resumen de su coste por metro cuadrado.

Tabla 269. Coste de las fibras y/o tejidos en la fabricación de los composite.

Proveedor	Descripción	Precio unitario (€)	Precio (€/m ²)	% IVA	Total (€/m ²)
Barnacork, S.L.	Rollos de Fibra de Coco 15 m - h 1 m	68,8	4,59	21	5,55
Antonio Ferre	Rollos de Fibra de Yute 50 m - h 1.6 m	159	1,99	21	2,40
Arte Nuevo S.L.	Rollo de Fibras Textiles recicladas 25 m – h 1 m	25	1	21	1,21
Jordi Sagrista S.L.	Rollos de Fibra de Lino Biaxial +/-45; 20 m – h 1.27 m	409	16,10	21	19,48
Cannabric	Rollos de Fibra de Cáñamo 25 m - h 1 m	136,68	4,97	21	6,01

4. Cálculo del coste de los materiales fungibles

El material utilizado en la fabricación para cualquier tipo de placa, independientemente de las fibras y/o tejidos es común para todas ellas. En la Tabla 270 se especifican los materiales comunes utilizados en la fabricación.

Tabla 270. Coste de los materiales fungibles utilizados en la fabricación de una placa de composite.

Descripción	Cantidad (m)	Coste (€/m)	Sub total (€)
ROLLO BOLSA DE VACIO WL7400 0,002 x60x1000 SHT	1	0,37	0,45
CINTA HELICOIDAL PEBD 9,5 x 12,1 mm (100 m)	3,5	0,52	2,20
TUBO PEBD 9,5 x 12,1 mm C.NATURAL	3	0,43	1,56
CINTA SUJECION DOBLE CARA 1" x 36 YDS CBS	1	0,41	0,50
MASILLA AIRSEAL 2T(ROLLO 3 mm x 12 mm x1 5 m)	3,6	0,29	1,27
ROLLO RED INFUSION AZUL 122 g/m ²	1	1,24	1,50
ROLLO TEJIDO PELABLE ECONOSTITCH 60" x 100 YDS	1	4,49	5,43
Descripción	Cantidad (unidad)	Coste (€/unidad)	Sub total (€)
POLYETHILENE "T" FITTING 1/2 NEGRO	6	0,17	1,23
POLYETHILENE ELBOW FITTING 1/2 NEGRO	6	0,20	1,45
Total			15,61

5. Cálculo del coste de la energía

La empresa que proporciona el suministro eléctrico a la universidad es IBERDROLA CLIENTES S.A.U. Se establece la potencia y el tiempo requerido para cada actividad llevada a cabo en la fabricación de una placa de composite, teniendo en cuenta que el coste de la energía es la misma en la fabricación para cada placa, independientemente de la fibra y/o tejido utilizado en el composite Tabla 271.

Tabla 271. Coste de energía consumida en la fabricación de una placa de composite.

Descripción	Precio (€/kWh)	% IVA	Total (€/kWh)
Coste de Kw-h	0,141017	21	0,17

Descripción	Potencia (Kw)	Tiempo (h)	Cantidad	Coste (€/kWh)	Sub total (€)
Utilización de bomba de vacío	0,9	3,33	1	0,17	0,0569
Utilización de máquina de corte	0,75	0,5	1	0,17	0,4550
				Total	0,51

6. Cálculo del coste de la mano de obra

Se entiende que la mano de obra debe ser cualificada y que tiene que realizar diferentes operaciones como: fabricación de placas por el método de infusión, verificación del proceso y finalmente el corte y preparación de la placa de composite para su correspondiente caracterización, ya sea acústica como mecánica.

Estos valores igualmente se repiten y son comunes independientemente de la fibra y/o tejido utilizado en el composite, Tabla 272.

Tabla 272. Coste de la mano de obra en la fabricación de una placa de composite.

Descripción	Precio (€/h)	Tiempo (h)	Sub total (€)
Preparación manual (fungible-vacío)	30	2	60
Infusión y Verificación del proceso (inicio-fin)	30	1	30
Preparación y corte de placas a medida	30	0,5	15
Total			105

7. Coste de cada placa

Una vez recopilados los datos sobre los costes comunes de los materiales necesarios para la fabricación de las placas, se da paso al cálculo del coste por metro cuadrado de cada una de las placas en función de la fibra y/o tejido utilizado en el composite teniendo en cuenta los costes comunes de fabricación.

En el siguiente apartado se va a realizar un desglose parcial del coste económico de la fabricación de cada una de las placas, que posteriormente deberán de ser ensayadas.

7.1 Placa de fibra de yute

En la Figura 336 se desglosa el coste de la placa composite de yute con bioresina.

Placa Green composite de yute con bioresina			Coste lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	167,96
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,910	0,605	0,55055	1,32
2	0,902	0,612	0,55202	1,33
3	0,906	0,611	0,55355	1,33
4	0,910	0,609	0,55419	1,33
5	0,906	0,604	0,54843	1,32
6	0,906	0,611	0,55356	1,33
			Total(€)	7,97
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)
Kit Lt SUPERSAP CLR04/NIF02 INFUSION SYSTEM		Parte A	1 422,75	26,39
		Parte B	726,03	12,48
			Total(€)	38,87
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	167,96

Figura 336. Coste de la fabricación de una placa de “green composite” con fibra de yute y bioresina.

En la Figura 337 se desglosa el coste de la placa composite de yute con resina de poliéster.

Placa Green composite de yute con poliéster			Coste lámina	0,6 (m ²)	
			Área final (m ²)	0,6	
			Coste Total(€/m ²)	138,37	
Tejido y/o fibra					
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)	
	Largo	Ancho			
1	0,910	0,605	0,55055	1,32	
2	0,902	0,612	0,55202	1,33	
3	0,906	0,611	0,55355	1,33	
4	0,910	0,609	0,55419	1,33	
5	0,906	0,604	0,54843	1,32	
6	0,906	0,611	0,55355	1,33	
			Total(€)	7,97	
Resina de poliéster				Sub total (€)	
Nordsodyne			Total(€)	9,28	
Catalizador					
Energía consumida				0,51	
Material Fungible				15,61	
Mano de obra				105	
Costes total producción			Total (€)	121,12	
				Total Lámina (€)	138,37

Figura 337. Coste de la fabricación de una placa de composite con fibra de yute con resina de poliéster.

7.2 Placa de fibra de lino

En la Figura 338 se desglosa el coste de la placa composite de lino con bioresina.

Placa Green composite de lino con bioresina			Costes Lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	224,10
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,880	0,640	0,56320	10,97
2	0,870	0,630	0,54810	10,66
3	0,915	0,605	0,55357	10,79
4	0,880	0,605	0,53240	10,37
5	0,900	0,630	0,56700	11,05
6	0,910	0,600	0,54600	10,64
			Total(€)	64,50
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)
Kit Lt SUPERSAP CLR04/NIF02 INFUSION SYSTEM		Parte A	1 529,25	26,12
		Parte B	718,75	12,36
			Total(€)	38,48
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	224,10

Figura 338. Coste de fabricación de una placa de “green composite” con fibra de lino y bioresina.

En la Figura 339 se desglosa el coste de la placa composite de lino con resina de poliéster.

Placa Green composite de lino con poliéster			Costes Lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	194,9
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,880	0,640	0,56320	10,97
2	0,870	0,630	0,54810	10,66
3	0,915	0,605	0,55357	10,79
4	0,880	0,605	0,53240	10,37
5	0,900	0,630	0,56700	11,05
6	0,910	0,600	0,54600	10,64
			Total(€)	64,50
Resina de poliéster				Sub total (€)
Nordsodyne			Total(€)	9,28
Catalizador				
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	194,9

Figura 339. Coste de fabricación de una placa de composite con fibra de lino y resina de poliéster.

7.3 Placa de fibra de Materia Textil Borra

En la Figura 340 se desglosa el coste de la placa composite de Materia Textil Borra con bioresina.

Placa Green composite de M.T.Borra con bioresina			Costes Lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	163,29
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,900	0,600	0,54000	0,65
2	0,912	0,605	0,55176	0,67
3	0,903	0,605	0,54631	0,66
4	0,905	0,603	0,54571	0,66
5	0,900	0,634	0,54360	0,66
6				
			Total(€)	3,30
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)
Kit Lt SUPERSAP CLR04/NIF02 INFUSION SYSTEM		Parte A	1 544,75	26,39
		Parte B	726,03	12,48
			Total(€)	38,87
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	163,29

Figura 340. Costes de la fabricación de una placa de composite con fibra de Materia Textil Borra y bioresina.

En la Figura 341 se desglosa el coste de la placa composite de materia textil borra con resina de poliéster.

Placa Green composite de M.T. Borra con poliéster			Costes Lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	133,70
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,900	0,600	0,54000	0,65
2	0,912	0,605	0,55176	0,67
3	0,903	0,605	0,54631	0,66
4	0,905	0,603	0,54571	0,66
5	0,900	0,634	0,54360	0,66
6				
			Total(€)	3,30
Resina de poliéster				Sub total (€)
Nordsodyne			Total(€)	9,28
Catalizador				
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	133,70

Figura 341. Costes en la fabricación de una placa de composite con fibra de Materia Textil Borra y resina de poliéster.

7.4 Placa de fibra de coco

En la Figura 342 se desglosa el coste de la placa composite de fibra de coco y bioresina.

Placa Green composite de coco con bioresina			Costes Lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	201,29
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,905	0,620	0,5611	3,11
2				
3				
4				
5				
6				
			Total(€)	3,11
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)
Kit Lt SUPERSAP CLR04/NIF02 INFUSION SYSTEM		Parte A	3 062,5	52,32
		Parte B	1 439,38	24,74
			Total(€)	77,06
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	201,29

Figura 342. Coste en la fabricación de una placa de “green composite” con fibra de coco y bioresina.

En la Figura 343 se desglosa el coste de la placa composite de coco y resina de poliéster.

Placa Green composite de coco con poliéster			Costes Lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	133,51
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,905	0,620	0,5611	3,11
2				
3				
4				
5				
6				
			Total(€)	3,11
Resina de poliéster				Sub total (€)
Nordsodyne			Total(€)	9,28
Catalizador				
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	133,51

Figura 343. Coste de la fabricación de una placa de composite con fibra de coco y resina de poliéster.

7.5 Placa de fibra de cáñamo

En la Figura 344 se desglosa el coste de la placa composite de una placa de “green composite” con fibra de cáñamo y bioresina.

Placa Green composite de cáñamo con bioresina			Coste lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	181,9
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,900	0,600	0,5400	3,25
2				
3				
4				
5				
6				
			Total(€)	3,11
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)
Kit Lt SUPERSAP CLR04/NIF02 INFUSION SYSTEM		Parte A	2 291,8	39,15
		Parte B	1 077,15	18,52
			Total(€)	57,67
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	181,9

Figura 344. Coste de la fabricación de una placa de “green composite” con fibra de cáñamo y bioresina.

En la Figura 345 se desglosa el coste de la placa composite de cáñamo y resina de poliéster.

Placa Green composite de cáñamo con Poliéster			Coste lámina	0,6 (m ²)
			Área final (m ²)	0,6
			Coste Total(€/m ²)	133,51
Tejido y/o fibra				
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho		
1	0,900	0,600	0,5400	3,25
2				
3				
4				
5				
6				
			Total(€)	3,11
Resina de poliéster				Sub total (€)
Nordsodyne			Total(€)	9,28
Catalizador				
Energía consumida				0,51
Material Fungible				15,61
Mano de obra				105
Costes total producción			Total (€)	121,12
			Total Lámina (€)	133,51

Figura 345. Coste en la fabricación de una placa de composite con fibra de cáñamo y resina de poliéster.

7.6 Resumen del coste de cada placa

En la Tabla 273 se recopilan a modo de resumen los costes por metro cuadrado de cada una de los biocomposites / composites y Materia Textil Borra en función de la fibra y/o tejido utilizado en su fabricación. En la parte superior de la Tabla 273, los valores corresponden a las láminas con bioresina y los valores inferiores de dicha, son los correspondientes a las láminas con resina de poliéster.

Tabla 273. Coste de fabricación de las placas de con bioresina y poliéster en función del tipo de fibra y/o tejido utilizado.

Fibra y/o tejido	Coste (€/0,6 m²)
Fibra de Yute	167,96
Fibra de Lino Biaxial	224,10
M. T. Borra	163,29
Fibra de Coco	201,29
Fibra de Cáñamo	181,90

Fibra y/o tejido	Coste (€/0,6 m²)
Fibra de Yute	138,37
Fibra de Lino Biaxial	194,90
M.T. Borra	133,70
Fibra de Coco	133,51
Fibra de Cáñamo	133,51

7.7 Costes de los apilamientos en forma de sándwich

En la Figura 346 se muestran los costes para un área de 0,6 m² del apilamiento multicapa en forma de sándwich de Materia Textil Borra– yute con bioresina como capas externas y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa de M.T.Borra con bioresina + Lana					Placa de Yute con bioresina				
Tejido M.T.Borra			Coste parcial (€)	65,78	Tejido Yute			Coste parcial (€)	62,45
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)	Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)
	Largo	Ancho				Largo	Ancho		
1	0,900	0,600	0,54000	0,65	1	0,910	0,605	0,55055	1,32
2	0,902	0,605	0,55176	0,67	2	0,902	0,612	0,55202	1,33
3	0,906	0,605	0,54631	0,66	3	0,906	0,611	0,55355	1,33
4	0,910	0,603	0,54571	0,66	4	0,910	0,609	0,55419	1,33
5	0,906	0,634	0,54360	0,66	5	0,906	0,604	0,54843	1,32
					6	0,906	0,611	0,55355	1,33
				Total (€)	3,30				
				Total (€)	38,87				
				Total (€)	15,61				
				Total (€)	8,00				
				Total (€)	128,23				
Placa de M.T.Borra con bioresina + Lana					Placa de Yute con bioresina				
Bioresina					Bioresina				
Supersap CLR04/NIF02					Supersap CLR04/NIF02				
Endurecedor					Endurecedor				
Material Fungible					Material Fungible				
Lana de oveja					Lana de oveja				
Coste total del apilamiento sándwich					Coste total del apilamiento sándwich				

Figura 346. Presupuesto del apilamiento en forma de sándwich de Materia Textil Borra y yute con bioresina y lana.

En la Figura 347 se muestran los costes del apilamiento multicapa en forma de sándwich de Materia Textil Borra- yute con resina de poliéster como capas externas y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa yute con resina de poliéster + Lana					Placa M.T.Borra con resina de poliéster				
Tejido de Yute			Coste parcial(€)	40,86	Tejido de M.T.Borra			Coste parcial(€)	28,19
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)	Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total(€)
	Largo	Ancho				Largo	Ancho		
1	0,910	0,605	0,55055	1,32	1	0,900	0,600	0,54000	0,65
2	0,902	0,612	0,55202	1,33	2	0,912	0,605	0,55176	0,67
3	0,906	0,611	0,55355	1,33	3	0,903	0,605	0,54631	0,66
4	0,910	0,609	0,55419	1,33	4	0,905	0,603	0,55419	0,66
5	0,906	0,604	0,54843	1,32	5	0,900	0,634	0,54571	0,66
6	0,906	0,611	0,55355	1,33					
				Total(€)	7,97				
				Total(€)	9,28				
				Total(€)	15,61				
				Total (€)	8,00				
Resina de poliéster					Resina de poliéster				
Nordsodyne					Nordsodyne				
Catalizador					Catalizador				
Material Fungible					Material Fungible				
Lana de oveja					Lana de oveja				
Coste total apilamiento sándwich					Coste total apilamiento sándwich				

Figura 347. Presupuesto de apilamiento en forma de sándwich de Materia Textil Borra- yute con resina de poliéster y lana.

En la Figura 348 se recopila el coste del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de yute de bioresina - yute con resina de poliéster y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa de yute con bioresina + Lana					Placa de yute con poliéster						
Tejido Yute			Coste parcial (€)		70,45	Tejido Yute			Coste parcial (€)		32,86
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)		Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)	
	Largo	Ancho					Largo	Ancho			
1	0,910	0,605	0,55055	1,32		1	0,910	0,605	0,55055	1,32	
2	0,902	0,612	0,55202	1,33		2	0,902	0,612	0,55202	1,33	
3	0,906	0,611	0,55355	1,33		3	0,906	0,611	0,55355	1,33	
4	0,910	0,609	0,55419	1,33		4	0,910	0,609	0,55419	1,33	
5	0,906	0,604	0,54843	1,32		5	0,906	0,604	0,54843	1,32	
6	0,906	0,611	0,55355	1,33		6	0,906	0,611	0,55355	1,33	
				Total (€)	7,97					Total (€)	7,97
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)	Resina de poliéster						
Supersap CLR04/NIF02	Parte A		1 422,75	23,69	Norsodyne			Total (€)		9,28	
Endurecedor	Parte B		726,03	12,48	Catalizador						
			Total (€)	38,87	Material Fungible			Total (€)		15,61	
Material Fungible			Total (€)	15,61	Coste total del apilamiento sándwich			Total (€)		103,31	
Lana de oveja			Total (€)	8,00							

Figura 348. Coste apilamiento sándwich con capas exteriores de yute con bioresina - yute con resina de poliéster y lana

En la Figura 349 se recopila el coste del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de materia textil de borra con bioresina - yute con resina de poliéster y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa de Materia textil Borra con bioresina + Lana					Placa de yute con poliéster						
Tejido M.T.Borra			Coste parcial (€)		65,78	Tejido Yute			Coste parcial (€)		32,86
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)		Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)	
	Largo	Ancho					Largo	Ancho			
1	0,900	0,600	0,54000	0,65		1	0,910	0,605	0,55055	1,32	
2	0,902	0,605	0,55176	0,67		2	0,902	0,612	0,55202	1,33	
3	0,906	0,605	0,54631	0,66		3	0,906	0,611	0,55355	1,33	
4	0,910	0,603	0,54571	0,66		4	0,910	0,609	0,55419	1,33	
5	0,906	0,634	0,54360	0,66		5	0,906	0,604	0,54843	1,32	
				Total (€)	3,30					Total (€)	7,97
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)	Resina de poliéster						
Supersap CLR04/NIF02	Parte A		1 422,75	23,69	Norsodyne			Total (€)		9,28	
Endurecedor	Parte B		726,03	12,48	Catalizador						
			Total (€)	38,87	Material Fungible			Total (€)		15,61	
Material Fungible			Total (€)	15,61	Coste total del apilamiento sándwich			Total (€)		98,64	
Lana de oveja			Total (€)	8,00							

Figura 349. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina - yute con resina de poliéster y lana.

En la Figura 350 se recopila el coste del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- (PYL) con resina de poliéster y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa de M.T.Borra con PYL y Resina de poliéster + Lana				
Tejido M.T.Borra			Coste parcial (€)	36,19
Láminas	Dimensión (m)		Área (m²)	Sub total (€)
	Largo	Ancho		
1	0,900	0,600	0,54000	0,65
2	0,902	0,605	0,55176	0,67
3	0,906	0,605	0,54631	0,66
4	0,910	0,603	0,54571	0,66
5	0,906	0,634	0,54360	0,66
			Total (€)	3,30
Resina de Poliéster				
Norsodyne			Total (€)	9,28
Catalizador				
Material Fungible			Total (€)	15,61
Lana de oveja			Total (€)	8,00
Placa de yeso laminado			Total (€)	6,32
Coste total del apilamiento sándwich			Total (€)	42,51

Figura 350. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster - PYL y lana.

En la Figura 351 se recopila el coste del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de yute con resina de poliéster - (PYL) y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placas de yute y PYL con resina de Poliéster + Lana				
Tejido Yute			Coste parcial (€)	40,86
Láminas	Dimensión (m)		Área (m²)	Sub total (€)
	Largo	Ancho		
1	0,910	0,605	0,55055	1,32
2	0,902	0,612	0,55202	1,33
3	0,906	0,611	0,55355	1,33
4	0,910	0,609	0,55419	1,33
5	0,906	0,604	0,54843	1,32
6	0,906	0,611	0,55355	1,33
			Total (€)	7,97
Resina de Poliéster				
Nordsodyne			Total (€)	9,28
Catalizador				
Material Fungible			Total (€)	15,61
Lana de oveja			Total (€)	8,00
Placa de yeso laminado			Total (€)	6,32
Coste total del apilamiento sándwich			Total (€)	47,18

Figura 351. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de yute con resina de poliéster – PYL y lana.

