



Universidad
de La Laguna

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS NATURALES

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Alumno: Lohengrin David Benazco Ángel

Tutoras: María Milagros Laz Pavón, María Hernández Molina

Julio 2015

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Y TECNOLOGÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

Memoria

TRABAJO FIN DE GRADO

TÍTULO

PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS NATURALES

AUTOR

Lohengrin David Benazco Ángel

TUTORAS

María Milagros Laz Pavón, María Hernández Molina

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis tutoras María Milagros Laz Pavón y María Hernández Molina su ayuda por guiarme durante todo el proyecto, además de despertar mi curiosidad por los trabajos de investigación. Muchas gracias.

Agradecer a las empresas que han suministrado las materias primas para la elaboración del trabajo, al igual que a los particulares como fue el caso de Abraham. También destacar la colaboración de los alumnos que realizaron las prácticas de la asignatura Ingeniería Materiales que participaron en la preparación de las fibras y a mis compañeros de laboratorio Pablo y Marian.

A mis padres, mis tres hermanos (Daniel, Jorge y Fernando) y a Tania por confiar en mí, apoyarme y “obligarme” a estudiar. También al resto de mi familia, por ayudarme en lo que han podido.

Por último a mis compañeros, amigos y a todos aquellos que me han ayudado, muchas gracias por vuestra aportación.

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

TÍTULO DEL PROYECTO

PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS A PARTIR DE FIBRAS NATURALES

DATOS DEL PETICIONARIO

RAZÓN SOCIAL: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGIA. UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DOMICILIO: CAMPUS DE ANCHIETA. AVDA. ASTROFÍSICO FCO. SÁNCHEZ S/N. EDIFICIO GAROÉ 38206, LA LAGUNA TENERIFE, ESPAÑA.

TELÉFONO: 922 845289/90/91

DATOS DEL AUTOR

LOHENGRIN DAVID BENAZCO ÁNGEL

DNI: 79073453-M

DATOS DE LAS TUTORAS

MARÍA MILAGROS LAZ PAVÓN, MARÍA HERNANDEZ MOLINA

FECHA

JULIO DE 2015

Índice

1. Objeto.	Pág. 13
1.1 Español.	Pág. 13
1.2 English.	Pág. 13
2. Introducción.	Pág. 15
3. Materiales compuestos.	Pág. 19
3.1 Materiales compuestos reforzados con fibra.	Pág. 20
3.1.1 Resinas.	Pág. 20
3.1.2 Fibras de vidrio.	Pág. 21
3.1.3 Fibras de carbono.	Pág. 21
3.1.4 Fibras naturales.	Pág. 22
3.1.5 Fibras de plátano.	Pág. 24
4. Obtención de las fibras.	Pág. 25
4.1 Fibras de vidrio y carbono.	Pág. 25
4.2 Fibras de plátano.	Pág. 26
4.2.1 Fibras obtenidas del pedúnculo floral.	Pág. 26
4.2.2 Fibras obtenidas a partir de la badana.	Pág. 28
5. Preparación de los materiales compuestos con fibras.	Pág. 31

5.1 Preparación de la resina poliéster.	Pág. 31
5.2 Preparación de la resina epoxi.	Pág. 32
5.3 Preparación de las probetas de resina sin refuerzo.	Pág. 32
5.4 Preparación de las probetas reforzadas con fibras de plátano.	Pág. 34
5.5 Preparación de las probetas reforzadas con fibras de vidrio y de carbono.	Pág. 37
5.6 Descripción de las probetas preparadas.	Pág. 38
5.6.1 Probetas para ensayos preliminares.	Pág. 38
5.6.2 Probetas normalizadas para ensayos a flexión.	Pág. 39
5.6.3 Probetas normalizadas para ensayos a tracción.	Pág. 39
6. Ensayos realizados sobre las probetas preparadas.	Pág. 41
6.1 Determinación de la resistencia a flexión.	Pág. 41
6.2 Determinación de la resistencia a tracción.	Pág. 45
6.3 Ensayo de ultrasonidos.	Pág. 48
6.4 Microscopía digital.	Pág. 49
7. Análisis y resultados.	Pág. 51
7.1 Caracterización de las materias primas.	Pág. 51
7.2 Comportamiento de la resina Epoxi frente a Poliéster.	Pág. 52

7.2.1 Probetas fabricadas sin refuerzo.	Pág. 52
7.2.2 Probetas fabricadas con resina Poléster y dos capas de fibras de refuerzo	Pág. 53
7.2.3 Probetas fabricadas con resina Epoxi y dos capas de fibras de refuerzo	Pág. 55
7.2.4 Probetas fabricadas con resina Poléster y tres capas de fibras de refuerzo	Pág. 57
7.2.5 Probetas fabricadas con resina Epoxi y tres capas de fibras de refuerzo	Pág. 59
7.3 Comparación de las probetas preliminares.	Pág. 60
7.4 Probetas normalizadas para ensayo a flexión.	Pág. 62
7.4.1 Fibras de plátano reforzadas con epoxi.	Pág. 62
7.4.2 Fibras de plátano reforzadas con poliéster.	Pág. 64
7.5 Probetas normalizadas para ensayo a tracción.	Pág. 66
7.4.1 Fibras de plátano reforzadas con epoxi.	Pág. 66
7.4.2 Fibras de plátano reforzadas con poliéster.	Pág. 68
7.6 Comparación de las probetas normalizadas.	Pág. 69
7.7 Ensayo de ultrasonidos	Pág. 70

7.8 Microscopía digital.	Pág. 70
8. Conclusiones y futuros desarrollos.	Pág. 75
8.1 Español.	Pág. 75
8.2 English.	Pág. 76
9. Bibliografía.	Pág. 79
10. Anexos.	Pág. 81
Anexo A: Determinación de las propiedades a flexión de las probetas preliminares	Pág. 83
Anexo B: Determinación de las propiedades a flexión de las probetas normalizadas reforzadas con epoxi	Pág. 91
Anexo C: Determinación de las propiedades a flexión de las probetas normalizadas reforzadas con poliéster	Pág. 99
Anexo D: Determinación de las propiedades a tracción de las probetas normalizadas reforzadas con epoxi	Pág. 107
Anexo B: Determinación de las propiedades a tracción de las probetas normalizadas reforzadas con poliéster	Pág.115

Índice de figuras

Figura 3.1 Clasificación de los materiales compuestos.	Pág. 19
Figura 4.1 Extracción de la parte externa.	Pág. 27
Figura 4.2 Laminación de las fibras.	Pág. 27
Figura 4.3 Fibras de plátanos procedentes del pedúnculo floral.	Pág. 28
Figura 4.4 Fibras de plátanos procedentes de la badana.	Pág. 29
Figura 5.1 Probetas sin refuerzo.	Pág. 33
Figura 5.2 Aplicación de la cera desmoldante.	Pág. 35
Figura 5.3 Primera capa de resina.	Pág. 35
Figura 5.4 Colocación de las fibras.	Pág. 36
Figura 5.5 Adición de resina sobre las fibras.	Pág. 36
Figura 5.6 Probeta reforzada con fibra de plátano.	Pág. 37
Figura 5.7 Orientación de las fibras.	Pág. 39
Figura 6.1 Máquina universal Shimadzu Autograph.	Pág. 42
Figura 6.2 Equipo Krautkrmaer USM 25.	Pág. 49
Figura 6.3 Microscopio digital Dino – Lite.	Pág. 50
Figura 7.1 Microestructura de las fibras de plátano.	Pág. 70
Figura 7.2 Formación de las burbujas de aire.	Pág. 71

Figura 7.3 Capa de aire entre las fibras.	Pág. 71
Figura 7.4 Mala adhesión entre la resina y la fibra.	Pág. 72
Figura 7.5 Rotura de las probetas a flexión.	Pág. 72
Figura 7.6 Rotura de las probetas normalizadas a tracción.	Pág. 73

Índice de tablas

Tabla 3.1 Propiedades de las resinas poliéster y epoxi sin refuerzo.	Pág. 20
Tabla 3.2 Parámetros físicos de algunas fibras naturales.	Pág. 22
Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.	Pág. 22
Tabla 4.1 Características físicas de las fibras de vidrio y carbono.	Pág. 25
Tabla 5.1 Probetas para ensayos preliminares.	Pág. 38
Tabla 7.1 Propiedades de las materias primas.	Pág. 51
Tabla 7.2 Propiedades a flexión de las probetas sin refuerzo.	Pág. 53
Tabla 7.3 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y dos capas de fibras de refuerzo.	Pág. 55
Tabla 7.4 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y dos capas de fibras de refuerzo.	Pág. 57
Tabla 7.5 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y tres capas de fibras de refuerzo.	Pág. 58
Tabla 7.6 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y tres capas de fibras de refuerzo.	Pág. 59
Tabla 7.7 Resumen de las probetas preliminares	Pág. 60
Tabla 7.8 Propiedades a flexión de las fibras de plátano reforzadas con epoxi.	Pág. 63

Tabla 7.9 Propiedades a flexión de las fibras de plátano reforzadas con poliéster.	Pág. 64
Tabla 7.10 Propiedades a tracción de las fibras de plátano reforzadas con epoxi.	Pág. 67
Tabla 7.11 Propiedades a tracción de las fibras de plátano reforzadas con poliéster.	Pág. 68
Tabla 7.12 Resumen de las probetas normalizadas.	Pág. 69