En la Figura 352 se recopila el coste del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de yute con resina de poliéster - (PYL) y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa de Yute y PYL con bioresina + Lana				
Tejido Yute			Coste parcial (€)	70,45
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)
	Largo	Ancho		
1	0,910	0,605	0,55055	1,32
2	0,902	0,612	0,55202	1,33
3	0,906	0,611	0,55355	1,33
4	0,910	0,609	0,55419	1,33
5	0,906	0,604	0,54843	1,32
6	0,906	0,611	0,55355	1,33
			Total (€)	7,97
Bioresina			Cantidad (g)	Sub total (€)
Supersap CLR04/NIF02		Parte A	1 422,75	23,69
Endurecedor		Parte B	726,03	12,48
			Total (€)	38,87
Material Fungible			Total (€)	15,61
Lana de oveja			Total (€)	8,00
Placa de yeso laminado			Total (€)	6,32
Coste total del apilamiento sándwich			Total (€)	76,77

Figura 352. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de yute con bioresina – PYL y lana.

En la Figura 353 se recopila el coste del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con resina de poliéster - (PYL) y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa de M.T.Borra con PYL y bioresina + Lana				
Tejido M.T.Borra			Coste parcial (€)	65,78
Láminas	Dimensión (m)		Área (m²)	Sub total (€)
	Largo	Ancho		
1	0,900	0,600	0,54000	1,32
2	0,902	0,605	0,55176	0,65
3	0,906	0,605	0,54631	0,67
4	0,910	0,603	0,54571	0,66
5	0,906	0,634	0,54360	0,66
			Total (€)	3,30
Bioresina				
Supersap CLR04/NIF02			Total (€)	38,87
Endurecedor				
Material Fungible			Total (€)	15,61
Lana de oveja			Total (€)	8,00
Placa de yeso laminado			Total (€)	6,32
Coste total del apilamiento sándwich			Total (€)	72,10

Figura 353. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina – PYL y lana.

En la Figura 354 se recopila el coste del apilamiento en forma de sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina – Materia Textil Borra con resina de poliéster y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Placa de M.T.Borra con bioresina + Lana					Placa de M.T.Borra con resina de poliéster						
Tejido M.T.Borra				Coste parcial (€)	65,78	Tejido M.T.Borra				Coste parcial (€)	28,19
Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)	Láminas	Dimensión (m)		Área (m ²)	Sub total (€)		
	Largo	Ancho				Largo	Ancho				
1	0,900	0,600	0,54000	0,65	1	0,900	0,600	0,54000	0,65		
2	0,902	0,605	0,55176	0,67	2	0,902	0,605	0,55176	0,67		
3	0,906	0,605	0,54631	0,66	3	0,906	0,605	0,54631	0,66		
4	0,910	0,603	0,54571	0,66	4	0,910	0,603	0,54571	0,66		
5	0,906	0,634	0,54360	0,66	5	0,906	0,634	0,54360	0,66		
				Total (€)	3,30					Total (€)	3,30
Bioresina					Resina de poliéster						
Supersap CLR04/NIF02				Total (€)	38,87	Norsodyne				Total (€)	9,28
Endurecedor						Catalizador					
Material Fungible				Total (€)	15,61	Material Fungible				Total (€)	15,61
Lana de oveja				Total (€)	8,00	Coste total del apilamiento sándwich				Total (€)	93,97

Figura 354. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra con bioresina – Materia Textil Borra con resina de poliéster y lana.

En la Tabla 274 se recopilan los costes finales de los apilamientos en forma de sándwich con resina de poliéster – bioresina – placa de yeso laminado y de lana de oveja como núcleo absorbente.

Tabla 274. Costes de apilamiento multicapa tipo sándwich con composites de bioresina- resina de poliéster - placa de yeso laminado y Lana.

Combinaciones	
Materiales Sándwich	Coste en €
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	128,23
M.T.Borra (poliéster)+ Yute (poliéster)	79,05
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	93,97
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	103,31
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	98,64
M.T.Borra (poliéster)+ Yute (bioresina)	79,05
Yute (bioresina) + PYL	76,77
Yute (poliéster) + PYL	47,18
M.T.Borra (poliéster) + PYL	42,51
M.T.Borra (bioresina) + PYL	72,10

En la Tabla 275 se recopila el coste final de los apilamientos en forma de sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado y lana.

Tabla 275. Coste de apilamientos con placas de yeso laminado y lana.

Apilamiento PYL + Lana	
Materiales Sándwich	Coste en €
Lana + PYL	20,64

IX. Conclusiones

1. Conclusiones del aspecto práctico

La motivación para la realización del presente proyecto nace de la búsqueda de alternativas a los materiales tradicionales empleados en las construcciones ligeras de absorción acústica [248].

La caracterización de las placas de los composites se realiza por infusión de resina biodegradable y de poliéster, utilizando como elementos de refuerzo fibras o tejidos de naturaleza lignocelulósica, así como residuos de materia textil procedentes de la industria. Ampliando el estudio a las correspondientes caracterizaciones mecánicas y físicas para la obtención de las propiedades fundamentales de estos composites.

En la actualidad predominan los polímeros sintéticos o procedentes del petróleo que pueden ser termoplásticos “vírgenes” o reciclados como el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, el policloruro de vinilo. Dentro de esta categoría también se encuentran las resinas termoestables como las de poliéster insaturado, las de fenol formaldehído, los isocianatos y las resinas epoxi.

Hoy en día existe un gran interés comercial por el desarrollo y mejora de estos productos, no solo por el agotamiento de las fuentes petroquímicas sino por una mayor concienciación medioambiental y social.

La concienciación ambiental por la reducción de la huella de carbono y el uso de residuos sólidos de origen no natural han dado lugar a un uso cada vez mayor de los materiales biodegradables polímeros y reciclables y sus compuestos para una amplia gama de aplicaciones de ingeniería.

Las fibras naturales derivados de plantas demuestran un gran potencial para su uso en plásticos ,automotriz, e industrias de envasado debido a sus excelentes características tales como baja densidad, alta rigidez específica, buenas propiedades mecánicas, biodegradabilidad, respeto con el medio ambiente, toxicológicamente inofensivo, buen aislamiento térmico y acústico.

El experimentar con materiales lignocelulósicos y resinas biodegradables y de poliéster, permite un enfoque distinto al de la fabricación de composites tradicionales con resinas y fibra de vidrio. Ya que en los últimos años se ha incrementado el interés por el desarrollo de la fibra natural reforzada con compuestos bionaturales para aplicaciones no estructurales.

La disponibilidad de las fibras naturales, su bajo costo, y sus propiedades útiles tales como la resistencia específica, la rigidez y, degradabilidad respetuosa con el medio ambiente hacen a los biocompuestos una alternativa viable a los compuestos sintéticos.

Las fibras naturales se están convirtiendo en una alternativa de bajo costo, ligero y al parecer ambientalmente mejor a la fibra de vidrio en los composites. Es probable que los composites de fibra natural sean ambientalmente superiores a los composites de fibra de vidrio en la mayoría de los casos por las siguientes razones:

- La producción de fibras naturales tiene menores impactos ambientales en comparación con la producción de fibra de vidrio.
- Los composites de fibras naturales tienen un mayor contenido de fibra para un rendimiento equivalente, reduciendo más los contaminantes basados en el contenido de polímero.
- El peso ligero de los composites de fibras naturales mejora la eficiencia de combustible y reduce las emisiones en la fase de utilización del componente, especialmente en aplicaciones de automóviles

Las propiedades de las fibras naturales reforzadas con materiales compuestos poliméricos se rigen en general por el procesado de pretratado de la fibra y el proceso de fabricación de los materiales compuestos. Estas propiedades se pueden adaptar para varios tipos de aplicaciones, seleccionando adecuadamente las fibras, matrices, aditivos y métodos de producción.

2. Conclusiones de los resultados obtenidos

En el presente trabajo se realiza la caracterización acústica de los composites como laminados ligeros para formar parte de particiones como solución acústica al ruido aéreo. Y realizar una comparativa con placas de yeso laminado de 13 mm de espesor.

Para lo cual, se hace necesaria una combinación de composites y materiales absorbentes constituidos por lanas de oveja de diferente procedencia. Para la selección y obtención de estas particiones ligeras a la absorción acústica al ruido aéreo se ha analizado un total de 10 láminas. Las láminas difieren en el tipo de la fibra base para su elaboración (cinco fibras distintas) o en el tipo de resina utilizada para su conformación (dos tipos distintos de resinas; resina epoxi biodegradable y resina de poliéster).

Las fibras utilizadas para el conformado son fibras naturales lignocelulósicas (lino, yute, coco, cáñamo) con bioresina se consideran como “eco-composites”. Por otra parte, las láminas provenientes de la materia de residuo textil borra o de las fibras lignocelulósicas con resina de poliéster se consideran composites.

Se inicia el trabajo con ensayos y análisis individuales de las distintas láminas de los composites, desde las vertientes correspondientes al estudio de las propiedades ingenieriles locales, globales y todos los parámetros del modelo ortotrópico elástico lineal. Utilizando para ello programas informáticos de simulación, hojas de cálculo de Excel, para confirmar la veracidad de los resultados obtenidos.

Una vez finalizados los ensayos mecánicos y físicos, se pasa a realizar los ensayos pertinentes para la obtención de las propiedades acústicas de aislamiento acústico al ruido aéreo de cada una de las láminas de composite, así como el valor de la absorción de la lana de oveja en sus dos vertientes en la cámara de reverberación. La caracterización acústica, se realiza mediante ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión para pequeñas muestras. Con este tipo de cámara, se pueden analizar laminados o láminas de apenas 1m² de muestra.

Una vez conocidas las características físicas, mecánicas y acústicas de cada uno de las láminas de los composites, se deben de elegir aquellos que presenten mejores propiedades mecánicas y acústicas al ruido aéreo. Con la finalidad de obtener apilamientos multicapa (laminados), para su posterior ensayo acústico y comparativa con apilamientos multicapa de placas de yeso laminado y lana de oveja.

De las distintas láminas de composites con resina de poliéster, y bioresina, las que han presentado las mejores características de módulo de elasticidad ha sido la lámina de composite de yute con bioresina. Con respecto a las propiedades al aislamiento acústico al ruido aéreo los composites con mejores propiedades han sido la materia de residuo textil borra y cáñamo con resina de poliéster. Ahora bien, hay que realizar un inciso en este punto y comentar que, los valores de aislamiento acústico al ruido aéreo entre los composites de cáñamo y yute son muy similares, basándose en las propiedades mecánicas del yute que son superiores a las del cáñamo, se eligen finalmente como láminas para el apilamiento en forma de sándwich los composites de Materia Textil Borra y yute, tanto para bioresina como para resina de poliéster.

Para la validación del laminado multicapa conformado por composites de yute y de materia textil borra y convertirlos en un material absorbente acústico ligero, falta dotarles de una lámina intermedia que aporte porosidad. Para lo cual, se utiliza la lana de oveja.

Los materiales absorbentes con los que se van a realizar los ensayos, corresponden a dos muestras distintas de lana de oveja, cedidos por la Escuela Politécnica Superior de Gandia. Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica. Las muestras corresponden a lana M5 y premium respectivamente.

3. Propiedades mecánicas

Los materiales compuestos están formados por la matriz y las fibras de refuerzo. Las propiedades mecánicas de estos componentes son distintas, siendo el resultado de la unión otro material con propiedades totalmente diferentes a sus predecesoras.

Como se ha podido observar en el apartado obtención de resultados, las características mecánicas de los composites elaborados con fibras no tejidas son inferiores a la de los composites elaborados como tejidos. El comportamiento de los composites no tejidos, no presenta fibras continuas siendo semejantes al comportamiento de la bioresina y resina de poliéster; es decir presentan una elevada fragilidad y poca deformación; así como tensiones de rotura elevadas.

Los composites fabricados con tejido tienen mayores características mecánicas resistentes, debidas al entrelazado y/o combinación de la fibra con varias orientaciones en el mismo tejido. Los valores correspondientes a los tejidos de biocomposite, son los que alcanzan los mejores valores en las distintas caracterizaciones.

Debido a que las propiedades del composite son función tanto del porcentaje de fibras que contienen, como de la orientación de sus fibras. Con un mayor porcentaje de fibras se produce un incremento de la resistencia y rigidez del composite, llegando a un límite del 80%. Por su parte la orientación de las fibras va influir de un modo directo en el módulo de elasticidad.

Las fibras continuas que se encuentran ubicadas de forma paralela y unidireccionalmente, originan una estructura más resistente con el inconveniente de producir una fuerte anisotropía. Por lo que se deben emplear fibras en disposición ortogonal cruzadas en una o varias láminas (tejidos).

En el caso de utilizar fibras como material de refuerzo en composites, mejora notablemente las propiedades mecánicas, además existen numerosos estudios de los ensayos realizados a efectos dinámicos y estáticos de estos materiales. Los procesos de fractura en ciclos de carga presentan mayor duración en el tiempo, dependiendo siempre de las características de la matriz [249].

Los valores obtenidos de los módulos de elasticidad de los "green composites" con bioresina son más elevados que los obtenidos para las placas o láminas de composites con resina de poliéster. Siendo el valor del "green composite" de yute el que alcanza el máximo valor.

Los módulos de elasticidad obtenidos en este trabajo son comparables con otros materiales funcionales como la madera laminada, y muy superiores a valores esperados en polímeros termoplásticos.

Los módulos de elasticidad de los composites con bioresina de los materiales Materia Textil Borray yute, son superiores al de la paca de yeso laminado y a los de composites con resina de poliéster.

Con valores correspondientes a 6984 MPa para el yute; 3651 MPa para la materia textil borra y 348,33 MPa para las placas de yeso laminado.

La línea de la gráfica tensión-deformación es no lineal.

Las fibras naturales derivadas de plantas demuestran un gran potencial para su uso en plásticos, automotriz e industrias de envasado debido a sus excelentes características tales como baja densidad, alta rigidez específica, buenas propiedades mecánicas, biodegradabilidad, respeto con el medio ambiente, toxicológicamente inofensivo, buen aislamiento térmico y acústico.

4. Aislamiento al ruido aéreo

Los composites se consideran como capas impermeables al sonido con propiedades de partición ligera para el aislamiento a ruido aéreo.

El aislamiento acústico pasa a ser uno de los requisitos más considerado en la construcción en España desde la publicación del Código Técnico de la Edificación. Con la búsqueda de composites que se adapten a los nuevos códigos de construcción [250].

Los tipos de ensayos acústicos se llevan a cabo en dos cámaras a escala distintas:

- La cámara de transmisión: obtención de aislamiento acústico al ruido aéreo.
- La cámara de reverberación: absorción de los materiales.

Investigación a nivel de lámina

De los valores obtenidos al aislamiento acústico a ruido aéreo de los composites con resina biodegradable, corresponde al cáñamo el valor más elevado, al que sigue la materia textil borra y el yute. Respecto a los composites con resina de poliéster, la materia textil borra adquiere el máximo valor, seguido por el lino. Los resultados de los valores de aislamiento acústico de los composites con matriz de poliéster presentan valores superiores a los composites con bioresina, debido a la mayor masa superficial que estos últimos presentan.

El valor del aislamiento acústico al ruido aéreo de la placa de yeso laminado presenta un valor superior al de todos los composites analizados a excepción de la Materia Textil Borra con resina de poliéster, teniendo en cuenta que los espesores de los composites son inferiores a los de la placa de yeso laminada.

- Materia textil borra con resina de poliéster 38,65 Rw (dB).
- Placa de yeso laminado 36,89 Rw (dB).

Impedancia acústica

Los valores teóricos calculados tras la obtención de la velocidad de propagación del sonido en los materiales compuestos con bioresina y con resina de poliéster dan los siguientes valores:

Composites con bioresina

- Yute $3,4 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Lino $3,11 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Cáñamo $2,98 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Coco $2,02 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Materia textil borra $2,80 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).

Composites con resina de polièster

- Yute $2,89 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Lino $2,88 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Cáñamo $3,21 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Coco $2,19 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).
- Materia textil borra $2,88 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).

Los valores de las distintas impedancias acústicas son muy superiores a la impedancia del aire cuyo valor es:

- Aire $0,0004 \cdot 10^6$ (kg/m²·s).

Como se puede observar las impedancias de los materiales compuestos tienen un valor muy superior a la impedancia del aire, con lo que se favorece una pérdida energética del sonido transmitido. Haciendo que el aislamiento de los paramentos aumente.

Investigación a nivel de apilamiento (sándwich)

Para realizar los apilamientos multicapa tipo sándwich se eligen en principio las tres láminas con un mayor valor al aislamiento acústico a ruido aéreo.

Composites con bioresina

- Cáñamo $33,73 R_w$ (dB).
- Materia textil borra $32,37 R_w$ (dB).
- Yute $30,54 R_w$ (dB).

Composites con resina de poliéster

- Materia textil borra 38,35 R_w (dB).
- Yute 35,49 R_w (dB).
- Cáñamo 35,13 R_w (dB).

Los valores de las láminas de cáñamo y yute con bioresina presentan una diferencia de aislamiento de 3 (dB) en los materiales compuestos con bioresina, mientras que en los materiales compuestos con resina de poliéster son prácticamente iguales en valores ponderados.

Basándose en los módulos de elasticidad:

Módulos de elasticidad de las láminas con resina de poliéster

- Yute 5 697 (MPa).
- Lino 4 053 (MPa).
- Materia textil borra 3 600 (MPa)
- Cáñamo 4 571 (MPa).
- Placa de yeso laminado 348,33 (MPa).

Módulos de elasticidad de las láminas con bioresina

- Yute 6 984 (MPa)
- Lino 4 041 (MPa).
- Materia textil borra 3 651 (MPa)
- Cáñamo 4 048 (MPa).
- Placa de yeso laminado 348,33 (MPa).

Se observa que el módulo de elasticidad del yute para los composites con bioresina y con resina de poliéster tiene el valor más elevado.

Basándose en los valores de aislamiento acústico y módulo de elasticidad, se escogen finalmente como capas exteriores para los apilamientos en forma de sándwich, los composites de Materia Textil Borra [251] y yute, en sus respectivas versiones con bioresina y resina de poliéster.

Para poder realizar una validación de los laminados multicapa tipo sándwich conformados por capas exteriores por biocomposites y composites de yute y de materia textil borra y convertirlo en un material absorbente acústico ligero, falta dotarles de una lámina intermedia que aporte porosidad, para lo cual se utiliza la lana de oveja [252], en sus versiones lana premium de un espesor de 50 mm y lana M5 con espesor de 60 mm.

Análisis a nivel de apilamientos multicapa tipo sándwich

Los máximos valores de aislamiento acústico a ruido aéreo corresponden al apilamiento de materia textil de borra con bioresina y Materia Textil Borra con resina en las pieles exteriores y con un núcleo de lana M5.

Este resultado se verifica debido a que el espesor de la lana M5 es superior en 10 mm al de la lana premium, y la materia textil de borra con poliéster es la que posee el nivel de aislamiento mayor.

Las láminas fabricadas a partir de fibras de coco presentan un valor menor de aislamiento acústico a ruido aéreo por tener un mayor número de huecos, así como un mayor porcentaje de resina.

Todas las placas estudiadas presentan densidades y espesores semejantes, a excepción de la lámina de coco por tener un espesor mayor.

La diferencia de espesores entre las láminas puede ser debida a la no homogeneidad de las placas por ser fabricadas o elaboradas con fibras naturales (no sintéticas) y con residuos textiles. Al estudiar la influencia del tipo de resina utilizada para la conformación de las placas, sí se observa que los valores del aislamiento acústico, tanto en frecuencias de tercio de octava como para los valores globales ponderados, tiene un mayor aislamiento acústico las placas con resina de poliéster.

5. Métodos dinámicos

El objetivo del análisis modal consiste en determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración de las estructuras durante su periodo de vibración libre [253]. Se puede definir un modo de vibración como un patrón o una forma característica en el que vibrará un sistema mecánico.

En este trabajo se va a realizar un estudio comparativo de los ensayos dinámicos aplicados al campo de la acústica con los ensayos estáticos con el objetivo de obtener los módulos de elasticidad de distintos materiales lignocelulósicos impregnados con distintos tipos de resina, y elaborados por infusión de resina en vacío.

El comportamiento de los composites, es complicado de predecir, por su anisotropía y en general por la forma heterogénea de las probetas, y laminados. Los composites se consideran como materiales ortotrópicos formados por dos o tres ejes que son ortogonales entre sí. La propiedad más importante de las fibras naturales es su módulo elástico. El cual se obtiene a través de ensayos dinámicos como son: ensayo de impulso – respuesta, ensayo de vibración forzada y ensayo de vibración libre.

Dentro de los métodos dinámicos, se va a realizar los ensayos de viga en voladizo (vibración libre) [254,255].

Vibración libre: Para la obtención del primer modo de vibración, se requiere de un micrófono de campo altamente sensible de la marca BK (Brüel & Kjær). De una tarjeta electrónica de frecuencia de marca NATIONAL INSTRUMENTS. Y del programa informático M Matlab. Para que la probeta entre en vibración, debe de ser flexionada por su extremo libre, y posteriormente dejar de ejecutar la flexión.

Para obtener el valor del módulo de elasticidad se emplea la ecuación de la Norma ASTM C1215 – 92:2012.

$$E = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot f_n^2 \cdot A \cdot L^4}{I \cdot (B_n L)^4} \quad (5)$$

En el caso de las fibras naturales, no se posee mucha información de los módulos de elasticidad y coeficientes de poisson. Se realizan una serie de cálculos previos, para obtener las constantes ingenieriles globales. La geometría de las probetas deberá de ser rectangular con un dimensionado de 15 mm x 230 mm y un espesor comprendido entre 4,3 – 4,5 mm.

Una vez conocidas las frecuencias naturales de vibración de los distintos biocomposites, se aplica la fórmula de la Norma ASTM C215– 92:2012, para la obtención del módulo de elasticidad.

La utilización de los ensayos no destructivos con métodos dinámicos, aplicados a áreas acústicas y de vibraciones, posibilitan alternativas rentables para la caracterización de nuevos materiales.

Los valores obtenidos por los procedimientos dinámicos acústicos, son muy similares a los valores obtenidos a través de ensayos destructivos con la máquina de ensayo de tracción. El valor más elevado es el del “green composite” con bioresina de yute. La utilización de ensayos dinámicos, aplicados en áreas acústicas, ofrece alternativas rentables para la caracterización de nuevos materiales, no siendo necesaria la utilización de la máquina universal de tracción para la obtención del módulo de elasticidad. Los métodos dinámicos, son métodos en que no se destruye la probeta objeto de análisis, y económicamente son más rentables, por no precisar de la máquina de tracción universal para la obtención del mismo.

Pudiendo determinar:

- Factores de asilamiento acústicos
- Coeficientes de amortiguamiento (Damping).
- Módulo de elasticidad.

La comparación de los ensayos estáticos y dinámicos son herramientas válidas para la caracterización de un material, evitando la fractura del material. Permitiendo el análisis acústico, del coeficiente de amortiguamiento y el módulo de elasticidad [129, 130].

6. Costes

La utilización de la bioresina, como material matricial constituyen una buena alternativa en general, aunque el valor de la materia prima para la elaboración las placas de biocomposite aumenta aproximadamente en un 20%.

En la Tabla 276 se recopilan todas las combinaciones analizadas de materiales compuestos con bioresina, así como con resina de poliéster y los apilamientos formados por placa de yeso laminado y materiales compuestos con bioresina y resina de poliéster. Aparte de los apilamientos formados por composites / biocomposites y lanas de ovejas, se va a realizar el estudio económico de las distintas combinaciones en las pieles exteriores formados por placas de yeso laminado...

Tabla 276. Recopilación de costes de los apilamientos sándwich.

Apilamientos combinados	Coste (€)
M.T.Borra (bioresina) + Yute (bioresina)	128,23
M.T.Borra (poliéster) + Yute (poliéster)	79,05
M.T.Borra (bioresina) + M.T.Borra (poliéster)	93,97
Yute (bioresina) + Yute (poliéster)	103,31
M.T.Borra (bioresina) + Yute (poliéster)	98,64
M.T.Borra (poliéster) + Yute (bioresina)	79,05
Yute (bioresina) + PYL.	76,77
Yute (poliéster) + PYL.	47,18
M.T.Borra (poliéster) + PYL	42,51
M.T.Borra (bioresina) + PYL	72,10
PYL + PYL	20,64

Donde se refleja que los apilamientos con resina de poliéster son más económicos que los de bioresina.

Entre todas las combinaciones de materiales compuestos, la más económica corresponde a pieles exteriores con placas de yeso laminado y Materia Textil Borra con resina de poliéster. Debido a que los laminados con Materia Textil Borra tienen una lámina menos que sus homólogos de yute, y al ser la resina utilizada de poliéster es mucho más económica que la bioresina.

Los apilamientos con un coste más elevado de todos los composites, corresponden a las combinaciones con Materia Textil Borra con bioresina y yute con bioresina en las pieles exteriores. Los apilamientos más económicos son los constituidos por placas de yeso laminado y lana.

7. Alternativa

Los composites presentan buenas propiedades mecánicas, biodegradabilidad, respeto con el medio ambiente, toxicológicamente inofensivo, buen aislamiento térmico y acústico, ofreciendo una alternativa viable a los materiales sintéticos actualmente utilizados.

En relación con la utilización de la resina de poliéster en general, su valor en el proceso de fabricación y de materia prima de las placas de biocomposite disminuye en un 8%, con respecto al valor inicial.

X. Líneas de trabajo futuras

1. Investigación

Para seguir en la línea de investigación abierta en esta tesis doctoral, y para complementar la parte experimental de la caracterización de los materiales eco-composites que ha quedado pendiente, se deberían de realizar varios ensayos.

El análisis térmico mecánico dinámico (DMA) de los materiales eco-composites, se realizará con la finalidad de comprobar los resultados del módulo de elasticidad obtenido en el estudio y el obtenido por este método de caracterización para poder validar el método de obtención del mismo más idóneo para este tipo de materiales. Éste ensayo se basa en la determinación de las propiedades mecánicas (módulo elástico o de almacenamiento y modulo viscoso o de pérdidas) de los materiales en función de un programa de temperaturas controlado. La información que aporta éste método es útil tanto desde el punto de vista estructural del material, como desde el punto de vista del diseño y cálculo.

El ensayo de Damping, se llevará a cabo para determinar la rigidez a la flexión y módulo de elasticidad, mediante vibraciones según la normativa ASTM C1215-92 (2012). Los resultados obtenidos tras la realización del ensayo también se pueden emplear para la determinación de la propiedad dinámica de amortiguamiento. El ensayo consiste en medir las vibraciones de una viga en voladizo, para lo que se golpea en el centro de la viga con un martillo de impacto modal con el objetivo de captar la señal del modo fundamental de vibración de la viga, utilizando acelerómetros que miden las aceleraciones que experimenta la viga tras el impacto. La señal captada por los acelerómetros pasa a un sistema de adquisición de datos dinámicos que permite transferir la información a un software computacional; que transforma las señales vibracionales en gráficas amplitud-frecuencia y aceleración-tiempo permitiendo determinar la razón de amortiguamiento de la viga ensayada.

Otra de las posibilidades a tener en cuenta en cuanto a líneas futuras, es la combinación de matrices con nanofibras, de cualquier tipo de procedencia y origen. Además, la combinación de distintas capas de los diferentes materiales estudiados y caracterizados en éste trabajo, como otra alternativa viable como trabajos futuros a tener en cuenta.

En definitiva, se trata de buscar aplicaciones de estos materiales eco-composites en el ámbito de la acústica arquitectónica como alternativa a los comúnmente utilizados hasta ahora. Su potencial se encuentra en la recuperación de materiales usados y en la utilización de materiales naturales contribuyendo a la sostenibilidad con el medio ambiente.

XI. Referencias

1. Citas bibliográficas

- [1] Méndez Ramos M. Determinación de la matriz de rigidez de un material compuesto laminado de fibra de vidrio y resina poliéster. [Tesis de Master] IPN ESIME UPALM, México;17 Junio 2004.
- [2] Daniel I, Ishai O. Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford Univerity. New York,1994. pp 299-300.
- [3] C. Sita, M. Burns, R. Häßler, W. Focke. Tensile properties of thermoplastic starch-PVB blends, J. Appl. Polym. Sci.2006; **101** (1): 1751-1755.
- [4] Cifuentes G., & Avisai M. (2010). La biotecnología como medio para prevenir la contaminación ambiental con el uso de plasticos biodegradables.
- [5] García-Echave, R. B., Campo, J. J., Larrañaga, M., German, L., & Iturrondobeitia, M. Desarrollo de granzas y compuestos plásticos para aplicaciones de altas prestaciones a partir de PET reciclado (RPET).
- [6] Shibata M., et al. Biodegradable polyester composites reinforced with short abaca fiber. Journal of Applied Polymer Science; 2002. **85**(1):129-138.
- [7] Dávila José Luis, et al.Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales, Firts edition, Imprefepp,Quito Ecuador, (2011).
- [8] Griffin G.J. Firts edition, Chemistry and technology of biodegradable polymers. Blackie Academic and Professional Stamford, Lincolnshire United Kingdom, 1994.
- [9] G. J. L. Griffin.Chemistry and technology of biodegradable polymers, Firts ed, Ecological Materials Research Institute, Epron Industries Ltd, Lincolnshire United Kingdom, 1994.23. Netravali, A.N. and S. Chabba, Composites get greener. Materials today. 2003; **6**(4): 22-29.
- [10] C. Bastioli, Handbook of biodegradable polymers, Firts edition, Rapra Technology Limited, Creve United Kingdom, 2005.
- [11] Muñoz Dominguez. Fabricación y Caracterización de green composites con bioresina y tejido de Fibra Natural de Lino mediante Móldeo por transferencia de Resina. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. [Tesis doctoral: <http://hdl.handle.net/10251/61299>]. Valencia Spain, Universitat Politècnica de València: 1 Diciembre 2016.
- [12] Miravete Antonio, and Luis Castejón. 20 edition. Zaragoza:Materiales compuestos.Temes de disseny;..2002.

- [13] Recuero Alfonso, et al. Refuerzo de estructuras con composites avanzados. *Informes de la Construcción*. 1997; (49): 39-50.
- [14] Víctor Alfonso Gómez Culebro. Caracterización mecánica de materiales compuestos manufacturados fuera de la autoclave. CIDESI [Tesina Máster <http://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/187>]. Santiago de Querétaro México; 1 Marzo 2017.
- [15] Sèbe G, et al. RTM hemp fibre-reinforced polyester composites. *Applied Composite Materials*. 2000; 7(5): 341-349.
- [16] Symington, M., et al. Kink bands in flax and hemp polyester composites. in *Proceedings of the 18th International Conference on Composites Materials (ICCM'11)*. 2011.
- [17] Maffezzoli A, et al. Cardanol based matrix biocomposites reinforced with natural fibres. *Composites Science and Technology*. 2004; 64(6): 839-845.
- [18] Rwwiire S, et al. Development of a biocomposite based on green epoxy polymer and natural cellulose fabric (bark cloth) for automotive instrument panel applications. *Composites Part B: Engineering*. 2015;81: 149-157.
- [19] John Maya Jacob, and Sabu Thomas. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*. 2008; 71.(3):343-364.
- [20] Shibata M, et al. Biodegradable polyester composites reinforced with short abaca fiber. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002; 85(1):129-138.
- [21] Rouison D, M Sain, and M Couturier. Resin transfer molding of hemp fiber composites: optimization of the process and mechanical properties of the materials. *Composites Science and Technology*. 2006; 66(7):895-906.
- [22] Sreekumar P, et al. A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques. *Composites Science and Technology*. 2007; 67(3):453-461.
- [23] BAKSI S, and BISWAS S. Natural-fibre composites in construction and rehabilitation. *JEC composites*. 2012; 77:25-28.
- [24] Bakis Charles E., et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. *Journal of composites for construction*. 2002; 6.(2):73-87.
- [25] David Juarez Varón, Rafael Antonio Balart Gimeno, Miguel Sánchez Llopis, Ana Mengual Recuerda. green composites basados en posidonia. *Caracterización mecánica*. ISSN-e 2254-4143. 2015;. 4 (3): 147-158.

- [26] Faruk Omar, et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*. 2012; 37 (11):1552-1596.
- [27] Liu Q, Hughes M. The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites. *Compos A Appl Sci Manuf*. 2008; 39:1644-1652.
- [28] Arruti JR, Erhan S. Vacuum bag in vacuum chamber technique for epoxy matrix composite materials fabrication. Centro de Investigación en Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. *Revista Ingeniería UC*, **23**, No. 1, 2016: p. 22-29.
- [29] La Mantia, F. and M. Morreale, Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2011; 42(6):579-588.
- [30] Mohanty, A., M. Misra, and L. Drzal, Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment* 2002; 10(1):19-26.
- [31] La Rosa A.D, et al. Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2014; 74: 135-144.
- [32] Carbó Giró Carlota, and Manuel Roca Baringo E. (2015). Evaluación de la dependencia de combustibles fósiles en la construcción de viviendas en Chile determinando una alternativa en materiales y sistemas constructivos en un mundo post petróleo. CIDESI [Tesis Máster]. TALCA Chile. Escuela de Ingeniería en Construcción: 96.
- [33] Joshi S.V, et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. 2004; 35(3): 371-376.
- [34] Joshi S, Drzal L, Mohanty A, Arora S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites. *Compos. P t. A-Appl. Sci. Manuf*. 2004; . 35: 371-376.
- [35] Ridzuan, M.J.M, et al. Characterisation of natural cellulosic fibre from *Pennisetum purpureum* stem as potential reinforcement of polymer composites. *Materials & Design*. 2016; 89: 839-847.
- [36] Soriano N, Roig I, Fita S, Sanz C. Estudio de las propiedades mecánicas de biocomposites con fibras naturales. Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS). Valencia. España. 2010; 6(10): 50-70.
- [37] Ahmad F, Choi HS, and Park MK. A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2015; 300(1):10-24.

- [38] Sodoke K.F., et al. Fuzzy logic response to Young's modulus characterization of a flax–epoxy natural fiber composite. *Materials & Design*. 2016; 89: 273-285.
- [39] PaganO, Nicholas J. Soluciones exactas para composites bidireccionales rectangulares y placas sándwich. *Revista de materiales compuestos*. 1970; 4, no 1: 20-34.
- [40] Pontón P, and Guerrero VH. Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá mediante estratificación manual. *Revista Tecnológica-ESPOL*. 2010;. 23(3).
- [41] Maya L.S A, & Useche LV. (2004). Falla de los materiales compuestos laminados. *Sciencia et technica*2004; 2 (25):47-54.
- [42] Mano B, Araujo J, Spinace N and de Paoi M. Polyolefin composites with curaua fibres: Efect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions. *Journal of Composites Science and Technology*.2010; 70: 29-35.
- [43] Diego A, et al. Utilización de materiales compuestos en la construcción de nuevos puentes. *II Jornadas de investigación en Construcción*. Madrid España. 2008 p.1583-1592
- [44] Palacios Acosta E. A. Construcción de una estructura de soporte para una aeronave no tripulada aplicando ingeniería inversa, utilizando material de matriz de resina poliéster reforzado con fibra natural de coco o cabuya [Bachelor's thesis <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6509>]. Ibarra Ecuador, Universidad Técnica del Norte. 29 Marzo 2017.
- [45] Corum J, Battiste R, and Ruggles-Wrenn M. Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites. *Composites science and technology* 2003; 63(6): 755-769.
- [46] Al-Oqla FM, and Sapuan S. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production* 2014; 66:347-354.
- [47] Kelkar A.D, Tate JS, and Chaphalkar P. Performance evaluation of VARTM manufactured textile composites for the aerospace and defense applications. *Materials Science and Engineering: B* 2006; 132(1):126-128.
- [48] Galan-Marin C, Rivera-Gomez C, Garcia-Martinez A. Use of Natural-Fiber Bio-Composites in Construction versus Traditional Solutions: Operational and Embodied Energy Assessment, *Construction Energy* 2016;9(6):465.
- [49] Ansel M. Natural fibre composites in a marine environment. *Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Properties* 2014 1: 365-374.

- [50] D.Hull. Materiales compuestos, Firts edition, Editorial Reverte, Barcelona, 2003.
- [51] W. Smit, 4 edition, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales, McGraw-Hill, México, 2006.
- [52] Ahmad F, Choi HS, and Park MK. A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials and Engineering* 2015; 300(1): 10-24.
- [53] Maya L SA, & Useche LV. Falla de los materiales compuestos laminados. *Scientia et technica* 2004; 2(25):113-117.
- [54] Besednjak Alejandro, and Alejandro Besednjak Dietrich, Firts edition, Materiales compuestos. Univ. Politèc. de Catalunya, 2005.
- [55] Moyano Arévalo JR, Molina Osejos, JV. Caracterización y aplicación de material compuesto de resina de poliéster y refuerzo de totora para la fabricación de parachoques delantero de autobús urbano <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/26562017> - Universidad Internacional SEK.
- [56] Rwawiire S, et al. Development of a biocomposite based on green epoxy polymer and natural cellulose fabric (bark cloth) for automotive instrument panel applications. *Composites Part B-Engineering* 2015; 81:149-157.
- [57] Corum J, Battiste R, and Ruggles-Wrenn M. Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites. *Composites science and technology* 2003; 63(6): 755-769.
- [58] Alves C, et al. Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. *Journal of Cleaner Production* 2010; 18(4): 313-327.
- [59] Bertomeu D, et al. Use of eco-friendly epoxy resins from renewable resources as potential substitutes of petrochemical epoxy resins for ambient cured composites with flax reinforcements. *Polymer Composites* 2012; 33(5): 683-692.
- [60] Chung Deborah DL, Second edition, Composite material structure and processing. *Composite Materials: Science and Applications* 2010: 1-34.
- [61] Caicedo C, et al. Material compuesto de matriz polipropileno (PP) y fibra de cedro: influencia del compatibilizante PP-g-MA. *Informador Técnico* 2015; 79(2):118-126.
- [62] Summerscales J, et al. A review of bast fibres and their composites. Part 2–Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2010. 41(10):1336-1344.

- [63] Kadam A, et al. Biodegradable biobased epoxy resin from karanja oil. *Polymer* 2015; 72:82-92.
- [64] Yang X, Zhang S, and Li W. The performance of biodegradable tung oil coatings. *Progress in Organic Coatings* 2015; 85: 216-220.
- [65] Reddy N. A review on completely biodegradable composites developed using soy-based matrices. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2015; 34(18):1457-1475.
- [66] Liu Z, S. Erhan S, Akin D, Barton F. green composites from renewable resources: preparation of epoxidized soybean oil and flax fiber composites, *Journal of agricultural and food chemistry*. pp. 2134-2137.
- [67] Alejandro Besednjak Dietrich, First edition, *Materiales compuestos Proceso de fabricación de embarcaciones*. ,Edicions de la Universidad Politècnica de Catalunya, SL: Edicions UPC, 2005.
- [68] Olivares Santiago M, Galán Marín C, Roa Fernández J. *Composites: characteristics and applications in bulding construction*. Dpto. Construcciones Arquitectónicas I. Escuela Superior de Arquitectura de la Universidad de sevilla España, 2003.
- [69] Bakis CE, et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-Ihe-Art Review. *Journal of Composites for Construction* 2002; 6(2):73-87.
- [70] Alfano G, Crisfield MA. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites mechanical and computational issues. *Publication International Methods in Engineering*, 50 n 7 2001; 1701-1736.
- [71] Alvarez V, Mondragon I, and Vazquez A. Influence of chemical treatments on interfacial adhesion between sisal fiber and different biodegradable polymers, *Composite Interfaces* 2007; 14: 7-9.
- [72] Dato. Mahmood H, First Edtion, *Mechanics of fibrous composites*, Elsevier applied Scieencie, New York, 2007.
- [73] Barghoom P, Stebani U and Balsam M, *Trends in Polymer Chemistry*, 1997 Part 2: Applied Macromolecular . *Acta polymerica* 1998, vol.49 no.6:266-271
- [74] Nicolas Le Moigne, Belkacem Otazaghine, Stéphane Corn, Hélène Angellier-Coussy and Anne Bergeret. *Characterization of the Interface / Interface in Composite Based on Natural Fibers, Surfaces and Interfaces in Composite Reinforced with Natural Fibers*, (2018) 10.1007 / 978-3-319-71410-3_5, (101-133).
- [75] George J, Sreekala MS, y Thomas S. (2001). Una revisión sobre la modificación de la interfaz y la caracterización de compuestos de plástico reforzado con fibra natural. *Polymer Engineering & Science* 2001; 41(9): 1471-1485.