Índice de gráficos

Gráfico 7.2 Curva fuerza – deflexión de las probetas sin refuerzo.	Pág. 53
Gráfico 7.3 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y dos capas de fibras de refuerzo.	Pág. 54
Gráfico 7.4 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y dos capas de fibras de refuerzo.	Pág. 56
Gráfico 7.5 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y tres capas de fibras de refuerzo.	Pág. 58
Gráfico 7.6 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y tres capas de fibras de refuerzo.	Pág. 59
Gráfico 7.8 Curva fuerza – deflexión de las fibras de plátano reforzadas con epoxi.	Pág. 62
Gráfico 7.9 Curva fuerza – deflexión de las fibras de plátano reforzadas con poliéster.	Pág. 64
Gráfico 7.10 Curva esfuerzo-deformación de las fibras de plátano reforzadas con epoxi.	Pág. 66
Gráfico 7.11 Curva esfuerzo-deformación de las fibras de plátano reforzadas con poliéster.	Pág. 68

1. Objeto

1.1 Español

El objeto principal del presente trabajo es la obtención del título universitario de Grado en Ingeniería Mecánica. Para ello, es de carácter obligatorio superar la asignatura de Trabajo Fin de Grado, donde se debe poner de manifiesto los diversos conocimientos obtenidos durante la realización de la carrera.

Por otro lado, el objeto específico de este proyecto es la preparación y caracterización de materiales compuestos a partir de resinas comerciales y fibras naturales, en concreto, de fibras obtenidas a partir de las plataneras de la isla de Tenerife.

En cuanto a las limitaciones del proyecto, sólo se ha estudiado su efecto con las resinas comerciales de poliéster y epoxi. En los ensayos preliminares se prepararon probetas de fibra de plátano con distintas dimensiones, capas y orientaciones de las fibras para estudiar sus propiedades a flexión. Estos valores se comparan con probetas reforzadas con fibras de vidrio o de carbono preparadas con características similares de dimensiones, capas y orientaciones de las fibras para poder comparar si tienen un comportamiento parecido.

Del estudio anterior, se vuelven a elaborar nuevas probetas de fibra de plátano pero esta vez para ensayarlas según las normas UNE a flexión y a tracción, además de aplicar a las probetas ensayos de microscopía y ultrasonidos.

Finalmente, quedan excluidos los demás materiales y resinas comerciales, al igual que otros tipos de ensayos y pruebas.

1.2 English

The main goal of the present work is to obtain the university title of Grade in Mechanical Engineering. To achieve the title it is mandatory to pass the final degree project, where the diverse knowledge obtained during the achievement of the career has to be applied.

The specific aim of this project is the preparation and characterization of composite materials from commercial resins and natural fibers, in particular, of fibers obtained from the banana plantations of the island of Tenerife.

Regarding to the limitations of the project, it has only been studied the effect with commercial polyester and epoxy resins. In preliminary tests, test tubes from banana fiber with different dimensions, layers, and orientations of fibers were made to study their flexural properties. These values are compared with test tubes reinforced with glass or carbon fiber prepared with similar values of dimensions, layers, and orientations of fibers to compare if they have a similar behavior.

From the previous study, we were developed new test tubes from banana fiber but this time to test them according to UNE standards of flexural and tensile strength. These test tubes were also tested with microscopy and ultrasounds.

Finally, other materials and commercial resins were excluded and also other types of essays and tests.

2. Introducción

Cada vez más, el mundo se está dando cuenta de que hay que hacer un mejor uso de los recursos naturales. En los últimos años, mucho se ha dicho y escrito sobre el mercado potencial y los beneficios comerciales que se derivan de la adaptación de tecnologías de fabricación con el fin de que sean más respetuosos con el medio ambiente.

Existe un amplio margen para desarrollar aún más las oportunidades comerciales para los productos naturales menos conocidos, por ejemplo, fibras naturales de países en desarrollo. El cultivo de fibras naturales, como el sisal, son de vital importancia para la subsistencia de los agricultores en algunas de las regiones más pobres del mundo. Estas fibras poseen las características técnicas y económicas adecuadas para su uso en aplicaciones innovadoras de mayor valor como materiales compuestos, materiales de construcción, muebles, material de embalaje, etc.

Las fibras naturales de un tipo u otro se producen en casi todos los países, y por lo general se conocen como materiales lignocelulósicos. En los países tropicales, como Colombia (fique), Ecuador y Filipinas (abacá), India (fibra de coco y yute), Pakistán y Bangladesh (yute), China (ramio), existe una gran variedad de fibras naturales con diferentes características mecánicas, físicas y químicas. En los países de clima templado, el lino y el cáñamo son los más representativos. El cultivo de kenaf se ha introducido recientemente en varios países, y en la actualidad se cultiva en lugares como Estados Unidos, Malasia, Bangladesh, Tailandia, etc. [1].

Cada año, los agricultores cosechan alrededor de 35 millones de toneladas de fibras naturales extraídas de una amplia gama de plantas y animales – de ovejas, conejos, cabras, camellos y alpacas, de las cápsulas de algodón, de las hojas de abacá y sisal y las cáscaras de coco, y de los tallos de las plantas de yute, cáñamo, lino y ramio –. Estas fibras forman tejidos, cuerdas e hilos que han sido fundamentales para la sociedad desde el origen de la civilización.

Las fibras naturales tienen una buena resistencia mecánica, poco peso y bajo costo. Esto las ha hecho especialmente atractivas a la industria automotriz. En Europa, los fabricantes de

automóviles están utilizando un estimado de 80.000 toneladas de fibras naturales al año para reforzar los paneles termoplásticos; además, los residuos del cáñamo se utilizan en el cemento. En India se han desarrollado láminas de materiales compuestos hechas de fibra de coco, ya que son más resistentes. En el caso de Brasil, se están realizando materiales compuestos reforzados con sisal. Finalmente, China usó materiales de construcción a base de cáñamo para los Juegos Olímpicos del 2008 [2].

Respecto a las Islas Canarias, el sector platanero es el motor de la actividad agrícola. Los datos aportados por la Asociación de Productores de Plátanos de Canarias (ASPROCAN) recogen que en estos momentos, la producción platanera producida se sitúa en torno a las 370.000 toneladas de plátano al año.

El plátano de Canarias se produce en las 9.100 hectáreas de cultivo existentes en 6 de las islas del archipiélago. Tenerife es la isla de mayor producción de plátanos de Canarias, con casi un 42 %, seguido por La Palma, con el 34 %, y Gran Canaria, con el 22 %. La Gomera, El Hierro y Lanzarote representan aproximadamente un 2 %.

Según los estudios realizados por la Universidad de La Laguna, tanto el proceso de cultivo del plátano como el de empaquetado, concentran la mayor contribución al valor de la producción final agrícola, superando los 282 millones de euros. Este sector, se ha convertido además en la actividad agraria que más empleo directo genera si se tiene en cuenta el promedio anual de empleos equivalentes a tiempo completo. En estos momentos, 12.000 empleos anuales a tiempo completo dependen del sector del plátano [3].

En la actualidad el comercio del plátano está pasando una dura etapa de competencia comercial, desconocida hasta ahora, debida a la liberalización del mercado europeo, en donde se hallan sus principales clientes.

Conforme a lo establecido por la Unión Europea, la producción de plátano de Canarias, Madeira, Martinica y los países del Área ACP (África, Caribe y Pacífico), goza de preferencia de comercialización en los mercados de la UE. Esto obliga a los productores del resto del mundo a limitar sus exportaciones a la zona euro para que éstas no sobrepasen el 50 % del mercado comunitario, gravando la entrada de sus productos,

que están sometidas a un complejo sistema de licencias. Éstas fomentan que los importadores europeos solo puedan traer a la UE el barato plátano centroamericano, con la condición de haber vendido con anterioridad las correspondientes cuotas de plátano comunitario de los países ACP.

Inconformes con esta situación, las grandes multinacionales estadounidenses (Dole, Chiquita y Del Monte) han declarado ante la UE la denominada “Guerra del Banano” lo que puede llevar al riesgo de que el Plátano de Canarias se vea desplazado en las fruterías españolas por el banano centroamericano (importado por estas multinacionales), mucho más barato. Aunque tiene varias contrapartidas, como es el caso de que procede de unos sistemas de cultivo que no respetan el medio ambiente, los trabajadores de las plantaciones se ven explotados y, además, incumplen los controles sobre pesticidas que la Unión Europea impone a sus productos [4].

En resumen, este trabajo surge de la necesidad de ayudar a los agricultores canarios ante la situación actual y aprovechar los residuos que generan las plataneras. En el pasado, estos desechos se utilizaban para abonar la tierra, como pienso para ganado o como uso en artesanías, pero hoy en día según datos del Proyecto BADANA, aproximadamente 25.000 toneladas de fibras naturales se tiran a la basura [5]. Para ello, se propone la utilización de los desechos para la preparación y caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras de plátano.

3. Materiales compuestos

Los materiales compuestos se obtienen al unir dos materiales para conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Generalmente una fase es continua (la matriz) y rodea completamente a la otra (la fase dispersa). Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento de altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad [6].