- [76] Boubimba R.M, et al. Preparation and mechanical characterisation of laminate composites made of glass fibre/epoxy resin filled with tri bloc copolymers. *Composite Structures* 2014; 116: 414-422.
- [77] Phil, E. and C. Soutis, First Edition, *Polymer composites in the aerospace industry*, Elsevier ,Cambridge, United Kingdom, 2014.
- [78] Biron, M, *Thermoplastics and thermoplastic composite*, William Andrew.77; 2012:
- [79] Varvani-Farahani A. Composite materials: characterization, fabrication and application-research challenges and directions. *Applied Composite Materials* 2010; 17(2): 63-67.
- [80] Goodship V.D, Middleton B, and Cherrington R. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing*. 2015: William Andrew.
- [81] La Mantia F, and Morreale M. green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2011; 42(6): 579-588.
- [82] Dai, D. and M. Fan, *Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications*. *Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Properties*, 2014: p. 3-65.
- [83] O'donnell A., Dweib M, and Wool R. Natural fiber composites with plant oil-based resin. *Composites Science and Technology*, 2004; 64(9): 1135-1145.
- [84] Shah D.U, Schubel PJ, and Clifford MJ. Can flax replace E-glass in structural composites A small wind turbine blade case study. *Composites Part B-Engineering* 2013; 52: 172-181.
- [85] Dhakal H.N, and Zhang Z, First Edition, *The use of hemp fibres as reinforcements in composites*. *Biofiber reinforcements in composites materials*. Woodhead Publishing,2015. 86-103
- [86] Di Landro L, and Janszen G. Composites with hemp reinforcement and bio-based epoxy matrix. *Composites Part B: Engineering* 2014; 67: 220-226.
- [87] Khiat MA, et al. Effect of the environmental conditions on the ultimate load of damaged unidirectional of natural hemp fiber/epoxy composite. *Desing and Modeling of Mechanical System-II*. Springer, Cham 2015,1:397-406.
- [88] Sam-Brew S,. and Smith GD. Flax and Hemp fiber-reinforced particleboard. *Industrial Crops and Products* 2015; 77: 940-948.
- [89] Müssig, J. and K. Haag, *The use of flax fibres as reinforcements in composites*, 2015, Woodhead Publishing (Elsevier), Cambridge, UK. p. 35-85.

- [90] Yan L, Chouw N, and Jayaraman K. Flax fibre and its composites—a review. *Composites Part B: Engineering* 2014; 56: 296-317.
- [91] Van Vuure, A.W., et al. Compressive properties of natural fibre composites. *Materials Letters* 2015; 149: 138-140.
- [92] Shah DU. Natural. fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts. *Materials & Design* 2014; 62: 21-31.
- [93] Mohanty A, Misra M, and Drzal L. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment* 2002; 10(1): 19-26.
- [94] Mohanty, A.K., M. Misra, and L.T. Drzal, *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. 2005: CRC press.
- [95] Cantero G, et al. Effects of fibre treatment on wettability and mechanical behaviour of flax/polypropylene composites. *Composites Science and Technology* 2003. 63(9):1247-1254.
- [96] Alamri H, and Low IM. Mechanical properties and water absorption behaviour of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites. *Polymer testing*, 2012; 31(5): 620-628.
- [97] Faruk O, et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science* 2012; 37(11): 1552-1596.
- [98] Corbière-Nicollier T, et al. Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics. *Resources, Conservation and Recycling* 2001; 33(4): 267-287.
- [99] Yates MR, and Barlow CY. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—a critical review. *Resources, Conservation and Recycling* 2013; 78: 54-66.
- [100] Khan, J. and M. Khan, *The use of jute fibers as reinforcements in composites*. Biofiber reinforcements in composite materials: Woodhead Publishing, 2015: p. 3-34.
- [101] Alves C, Silva A, Reis L, Freitas M, Rodrigues L, Alves D. Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites, *J. Clean. Prod* 2010; 18 :313-327.
- [102] Behera AK, et al. Fabrication and characterizations of biodegradable jute reinforced soy based green composites. *Carbohydrate Polymers* 2012; 88(1): 329-335.
- [103] Goriparthi BK, Suman KNS, and Nalluri MR. Processing and characterization of jute fiber reinforced hybrid biocomposites based on polylactide/polycaprolactone blends. *Polymer Composites* 2012; 33(2): 237-244.

- [104] Komuraiah A., Kumar NS, and. Prasad BD. Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties. *Mechanics of composite materials*, 2014; 50(3):359-376.
- [105] S.T. Peters, "Handbook of composites" Chapman & Hall, UK, 1998.
- [106] Callister W.D, Primera Edición, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Vol. 1.Reverté, Barcelona ,2002.
- [107] Herakovich, C.T. *Mechanics of fibrous composites* John Wiley & Sons, 1998.
- [108] Mohanty AK, Misra,M, y Drzal LT. Biocompuestos sostenibles a partir de recursos renovables: oportunidades y desafíos en el mundo de los materiales verdes. *Diario de polímeros y el medio ambiente* 2002 ;10 (1-2): 19-26.
- [109] Mohanty AK, Misra,MA, y Hinrichsen,G. Biofibras, polímeros biodegradables y biocompuestos: una visión general. *Ingeniería y materiales macromoleculares* 2000; 276 (1): 1-24.
- [110] Hodzic A. and Shanks R First Edition, *Natural fibre composites: materials, processes and properties*. Woodhead Publishing, Unite Kingdom, 2014.
- [111] Wambua P, Ivens J, and Verpoest I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics *composites science and technology* 2003; 63(9): 1259-1264.
- [112] Espinach FX, Julian F, Verdaguer N, Torres L, Pelach M A, Vilaseca F, & Mutjé P. Analysis of tensile and flexural modulus in hemp strands/polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering* 2013; 47: 339–343.
- [113] Sukmawan, R, Takagi H, and. Nakagaito AN. Strength evaluation of cross-ply green composite laminates reinforced by bamboo fiber. *Composites Part B: Engineering* 2016; 84: 9-16.
- [114] Okubo K. and Fujii T, Eco-composites using natural fibers and their mechanical properties, in *High Performance Structures and Composites*, C.A. Brebbia and W.P. DeWilde, Editors. 2002. p. 77-85.
- [115] Barona Mejias Y, Mario Euclides and Vaca Iván. Evaluación de tendencias de los constructores de edificios en el uso de sistemas tradicionales de construcción con el uso de estructuras de acero. En la ciudad de Quito. URI [Tesis Máster <http://repositorio.upacifico.edu.ec/handle/40000/180>]. TALCA Chile. Universidad Del Pacífico. Julio.2016.
- [116] Baillie C, First Edition *green composites: polymer composites and the environment*. 2005: CRC Press. Cambridge 2005.

- [117] Fernandes Pereira PH, et al. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. *Polimeros-Ciencia E Tecnologia* 2015; 25(1): 9-22.
- [118] Netravali AN, and Chabba S. Composites get greener. *Materials today* 2003; 6(4):. 22-29.
- [119] Bertó Carbó L. Nuevos materiales, modelos y técnicas de caracterización en acústica de la edificación y acústica medioambiental. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. [Tesis doctoral/10251/157953]. Valencia Spain, Universitat Politècnica de València: 179. 2015.
- [120] Bertomeu D, et al. Use of eco-friendly epoxy resins from renewable resources as potential substitutes of petrochemical epoxy resins for ambient cured composites with flax reinforcements. *Polymer Composites* 2012; 33(5): 683-692.
- [121] A. K. Mohanty, M. Misra y L. Drzal, *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites* Taylor y Francis, Michigan, 2005.
- [122] Georgios Koronis, Arlindo Silva y Mihail Fontul. green composites: Una revisión de materiales adecuados para aplicaciones automotrices, *Composites Part B: Applied Science and Manufacturing* 2013; 44 (1): 120-127.
- [123] Galan-Marin C, Rivera-Gomez C, Garcia-Martinez A. Use of Natural-Fiber Bio-Composites in Construction versus Traditional Solutions: Operational and Embodied Energy Assessment, *Use of Natural-Fiber Bio-Composites in Construction versus Traditional Solutions: Operational and Embodied Energy Assessment* 2016;9(6): 465.
- [124] Soriano N, Roig I, Fita S, & Sanz C. Estudio de las Propiedades Mecánicas de Biocomposites con fibras naturales. *Lino* 2015; 6(10): 50-70.
- [125] Pan Y, and Zhong Z. Mechanical Degradation Of Natural Fiber Reinforced Composite Materials Under Constrained Swelling. *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 2015;10(1): 79-91.
- [126] Niaounakis, M., *Biopolymers: reuse, recycling, and disposal*. 2013: William Andrew.
- [127] Duc F, et al. Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2014; 64: 115-123.
- [128] Rougeron, Claude. *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. First edn (Spain: Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona Reverte, 1977), .p 301.
- [129] Da Costa Correia V, et al. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber–cement materials. *Construction and Building Materials* 2014; 72: 65-71.

- [130] LOBERA, J., MICHELUTTI, E. (2007). Construcción sostenible y construcción de la sostenibilidad: una experiencia en comunidades rurales de El Salvador, Revista internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo, Nº 2.
- [131] MATA, F. (2003). *El humanismo científico y tecnológico desde la perspectiva de la sostenibilidad*, Revista Ingenierías, Nº 20, P. 18-23
- [132] Amigó, Vicente, et al. "Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos." Instituto de Tecnología de Materiales Universidad Politécnica de Valencia, España (2009).
- [133] Duigou A.L, Davies P, and Baley C. Replacement of glass/unsaturated polyester composites by flax/PLLA biocomposites: is it justified Journal of biobased materials and bioenergy 2011; 5(4):466-482.
- [134] Marrot L, et al. Multi-scale study of the adhesion between flax fibers and biobased thermoset matrices. Materials & Design (1980-2015) 2014; 62: 47-56.
- [135] Wadel G. Aislamientos térmicos renovables y reciclados de lana de oveja y algodón: Un aporte a la construcción sostenible. Revista de Arquitectura 2009 15 (20), ág-27.
- [136] Vasconcelos G, et al. Proposal of an innovative solution for partition walls: mechanical, thermal and acoustic validation, Constr. Build. Mater 2013; 48: 961-979.
- [137] Moretti E, Belloni E, and Agosti F. Innovative mineral fiber insulation panels for buildings: Thermal and acoustic characterization. Applied Energy 2016; 169: 421-432.
- [138] Carlos de La Colina Tejeda y Antonio Moreno Arranz. "Acústica de la Edificación", Fundación Escuela de la Edificación, 2000.
- [139] Amelia Romero Fernández – M^a Teresa Carrascal García. "La Ley del Ruido y sus Implicaciones en la Edificación". Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Julio de 2008.
- [140] Isover. *Manual de Aislamiento Acústico*, Julio de 2000.
- [141] UNE-EN ISO 717-1:2013. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1:2013).
- [142] Del Rey R, et al. Acoustic characterization of recycled textile materials used as core elements in noise barriers. Noise Control Engineering Journal 2015; 63(5): 439-447.
- [143] Harris, C.M., *Manual para el control del ruido: Tomo I*. 1977: Instituto de Estudios de Administración Local.
- [144] López, M.R., *Ingeniería acústica*. 1999: Thomson-Paraninfo.

- [145] Mac Donnell, H., & Mac Donnell, H. P. (1999). *Manual de construcción industrializada*. Revista Vivienda SRL.
- [146] Mestre Sancho, V., *Principios del aislamiento acústico*. 1996.
- [147] Monteiro, C., Marino, C., Torchia, F., Nannipieri, E., Robertson, N., Smith, R. S., Machimbarrena, and M.: *Comparative analysis of airborne sound insulation field measurements using different ISO 717-1 performance descriptors - Lightweight separating walls and floors*. Euronoise 2012, Prague, 2012.
- [148] RUSSELL, Daniel A. GMI Engineering & Management Institute, *Absorption Coefficients and impedance*, www.gmi.edu/~drussell/GMIAcoustics/Absorption.html.
- [149] W. C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics; Paper 1 - "Reverberation,"* Cambridge: Harvard Press, 1927 (Reimpreso en 1964 por Dover).
- [150] C. F. Eyring, *"Reverberation time in "dead" rooms,"* J. Acoust. Soc. Am. 1:217- 241, 1930.
- [151] G. Millington, *"A modified formula for reverberation,"* J. Acoust. Soc. Am. 4:69–82, 1932.
- [152] H. Arau-Puchades, *"An improved reverberation formula,"* Acustica 65:163–180, 1988.
- [153] H. Steeneken, T. Houtgast, *"A Physical Method for Measuring Speech Transmission Quality,"* J. Acoust. Soc. Am., 67:318-326, 1980.
- [154] Del Rey, R.; Alba J.; Bertó L.; Gregori, A. (2017) *Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption*. Mater Construcc. 67 [328], e139 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.07316>.
- [155] UNE-EN ISO 10534-2:2002. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.
- [156] Alba, J., et al. *Cámara de transmisión acústica a escala para el estudio de pantallas acústicas*. in *VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal*. 2012.
- [157] UNE–74.002:78. Protección contra la contaminación acústica.
- [158] Alba J., Bertó L., Del Rey (2014). Validación de una cámara de transmisión a escala para medidas de elementos ligeros. 45º Congreso Español de Acústica. 8º Congreso Ibérico de Acústica, European Symposium on Smart cities and environmental acoustics. Tecniacustica 2014, Murcia.

- [159] Maia, N.M.M., Silva, J.M.M., He, J., Lieven, N.A.J., Lin, R.M., Skingle, G.W., To, W., Urgueira, A.P.V., (1997) *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press Ltd, John Wiley & Sons Inc..
- [160] José Luis berné Valero, Mónica García Merlón. *Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras*. Universidad Politécnica, 2009.
- [161] Río Fernández, Pablo .*Creación y validación de un modelo de elementos finitos de una viga mediante análisis modal*. BS [thesis]. 2015.
- [162] Dobson B.J. A Straight-Line *Technique for Extracting Modal Properties from Frequency Response Data*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, volumen 1 (número 1), 1987: 29-40.
- [163] Gutiérrez-Wing Enrique Simón, Vélez-Castán Guadalupe, Szwedowicz-Wasik Dariusz, Bedolla-Hernández Jorge y Cortés-García Claudia. *Identificación de modos cercanos de vibración de una estructura cuasi-axismétrica: estudio complementario*. Departamento de Ingeniería Mecánica Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morel. Abril de 2012.
- [164] Lizarza, J. T. C. (2000). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. Third edn (Spain Campus tecnológico de la Universidad de Navarra tecnun, 2008), p.269.
- [165] Balachandran, B and Magrab E. B. *Vibration*. Belmont USA: Thomson 2004.
- [166] Leonard Meirovitch. *Analytical Methods of Vibration*. New York NY: Macmillan Publishing Co., 1967.
- [167] Bernerjee J.R. Explicit analytical expressions for frequency equation and mode shapes of composites beams. *International Journal of Solids and Structures* 2001; 38: 2415 – 2426.
- [168] David A. Mendels, M. L. “*Dynamic properties of AFM cantilevers and the calibration of their spring constants*”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, (2006), 1720-1733.
- [169] Maroño. Rodríguez, JE. Aguirre Romano JM, *Cálculo del modelo de respuesta de una viga libre- empotrada. Resina* [thesis]. Mexico Spain, Universidad de Veracruz, 2001.
- [170] Roca, P., Molins i Borrell, C., & Barbat Barbat, H. A. (1995). *Una formulación matricial generalizada*. Parte 2: Análisis dinámico.
- [171] K.J. Bathe and E.L. Wilson, *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1976).

- [172] Abramovich, H. "Free-vibrations of gravity loaded composite beams". Composite Structures, 23(1), pp 17-26, 1993.
- [173] Malhotra, V.M. and N.J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition*. 2003: CRC press.
- [174] Obert, L. and W.I. Duvall. *Discussion of dynamic methods of testing concrete with suggestions for standardization*. in *Proceedings*. 1941.
- [175] Mario.Paz, *Structural Dynamics, theory and computation*, third edition (Van Nostrand Reinhold Company, New York, Editorial Reverté, S.A, 2002), p. 645.
- [176] Weaver Jr, W., S.P. Timoshenko, and D.H. Young, *Vibration problems in engineering*. 1990: John Wiley & Sons.
- [177] Repetto C, Roatta A, and Welti R. Measurements of resonant frequencies, loss factor and dynamic Young modulus of cantilever beams. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 2014; 36(1): 1-8.
- [178] Rodero Sánchez-Patón, A., *Análisis del estado tensional de vigas de tipo laminado sometidas a cargas dinámicas*, 2010.
- [179] Malhotra, V.M. and N.J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition*. 2003: CRC press.
- [180] Sobue, N, Simultaneous determination of Young's modulus and shear modulus of structural lumber by complex vibrations of bending and twisting 1988; 34(8): 652-657.
- [181] Li J, Samall B, and Crews K. Determining individual member stiffness of bridge structures using a simple dynamic procedure. *Acoustics Australia* 2004; 32(1): 9-12.
- [182] Assarar M. et al. Evaluation of the damping of hybrid carbon-flax reinforced composites. *Composite Structures* 2015; 132: 148-154.
- [183] Bakis Charles E, et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction* 2002;6 (2): 73-87.
- [184] Marco A. Pérez, Montserrat Sánchez: *Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos*. Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech, Colon 11, TR45, Terrassa, 08222 Barcelona, España.
- [185] Diseño y Análisis de Materiales Compuestos. Autores: S. W.Tsai, A. Miravete. Editor: Editorial Reverté, Barcelona. Año: 1988. ISBN: 84-291-4889-2 N° páginas: 548.
- [186] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design*, Second ed, CRC press, Boca Raton USA, 2010.

- [187] Taylor & Francis Group, CRC Press, *Fiber reinforced composites*. Materials, Manufacturing, and Design. 2008 Third edition.
- [188] Del Rey, Romina; Alba, Jesús; Crespo, José Enrique; Fontoba, Jorge. *Estudio de la Influencia del Tipo de Fibra y Resina en Composites como Soluciones Ligeras para Aislamiento Acústico*. Universitat Politècnica de València. Escuela Politécnica Superior de Gandia. Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica.
- [189] Del Rey, Romina Alba, Jesús; Crespo, José Enrique; Fontoba, Jorge. *Propuesta de Soluciones Ligeras para Aislamiento Acústico a Ruido Aéreo basadas en Lana de Oveja y green composites*. Universitat Politècnica de València. Escuela Politécnica Superior de Gandia. Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica.
- [190] Aresti, P.M., *La licencia contractual de patente*. 1997: Editorial Aranzadi.
- [191] Blanco Sáez MT. Teresa Mogín, Directora General de Medios y Recursos. Sivia Fernández de Caleyá, Jefa de RR. HH. y RSE del ICO. Observatorio de recursos humanos y relaciones laborales 2015;103: 26-31.
- [192] Vega Barón, M.A., *La propiedad industrial como herramienta para el diseño de productos*. 2016.
- [193] Fernández-Nóvoa, C., J.M.O. Lastres, and M.B. Agra, *Manual de la propiedad industrial*. 2009: Marcial Pons.
- [194] Sádaba, I., *Propiedad intelectual: ¿ bienes públicos o mercancías privadas?* 2008: Los libros de la Catarata.
- [195] Vide, C.R., *Autores, coautores y propiedad intelectual*. 1984.
- [196] Ruíz, W.R.R., *Propiedad Intelectual Respecto de los Circuitos Integrados-Chips-Regulación de los Mismos en la Decisión 486 del Año 2000*. Rev. Prop. Inmaterial, 2001. 2: p. 75.
- [197] DE CARTAGENA, A., *Decisión 345—Régimen Común de Protección a los Derechos de los Obtentores de Variedades Vegetales*.
- [198] Pérez Miranda, *Propiedad industrial y competencia en México, un enfoque de derecho económico*, México, Porrúa, 1994, p. 64
- [199] Sepúlveda, César. *El sistema mexicano de propiedad industrial: un estudio sobre las patentes, los certificados de invención, las marcas, los avisos y los nombres comerciales y la competencia desleal*. 1981.
- [200] Londono Fernandez, J.L., *The Appellations of Origin and the Reach of its Protection (La Denominación De Origen Y El Alcance De Su Protección)*. 2010.