Los compuestos se pueden clasificar en tres categorías: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibra y compuestos estructurales; además, existen dos subdivisiones para cada una, como se muestra en la Figura 3.1.

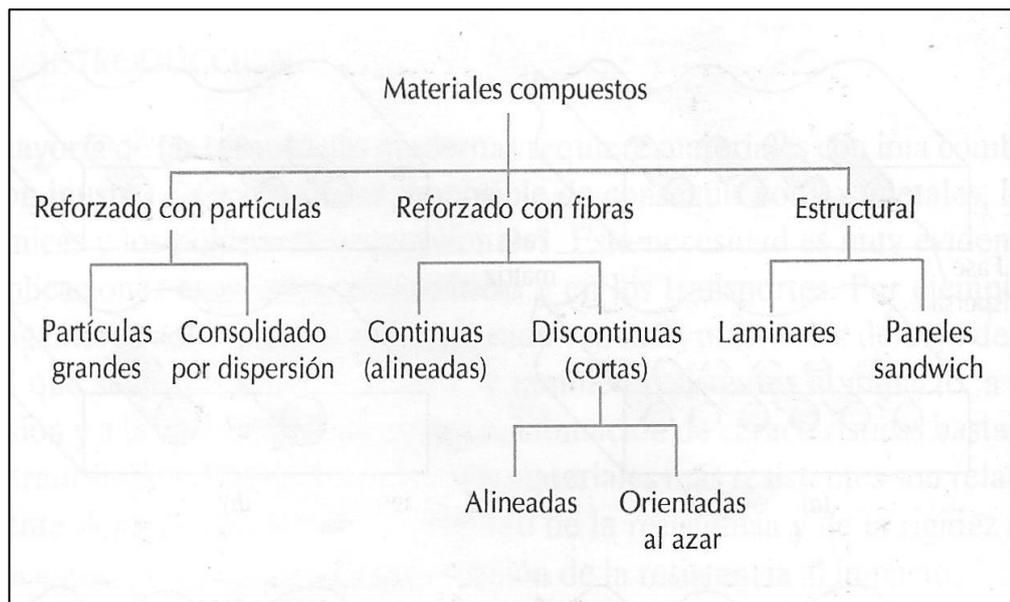


Figura 3.1 Clasificación de los materiales compuestos. Fuente: Willian D. Callister [6]

Nos centraremos en los materiales compuestos reforzados con fibras, de las cuales veremos las resinas más utilizadas y como refuerzo las fibras de vidrio, carbono y naturales (con especial referencia a las fibras de plátano).

3.1 Materiales compuestos reforzados con fibra

3.1.1 Resinas

Dos de las más importantes resinas plásticas utilizadas como matriz para la fabricación de plástico reforzado con fibra son: la resina de poliéster insaturados y la resina epoxi.

Algunas de las propiedades de la resina epoxi y de poliéster sin refuerzo de fibras se recogen en la Tabla 3.1. Las resinas de poliéster son de menor coste pero no son habitualmente tan resistentes como la resina epoxi. Éstas son utilizadas ampliamente como matrices de plástico reforzado con fibra, normalmente fibra de vidrio. Las aplicaciones de estos materiales incluyen su empleo en cascos de barco, paneles de construcción y paneles estructurales de automóviles, aeronaves y accesorios. Las resinas epoxi en cambio tienen buenas propiedades en relación a su resistencia y además cuentan con una menor contracción después del curado que las resinas de poliéster. Por otro lado, se utiliza habitualmente como matrices de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono [7].

	Poliéster	Epoxi
Resistencia a la tracción (MPa)	40 – 90	55 – 130
Módulo de tracción (GPa)	2 – 4,4	2,8 – 4,2
Resistencia a la flexión (MPa)	60 – 160	125
Resistencia al iMPacto (J/m)	10,6 – 21,2	5,3 – 53
Densidad (g/ cm³)	1,10 – 1,46	1,2 – 1,3

Tabla 3.1 Propiedades de las resinas poliéster y epoxi sin refuerzo. Fuente: William F. Smith [7]

3.1.2 Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio se usan para reforzar matrices plásticas y formar así materiales compuestos estructurales y productos de moldeo. Los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio tienen las siguientes características favorables: buena relación resistencia/peso; buena resistencia al calor, al frío, a la humedad y a la corrosión; facilidad de fabricación y coste relativamente bajo.

Las dos clases más importantes para la fabricación de fibras de vidrio para materiales compuestos son: los vidrios E (eléctricos) y los vidrios S (de alta resistencia).

Los vidrios E son los más utilizados en la fabricación de fibras continuas. Básicamente, el vidrio E es un vidrio de borosilicato de calcio y aluminio con un bajo o nulo contenido en potasio y sodio. La composición básica de los vidrios E es de un 52 % – 56 % de SiO_2 , 12 % – 16 % de Al_2O_3 , 16 % – 25 % de CaO y 8 % – 13 % de B_2O_3 . El vidrio E no modificado tiene una resistencia a la tracción de 3,44 GPa y un módulo de elasticidad de 72,3 GPa.

En cambio, los vidrios S tienen una relación resistencia/peso más altas y son más caros que los vidrios E. Este tipo de vidrio, es utilizado principalmente en aplicaciones militares y aeroespaciales. Su resistencia a la tracción está sobre los 4,48 GPa y su módulo de elasticidad es de unos 85,4 GPa. Una composición usual del vidrio S es de aproximadamente un 65 % de SiO_2 , 25 % de Al_2O_3 y 10 % de MgO [7].

3.1.3 Fibras de carbono

Los materiales compuestos, formados por matrices de resinas plásticas y reforzadas con fibras de carbono se caracterizan por dar una combinación ligera, de gran resistencia y consistencia. Estas propiedades hacen que su uso sea especialmente atractivo para aplicaciones aeroespaciales. Sin embargo, el elevado precio de las fibras de carbono limita su uso en algunas industrias, como la del automóvil.

Las fibras de carbono para estos compuestos provienen principalmente de dos fuentes, poliacrilonitrilo (PAN) y alquitrán, que se conocen como precursores. Las fibras de carbono

que proceden a partir del precursor PAN tienen una resistencia a la tracción de 2,34 a 3,17 GPa y un módulo de elasticidad en el intervalo de 193 a 413 GPa [7].

3.1.4 Fibras naturales

Como fibras naturales, se entienden los materiales fibrosos que pueden extraerse de la naturaleza, principalmente están constituidos por celulosa y lignina, además de otros componentes en menor cantidad. Por esta razón, las fibras naturales también reciben el nombre de fibras lignocelulósicas.

En la Tabla 3.2 se recogen algunos de los parámetros físicos más importantes de algunas de las fibras investigadas.

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Humedad (%)
Cañamo	1,48	88 – 90	7 – 10	1,5 – 2	3,5 – 8
Sisal	1,45	65	12	9,9	10
Plátano	1,35	63 – 64	19	5	10 – 11
Piña	1,53	81	-	12,7	13,5

Tabla 3.2 Parámetros físicos de algunas fibras naturales. Fuente: Referencia [8]

En la Tabla 3.3 se recogen los parámetros mecánicos investigados de las fibras nombradas con anterioridad

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Modulo elasticidad (GPa)	Resistencia tracción (MPa)	Alargamiento a rotura (%)
Cañamo	1,48	-	285	1,3
Sisal	1,45	10,4	444 – 552	2,0 – 2,5
Plátano	1,35	20	550	5,0 – 6,0
Piña	1,53	4,2	413	3,0 – 4,0

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales. Fuente: Referencia [8]

Las principales ventajas de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [1] son:

- Sustitución de fibras sintéticas o artificiales.
- Mejora de la productividad agrícola y la calidad de la fibra a través del uso de mejores procesos de extracción.
- Desarrollo de nuevas máquinas para procesar e industrializar fibras naturales directamente en el campo.
- Proporcionar una nueva fuente de ingresos y de materias primas para la población rural en las zonas económicamente deprimidas.
- Menor costo en comparación con fibras sintéticas o artificiales. El precio en peso es mucho menor para los productos hechos con fibras naturales en comparación con sus equivalentes sintéticos.
- Métodos respetuosos del medio ambiente de la producción, cosecha, procesamiento y reciclaje.
- Su alta resistencia y bajo alargamiento les hace deseable para ciertas aplicaciones.
- Bajo consumo de energía cuando se procesa, debido a los requisitos de baja temperatura y la flexibilidad.
- Posibles aplicaciones con niveles más altos de refuerzo con las nuevas tecnologías tales como la extrusión y moldeo por inyección.
- Los compuestos basados en fibras naturales pueden ser reciclados varias veces sin pérdida significativa de propiedades mecánicas.

3.1.5 Fibras de plátano

La gran mayoría de las fibras vegetales que se disponen a nivel comercial son procedentes de plantas sembradas para tal fin, como el sisal, yute o lino. Sin embargo, existe un importante potencial en los desechos vegetales de otros cultivos como el plátano o el coco, donde la fibra se convierte en un subproducto del proceso.

De una platanera sólo se comercializa la fruta, las demás partes de la planta se convierten en desechos tras la cosecha. De estos residuos que no se aprovechan podemos encontrar:

- El falso tallo, conocido también como badana.
- El pedúnculo floral, que es el tallo de donde cuelgan los plátanos.