- [201] Chávez Valdivia, A. K. (2015). *Las Patentes sobre los Métodos Comerciales en Internet: Implicancias en la propiedad industrial*.
- [202] Solleiro, J. L., & Briseño, A. (2003). *Propiedad intelectual I: Impacto en la difusión de la biotecnología*. *Interciencia*, 28(2), 118-123.
- [203] Domínguez J.G. Un acercamiento a la patentabilidad de las invenciones biotecnológicas. *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas* 2006; 36(104): 111-136.
- [204] Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamericana*, 3 (1), 47-50.
- [205] Dou H, & Bai Y. A rapid analysis of Avian Influenza patents in the Esp@ cenet® database—R&D strategies and country comparisons. *World Patent Information* 2007; 29 (1): 26-32.
- [206] Castillo G, Alvarez AB, Alvarez H, & Diez I. Recuperación de Información sobre Patentes: Comparación de recuperación de información web entre patentscope y google patents. *KnE Engineering* 2018; 3 (1): 768-783.
- [207] J. Arruti R, S. Erhan, *Vacuum bag in vacuum chamber technique for epoxy matrix composite materials fabrication*. Centro de Investigación en Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. *Revista Ingeniería UC*, Vol. 23, No. 1, 2016: p. 22-29
- [208] UNE-EN ISO 1183-2:2005. Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 2: Método de la columna por gradiente de densidades (ISO 1183-2:2004).
- [209] ASTM D792 Métodos de prueba de densidad y gravedad específica (densidad relativa) de plásticos por desplazamiento.
- [210] UNE-EN ISO 527-4:1997. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras. (ISO 527-4:1997).
- [211] UNE-EN ISO 9513:2003. Materiales metálicos. Calibración de los extensómetros utilizados en ensayos uniaxiales. (ISO 9513:1999).
- [212] UNE-EN ISO 14125/AC: 2002. Compuestos plásticos reforzados con fibras. Determinación de las propiedades de flexión. (ISO 14125:1998/Cor. 1:2001).
- [213] ISO 179:1993 Plastics -- Determination of Charpy impact strength.
- [214] UNE-EN ISO 868:2003. Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (dureza Shore). (ISO 868:2003)

- [215] Assarar, M., et al., Evaluation of the damping of hybrid carbon-flax reinforced composites. *Composite Structures*, 2015. **132**: p. 148-154.
- [216] Calderón, S., Núñez, P. y Gil, S., (2010). *Experimentos en el aula utilizando tarjeta de audio de una Pc*. *Lat. Am. J. Phys*, pp. 188-193.
- [217] ASTM C1215-92 (2012). Standard Guide for Preparing and Interpreting Precision and bias Statements in Test Method Standards used in Nuclear Industry, (2012).
- [218] UNE-EN ISO 10140-1:2016. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos. (ISO 10140-1:2016).
- [219] UNE-EN ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003)
- [220] Cuinat-Guerraz N, Dumont MJ, and Hubert P. Environmental resistance of flax/bio-based epoxy and flax/polyurethane composites manufactured by resin transfer moulding. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing* 2016; 88: 140-147.
- [221] Wambua P, Ivens J, and Verpoest I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics *composites science and technology* 2003; 63(9): 1259-1264.
- [222] Niaounakis, M., *Biopolymers: reuse, recycling, and disposal*. 2013: William Andrew.
- [223] ASTM D6866 se refiere a los métodos estandarizados de análisis para determinar el contenido de base biológica de muestras sólidas, líquidas y gaseosas, utilizando el análisis por radiocarbono.
- [224] Stupenengo, Franco. "Materiales y materias primas." *Materiales y materias primas*. Buenos aires: sn (2011).
- [225] Ashby, Michael F., and David RH Jones. *Materiales para Ingeniería 2: Introducción a la Microestructura, el procesamiento y el diseño*. 2. Reverté, 2009.
- [226] Khan, J. and M. Khan, *The use of jute fibers as reinforcements in composites*. Biofiber reinforcements in composite materials: Woodhead Publishing, 2015: p. 3-34.
- [227] Müssig, J. and K. Haag, *The use of flax fibres as reinforcements in composites*, 2015, Woodhead Publishing (Elsevier), Cambridge, UK. p. 35-85.
- [228] Amigó, V., Salvador, M. D., Sahuquillo, O., Llorens, R. & Martí. (2007). *Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos*. Quinto congreso internacional de fibras naturales. Valencia España, Universidad Politécnica de Valencia

- [229] González Loeda, Lorena. *Modelado vibromecánico de eco-composites textiles para aislamiento acústico* [Tesis de Máster] España, Escuela Politécnica Superior de Gandía. 2017.
- [230] Carrijo Osmar Alves, Liz R, Makishima Nozomu. Fibra de la cáscara del coco verde como sustrato agrícola brasileña Horticultura 2002; .20 (4):.533-535.
- [231] Alonso Vera. J.A, Gálvez Ruiz, J.C, Reyes Pozo, E. *Caracterización del comportamiento en fractura de paneles sándwich de placa de yeso laminados y lana de roca*. Departamento de Tecnología de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, EU de Arquitectura Técnica, Madrid, España.
- [232] Rodriguez E, Petrucci R, and Puglia D. Characterization of composites base on natural and glass fibers obtained by vacuum infusion. *Journal of composites Materials*, 2005; 39: 265-282.
- [233] O'donnell A, Dweib M, and Wool R. Natural fiber composites with plant oil-based resin. *Composites Science and Technology* 2004; 64(9):1135-1145.
- [234] ASTM E756-05 (2010). Método de prueba estándar para medir las propiedades de amortiguación de vibraciones de los materiales
- [235] Etaati A, et al. Vibration damping characteristics of short hemp fibre thermoplastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2014; 33(4): 330-341.
- [236] C. R. Freberg, E. N. Kemler, *Elements of Mechanical Vibration*. Second Edition (Editorial John Wiley & Sons, 5 th printing, 1957).p 227.
- [237] Mindlin R, and Goodman L. Beam vibrations with time-dependent boundary conditions. *Journal of Applied Mechanics* 1950; 17(4): 377-380.
- [238] UNE-EN 1793-1:1998. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción sonora.
- [239] UNE – EN ISO 354:2004. Aenor. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.
- [240] Cheng, T.-H., et al., *Vibration and Damping Analysis of Composite Fiber Reinforced Wind Blade with Viscoelastic Damping Control*, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- [241] Rubio González Carlos, V. R. Método de Elemento Finito, Fundamentos y Aplicaciones con ANSYS. Editorial Limusa, México, 2010.
- [242] Stolarski, Tadeusz, Yuji Nakasone y Shigeka Yoshimoto. *Análisis de ingeniería con el software ANSY*. Butterworth-Heinemann, 2018.

- [243] Nirbhay M, Misra RK, and Dixit A. Finite-Element Analysis of Jute- and Coir-Fiber Reinforced Hybrid Composite Multipanel Plates. *Mechanics of Composite Materials* 2015; 51(4): 505-520.
- [244] Wilson F, and A. Lord Jr. Young's modulus determination via simple, inexpensive static and dynamic measurements. *American Journal of Physics* 1973; 41(5): 653-656.
- [245] eLamX versión actual 2.5.0 (24.08.2018) es un programa gratuito de cálculo de laminado escrito en Java desarrollado en el Instituto de Tecnología Aeronáutica de la Universidad de Tecnología de Dresde. Los cálculos se basan en la teoría clásica del laminado
- [246] SOLIDWORKS: Solidworks Office Premium, [en línea], Inst.Solidworks Corporation, 300 Baker Avenue. Concord, Massachusetts 01742.USA, 2014, Disponible en http://www.solidworks.com/sw/docs/instructor_WB_2011_ESP.pdf, [Consulta: 20 de junio de 2015].
- [247] UNE-EN ISO 717-1:2013. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1:2013).
- [248] Bank, L.C., *Composites for construction: structural design with FRP materials*. 2006: John Wiley & Sons.
- [249] Liber-Knec A, Kuzniar P, and Kuciel S. Accelerated Fatigue Testing of Biodegradable Composites with Flax Fibers. *Journal of Polymers and the Environment* 2015; **23**(3):400-406.
- [250] Brüel & Kjaer Ibérica S.A., "Soluciones para la medida y análisis de ruido", Noviembre de 2004.
- [251] Berenguer, J.M., *Descomposición Térmica De Residuos Textiles: Estudio Cinético y Formación De Contaminantes*. 2007.
- [252] Alba J., del Rey R., Uris A., Candelas P. "Lana de oveja: Una alternativa natural para la absorción sonora". *Tecniacustica* 2015. 46 Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica y Simposio Europeo de Acústica Virtual. Valencia. España. Octubre, 2015.
- [253] Abramovich H. Free-vibrations of gravity loaded composite beams. *Composite Structures* 1993; 23(1):17-26.
- [254] David. Mendels A, et al. Dynamic properties of AFM cantilevers and the calibration of their spring constants, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2006; 16(8):1720-1733.
- [255] R. Maroño. Rodríguez, JE. Aguirre Romano JM, *Cálculo del modelo de respuesta de una viga libre- empotrada*. Resina [thesis]. Mexico Spain, Universidad de Veracruz, 2001.

2. Páginas Web

<http://www.worldscibooks.com/engineering/p311.html>

http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642005000200003&script=sci_arttext

http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0302106-123111//03Xrr03de17.pdf

<http://www.rlmm.mt.usb.ve/S01/N1/RLMMArt-09S01N1-p57.pdf>

http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema7_CM.pdf

<http://aulavirtual.aimplas.es/FCCCurso.aspx?IDAreaTematicaPrincipal=15&IDAreaTematica=15&IDCurso=519>

<http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/index.html>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Composite>

<http://www.tecnipul.com/es/caracteristicastecnicas.aspx> RODRÍGUEZ, Ezequiel; VÁZQUEZ, Analia. Universidad Nacional del Mar de Plata-INTEMA, J.B. Justo 4302 (7600) Mar de Plata, Argentina.

<http://www.edym.com/CD-tex/2p/matprim/cap03/cap03.htm>

<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5438-Situacion-actual-de-la-industria-de-composites.html>

http://www.academia.edu/10283562/VIBRACIONES_EN_MEDIOS_CONTINUOS

http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/9731/PFC_Josue_Aranda_Ruiz.pdf
sequence=1

http://www.jblpro.com/pages/tech_lib.htm

<http://www.rane.com>

<http://www.yale.edu/dramat/sound/soundrein.html>

<http://www.sabine.com/index.html>

<http://smr-home-theatre.org/Power/Power-How-Much.html>

<http://www.meyersound.com/support/papers/speech/section4.htm>

<http://www.rpginc.com/products/siap/enhance.eps>

3. Bibliografía

- Wolfgang Anherth, Frank Steffen, Sound reinforcement engineering, Spon Press, 1999. Capítulos 5 a 7. Revista
- Glen Ballou, Handbook for sound engineers. The new audio cyclopedia, Focal Press, 1998. Capítulo 31. Revista
- José Luis Sánchez Bote, Sistemas de refuerzo sonoro y megafonía, Servicio de publicaciones UPM, 1999.
- Philip Giddings, Audio Systems. Design and installation, Focal Press, 1990. Capítulo 7. Capítulos 9 y 10.
- Constantino Gil González, Acústica para la palabra, Servicio de Publicaciones UPM, 1999.
- Don Davis, Carolyn Davis, Sound system engineering, Focal Press, 1997. Capítulos 10 y 11.
- Gary Davis, Ralph Jones, Sound reinforcement handbook, Hal Leonard Corporation, 1990. Capítulos 4 a 6. Capítulo 17.
- Bobby Owsinski, The mixing engineer's handbook, MixBooks, 1999- 93.

XII. Anexos

Hoja técnica Fibra de Yute



FICHA TECNICA

REFERENCIA ARTÍCULO <i>ITEM REFERENCE</i>	TAPICERIA 103		
USO ACONSEJADO <i>RECOMMENDED USE</i>	<input checked="" type="checkbox"/> CORTINA <i>CURTAIN</i>	<input checked="" type="checkbox"/> TAPICERIA <i>UPHOLSTERY</i>	<input checked="" type="checkbox"/> CAMA <i>BEDCLOTHES</i>
COMPOSICION <i>COMPOSITION</i>	100% JU		
ANCHO (Aprox.) (cm.) <i>WIDTH (Aprox)</i>	130		
PESO (gr/m2) <i>WEIGHT</i>	370		
ESTABILIDAD DIMENSIONAL <i>DIMENSIONAL CHANGE</i>	(%) URDIMBRE (WARP) -5	(%) TRAMA (WEFT) -8	
ENSAYOS REALIZADOS SEGÚN METODOS NORMALIZADOS.VALORES EXPRESADOS CON MEDIAS. TESTS DONE FOLLOWING STANDARD METHODS. AVERAGE VALUES EXPRESSED.			



HIJOS DE ANTONIO FERRE, S.A.
C/ Les Molines, 77
03450 BANYERES (Alicante)
Tel. 966568009 / Fax. 966568363

Hoja técnica Fibra de Lino biaxial



Technical Data Sheet
AmpliTex 5008 & 5018

AmpliTex flax biaxial fabric 350 gsm

1. Product description

Non-crimp biaxial flax fabric with fibers oriented at +45° and -45°, suitable for manufacturing fiber reinforced composite products with high performance and low environmental impact.

2. Specifications

Fabric construction	Ply construction	Stitching fibre
Fibre type: Flax (EU) Construction: -45/+45° Fabric weight : 350 gsm +/- 5%	-45 ply Fibre type: Flax Fibre tex : 106 TEX Ply weight : 171 gsm +45 ply Fibre type: Flax Fibre tex : 106 TEX Ply weight : 171 gsm	Stitching thread: textured polyester Stitch weight: 6 gsm

Standard width*: art. no 5018 -> 310 mm width
art. no. 5008 -> 1270 mm width

Standard roll length*: 50 m

* other width and length on request

3. Mechanical properties

Fiber properties

Properties of fibers used in the fabric are:

Tensile modulus of fibers	58.5	GPa
Tensile strength fibers	700	MPa
Density of fiber	1.35	

Considering that glass fibers have a density of 2.6 and a tensile modulus of 70GPa, the flax ampliTex biax 350 g/m² can replace a 560 g/m² glass fiber biax fabric to have the same stiffness in tension. In compression, the performance of flax is a bit lower, so that as the biax often work in traction in one direction and compression in the other direction, the flax ampliTex biax 350 g/m² can replace a 475 g/m² glass fiber biax fabric to have the same stiffness.

4. Processing guidelines

- Good compatibility with epoxy and polyester
- Near-zero CTE, hence good processing compatibility with carbon fibres
- Compatible with infusion-based processes (vacuum infusion, RTM), wet layup, bladder inflation moulding (BIM), compression moulding
- Sensitive to humidity : dry fabric before use
- Fiber weight fraction of 60% can be reached with process pressure >5 bars. However, the fibers absorb a lot of resin when laminating the fabric and it tends to look "dry" (unless too much resin is used) before pressure is applied. We recommend controlling amount of adhesive used for laminating and to impregnate with 50-60% resin in weight. Excess resin comes then out while pressing the fabric.

Hoja técnica Fibra de Coco

AISLAMIENTOS ACÚSTICOS



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Rollo de Fibra de Coco

Producto muy versátil, gracias a su formato en rollo, permite un ahorro considerable en tiempo y en mano de obra. Especialmente indicado como subpavimento, las excepcionales prestaciones acústicas proporcionan una reducción sustancial de los niveles sonoros, tanto de impacto como aéreos, constituyendo la solución ideal a muchos de los problemas acústicos. Los rollos modelo R presentan además un tratamiento adicional anti- fuego.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Materiales: fibra de coco.

Aglutinantes: Sin aglutinantes.

Presentación: Rollos de 1 x 10 mts (10 mt²).

Reducción de sonidos de impacto: De 25 a 35 dB según espesor *.

Reducción de ruidos aéreos: 47 dB de media según espesores.

Olor: Inodoro.

Resistencia a insectos y roedores: Inatacable.

Resistencia al fuego fibras tipo S-AR: Euroclase f.

Resistencia al fuego fibras tipo r: Euroclase B2.

Tolerancia del grosor: + 10% / - 0%.

Putrescibilidad: Nula.

Comportamiento electrostático: No acumula carga electrostática.

* Pruebas realizadas en soleras de hormigón armado.

DESCRIPCIÓN	TIPO	ESPESOR	DENSIDAD	CÓDIGO
Rollo fibra de coco S15 (1 x 10 mts)	S	15 mm	94 - 96 Kg / m ³	0308003
Rollo fibra de coco S 20 (1 x 10 mts)	S	20 mm	85 - 88 Kg / m ³	0308004
Rollo fibra de coco R 20 (1 x 10 mts)	R	20 mm	80 - 85 Kg / m ³	0308000
Rollo fibra de coco R 25 (1 x 10 mts)	R	25 mm	75 - 80 Kg / m ³	0308001
Rollo fibra de coco R 35 (1 x 10 mts)	R	35 mm	70 - 75 Kg / m ³	0308002

Hoja técnica Fibra de Cáñamo

Materias primas:

Fieltro = fibra de cáñamo 75%, jute reciclada 25%.

Material 100% vegetal.

Libre de fibras sintéticas (no termosoldado).

Acondicionamiento:

Rollo de 1,00 m * 25 m (25 m²), 5 mm de espesor.

Bandas 10 cm x 5 metros, 5 mm de espesor.

Utilización:**Rollos:**

- Debajo tarima de madera flotante.
- Como capa aislante debajo el suelo (o encima de suelos antiguos para aislar de suelos nuevos).
- Contra ruidos aéreos y de impacto (ruptura acústica entre materiales duros y resonantes).
- Puesto encima de tablero de madera en techos, permite su ventilación.

Bandas:

- Como junta de dilatación.
- Encima de vigas de madera como amortiguador.
- Como separación aislante entre muros y solera.

Características físicas:

Densidad media 750 g/ m².

Espesor medio 5 mm.

Color cáñamo (beige - marrón claro).

Material elástico (como una alfombra).

Hoja técnica Fibra de Materia Textil Borra



HOJA TÉCNICA.

PRODUCTO.

FIELTRO CUBRESUELOS 200 g.

DESCRIPCIÓN.

Lámina de tejido 100% fibra sintética (principalmente poliéster) laminada con film de polietileno antideslizante.

FORMATOS DISPONIBLES:

✓ Bobinas de 1 M x 25 M.

CARACTERÍSTICAS.

Tejido absorbente.

Reutilizable.

Volumen reducido para su fácil transporte.

APLICACIÓN.

Recubrimiento de suelos, parquet, muebles y escaleras para preservar las superficies de manchas de pintura y golpes.

PROPIEDADES TÉCNICAS.

PROPIEDADES	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR
✓ Peso	g / m ²	200 ± 10%
✓ Espesor	mm	1,9 ± 20%

Características del sonido

Características del sonido

El significado de sonido, se puede interpretar desde dos ambitos de vista distintos.