De estas partes es posible extraer fibras mediante la implantación de procesos de extracción biológica y mecánica.

Algunas de las propiedades físicas y mecánicas que se han investigado con respecto a las fibras de plátano se encuentran recogidas en las Tablas 3.2 y 3.3.

Las ventajas de las fibras de plátano son: su baja densidad y sus apropiadas propiedades mecánicas y térmicas. Aunque cuentan con un importante inconveniente para desarrollar materiales compuestos, relacionados con su fuerte carácter hidrófilo, es decir, que absorben fácilmente la humedad o el agua. [9].

4. Obtención de las fibras

4.1 Fibras de vidrio y carbono

Las fibras sintéticas que se han utilizado fueron suministradas por la Empresa Adhesivos y Resinas TNK, eligiéndose para este estudio fibras de vidrio y de carbono, en distintas presentaciones. Las fibras de vidrio utilizadas corresponden a fibras obtenidas a partir de vidrio común principalmente de tipo borosilicato, y se muestran en dos presentaciones diferentes, seleccionadas en este caso para responder a muy distintas propiedades: una manta compactada con fibras de orientación aleatoria y un tejido de fibras entrelazadas a 90° cuyas características se describen en la tabla siguiente. Las fibras de carbono utilizadas son de carbono grafito, y los formatos seleccionados, en forma de fibras alineadas (ángulo de 0°) y de fibras entrecruzadas a 90°. En la Tabla 4.1, se muestra la orientación de las fibras y su densidad, cabe destacar la gran cantidad y variedad de presentaciones de estas mismas fibras por ello se hizo necesaria una selección previa.

Tipo de Fibra	Orientación de las fibras	Densidad (g / cm ³)
Vidrio	Tejido	1,1
Vidrio	Aleatorio	0,92
Carbono	Tejido	0,93
Carbono	Alineado	0,92

Tabla 4.1 Características físicas de las fibras de vidrio y carbono

4.2 Fibras de plátano

Para la obtención de las fibras de plátano se trabajó con dos partes distintas del tallo de la planta de la platanera:

- El pedúnculo floral, que es el tallo de la piña de plátanos, de donde nacen los plátanos.
- El falso tallo o badana, que corresponde a las hojas que envuelven el tronco de la platanera, y que se secan durante el crecimiento del mismo desprendiéndose.

4.2.1 Fibras obtenidas del pedúnculo floral

Suministrador: Empresa “Finca el Puertito” situada en el municipio de Güímar.

Material necesario:

- Pedúnculos florales
- Cúter
- Máquina laminadora (por corte)

Procedimiento experimental:

En primer lugar se eliminó la parte externa del tronco con ayuda de un pequeño cúter estándar para tener un mejor acceso a las fibras como se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Extracción de la parte externa

Luego se cortó en partes cada tallo a la longitud adecuada para una fácil manipulación durante el proceso de corte con una máquina rebanadora (ver Figura 4.2). Mediante este proceso se obtienen láminas de fibra de tallo de plátano de espesores entre 1 y 4 mm.



Figura 4.2 Laminación de las fibras

Por último, se dejaron secar durante dos días a 28°C, en habitación con humedad controlada (<60%) y calefacción por IR. El resultado final de las fibras secas era irregular y con dimensiones distintas a las iniciales, debido a que durante el proceso de secado se pierde mucha agua y se observa la contracción de las mismas (ver Figura 4.3).



Figura 4.3 Fibras procedentes del pedúnculo floral de plátano

4.2.2 Fibras obtenidas a partir de la badana

Suministrador: Plantación particular en el municipio de Los Silos (Isla de Tenerife) de Don Abraham González Méndez.

Material necesario:

- Hojas de badana
- Tijeras

Procedimiento experimental:

Inicialmente se separan las hojas secas de badana y, se cortan mediante un proceso manual con ayuda de unas tijeras hasta una forma rectangular de dimensiones adecuadas para su posterior utilización. (ver Figura 4.4).



Figura 4.4 Fibras de plátano procedentes de la badana

5. Preparación de los materiales compuestos con fibras

5.1 Preparación de la resina de poliéster

Suministrador: Empresa La Marina, S. A. L.

Marca: Resina Poliéster Palatal P – 4 y peróxido de metiletilcetona como catalizador (calidad industrial).

Material necesario:

- Resina poliéster.
- Catalizador.
- Vaso plástico.
- Varilla de vidrio.
- Bolígrafo permanente.
- Probeta graduada cilíndrica.
- Pipeta Pasteur.

Procedimiento experimental:

Las recomendaciones del fabricante para la correcta preparación de la resina son de 49 ml de resina para 1 ml de catalizador. Para ello, los volúmenes se miden en una probeta cilíndrica y una pipeta respectivamente y se añaden a un vaso desechable y se remueve la mezcla con una varilla de vidrio hasta homogeneizar la mezcla durante aproximadamente 2 minutos. Todo el proceso se realiza a temperatura ambiente y cada vez que se necesita más resina de poliéster se elabora en las mismas proporciones siguiendo los pasos anteriores.

5.2 Preparación de la resina epoxi

Suministrador: Empresa Adhesivos y Resinas TNK.

Marca: Epoxi TNK 120 y su debido catalizador TNK 120 (calidad industrial).

Material necesario:

- Resina epoxi.
- Catalizador.
- Vaso plástico.
- Varilla de vidrio.
- Balanza.

Procedimiento experimental:

Las recomendaciones del fabricante para su preparación son 3 partes de resina por una parte de catalizador en peso, en nuestro caso seguimos estrictamente esas proporciones pesando 45g de la resina y 15 g del catalizador por separado y ambos se añaden a un vaso desechable donde se remueve la mezcla con una varilla de vidrio el tiempo necesario para su homogeneización aproximadamente 2 minutos. Todo el proceso se realiza a temperatura ambiente y cada vez que se necesita más resina de epoxi se elabora con las mismas cantidades siguiendo los pasos anteriores.

5.3 Preparación de las probetas de resina sin refuerzo

Material necesario:

- Molde de silicona con forma rectangular.

- Resina epoxi.
- Resina de poliéster.

Procedimiento experimental:

En primer lugar se prepararon las resinas según los apartados 5.1 y 5.2. Una vez listas para utilizar, se vertió la resina (poliéster o epoxi) sobre los moldes de silicona hasta rellenar una altura aproximadamente de 4 mm de espesor. La ventaja del uso de moldes de silicona comercial es que permite un fácil desmoldeo, y no resulta necesario el uso de agentes desmoldantes.

A continuación, los moldes de las probetas de resina se dejaron curar a temperatura ambiente durante dos días para que se endurecieran. El resultado final se puede observar en la Figura 5.1, donde la primera probeta (más amarilla y opaca) es de poliéster y las dos transparentes de epoxi.

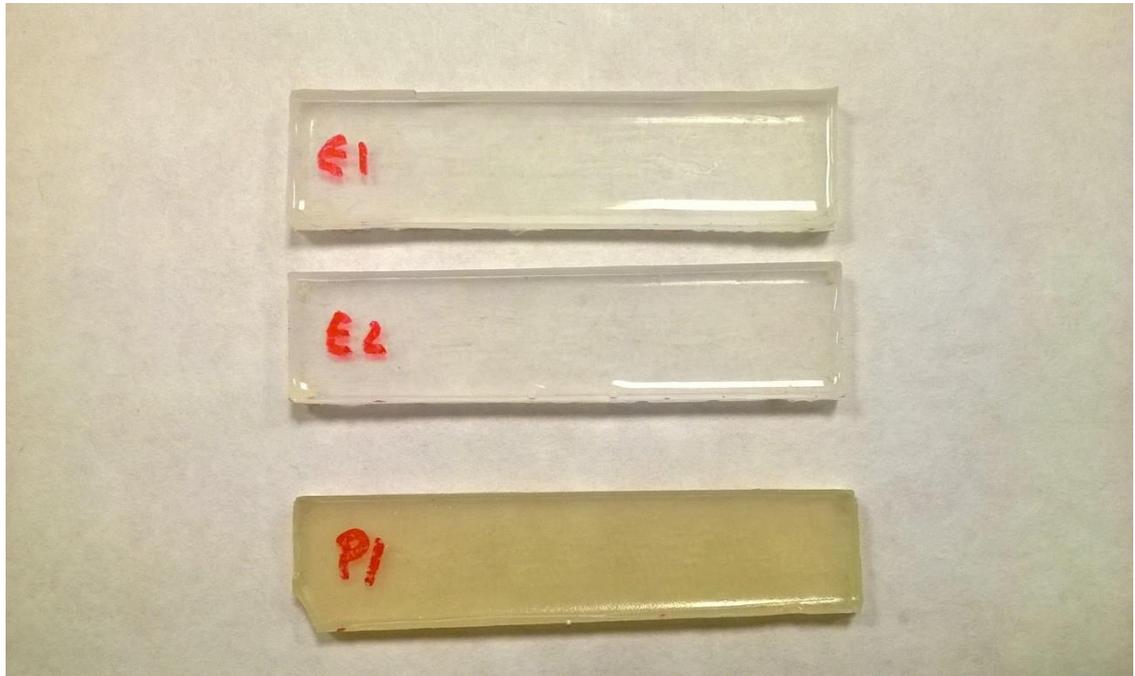


Figura 5.1 Probetas sin refuerzo

5.4 Preparación de las probetas reforzadas con fibras de plátano.

Material necesario:

- Fibras cortadas de plátano.
- Resina epoxi.
- Resina poliéster.
- Cera desmoldante.
- Placas de policarbonato de forma rectangular.
- Espátula.