Ambito fisiológico que está relacionado con la sensación auditiva que experimentan los nervios auditivos de la oreja humana, cuando son estimulados por ondas de presión externas.

Ambito físico que se encarga de describir las ondas sonoras producidas por ondas de presiones que estimulan mediante una sensación sonora el oído humano.

Siendo la acústica una rama de la física que estudia el sonido desde ambos puntos de vista.

Simil mecánico del sonido

Suponga que se dispone una cuerda que se encuentra fija por uno de sus extremos a un muro o pared, y por el otro extremo es sujeta por un individuo, según la siguiente Figura 355.

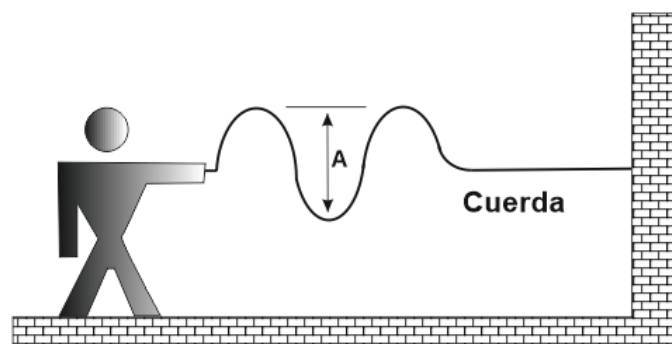


Figura 355. Símil mecánico de la onda de sonido.

Si se toma el extremo libre de la cuerda y se agita de arriba abajo una cierta distancia $+A$ y $-A$, desde su posición horizontal o de equilibrio, se producirán dos fenómenos.

El primero de ellos, será que se produce una onda que se propaga con un frente de avance desde la soga hacia el muro.

Hay que tener en cuenta que el movimiento de avance de la cuerda es hacia el muro, pero cada segmento de la misma se mueve únicamente hacia arriba y hacia abajo, siendo su desplazamiento medio de cero.

El segundo fenómeno es que cada segmento de la cuerda realizan un movimiento periódico.

Las propiedades del sonido son:

Amplitud

Cada segmento de la cuerda tiene una cierta amplitud (A). definiéndose la amplitud como el máximo desplazamiento desde su posición horizontal o de equilibrio.

El valor de la amplitud depende de la fuente que origina el sonido. De tal modo que si el extremo de la cuerda se eleva mucho desde su posición de equilibrio la amplitud aumentará y por el contrario si se eleva poco, será la amplitud disminuirá.

Periodo

Es el tiempo que se tarda en realizarse un ciclo, se representa por la sigla T y se mide en segundos.

Frecuencia

Es la inversa del periodo, es decir el número de ciclos que se producen en un segundo, se representa por la sigla f, y se mide en hercios Hz.

La relación entre el periodo y la frecuencia viene indicada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{T} .$$

La frecuencia se encuentra determinada por la fuente que la origina. De tal modo que si la cuerda se agita de forma rápida, la frecuencia será mayor (alta frecuencia), y si por el contrario se agita de forma lenta se denomina baja frecuencia.

Velocidad de propagación

La velocidad de propagación o de desplazamiento de una onda va a depender del medio en el que se propague, en este ejemplo el medio de propagación será la cuerda. La velocidad dependerá de la masa de la cuerda y de la tensión de la misma.

La expresión que relaciona la velocidad con el espacio que puede recorrer una onda viene determinada por la siguiente expresión:

$$\vec{V} = \frac{e}{t} .$$

Donde:

- \vec{V} : Velocidad de propagación del sonido en el medio, si es en el aire se representa por c y su valor es de 340 (m/s).
- e : el espacio que recorre la onda se representa por λ
- t : el tiempo que corresponde al periodo (T).

Sustituyendo y despejando en la ecuación anterior las nuevas siglas se tiene que:

$$\lambda = V \cdot T \text{ (m/s).}$$

A este tipo de onda se le denomina sinusoidal y su función vale:

$$Y = A \cdot \sin wt.$$

Donde:

- A: Amplitud máxima (dB).
- W: es la pulsación $W = 2 \cdot \pi \cdot f$.(radianes)-
- t: el tiempo (s).

La longitud de onda se define como la distancia entre dos picos consecutivos de una onda sinusoidal.

Todos los parámetros anteriores se recopilan en la siguiente Figura 356.

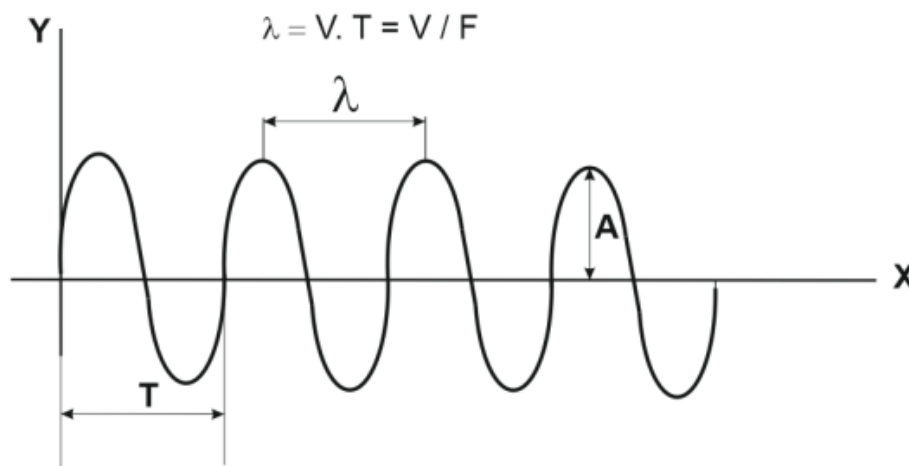


Figura 356. Parámetros fundamentales del sonido.

Todo lo visto hasta ahora es trasladable a una onda sonora, donde el foco emisor será un foco sonoro y el aire el medio donde se propaga el sonido.

En estas condiciones se trataría de un sonido puro, es decir de una sola frecuencia con una intensidad determinada. Pero este tipo de sonido es muy difícil de encontrar en el entorno cotidiano que nos rodea, ya que la mayoría de los sonidos están compuestos por superposiciones de sonidos de distinta frecuencia y amplitudes que se denominan sonidos complejos.

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura de un material compuesto.	26
Figura 2. Comparación de los tres tipos de materiales compuestos (a) con partículas, (b) con fibras y (c) laminar.	26
Figura 3. Propiedades mecánicas de la matriz, compuesto y el refuerzo.	27
Figura 4. Distintos tipos de refuerzos de origen fibroso.	28
Figura 5. Refuerzos estructurales.	28
Figura 6. Matriz reforzada con partículas.	29
Figura 7. Material reforzado con fibras.	30
Figura 8. Composites laminares.	30
Figura 9. Material en forma de sándwich.	32
Figura 10. Tipos de Trenzados: Unidireccional - Bidireccional 0/90° - 45°.	32
Figura 11. Producción anual de los materiales compuestos avanzados.	34
Figura 12. Fórmula química del grupo ester.	40
Figura 13. Procedimiento del proceso de curado de una resina de poliéster.	42
Figura 14. Fases del proceso de curado.	42
Figura 15. Imagen del estado líquido de la resina de epoxi.	43
Figura 16. Imagen de la transición de cadenas lineales a 3D (sólido).	44
Figura 17. Finalización del proceso de curado.	44
Figura 18. Apertura de los puentes de extremo de cadena.	47
Figura 19. Los grupos esteres y los dobles enlaces crean dos inconvenientes importantes en las resinas de poliéster.	49
Figura 20. Principales fibras vegetales utilizadas.	52
Figura 21. Diagrama de Ashby del módulo de elasticidad y la resistencia mecánica de los materiales naturales y de ingeniería.	53
Figura 22. Importancia de la evolución de los cuatro tipos de materiales durante el transcurso del tiempo.	64
Figura 23. Imagen del corcho.	75
Figura 24. Imagen de la manta aislante del cáñamo.	76
Figura 25. Imagen de fibras de Lino.	76
Figura 26. Imagen de paneles de madera.	77
Figura 27. Imagen de lana natural.	78
Figura 28. Esquema de Aislamiento.	82
Figura 29. Esquema de la absorción.	83

Figura 30. Aislamiento acústico específico de un elemento constructivo.....	83
Figura 31. Caminos para la transmisión del ruido aéreo de un recinto a otro.....	84
Figura 32. Conducta de la pérdida de transmisión de una partición simple.....	86
Figura 33. Ley de masas paredes simples.....	88
Figura 34. Imagen de una pared doble.....	91
Figura 35. Las paredes y el espesor de la cámara de aire forman un sistema mecánico masa - muelle - masa.....	92
Figura 36. Diseños de paredes dobles.....	93
Figura 37. Frecuencia de la cavidad.....	95
Figura 38. Valores de n: n =1 para la frecuencia fundamental y n= 2,3 y 4 para los armónicos.....	96
Figura 39. Las paredes múltiples alcanzan 18 dB/ octava.....	98
Figura 40. Coeficiente de absorción $\alpha = 70 / 100 = 0,7$	100
Figura 41. Tiempo de reverberación en un recinto.....	101
Figura 42. Medida del coeficiente de absorción de un material.....	102
Figura 43. Posicionamiento de los micrófonos, fuente y muestra en la cámara de reverberación.....	104
Figura 44. Tiempo de reverberación y coeficiente de absorción de la cámara de reverberación vacía.....	105
Figura 45. El sonido se puede transmitir en medios gaseosos, sólidos y líquidos.....	117
Figura 46. Materiales sólidos.....	118
Figura 47. Movimiento de las moléculas en un medio denso.....	118
Figura 48. Avance longitudinal del sonido en el aire.....	120
Figura 49. Ondas transversales.....	121
Figura 50. Sistema con dos grados de libertad.....	132
Figura 51. Simplificación de la ecuación matricial teniendo en cuenta que el amortiguamiento es nulo.....	134
Figura 52. Modelo experimental.....	135
Figura 53. Ejemplo de las frecuencias de respuestas obtenidas a través de la aproximación experimental.....	135
Figura 54. Modos de vibración de una viga en voladizo.....	136
Figura 55. Detalle de la vibración longitudinal.....	138
Figura 56. Detalle de la vibración a flexión.....	139
Figura 57. Detalle de vibración en torsión para probetas en forma de placa.....	141
Figura 58. Esquema del equipo experimental.....	143

Figura 59. Imagen del ensayo del Análisis modal impulso - respuesta.	144
Figura 60. Imagen del ensayo de vibración forzada con shaker.	144
Figura 61. Vibración libre de la probeta.	145
Figura 62. Estructura de los materiales compuestos reforzados con fibras.	148
Figura 63. Elemento de Volumen Representativo, (RVE).	149
Figura 64. Caracterización analítica de los materiales compuestos.	151
Figura 65. Caracterización analítica de los materiales compuestos.	151
Figura 66. Diferencia entre lámina y laminado.	153
Figura 67. Estructura del refuerzo hexagonal (izquierda) y cuadrado (derecha).	156
Figura 68. Características de las fibras.	166
Figura 69. Características de la matriz.	167
Figura 70. Características de la lámina.	168
Figura 71. Elemento de volumen representativo de una lámina.	169
Figura 72. Propiedades de la celdilla unidad.	169
Figura 73. Tensiones que actúan sobre el plano interlaminarmente.	170
Figura 74. Tensiones interlaminares.	171
Figura 75. Plano del laminado (X – Y).	171
Figura 76. Lámina trabajando en tensión plana.	172
Figura 77. Orientación de las fibras de refuerzo de la lámina.	173
Figura 78. Imagen de las direcciones locales, globales.	173
Figura 79. Forma esquemática de las direcciones de las fibras.	174
Figura 80. Estado tensional de un laminado plano.	174
Figura 81. Material compuesto con fibras dispuesta unidireccionalmente, sometidas a una carga de tracción en la dirección del eje de las fibras.	176
Figura 82. Esfuerzo longitudinal aplicado al elemento de volumen representativo para el desarrollo del cálculo del módulo de elasticidad longitudinal de una lámina unidireccional. ...	177
Figura 83. Igualdad de isotensión.	180
Figura 84. Elemento de volumen representativo de una lámina unidireccional.	181
Figura 85. Efectos del módulo de poisson.	183
Figura 86. Módulo de cortadura en el plano.	186
Figura 87. Material compuesto con fibras dispuestas unidireccionalmente, que se somete a una carga cortante paralela a las fibras.	187
Figura 88. Material compuesto reforzado con fibra larga unidireccional.	194
Figura 89. Direcciones globales de una lámina.	194

Figura 90. Direcciones locales de una lámina.	195
Figura 91. Estado tensional de la lámina.	195
Figura 92. Laminado a 45° y orientación en los ejes globales.	204
Figura 93. Tensión plana de los laminados.	207
Figura 94. Situación donde no se puede aplicar la hipótesis de tensión plana (Borde libre). ...	208
Figura 95. Otras situaciones donde no se puede aplicar la hipótesis de tensión plana.	208
Figura 96. Definición de los ejes del laminado.	209
Figura 97. Secciones sin deformar y deformadas respecto al plano medio.	210
Figura 98. Designación de los esfuerzos a los que se encuentra sometido la lámina.	211
Figura 99. Designación de los esfuerzos a los que se encuentra sometido la lámina.	212
Figura 100. Posicionamiento de las láminas en el laminado.	212
Figura 101. Disposición de la ubicación de cada lámina en función del espesor de la mima. ...	212
Figura 102. Tensiones y deformaciones.	214
Figura 103. Laminado simétrico.	224
Figura 104. Laminado de láminas cruzadas.	226
Figura 105. Laminado cruzado simétrico.	227
Figura 106. Tres planos ortogonales de simetría del material de un laminado cruzado.	228
Figura 107. Desplazamiento del punto (P) en flexión.	232
Figura 108. Esquema de planificación del proyecto de tesis.	261
Figura 109. Imagen de la bomba de vacío para la realización de las placas de composite. ...	267
Figura 110. Imagen del cubo de evacuación de resina.	268
Figura 111. Imagen de la máquina de cortar RUBI mod DU - 200 - L - LB.	269
Figura 112. Imágenes de la balanza hidrostática y componentes auxiliares.	270
Figura 113. Imagen de la maquina universal de tracción Ibertest mod ELIB - 50.	271
Figura 114. Dimensionamiento de las probetas según normativa UNE EN ISO 527- 4.	272
Figura 115. Imagen del aspecto de las probetas de tracción tras llevar a cabo el ensayo.	273
Figura 116. Accesorios extensométricas.	274
Figura 117. Requisitos a cumplir en el ensayo de tracción.	276
Figura 118. Imagen del accesorio utilizado para el ensayo de flexión.	276
Figura 119. Dimensionamiento general de las probetas para el ensayo de tracción sobre tres puntos de apoyo.	277
Figura 120. Imagen del péndulo de Charpy.	279
Figura 121. Normativa complementaria.	280

Figura 122. Tipos de péndulos utilizados en el ensayo de impacto.	280
Figura 123. Imagen del tipo de masas de impacto aplicadas a la normativa ISO.....	281
Figura 124. Requisitos a cumplir en el ensayo de impacto.	281
Figura 125. Imagen del durómetro Shore utilizado en el ensayo de dureza.	282
Figura 126. Imagen del Shaker (vibrador electrodinámico). Utilizado para el ensayo de vibración forzada.....	283
Figura 127. Generador de funciones.	284
Figura 128. Martillo de impacto y acelerómetro.	284
Figura 129. Tarjeta electrónica de frecuencia de la casa National Instruments.	285
Figura 130. Imagen del micrófono unidireccional de elevada precisión.	285
Figura 131. Conexión cámara de transmisión.	287
Figura 132. Captura de imagen durante la puesta en marcha del ensayo de aislamiento acústico al ruido aéreo en la cámara de transmisión de tamaño reducido.	287
Figura 133. Montaje para la medición en cámara reverberante.	288
Figura 134. Imagen de la resina Super SAP CLR "Entropy Resins.	298
Figura 135. Muestras de fibras naturales.....	304
Figura 136. Comparación de las propiedades específicas de las fibras naturales y las no renovables [225].	305
Figura 137. Imagen tomada en microscopio óptico de la fibra de yute x0,8 aumentos.....	307
Figura 138. Imagen tomada en microscopio óptico x0,8 aumentos de la fibra de lino biaxial.	309
Figura 139. Imagen tomada en microscopio óptico x0,8 aumentos de la materia textil borra.	310
Figura 140. Imagen tomada en microscopio x0,8 aumentos de la fibra de coco.	312
Figura 141. Imagen tomada en microscopio óptico x0,8 aumentos de la fibra de cáñamo.	315
Figura 142. Resultados de la absorción en cámara reverberante estandarizada de la lana Premium y M5.	317
Figura 143. Imagen de preparación y corte de diversas capas de fibra de yute.	322
Figura 144. Imagen del vidrio utilizado para la infusión de los composite y su preparación superficial.	323
Figura 145. Imagen de superposición de diversas capas de yute.....	324
Figura 146. Imagen de la colocación del tejido pelable encima de las capas de fibra de yute.	324
Figura 147. Colocación del tubo (PE) - uniones del tipo T - tubería continua.	325
Figura 148. Colocación de la red de distribución de resina por encima del tejido pelable.	326
Figura 149. Colocación de los canales de entrada de resina.	326
Figura 150. Bolsa de vacío para el sellado hermético.	327
Figura 151. Red de infusión y canal de entrada de resina.	327

Figura 152. Tubos de canalización de entrada de resina.	328
Figura 153. Detalle del conjunto con cuatro canales de entrada de resina.....	328
Figura 154. Conjunto total preparado para la infusión de resina.	329
Figura 155. Imagen del conjunto una vez realizada la infusión de la resina y cerrado el canal de entrada de la resina.....	329
Figura 156. Imágenes de la balanza hidrostática y sus componentes para la obtención de las densidades de los composites.	330
Figura 157. Ilustración de los accesorios donde se realiza el pesaje de la muestra tanto fuera como dentro del fluido.	332
Figura 158. Forma de las probetas a ensayar.	337
Figura 159. Imagen de la forma de alterio de una probeta y su zona de rotura.	338
Figura 160. Colocación de la probeta entre las mordazas de la máquina de tracción.	339
Figura 161. Curva de tensión – deformación de un ensayo de tracción.	340
Figura 162. Imagen de las ubicaciones de ambos extensómetros sobre la probeta.....	341
Figura 163. Recuperación o creación del archivo de trabajo en flexión.	342
Figura 164. Imagen de las probetas utilizadas para la realización de los ensayos dinámicos de biocomposites.....	350
Figura 165. Esquema de la aproximación teórica del análisis modal.	351
Figura 166. Dimensionado de la probeta para la obtención del momento de inercia.....	351
Figura 167.	353
Figura 168. Imagen de la aplicación de la carga puntual.	354
Figura 169. Simulación de la vibración de la probeta en voladizo.....	354
Figura 170. Esquema de la aproximación del análisis modal del ensayo vibración forzada....	355
Figura 171. Posicionamiento del shaker en la probeta en voladizo.....	356
Figura 172. Esquema del ensayo del análisis modal impulso-respuesta.	357
Figura 173. Frecuencias naturales obtenidas del composite de la materia textil. borra.....	358
Figura 174. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Cáñamo.....	358
Figura 175. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Coco.	358
Figura 176. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Lino.....	358
Figura 177. Frecuencias naturales obtenidas del composite de Yute.	359
Figura 178. Composición de un laminado multicapa.	361
Figura 179. Posicionamiento para la medición del aislamiento al ruido aéreo.....	362
Figura 180. Elementos que componen una cámara de transmisión.....	365
Figura 181. Espectro del ruido blanco.	365

Figura 182. Cálculo del T_R con la cámara vacía y con la muestra.	368
Figura 183: Dimensionado de la probeta de yute con bioresina.....	370
Figura 184. Celdas que permiten la introducción de las constantes ingenieriles globales del material.....	371
Figura 185. Visualización de la pieza mallada.....	371
Figura 186. Elección del tipo de fijación que se desea.....	372
Figura 187. Realización del análisis y elección de modos de vibración.....	373
Figura 188. Soluciones de frecuencias a través de diagrama de gráficos.....	374
Figura 189. Introducción del nombre del nuevo material y de las constantes ingenieriles del mismo.....	375
Figura 190. Valores de la densidad y de las constantes ingenieriles del composite yute con resina de poliéster.....	376
Figura 191. Obtención de los valores de las constantes ingenieriles globales del composite yute con resina de poliéster.....	377
Figura 192. La imagen izquierda superior corresponde a los valores de la matriz [A] y la derecha inferior a los valores de la matriz [D]......	377
Figura 193. Dimensionado geométrico de la probeta.....	378
Figura 194. Disposición de los ejes de coordenadas de la probeta.....	378
Figura 195. Deformaciones en la dirección de los esfuerzos.....	379
Figura 196. Deformaciones en la dirección transversal a los esfuerzos.....	379
Figura 197. Secuenciación de iconos para el diseño del material de la pieza.....	380
Figura 198. Selección de la cara de la pieza que se debe de fijar.....	381
Figura 199. Pieza mallada.....	381
Figura 200. Desplegable para la elección de magnitudes que se deseen analizar.....	382
Figura 201. Placa de fibra de yute con bioresina.....	387
Figura 202. Placa de fibra de lino biaxial con Bioresina.....	389
Figura 203. Placa de Materia Textil Borracon bioresina.....	392
Figura 204. Placa de composite de fibra de coco con bioresina.....	394
Figura 205. Placa de composite de cáñamo con bioresina.....	396
Figura 206. Densidades de los materiales compuestos “green composites” con bioresina.....	402
Figura 207. Densidades de los materiales compuestos con resina de poliéster.....	402
Figura 208. Probetas de “green composite” yute, ubicación en máquina Ibertest.....	403
Figura 209. Imagen de la probeta de “green composite” con yute rota en la mordaza, así como las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.....	403

Figura 210. Imagen de la colocación de la probeta del “green composite” yute en el útil de flexión en la máquina de tracción y su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.	404
Figura 211. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del composite de yute con bioresina una vez finalizado el ensayo de flexión.....	405
Figura 212. Imagen de las roturas en las probetas del composite de yute una vez finalizado el ensayo de impacto.	406
Figura 213. Imagen de las probetas del biocomposite lino biaxial y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.	407
Figura 214. Imagen de las probetas del composite de lino biaxial con bioresina en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.	408
Figura 215. Imagen de la colocación de la probeta de composite lino biaxial en el útil de flexión en la máquina de tracción y de su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.	409
Figura 216. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas de composite lino biaxial una vez finalizado el ensayo de flexión.	409
Figura 217. Imagen de las roturas en las probetas del composite lino biaxial una vez finalizado el ensayo de impacto.	410
Figura 218. Imagen de las probetas del composite de Materia Textil Borracon resina de poliéster y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.....	412
Figura 219. Imagen de la probeta de composite de Materia Textil Borracon resina de poliéster en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.	413
Figura 220. Imagen de la colocación de la probeta del composite Materia Textil Borraen el útil de flexión en la máquina de tracción y de su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.	414
Figura 221. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del composite de Materia Textil Borracon bioresina una vez finalizado el ensayo de flexión.	414
Figura 222. Imagen de las roturas en las probetas del composite Materia Textil Borrauna vez finalizado el ensayo de impacto.	415
Figura 223. Imagen de las probetas de composite de coco y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.	417
Figura 224. Imagen de la probeta de composite de coco en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.....	417
Figura 225. Imagen de la colocación de la probeta de “green composite” de coco en el útil de flexión en la máquina de tracción y su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.	418
Figura 226. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del “green composite” de coco una vez finalizado el ensayo de flexión.....	419
Figura 227. Imagen de las roturas en las probetas del “green composite” de coco con bioresina una vez finalizado el ensayo de impacto.	420
Figura 228. Imagen de las probetas del “green composite” cáñamo y de su colocación en las mordazas de la máquina de tracción.	421

Figura 229. Imagen de la probeta del “green composite” de cáñamo en las mordazas y de las roturas obtenidas una vez finalizado el ensayo de tracción.	422
Figura 230. Imagen de la colocación de la probeta del “green composite” de cáñamo en el útil de flexión en la máquina de tracción y su posterior rotura una vez finalizado el ensayo.	423
Figura 231. Imagen de las roturas obtenidas en las probetas del “green composite” de cáñamo una vez finalizado el ensayo de flexión.....	423
Figura 232. Imagen de las roturas en las probetas de biocomposite de cáñamo una vez finalizado el ensayo de impacto.	424
Figura 233. Resistencia máxima a la tracción de los “green composites” con bioresina.	432
Figura 234. Resistencia máxima a la tracción de los composites con resina de poliéster.	432
Figura 235. Resistencia máxima a la flexión de los “green composites” con bioresina.	433
Figura 236 Resistencia máxima a la flexión de los composites con resina de poliéster.	433
Figura 237. Dureza tipo (D) de los “green composites” con bioresina.....	434
Figura 238. Dureza tipo (D) de los composites con resina de poliéster.	434
Figura 239. Impacto péndulo de charpy de los “green composites” con bioresina.	435
Figura 240. Impacto péndulo de charpy de los composites con resina de poliéster.	435
Figura 241. Valores de los módulos de elasticidad de los biocomposites.....	436
Figura 242. Valores de los módulos de elasticidad de los composites con poliéster.....	436
Figura 243. Valores comparativos del módulo elasticidad de los “green composites” con bioresina.....	441
Figura 244. Valores comparativos del módulo elasticidad de los composites con resina de poliéster.	442
Figura 245. Imagen de las láminas de los composites con bioresina y resina de poliéster así como de la placa de yeso laminado que se van a someter a ensayos en la cámara de transmisión.....	444
Figura 246. Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo de los composites con bioresina en toda la banda de frecuencia de tercio de octava.	447
Figura 247. Valores del aislamiento acústico composites con bioresina desde la frecuencia desde la frecuencia de corte hasta 5 kHz.	448
Figura 248. Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo de los composites con resina de poliéster en toda la banda de frecuencia de tercio de octava.....	448
Figura 249. Comparativa del aislamiento acústico al ruido aéreo R de las placas de composite.	449
Figura 250. Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de lino con bioresina y resina de poliéster para toda la banda de frecuencia de tercio de octava.	452
Figura 251. Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de lino con bioresina y con resina de poliéster.	454

Figura 252. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre láminas de Materia Textil Borracon bioresina y con resina de poliéster.....	455
Figura 253. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre láminas de yute con bioresina y con resina de poliéster.....	455
Figura 254. Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de coco con bioresina y con resina de poliéster.....	456
Figura 255, Valores de aislamiento al ruido aéreo entre láminas de cáñamo con bioresina y con resina de poliéster.....	457
Figura 256. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” lino con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.....	459
Figura 257. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de la Materia de residuo textil Borra con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.....	460
Figura 258. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” yute con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.....	461
Figura 259. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” coco con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.....	462
Figura 260. Valores de aislamiento a ruido aéreo entre lámina de “green composite” cáñamo con bioresina versus placa de yeso laminado de 13 mm.....	462
Figura 261. Recopilación de “green composites” con bioresina versus placa de yeso laminada.....	463
Figura 262. Recopilación de los composites con resina de poliéster versus placa de yeso laminada.....	463
Figura 263. Elección de los mejores “green composites” y Materia Textil Borracon bioresina al aislamiento acústico a ruido aéreo.....	465
Figura 264. Valores obtenidos de los composites con bioresina para los materiales tipo sándwich.....	467
Figura 265. Valores obtenidos de los composites con resina de poliéster para los materiales tipo sándwich.....	467
Figura 266. Multicapa en forma de sándwich con capas externas de composite y núcleo de lana de oveja.....	468
Figura 267. Valores al aislamiento acústico al ruido aéreo con las multicapas en forma de sándwich.....	469
Figura 268. Estructura en forma de sándwich de placas de yeso laminado y lana de oveja... ..	480
Figura 269. Resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido para todas las configuraciones dobles de láminas de yeso y lanas de oveja.....	480
Figura 270. Direcciones arbitrarias de una capa.....	513
Figura 271. Distancias las láminas inferiores al eje de simetría del laminado.....	526
Figura 272. Disposicionamiento de las láminas y sus matrices de rigidez.....	527

Figura 273. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad de las fibras para los composites con resina de poliéster.	532
Figura 274. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad longitudinales para los composites con resina de poliéster.	533
Figura 275. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad transversales para los composites con resina de poliéster.	533
Figura 276. Comparativa de los distintos valores de los módulos de cortadura para los composites con resina de poliéster.	533
Figura 277. Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson de las fibras para los composites con resina de poliéster.	534
Figura 278. Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson μ_{12} y μ_{21} para los composites con resina de poliéster.	534
Figura 279. Comparativa de los distintos valores de las constantes ingenieriles globales para los composites con resina de poliéster.	535
Figura 280. Comparativa de los distintos valores de las densidades de las fibras para los composites con resina de poliéster.	535
Figura 281. Comparativa de los distintos valores de las constantes ingenieriles globales para los "green composites" con bioresina.	536
Figura 282. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad de las fibras para los "green composites" con bioresina.	537
Figura 283. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad longitudinales para los "green composites" con bioresina.	537
Figura 284. Comparativa de los distintos valores de los módulos de elasticidad transversales para los "green composites" con bioresina.	538
Figura 285. Comparativa de los distintos valores de los módulos de cortadura para los "green composites" con bioresina.	538
Figura 286. Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson de las fibras para los "green composites" con bioresina.	539
Figura 287. . Comparativa de los distintos valores de los módulos de poisson μ_{12} y μ_{21} para los "green composites" con bioresina.	539
Figura 288. Comparativa de los distintos valores de las densidades de las fibras para los "green composites" con bioresina.	540
Figura 289. Proceso de creación de un nuevo material.	541
Figura 290. Introducción de los parámetros de las láminas.	542
Figura 291. Apilamiento del laminado.	543
Figura 292. Apilamiento de las láminas.	547
Figura 293. Espesores y ángulos de las láminas que forman el apilamiento.	548

Figura 294. Resultados obtenidos de las constantes ingenieriles globales y de las matrices de rigidez de extensión y flexión.	548
Figura 295. Recopilación de los valores de las constantes ingenieriles locales del composite yute con resina de poliéster a través del programa elamx2.	551
Figura 296. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite yute con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.	552
Figura 297. Recopilación de los valores de las constantes ingenieriles globales del “green composite” yute con bioresina a través del programa elamx2.	554
Figura 298. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” yute con bioresina tras la realización del programa eLamX2.	555
Figura 299. Introducción de las constantes locales.	556
Figura 300. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite lino con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.	557
Figura 301. Introducción de las constantes locales.	558
Figura 302. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” lino con bioresina tras la realización del programa eLamX2.	559
Figura 303. Introducción de las constantes locales.	560
Figura 304. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite M.T: Borra con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.	561
Figura 305. Introducción de las constantes locales.	562
Figura 306. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite Materia Textil Borracon bioresina tras la realización del programa eLamX2.	563
Figura 307. Introducción de las constantes locales.	564
Figura 308. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite cáñamo con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.	565
Figura 309. Introducción de las constantes locales.	566
Figura 310. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” cáñamo con bioresina tras la realización del programa eLamX2.	567
Figura 311. Introducción de las constantes locales.	568
Figura 312. Constantes ingenieriles globales y matrices del composite coco con resina de poliéster tras la realización del programa eLamX2.	569
Figura 313. Constantes ingenieriles obtenidas a través del programa informática eLam x ²	570
Figura 314. Constantes ingenieriles globales y matrices del “green composite” coco con bioresina tras la realización del programa eLamX2.	571
Figura 315. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina de yute.	572
Figura 316. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina de coco.	572

Figura 317. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina materia textil borra.	573
Figura 318. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina lino.....	573
Figura 319. Valores de las frecuencias naturales para los primeros 6 modos obtenidos con el Ansys Workbench para el composite con bioresina cáñamo.	574
Figura 320. Tensión de Von Mises.....	582
Figura 321. Análisis estático 3-Desplazamientos-Desplazamientos1.	583
Figura 322. Deformación unitaria normal en dir. X	584
Figura 323. Deformaciones unitarias eje Y	585
Figura 324 Tensiones en el eje global X.....	586
Figura 325. Tensión de cortadura en el eje global XY.....	587
Figura 326. Elección de la tensión de cortadura.....	588
Figura 327. Obtención del valor de la tensión de cizalladura.	588
Figura 328. Iso superficies.	589
Figura 329. Desplazamiento del cursor hacia el valor que se ha calculado de forma analítica.	589
Figura 330. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano YZ.	590
Figura 331. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano YZ.	591
Figura 332. Valor de la deformación en el eje global Z.	592
Figura 333. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano XZ.	593
Figura 334. Valor de la tensión cortante en la dirección Z en el plano XZ.	594
Figura 335. Valor de la tensión normal en el eje Z.	595
Figura 336. Coste de la fabricación de una placa de “green composite” con fibra de yute y bioresina.	606
Figura 337. Coste de la fabricación de una placa de composite con fibra de yute con resina de poliéster.	607
Figura 338. Coste de fabricación de una placa de “green composite” con fibra de lino y bioresina.	608
Figura 339. Coste de fabricación de una placa de composite con fibra de lino y resina de poliéster.	609
Figura 340. Costes de la fabricación de una placa de composite con fibra de Materia Textil Borrar bioresina.	610
Figura 341. Costes en la fabricación de una placa de composite con fibra de Materia Textil Borrar resina de poliéster.	611

Figura 342. Coste en la fabricación de una placa de “green composite” con fibra de coco y bioresina.	612
Figura 343. Coste de la fabricación de una placa de composite con fibra de coco y resina de poliéster.	613
Figura 344. Coste de la fabricación de una placa de “green composite” con fibra de cáñamo y bioresina.	614
Figura 345. Coste en la fabricación de una placa de composite con fibra de cáñamo y resina de poliéster.	615
Figura 346. Presupuesto del apilamiento en forma de sándwich de Materia Textil Borrayute con bioresina y lana.	617
Figura 347. Presupuesto de apilamiento en forma de sándwich de Materia Textil Borrayute con resina de poliéster y lana.	617
Figura 348. Coste apilamiento sándwich con capas exteriores de yute con bioresina - yute con resina de poliéster y lana.	618
Figura 349. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borracon bioresina - yute con resina de poliéster y lana.	618
Figura 350. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borracon resina de poliéster - PYL y lana.	619
Figura 351. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de yute con resina de poliéster – PYL y lana.	620
Figura 352. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de yute con bioresina – PYL y lana.	621
Figura 353. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borracon bioresina – PYL y lana.	622
Figura 354. Coste del apilamiento sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borracon bioresina – Materia Textil Borracon resina de poliéster y lana.	623
Figura 355. Símil mecánico de la onda de sonido.	693
Figura 356. Parámetros fundamentales del sonido.	695

Índice de Tablas

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes de la resina de epoxi.....	38
Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de la resina de poliéster.	40
Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de la resina de poliéster.....	45
Tabla 4. Clasificación resinas de poliéster.....	45
Tabla 5. Ventajas e inconveniente de los ecos composites.	56
Tabla 6. Proveedores de envases y embalajes de bioresina a nivel mundial.	57
Tabla 7. Clasificación de las fibras naturales.....	58
Tabla 8. Propiedades físicas de las fibras naturales.	60
Tabla 9. Propiedades mecánicas de las fibras.	61
Tabla 10. Fuentes: four “The Wood Fibre Polymer Composites International Sumposium”, Bourdeax.	72
Tabla 11. Valores recomendables de R_w	90
Tabla 12. Recopilación de distintos valores de α	101
Tabla 13. Módulos de elasticidad de algunos materiales sólidos.....	122
Tabla 14. Valores de los módulos de compresión de distintos materiales.	124
Tabla 15. Valores de la velocidad del sonido de distintos gases.....	126
Tabla 16. Velocidades de distintos materiales.....	127
Tabla 17. Recopilación de los valores de la densidad, velocidades longitudinales y transversales e impedancias acústicas de diversos materiales.	127
Tabla 18. Valores de la constante de la que dependen las condiciones de borde para cada modo.	129
Tabla 19. Comparación de propiedades del acero y laminados cross – Ply con los composites.	152
Tabla 20. Valores de fracción de volumen en función del procesado.	156
Tabla 21. Propiedades de las fibras de refuerzo.	167
Tabla 22. Propiedades de las matrices.....	168
Tabla 23. Parámetros de las fibras a tracción, cortadura y coeficiente de poisson.....	175
Tabla 24. Parámetros de cálculo de una lámina en las direcciones locales.	176
Tabla 25. Recopilación de los parámetros de un laminado.	213
Tabla 27. Constantes ingenieriles globales.	221
Tabla 27. Búsqueda de palabras clave en el tema materiales compuestos fibras naturales...	241
Tabla 28. Resultados obtenidos sobre la búsqueda con la palabra clave.....	242
Tabla 29. Resultados obtenidos sobre la búsqueda con la palabra clave.....	242

Tabla 30. Resultados obtenidos sobre la búsqueda de palabras claves.....	242
Tabla 31. Palabras claves de la búsqueda.	243
Tabla 32. Recopilación de opciones descartadas y válidas en la protección de la invención..	248
Tabla 33. Valores obtenidos tras la realización de las distintas búsquedas en función de distintas palabras claves.....	249
Tabla 34 Valores obtenidos tras la realización de las distintas búsquedas en función de distintas palabras claves.....	250
Tabla 35 Valores obtenidos tras la realización de las distintas búsquedas en función de distintas palabras claves.....	252
Tabla 36. Datos técnicos del cubo de evacuación de resina.....	268
Tabla 37. Dimensionamiento de las probetas según el tipo de refuerzo.	277
Tabla 38. Materiales utilizados en la fabricación de los composites.	292
Tabla 39. Características de la resina biodegradable utilizada.	298
Tabla 40. Propiedades de la resina Norsodyne.	301
Tabla 41. Propiedades físicas y de curado de la resina Norsodyne.....	301
Tabla 42. Características de las fibras utilizadas.....	302
Tabla 43. Fibras utilizadas en la fabricación de placas.	302
Tabla 44. Prestaciones de la fibra de yute.....	308
Tabla 45. Prestaciones de la fibra de Lino.....	308
Tabla 46. Prestaciones de la fibra de Coco.	312
Tabla 47. Prestaciones de la fibra de Cáñamo Albahaca.....	313
Tabla 48. Prestaciones de la fibra de Cáñamo.....	314
Tabla 49. Composición, densidad y espesor de las muestras de lana de oveja M5 y Premium.	316
Tabla 50. Módulo de elasticidad y de poisson del yeso.....	317
Tabla 51. Densidad del composite M.T.Borra con bioresina.	335
Tabla 52. Introducción de datos obtenidos por medición y cálculos previos al ensayo.	343
Tabla 53. Valores obtenidos en el ensayo en la máquina universal.....	344
Tabla 54. Cálculos estadísticos para la obtención del valor de resistencia máxima a la flexión.	344
Tabla 55. Valores obtenidos de la resistencia máxima a la tracción del yute.	345
Tabla 56. Promedio impacto péndulo de charpy composite yute con bioresina.....	346
Tabla 57. Valores de impacto de los distintos composites ensayados.....	347
Tabla 58. Valores dureza composite lino con bioresina con shore D.....	349
Tabla 59. Valores de dureza shore D de los distintos composites ensayados.....	349