Procedimiento experimental:

Para preparar materiales compuestos con fibras en espesores reducidos se requiere la aplicación de presión para eliminar las burbujas de aire de la muestra, basándonos en el sistema diseñado por Ricardo Zamora Rojas [10]; el sistema seguido en nuestro laboratorio para realizar este efecto consiste en usar láminas planas, donde se aplican los materiales alternadamente, resina y fibras en espesores reducidos, tantas capas como sea necesario, según las características del material que deseamos obtener, para terminar con una última capa de resina, cerrar el montaje con otra lámina de PC (policarbonato), y aplicar presión al sistema completo.

Para ello se aplica cera desmoldante por toda la superficie de las placas de policarbonato (previamente limpias) con ayuda de una esponja como se muestra en la Figura 5.2. El exceso de cera se retira de la superficie.



Figura 5.2 Aplicación de la cera desmoldante

Mientras se secaba la cera, se preparan las resinas (poliéster y epoxi) según lo explicado en los apartados 5.1 y 5.2, y con ayuda de una espátula se aplican sobre las placas de policarbonato.

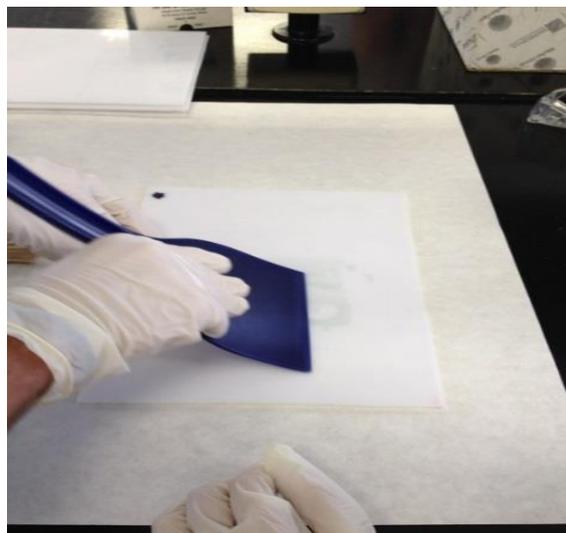


Figura 5.3 Primera capa de resina

Sobre la capa de resina se colocó la fibra de plátano (procedente tanto del pedúnculo floral como la procedente de la badana) con la orientación escogida y el número de capas

deseado (Figura 5.4). En nuestro caso, las orientaciones de las fibras se colocaron de manera longitudinal (0°) y transversal (90°), y el número de capas fue entre 2 y 3 capas.



Figura 5.4 Colocación de las fibras

A medida que se colocaban las fibras, con la espátula se presionan y se les añadía más resina para que se humedecieran bien como se muestra en la Figura 5.5.



Figura 5.5 Adición de resina sobre las fibras

Se repite la aplicación de resina y fibra cuantas veces sean necesarias para la obtención del número de capas deseado y terminado el proceso se cerraba el molde con otra placa de policarbonato y se le aplicaba presión para eliminar las burbujas de aire que se formaban.

Por último, se dejó curar durante una semana con la presión de 2 kPa encima de la placa. El resultado final se muestra en la Figura 5.6.



Figura 5.6 Probeta reforzada con fibra de plátano

5.5 Preparación de las probetas reforzadas con fibra de vidrio y fibra de carbono.

Para la preparación de estas probetas seguimos el procedimiento detallado en el apartado 5.4 con la única diferencia de cambiar la fibra de plátano por fibra de vidrio o fibra de carbono.

5.6 Descripción de las probetas preparadas

5.6.1. Probetas para ensayos preliminares

En este apartado distinguimos entre las probetas para la caracterización de las materias primas utilizadas, es decir, las resinas epoxi y poliéster, además de las fibras de plátano. Y las probetas de materiales compuestos que se describen a continuación.

En la Tabla 5.1 se detallan las características de las probetas de materiales compuestos preparadas para estudiar sus propiedades a flexión. Cada probeta se denomina en función de la resina base que la compone y la naturaleza de la fibra de refuerzo. Además se especifican la orientación de las fibras y el número de capas de fibra.

Resina	Fibra	Número de capas	Orientación	Código	
Epoxi	-	-	-	E0	
	Carbono	2	Entrecruzada	EC1	
			1 longitudinal (0°) + 1 transversal (90°)	EC2	
	Vidrio	3	Entrecruzada	EC3	
			2	Entrecruzada	EG1
		Plátano	3	Entrecruzada	EG2
			2	2 longitudinales (0°, 0°)	EB1
				1 longitudinal (0°) + 1 transversal (90 °)	EB2
	3	3 longitudinales (0°, 0°, 0°)	EB3		
Poliéster	-	-	-	P0	
	Vidrio	2	Entrecruzada	PG1	
			Aleatorio	PG2	
		3	Entrecruzada	PG3	
			Aleatorio	PG4	
	Plátano	2	2 longitudinales (0°, 0°)	PB1	
			1 longitudinal (0°) + 1 transversal (90 °)	PB2	
		3	3 longitudinales (0°, 0°, 0°)	PB3	

Tabla 5.1 Probetas para ensayos preliminares

Donde E0 y P0 hacen referencia a las probetas sin refuerzo explicadas en el apartado 5.3.

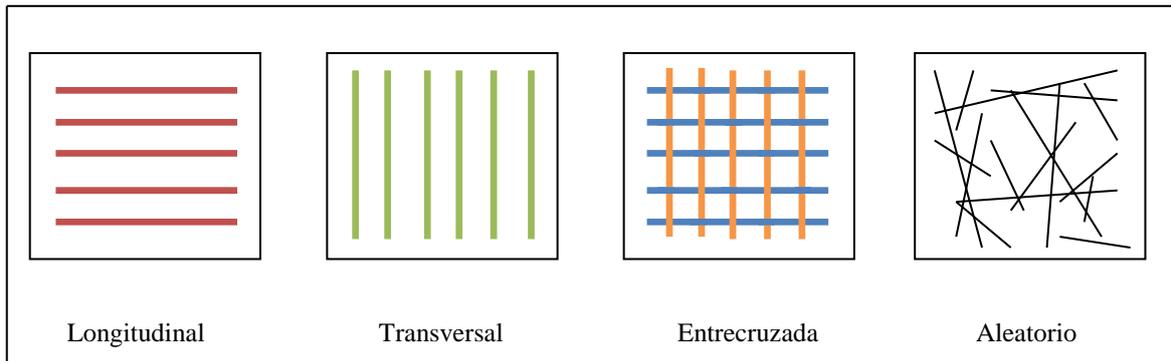


Figura 5.7 Orientación de las fibras

5.6.2. Probetas normalizadas para ensayo a flexión

El ensayo a flexión de las probetas fabricadas con matriz epoxi y fibra de plátano se realiza siguiendo la norma UNE-EN-ISO 178 [11], para ello se preparan 10 probetas (5 de epoxi y 5 de poliéster) con la misma disposición y número de capas de fibras de refuerzo: 3 capas de fibra de plátano y disposición longitudinal en ellas (0° , 0° , 0°).

5.6.3. Probetas normalizadas para ensayo a tracción

El ensayo a tracción de las probetas fabricadas con matriz epoxi y fibra de plátano se realiza siguiendo la norma UNE-EN-ISO 527 [12], para ello se preparan (5 de epoxi y 5 de poliéster) con la misma disposición y número de capas de fibras de refuerzo: 3 capas de fibra de plátano y disposición longitudinal en ellas (0° , 0° , 0°).

6. Ensayos realizados sobre las probetas preparadas

6.1 Determinación de la resistencia a flexión

La resistencia a flexión se obtiene ensayando las probetas normalizadas conforme a la Norma UNE-EN-ISO 178. “Plásticos. Determinación de las Propiedades a flexión” [11].

Las medidas que la norma propone como recomendadas para las probetas son 80 mm x 10mm x 4 mm, en el caso de las probetas de ensayo preliminares (Ver Tabla 5.1) las medidas de éstas no se ajustan a norma debido a que íbamos probando distintas dimensiones, capas y orientaciones. En todo momento se intenta estar dentro de los rangos de espesores nominales y anchura que proponen en el apartado 6.1 de la norma UNE-EN-ISO 178, sobre dimensiones de otras probetas. Nuestras probetas preliminares estarían en torno a espesores de 1 a 3 mm y una anchura de 25 mm y otras se encontraban entre 3 a 5 mm de espesor y 10 de anchura. Estos ensayos realizados con las probetas preliminares, aún no siguiendo estrictamente las condiciones dimensionales de la norma nos permiten seleccionar las mejores combinaciones de matriz y capas de refuerzo, para la preparación y fabricación más adecuada de los materiales a ensayar.