Tabla 60. Dimensionado de las probetas.....	350
Tabla 61. Recopilación de valores de las constantes de condiciones de borde.	352
Tabla 62. Recopilación de valores de las constantes de condiciones de borde.	360
Tabla 63. Valores ponderados de la placa de yeso laminado.	366
Tabla 64. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa con fibras de yute.	386
Tabla 65. Dimensionado de las capas de yute.	386
Tabla 66. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa con fibras de yute.	387
Tabla 67. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa con fibra de Lino Biaxial.	388
Tabla 68. Dimensionado de las capas de lino biaxial.	389
Tabla 69. Número de capas utilizadas en la fabricación de las placas “green composite” con fibras de lino biaxial.....	390
Tabla 70. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de la Materia Textil Borracon bioresina.	391
Tabla 71. Dimensionado de las capas de Materia Textil Borracon bioresina.	391
Tabla 72. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de Materia Textil Borracon resina de poliéster.	392
Tabla 73. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de “green composite” con fibra de coco.	393
Tabla 74. Dimensionado de la capa de coco.	393
Tabla 75. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de coco.	394
Tabla 76. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa de composites con fibra de cáñamo y bioresina.	395
Tabla 77. Dimensionado de las capas de cáñamo.	395
Tabla 78. Número de capas utilizadas en la fabricación de la placa del composite de cáñamo con resina de poliéster.	396
Tabla 79. Valores de densidad de los distintos composites ensayados.....	397
Tabla 80. Resumen de parámetros para la realización del cálculo teórico de los valores de porosidad de los composites con resina de poliéster.	397
Tabla 81. Recopilación de las densidades teóricas de las fibras de los “green composites” con bioresina.	399
Tabla 82. Recopilación de los resultados de las densidades teóricas de los composite con resina de poliéster y fracción volumétrica de poros.	400
Tabla 83. Resumen de parámetros para la realización del cálculo teórica de los valores de porosidad de los composites con bioresina.	400
Tabla 84. Recopilación de las densidades teóricas de las fibras de los composites con resina de poliéster.	401

Tabla 85. Valores de densidades teóricas de los composites con bioresina y fracción de poros.	401
Tabla 86. Resultados de los parámetros de los composites de yute en la máquina de tracción.	404
Tabla 87. Resultados obtenidos de resistencia máxima a la flexión del composite yute con bioresina.	405
Tabla 88. Resultados obtenidos de la resistencia al impacto del composite yute.	406
Tabla 89. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza shore D del composite yute	407
Tabla 90. Resultados obtenidos de los parámetros a tracción de los composites lino biaxial con bioresina y resina de poliéster.	408
Tabla 91. Resultados obtenidos de resistencia máxima a la flexión del composite de lino biaxial.	410
Tabla 92. Resultado obtenido de la resistencia al impacto del “green composite” lino biaxial.	411
Tabla 93. Resultados obtenidos de la resistencia a la dureza shore D del composite de lino biaxial.	411
Tabla 94. Resultados obtenidos de los parámetros de tracción del composite materia textil borra.	413
Tabla 95. Resultado obtenido de la resistencia máxima a la flexión composite materia textil borra.	415
Tabla 96. Resultado obtenido de la resistencia al impacto de la materia textil borra.	416
Tabla 97. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza Shore D del composite de materia textil borra.	416
Tabla 98. Resultados obtenidos dos parámetros de tracción del composite coco.	418
Tabla 99. Resultados obtenidos de la resistencia máxima a flexión de los composites de coco.	419
Tabla 100. Resultados obtenidos de la resistencia al impacto de los composites de coco.	420
Tabla 101. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza shore D de los composites coco.	421
Tabla 102. Resultados obtenidos de los parámetros a tracción del composite cáñamo con bioresina.	422
Tabla 103. Resultado obtenido de la resistencia máxima a flexión de los composite de cáñamo	424
Tabla 104. Resultado obtenido de la resistencia al impacto de los composite de cáñamo.	425
Tabla 105. Resultado obtenido de la resistencia a la dureza shore D del composite cáñamo	425
Tabla 106. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite lino con bioresina.	426
Tabla 107. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite lino con resina de poliéster.	426

Tabla 108. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite yute con bioresina.....	427
Tabla 109. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite yute con resina de poliéster.....	427
Tabla 110. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción de la Materia Textil Borracon bioresina.....	428
Tabla 111. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción de la Materia Textil Borracon bioresina.....	428
Tabla 112. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite cáñamo con bioresina.....	429
Tabla 113. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite cáñamo con resina de poliéster.....	429
Tabla 114. . Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite coco con bioresina.....	430
Tabla 115. Resultados obtenidos en el ensayo estático de tracción del composite coco con resina de poliéster.....	430
Tabla 116. Módulos de elasticidad a través de ensayos con extensómetros.....	431
Tabla 117. Resultados de vibración libre experimentales.....	437
Tabla 118. Recopilación de valores de las constantes de condiciones de borde.....	438
Tabla 119. Valores comparativos de los módulos de elasticidad de los distintos materiales...	439
Tabla 120. Resultados del módulo de elasticidad a través de ensayos dinámicos versus máquina de tracción universal.....	440
Tabla 121. Resultados de los distintos módulos de elasticidad.....	442
Tabla 122. Comparación entre frecuencias naturales, rango de frecuencias de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido y frecuencias críticas.....	443
Tabla 123. Valores del aislamiento acústico al ruido aéreo de toda la banda de tercio de octava para composites con bioresina.....	445
Tabla 124. Valores del aislamiento acústico al ruido aéreo de toda la banda de tercio de octava para composites con resina de poliéster.....	445
Tabla 125. Tabla de sustracciones y adiciones ponderadas en la banda de frecuencia de tercio de octava.....	450
Tabla 126. Ubicación de valores por columna para la obtención del valor de ponderación aplicada.....	451
Tabla 127. Valores ponderados de composites – biocomposites.....	451
Tabla 128. Obtención del valor ponderado de aislamiento acústico para toda la banda de frecuencia de tercio de octava.....	453
Tabla 129. Obtención del valor ponderado al aislamiento acústico a ruido aéreo con banda de frecuencia de 800 Hz a 5 000 Hz.....	453

Tabla 130. Valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de una placa de yeso laminado.	458
Tabla 131. Valores de ponderación aplicada de la placa de yeso laminado.	458
Tabla 132. Valor ponderado de la placa de yeso laminado.	459
Tabla 133. Resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido para las placas evaluadas elaboradas con bioresina.	464
Tabla 134. Resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido para las placas elaboradas con resina de poliéster.	464
Tabla 135. Valores de aislamiento acústico global ponderado de las placas evaluadas y de la placa de yeso de 13 mm de espesor ensayada en la misma cámara de transmisión.	466
Tabla 136. Valores de ponderación aplicada de los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- yute con bioresina y lana M5.	469
Tabla 137. Valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- yute con bioresina y lana premium.	470
Tabla 138. Valores ponderados para los apilamientos sándwich con bioresina.	470
Tabla 139. Valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- yute con resina de poliéster con lana M5.	471
Tabla 140. Valores de ponderación aplicada a los materiales tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borra- yute con resina de poliéster y lana premium.	471
Tabla 141. Valores ponderados para los materiales tipo sándwich con resina de poliéster.	471
Tabla 142. Valores de la ponderación aplicada a las placas de Materia Textil Borrade bioresina + Materia Textil Borreresina de poliéster + lana M5.	472
Tabla 143. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borracaon bioresina – resina de poliéster y lana M5.	472
Tabla 144. Valores de la ponderación aplicada a las placas con yute con bioresina + yute con resina de poliéster + lana M5.	473
Tabla 145. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de yute con bioresina – resina de poliéster y lana M5.	473
Tabla 146. Valores de ponderación aplicada de las placas con Materia Textil Borracaon bioresina + yute con resina de poliéster + lana M5.	474
Tabla 147. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borracaon bioresina – yute con resina de poliéster y lana M5.	474
Tabla 148. Valores de ponderación aplicada de la placas con Materia Textil Borracaon resina de poliéster + yute con bioresina + lana M5.	475
Tabla 149. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de Materia Textil Borracaon resina de poliéster – yute con bioresina y lana M5.	475
Tabla 150. Valores de ponderación aplicadas de las placas y Materia Textil Borracaon bioresina y Materia Textil Borracaon resina de poliéster + lana premium.	476

Tabla 151. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de y Materia Textil Borracon resina de poliéster – yute con bioresina y lana premium.	476
Tabla 152. Valores de ponderación aplicada de las placas yute con bioresina - yute con resina de poliéster + lana premium.	477
Tabla 153. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de yute con resina de poliéster – yute con bioresina y lana premium.	477
Tabla 154. Valores de ponderación aplicada de la placas y Materia Textil Borracon bioresina - yute con resina de poliéster + lana premium.	478
Tabla 155. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de y Materia Textil Borracon bioresina– yute con resina de poliéster y lana premium.....	478
Tabla 156. Valores de ponderación aplicada de la placas y Materia Textil Borracon resina de poliéster y yute con bioresina + lana premium.....	479
Tabla 157. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de y Materia Textil Borracon bioresina– yute con resina de poliéster y lana premium.....	479
Tabla 158. Valores de ponderación aplicada de las placas de yeso laminado + lana premium.	481
Tabla 159. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado y Lana Premium.	481
Tabla 160. Valores de ponderación aplicada de las placas de yeso laminado + lana premium.	481
Tabla 161. Valor global ponderado del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado y lana M5.....	482
Tabla 162. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - Materia Textil Borracon bioresina + lana M5.	482
Tabla 163. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- Materia Textil Borracon bioresina y lana M5.	482
Tabla 164. Valores de ponderación aplicada de la Placa yeso laminado - yute con bioresina.....	483
Tabla 165. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- yute con bioresina y lana M5.	483
Tabla 166. Valores de ponderación aplicada de la Placa yeso laminado - y Materia Textil Borracon resina poliéster + lana M5.	483
Tabla 167. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- y Materia Textil Borracon resina de poliéster y lana M5.	484
Tabla 168. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - yute con resina poliéster + lana M5.....	484
Tabla 169. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con resina de poliéster y lana M5.	484
Tabla 170. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - y Materia Textil Borracon bioresina + lana Premium.	485

Tabla 171. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - y Materia Textil Borracon bioresina y lana premium.	485
Tabla 172. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - yute con bioresina	486
Tabla 173. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - yute con bioresina y lana premium.	486
Tabla 174. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - y Materia Textil Borracon resina de poliéster + lana premium.	486
Tabla 175. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado - y Materia Textil Borracon resina de poliéster y lana premium.	487
Tabla 176. Valores de ponderación aplicada de la placa yeso laminado - yute con resina de poliéster + lana premium.	487
Tabla 177. Valor global de ponderación del material tipo sándwich con capas exteriores de placa de yeso laminado- yute con resina de poliéster y lana premium.	487
Tabla 178. Recopilación de los valores globales ponderados de los distintos apilamientos laminares tipo sándwich con lana M5.	488
Tabla 179. Recopilación de los valores globales ponderados de los distintos apilamientos laminares tipo sándwich con lana premium.	489
Tabla 180. Recopilación de los valores al aislamiento acústico a ruido aéreo de los materiales compuestos y placas de yeso laminadas con mayor aislamiento.	490
Tabla 181. Valores de espesores de los distintos apilamientos sándwich con lana M5.	491
Tabla 182. Valores de espesores de los distintos apilamientos sándwich con lana premium.	492
Tabla 183. Valores correspondientes al módulo de elasticidad, coeficiente de poisson y densidad de los composites con bioresina.	493
Tabla 184. Valores de los módulos de cortadura y densidades de los composites con bioresina.	493
Tabla 185. Recopilación de las velocidades de propagación longitudinales- transversales del sonido en los composites con bioresina.	494
Tabla 186. Recopilación de los parámetros necesarios para la obtención de la velocidad de propagación longitudinal del sonido en los composites con resina de poliéster.	494
Tabla 187. Valores de los módulos de cortadura y densidades de los composites con resina de poliéster.	494
Tabla 188. Recopilación de las velocidades de propagación longitudinales- transversales del sonido en los composites con resina de poliéster.	495
Tabla 189. Valores de los módulos de elasticidad- coeficiente de poisson – densidad de la placa de yeso laminado y lana.	495
Tabla 190. Recopilación de la velocidad longitudinal y transversal del sonido de la placa de yeso laminado.	495
Tabla 191. Valor de las impedancias de los composites con bioresina.	496

Tabla 192. Valor de las impedancias de los composites con resina de polièster.....	497
Tabla 193. Recopilación de la impedancia acústica de la placa de yeso laminada y lana.....	497
Tabla 194. Datos para la obtención de la frecuencia de coincidencia.....	499
Tabla 195. Obtención de los valores necesarios para el cálculo de aislamiento acústico en la banda de tercio de octava.	499
Tabla 196. Secuencia de operaciones para la obtención del valor global ponderado.	500
Tabla 197. Valores de aislamiento global ponderado de los composites con resina de poliéster.	500
Tabla 198. Parámetros necesarios para el cálculo de la frecuencia de coincidencia.	500
Tabla 199. Valores de aislamiento acústico ponderados de los composites con bioresina.	501
Tabla 200. Espesores y rigideces de las lanas de oveja M5 y premium.	503
Tabla 201. Parámetros necesarios para el cálculo de aislamiento acústico a ruido aéreo del apilamiento multicapa tipo sándwich Materia Textil Borra- placa de yeso laminado con lana premium.....	503
Tabla 202. Valores de la densidad - velocidad de propagación del sonido e impedancia acústica en el aire.....	503
Tabla 203. Recopilación de valores para la obtención del aislamiento acústico a ruido aéreo en la banda superior de tercio de octava.	504
Tabla 204. Operaciones para la obtención del valor global ponderado para frecuencias inferiores a la frecuencia de coincidencia.	504
Tabla 205. Operaciones para la obtención del valor global ponderado para frecuencias superiores a la frecuencia de coincidencia.	505
Tabla 206. Recopilación de los valores globales ponderados teóricos de los distintos apilamientos laminares tipo sándwich con lana M5 y premium.	505
Tabla 207. Recopilación primeros datos de partida.....	508
Tabla 208. Recopilación de fórmulas para la obtención del volumen del composite, masa de la matriz, volumen de la matriz y volumen de las fibras.	508
Tabla 209. Valor de la densidad de la fibra de yute.....	509
Tabla 210. Módulos de elasticidad composite y matriz de resina de poliéster.....	509
Tabla 211. Resultados obtenidos de los porcentajes de volumen y masa.....	510
Tabla 212. Recopilación de las constantes locales del laminado.....	512
Tabla 213. Recopilación de constantes locales.	513
Tabla 214. Valores de las principales razones trigonométricas para un ángulo de 45°.	517
Tabla 215. Valores de las principales razones trigonométricas para un ángulo de 45°.	520
Tabla 216. Recopilación de las constantes ingenieriles globales del laminado.	525
Tabla 217. Valores por los que hay que multiplicar a las matrices de rigidez.	527

Tabla 218. Recopilación de resultados matemáticos teóricos de las constantes locales – globales de composites con bioresina Super sap CLR.	530
Tabla 219. Recopilación de las densidades – fracciones de masa, volumen y módulos de elasticidad y coeficiente de poisson de la matriz de los composites con bioresina.....	530
Tabla 220. Valores de tensiones – deformaciones de los composites con bioresina.	530
Tabla 221. Recopilación de resultados matemáticos teóricos de las constantes locales – globales de composites con resina de Poliéster.	531
Tabla 222. Recopilación de las densidades – fracciones de masa, volumen y Módulos de elasticidad y coeficiente de poisson de la matriz de los composites con resina de poliéster...	531
Tabla 223. Valores de tensiones – deformaciones de los composites con resina de poliéster.	531
Tabla 224. Resultados de las constantes ingenieriles globales obtenidas a través de medios matemáticos.	549
Tabla 225. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x ²	549
Tabla 226. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m ³) a través del eLam x ²	549
Tabla 227. Parámetros para la obtención de resultados deseados en eLam x ²	550
Tabla 228. Parámetros para la obtención de resultados deseados en eLam x ²	550
Tabla 229. Valores de las constantes ingenieriles globales del composite yute con resina de poliéster.	552
Tabla 230. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x ²	553
Tabla 231. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m ³) a través del eLam x ²	553
Tabla 232. Valores de las constantes ingenieriles globales del “green composite” yute con bioresina.	554
Tabla 233. Valores de la matriz [A] (MPa * m) obtenidos a través de eLam x ²	555
Tabla 234. Valores de la matriz [D] (Pa * m ³) obtenidos a través de eLam x ²	555
Tabla 235. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite lino con resina de poliéster.	556
Tabla 236. Valores de la matriz [A] (Pa * m) obtenidos a través de eLam x ²	557
Tabla 237. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m ³) a través del eLam x ²	557
Tabla 238. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del “green composite” lino con bioresina.	558
Tabla 239. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x ²	559
Tabla 240. Valores obtenidos de la matriz [D] (Pa * m ³) a través de eLam x ²	559
Tabla 241. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite materia de residuo textil borra.	560
Tabla 242. Valores obtenidos de la matriz [A] (MPa * m) a través de eLam x ²	561

Tabla 243. Valores obtenidos de la matriz [D] ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3$) a través de eLam x^2 .	561
Tabla 244. Recopilación de los valores de las constantes ingenieriles globales.	562
Tabla 245. Valores obtenidos de la matriz [A] ($\text{Mpa} \cdot \text{m}$) a través de eLamX ² .	563
Tabla 246. Valores obtenidos de la matriz [D] ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3$) a través del eLam x^2 .	563
Tabla 247. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite cáñamo con resina de poliéster.	564
Tabla 248. Valores de la matriz [A] ($\text{MPa} \cdot \text{m}$) obtenidos a través de eLamX ² .	565
Tabla 249. Valores de la matriz [D] ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3$) obtenidos a través de eLam x^2 .	565
Tabla 250. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del “green composite” cáñamo con bioresina.	566
Tabla 251. Valores de la matriz [A] ($\text{MPa} \cdot \text{m}$) obtenidos a través de eLam x^2 .	567
Tabla 252. Valores obtenidos de la matriz [D] ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3$) a través del eLam x^2 .	567
Tabla 253. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del composite coco con resina de poliéster.	568
Tabla 254. Valores de la matriz [A] ($\text{MPa} \cdot \text{m}$) obtenidos a través de eLam x^2 .	569
Tabla 255. Valores obtenidos de la matriz [D] ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3$) a través del eLam x^2 .	569
Tabla 256. Recopilación de las constantes ingenieriles globales teóricas del “green composite” coco con bioresina.	570
Tabla 257. Valores obtenidos de la matriz [A] ($\text{MPa} \cdot \text{m}$) a través de eLam x^2 .	571
Tabla 258. Valores obtenidos de la matriz [D] ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3$) a través de eLam x^2 .	571
Tabla 270. Recopilación de la frecuencia natural de los composites con resina de poliéster.	574
Tabla 271. Recopilación de parámetros para el cálculo del módulo de elasticidad de la probeta.	575
Tabla 272. Recopilación de fórmulas para los cálculos de las deformaciones.	576
Tabla 273. Recopilación de datos de la fibra de lino y de la resina de poliéster.	579
Tabla 274. Recopilación de los parámetros necesarios para la realización del cálculo de los coeficientes de dilatación térmica.	580
Tabla 275. Parámetros del composite lino con resina de poliéster.	581
Tabla 276. Recopilación de expresiones matemáticas para el cálculo de una lámina.	596
Tabla 277. Recopilación de valores obtenidos tras el análisis informático.	596
Tabla 278. Coste de la resina biodegradable utilizada en la fabricación de los “green composites”.	602
Tabla 279. Coste de la resina de poliéster y catalizador utilizado en la fabricación de las placas.	602
Tabla 280. Coste de las fibras y/o tejidos en la fabricación de los composite.	603

Tabla 281. Coste de los materiales fungibles utilizados en la fabricación de una placa de composite.....	604
Tabla 282. Coste de energía consumida en la fabricación de una placa de composite.....	605
Tabla 283. Coste de la mano de obra en la fabricación de una placa de composite.....	605
Tabla 284. Coste de fabricación de las placas de con bioresina y poliéster en función del tipo de fibra y/o tejido utilizado.....	616
Tabla 285. Costes de apilamiento multicapa tipo sándwich con composites de bioresina- resina de poliéster - placa de yeso laminado y Lana.....	623
Tabla 286. Coste de apilamientos con placas de yeso laminado y lana.....	624
Tabla 288. Recopilación de costes de los apilamientos sándwich.....	639