Por otro lado, todas las probetas normalizadas que se ensayaron siguen las indicaciones de la norma y se encuentran en los intervalos de dimensiones recomendadas por la misma.

Los ensayos de flexión se realizaron con la Máquina Universal *Shimadzu Autograph* (ver Figura 6.1), perteneciente al Laboratorio de Materiales del Dpto. de Ingeniería Industrial (ULL), mediante la aplicación de una fuerza en el centro de la probeta a ensayar que se sitúa simplemente apoyada por los dos extremos en el puente de flexión y nos permiten determinar la resistencia a flexión (como función de la fuerza máxima aplicada y las variables geométricas), módulo de elasticidad a flexión (como una función de la pendiente de la curva en la zona elástica) y la deformación a flexión (en función de la deflexión máxima y las variables geométricas también).

Todas las probetas se ensayaron manteniendo los siguientes parámetros:

- Método del ensayo: Se utilizó el Método A de la norma aplicada, en el cual se emplea una velocidad constante durante todo el ensayo hasta la rotura del material.
- Velocidad de ensayo: 2 mm/min.
- Distancia entre los apoyos: 60 mm.



Figura 6.1 Máquina Universal Shimadzu Autograph

Para el cálculo de la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad a flexión y la deformación a flexión a partir de los datos obtenidos en este ensayo, se utilizó la norma UNE-EN-ISO 178 [11] que permite estimar los siguientes parámetros:

- La determinación de la resistencia a la flexión (σ_f), se calcula mediante la ecuación dada por:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

Donde;

σ_f es la resistencia a flexión (MPa).

F es la carga aplicada a la probeta (N).

L es la distancia entre soportes (mm).

b es la anchura de la probeta (mm).

h es el espesor de la probeta (mm).

- El módulo de elasticidad en flexión (E_f), se calcula mediante la expresión:

$$E_f = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot h^3} \quad (2)$$

Donde;

E_f es el módulo de elasticidad a flexión (MPa).

L es la distancia entre soportes (mm).

m es la pendiente de la curva de flexión en la zona elástica lineal (N/mm).

b es la anchura de la probeta (mm).

h es el espesor de la probeta (mm).

- La deformación a flexión (ε_f), viene dado por la ecuación:

$$\varepsilon_f = \frac{600 \cdot \delta \cdot h}{L^2} \quad (3)$$

ε_f es la deformación a flexión (%).

h es el espesor de la probeta (mm).

δ es la flecha o deflexión de la probeta (mm).

L es la distancia entre soportes (mm).

- La desviación típica (s), se calcula mediante la expresión dada por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Donde;

s es la desviación típica.

n es el número total de las probetas medidas.

σ_i es el valor de la resistencia a flexión en la medición i -ésima.

$\bar{\sigma}$ es la media aritmética de las n medidas calculadas.

- Intervalo de confianza bilateral del 95% probabilidad, viene dada por:

$$\bar{\sigma} - \frac{t}{\sqrt{n}}s < \bar{\sigma} < \bar{\sigma} + \frac{t}{\sqrt{n}}s \quad (5)$$

Donde;

$\bar{\sigma}$ es la media aritmética de las n medidas calculadas.

s es la desviación típica.

n es el número total de las probetas medidas.

t valor de la distribución t de Student.

En el Anexo A se muestran las dimensiones, las condiciones de ensayo, así como los resultados de los ensayos para cada una de las probetas de fibra de plátano de la Tabla 5.1, mientras que en los apartados 7.2 y 7.3 de la presente memoria, se discuten los valores obtenidos para los ensayos a flexión de de todas las probetas fabricadas con las diferentes fibras.

Por otro lado en Anexo B (epoxi) y Anexo C (poliéster) se muestran las dimensiones, las condiciones de ensayo, así como los resultados de los ensayos para cada una de las probetas de fibra de plátano normalizadas, mientras que en el apartado 7.4 de la presente memoria, se discuten los resultados obtenidos en estos ensayos.

6.2 Determinación de la resistencia a tracción

Las propiedades mecánicas a tracción de los materiales se ven modificadas desde las propiedades base de la matriz hasta las propiedades mejoradas por las fibras de refuerzo que les han sido añadidas, por ello se realizan ensayos a tracción de las probetas con matriz epoxi y reforzadas con fibras de plátano, conforme a la Norma UNE-EN-ISO 527 “Plásticos. Determinación de las propiedades a tracción [12].

Los ensayos se realizaron a las probetas que se denominan normalizadas y que se describen en el apartado 5.6.3, haciendo uso de la Máquina Universal de ensayos *Shimadzu Autograph* (ver Figura 6.1), donde la probeta se coloca sujeta a las mordazas, una de ellas situada en el brazo fijo del bastidor y la otra al brazo móvil que a su vez se conecta a la célula de carga que controla y aplica el esfuerzo de tracción.

Todas las probetas se ensayaron siguiendo los siguientes parámetros:

- Velocidad de ensayo: 2 mm/min.
- Distancia entre las mordazas: 150 mm.
- Longitud de referencia (extensómetro): 50 mm.

Para la determinación de los parámetros obtenidos a partir de este ensayo (esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad a tracción), se utilizó la norma UNE-EN-ISO 527 [12]:

- La determinación de esfuerzo (σ_t), se calcula mediante la ecuación dada por:

$$\sigma_t = \frac{F}{b \cdot h} \quad (6)$$

Donde;

σ_t es el esfuerzo a tracción (MPa).

F es la fuerza medida implicada (N).

b es la anchura de la probeta (mm).

h es el espesor de la probeta (mm).

- La deformación a tracción (ε_t), viene dado por la ecuación:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_o}{L_o} \quad (7)$$

ε_t es la deformación en tracción (%).

L_o es longitud referencia de la probeta (mm).

ΔL_o es el incremento de la longitud entre las marcas de referencia (mm).

- El módulo de elasticidad a tracción (E_t), se calcula mediante la expresión:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (8)$$

O mediante;

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (9)$$

Donde;

E_t es el módulo de elasticidad a flexión (MPa).

σ_1 es el esfuerzo a tracción (MPa) medido a la deformación $\varepsilon_1 = 0,0005$ (0,05%).

σ_2 es el esfuerzo a tracción (MPa) medido a la deformación $\varepsilon_2 = 0,0025$ (0,25%).

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ es la recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados a la parte de la curva esfuerzo/deformación en el intervalo $0,05\% \leq \varepsilon \leq 0,25\%$.

- La desviación típica (s), se calcula mediante la expresión dada por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}} \quad (10)$$

Donde;

s es la desviación típica.

n es el número total de las probetas medidas.

σ_i es el valor del esfuerzo a tracción en la medición i-ésima.

$\bar{\sigma}$ es la media aritmética de las n medidas calculadas.

- Intervalo de confianza bilateral del 95% probabilidad, viene dada por:

$$\bar{\sigma} - \frac{t}{\sqrt{n}} s < \bar{\sigma} < \bar{\sigma} + \frac{t}{\sqrt{n}} s \quad (11)$$

Donde;

$\bar{\sigma}$ es la media aritmética de las n medidas calculadas.

s es la desviación típica.

n es el número total de las probetas medidas.

t valor de la distribución t de Student.

En el Anexo D (epoxi) y Anexo E (poliéster) se muestran las dimensiones, las condiciones de ensayo, así como los resultados de los ensayos para cada una de las probetas normalizadas de fibra de plátano que se describen en el apartado 5.6.3, mientras que en los apartados 7.5 y 7.6 de la presente memoria se discuten los valores obtenidos para las probetas de fibras ensayadas en estas condiciones.

6.3 Ensayo de ultrasonidos

Las ondas de sonido de alta frecuencia, que componen la señal de US, son emitidas por el cristal piezoeléctrico que conforma el transductor del equipo, que también se encarga de recibirlas y filtrarlas para mostrarlas en el osciloscopio. Las ondas ultrasónicas que no se atenúan en sólidos homogéneos donde la velocidad de transmisión del sonido es casi constante, se van atenuando a medida que van atravesando un material no homogéneo y, cuando llegan a la pared opuesta, son reflejadas produciéndose un eco que es recibido por el transductor. De la misma forma, pequeñas grietas, de laminaciones o poros pueden ser detectados fácilmente con este ensayo, ya que causan una disminución del tiempo de reflexión de la onda en dicho punto.

Todas las probetas normalizadas (descritas en los apartados 5.6.2 y 5.6.3) con refuerzo de fibra de plátano fueron inspeccionadas por medio de ultrasonidos con el equipo Krautkramer USM 25 (ver Figura 6.2), perteneciente al Laboratorio de Materiales del Dpto. de Ingeniería Industrial (ULL).



Figura 6.2 Equipo Krautkrämer USM 25

En el apartado 7.7 de esta memoria se encuentran las observaciones realizadas sobre las probetas normalizadas reforzadas con fibras de plátano.

6.4 Microscopía digital

Para poder observar la estructura macroscópica de los materiales compuestos fabricados con fibras de plátano, sus posibles defectos y además la forma de la fractura de las probetas, tanto en los ensayos de flexión, como de tracción, se utilizó un microscopio óptico digital Dino-Lite modelo AM -211 (ver Figura 6.3), perteneciente al Laboratorio de Materiales del Dpto. de Ingeniería Industrial (ULL).



Figura 6.3 Microscopio digital Dino-Lite

En el apartado 7.8 se muestran las imágenes obtenidas para las probetas fabricadas con materiales reforzados con fibras de plátano con el microscopio mencionado anteriormente.

7. Análisis y resultados

7.1 Caracterización de las materias primas

En primer lugar se determinó las propiedades a flexión y a tracción de las materias primas utilizadas. En este caso, nos hemos centrado en estudiar a las resinas (epoxi y poliéster) y las fibras de plátano al natural que se explican en los apartados 4.2.1 y 4.2.2.

En la Tabla 7.1 se muestran los valores obtenidos, donde vemos que partimos de la resina epoxi que casi dobla en sus propiedades a la de poliéster y unos valores bajos de las fibras de plátano.

	Epoxi	Poliéster	Fibra de plátano
Propiedades a Flexión			
$\sigma_f(\text{MPa})$	66,152	29,874	2,344
$E_f(\text{MPa})$	1.777,924	774,010	207,347
$\varepsilon_f(\%)$	4,28	6,26	1,72
Propiedades a Tracción			
$\sigma_t(\text{MPa})$	46,107	20,023	0,631
$E_t(\text{MPa})$	2.621,700	1.487,300	185,245
$\varepsilon_t(\%)$	1,333	1,55	0,39

Tabla 7.1 Propiedades de las materias primas

Tras conocer los valores iniciales de las materias primas, proseguimos con el análisis de las probetas preliminares (ver Tabla 5.1), donde se expone su comportamiento frente a la influencia de la resina utilizada, la orientación de las fibras y el número de capas.

7.2 Comportamiento de la resina Epoxi frente a Poliéster

A continuación se presentan los resultados de los ensayos a flexión de las probetas que se han denominado preliminares (ver Tabla 5.1) estudiando sus resultados para comparar su comportamiento frente a la influencia de la resina utilizada, de la orientación de las fibras y del número de capas de material de refuerzo. El objetivo es estudiar la influencia de la calidad de la resina en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

7.2.1 Probetas fabricadas sin refuerzo

En este apartado confirmamos de manera más gráfica los valores de la Tabla 7.1 donde se muestra un comportamiento superior de la resina epoxi respecto al poliéster, como se observa en el Gráfico 7.2 que representa fuerza en N frente a deflexión en mm, así como en la Tabla 7.2, donde los resultados numéricos de resistencia y módulo de elasticidad a flexión son casi el doble, por lo que la resina epoxi presenta mejores propiedades.

Si comparamos las propiedades a flexión obtenidas experimentalmente con las tabuladas en la literatura (ver la Tabla 3.1), se observa que los valores obtenidos para la resistencia a flexión de las resinas son muy inferiores. Esta discrepancia con los valores tabulados y esperados puede deberse a defectos en las probetas preparadas, así como que el número de las mismas ensayadas sea inferior a las indicaciones de la norma y los resultados por tanto no sean representativos. Otra explicación deriva del alejamiento de los estándares dimensionales marcados por la norma, que como hemos mencionado anteriormente tiene una gran influencia en el desarrollo numérico de los resultados de los ensayos de flexión.

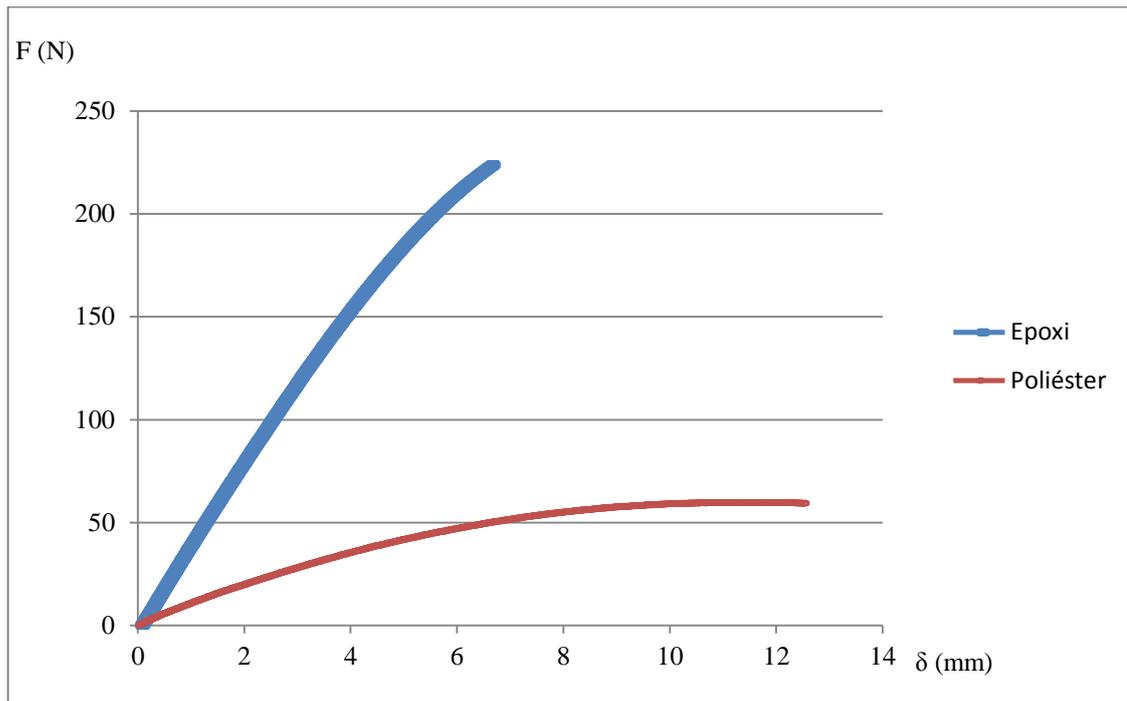


Gráfico 7.2. Curva fuerza – deflexión de las probetas sin refuerzo

Propiedades a flexión	E0	P0
σ_f (MPa)	66,152	29,874
E_f (MPa)	1.777,924	774,010
ϵ_f (%)	4,28	6,26

Tabla 7.2 Propiedades a flexión de las probetas sin refuerzo

Para continuar con la comparación de las resinas que forman la matriz, se debe tener en cuenta que dado que la fibra de carbono se considera mejor refuerzo que cualquiera de las otras dos, no se prepararon las probetas de poliéster con fibra de carbono.

7.2.2 Probetas fabricadas con resina Poliéster y dos capas de fibras de refuerzo

Inicialmente se preparan probetas con una sola capa de fibra de refuerzo, tanto con matriz de poliéster como epoxi, pero se descarta su caracterización mecánica porque al resultar dimensionalmente muy finas, en la práctica, desde el principio de aplicación de la fuerza flectan en exceso comportándose como elementos no resistentes.

Por ello comenzamos esta presentación de resultados comentando las probetas fabricadas con resina poliéster y dos capas de fibras de refuerzo, para comparar el efecto de la naturaleza de la fibra sobre su comportamiento mecánico a flexión. Recordar que las probetas de resina de poliéster no se fabrican con fibra de carbono porque la calidad de las fibras es muy superior a las propiedades de la resina.

Las probetas ensayadas se enumeran y se describen en la tabla 5.1, la que resiste entre ellas una mayor fuerza resulta ser la fabricada con dos capas de fibra de plátano alineadas o montadas en el espécimen en disposición longitudinal formando las dos capas un ángulo de 0°. Le sigue la probeta fabricada con dos capas de fibra de vidrio aleatorio (PG2) pero que soporta menos del 30% de la fuerza máxima observada para la probeta PB1 mencionada antes y a continuación y en orden PB2 y PG1.

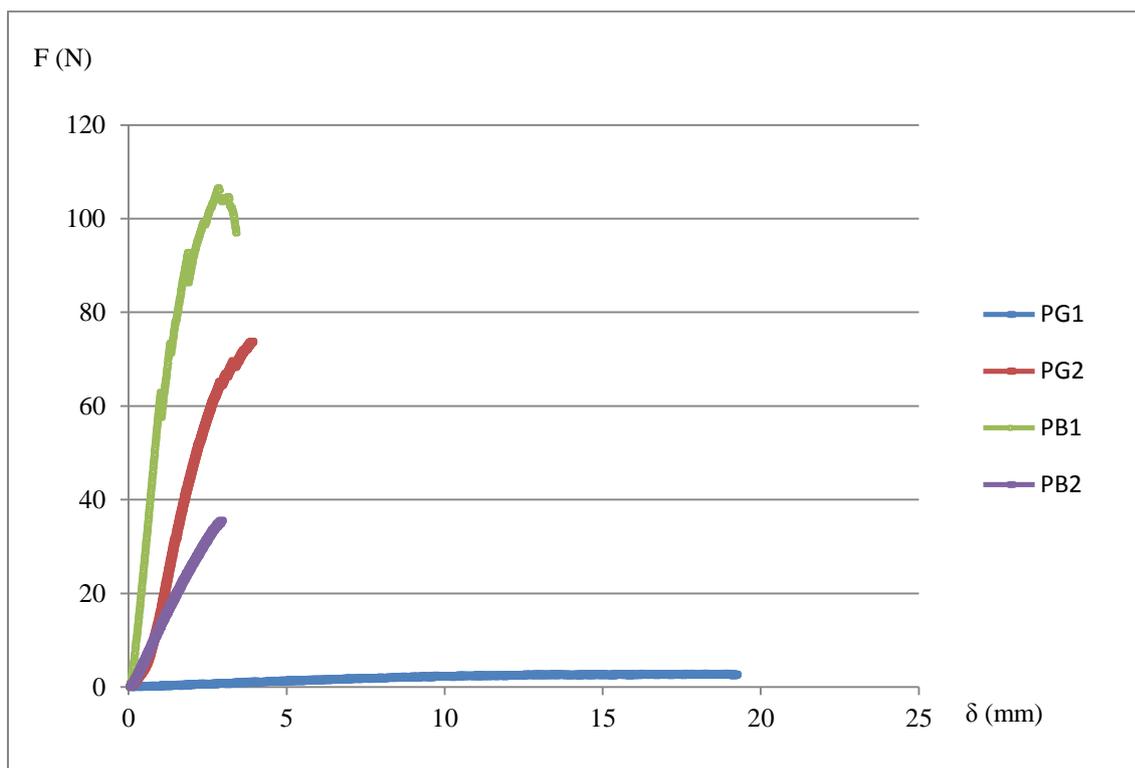


Gráfico 7.3 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y dos capas de fibras de refuerzo

A continuación se adjuntan los resultados numéricos de los parámetros obtenidos, se debe comentar que la probeta PB1, que soporta la mayor fuerza, no es la que presenta

mejores valores a flexión, cabe destacar que para tratar los datos se deben tener en cuenta las dimensiones de las piezas, dando como resultado una variación de las posiciones mencionadas anteriormente y que aparecen reflejadas en la tabla 7.3.

Propiedades a flexión	PG1	PG2	PB1	PB2
σ_f (MPa)	53,073	89,722	11,280	7,837
E_f (MPa)	5.967,19	4.733,984	1.011,307	551,959
ε_f (%)	1,40	1,85	2,48	1,78

Tabla 7.3 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y dos capas de fibras de refuerzo

Revisando los parámetros obtenidos, el conjunto formado por resina poliéster y fibra de vidrio presenta valores superiores de resistencia a flexión (MOR), mejor la disposición aleatoria (PG2) respecto a la entrecruzada (PG1). Y si observamos las otras probetas, las preparadas con refuerzo de fibra de plátano presentan mejores resultados las fibras alineadas longitudinalmente en ambas capas (PB1) que aquellas en disposición longitudinal-transversal (PB2).

El valor del módulo a flexión, también influido por las dimensiones, aporta una idea de las características elásticas de los materiales fabricados, presentando la siguiente clasificación: PG1 > PG2 > PB1 > PB2, resultando así que los mejores valores corresponde a las probetas cuyo comportamiento aparece como más frágil, como suele ocurrir.

La deflexión (%) que también se estima teniendo en cuenta las dimensiones geométricas de las probetas, permite establecer cuanta deformación (deflexión) son capaces de soportar dichas probetas hasta su rotura, donde la máxima deflexión corresponde a PB1, donde la disposición longitudinal (0°, 0°) de las capas alineadas permite mantener el conjunto cohesionado, frente al comportamiento de PB2 cuya disposición alterna (0°, 90°) resulta menos adecuada.

7.2.3 Probetas fabricadas con resina Epoxi y dos capas de fibras de refuerzo

A continuación se describen los resultados obtenidos para probetas fabricadas con resina Epoxi y dos capas de fibras de refuerzo, se debe constatar que en este caso si se fabrican probetas con fibra de carbono, teniendo así una mayor diversidad de presentaciones.

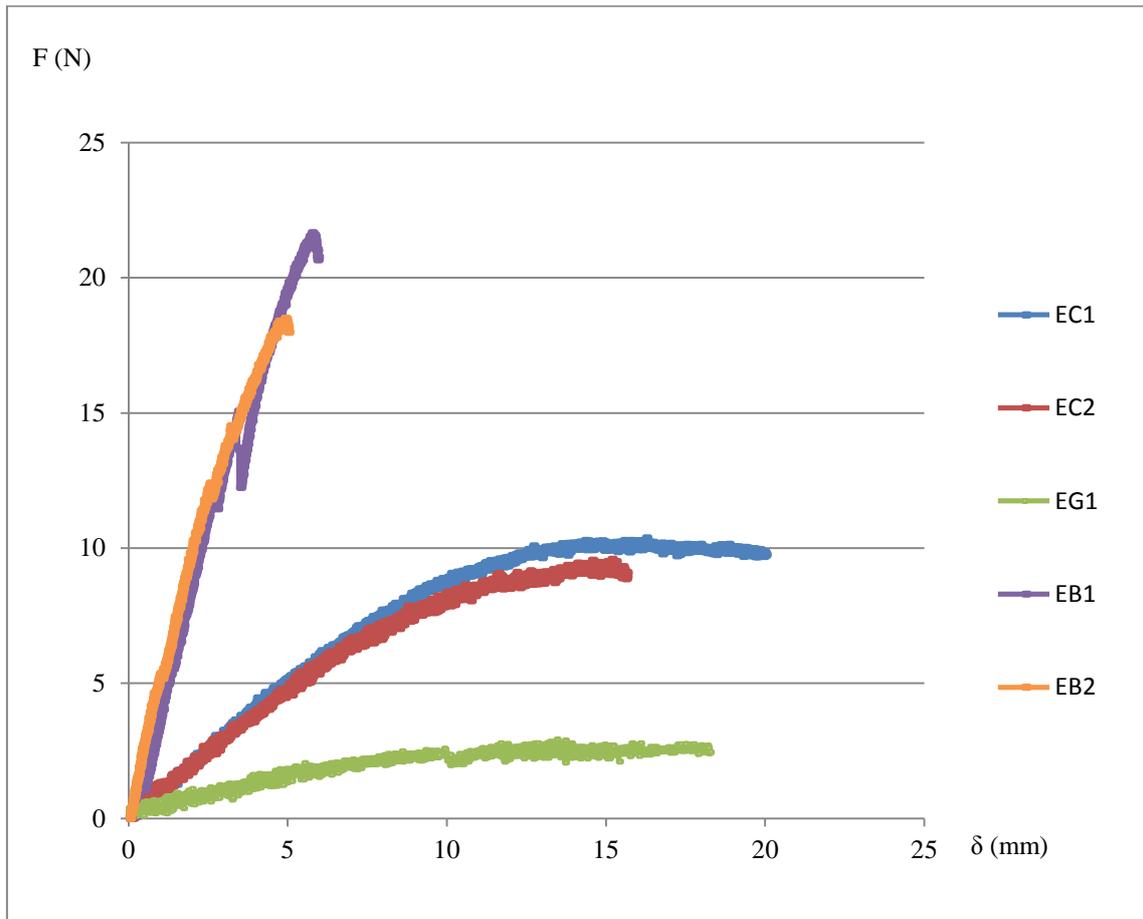


Gráfico 7.4 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y dos capas de fibras de refuerzo

Igual que ocurría con las probetas de 2 capas fabricadas con matriz poliéster la probeta que aguanta más fuerza es la EB1 preparada con fibra de plátano como refuerzo, con la disposición de las fibras longitudinalmente ($0^\circ, 0^\circ$), misma disposición que la correspondiente a la fabricada con matriz poliéster (PB2). Esto no significa que sea la que después tenga mejores características a flexión.

La segunda probeta clasificada por su resistencia a fuerza aplicada es la probeta fabricada con fibra de plátano con una primera capa transversal (90°) y la segunda capa longitudinal (0°), la denominada EB2. Le siguen la fabricada con dos capas de fibra de carbono entrecruzada (EC1) y la probeta EC2 con 2 capas de fibra de carbono en disposición longitudinal (0°) y transversal (90°), que presentan prácticamente la misma respuesta a carga aplicada en flexión. En último lugar estaría la EG1 con 2 capas de fibra de vidrio entrecruzada,

A continuación se adjuntan los resultados numéricos de los parámetros obtenidos, al igual que en el caso de las probetas fabricadas con dos capas y resina poliéster la probeta EB1 aunque aguanta más carga no es la que presenta mejor resistencia a flexión. Los dos especímenes fabricados con fibra de carbono son los que presentan mejor resistencia a flexión y la probeta con la fibra entrecruzada la que presenta mayor resistencia a flexión. Le sigue EG1 que presenta valores similares a EC2, y por último las probetas reforzadas con fibra de plátano son las que peor se comportan.

Propiedades a flexión	EC1	EC2	EG1	EB1	EB2
σ_f (MPa)	177,124	96,528	93,937	10,527	9,257
E_f (MPa)	22.092,277	15530,299	14.395,585	620,300	702,195
ε_f (%)	1,53	1,01	1,16	2,37	1,71

Tabla 7.4 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y dos capas de fibras de refuerzo

7.2.4 Probetas fabricadas con resina Poliéster y tres capas de fibras de refuerzo

Se presentan a continuación los resultados de los ensayos de flexión de las probetas fabricadas con resina de poliéster y 3 capas de refuerzo, concretamente PG3 formada por 3 capas de fibra de vidrio de tejido entrecruzado, PG4 con 3 capas de fibra de vidrio aleatorias y PB3 con 3 capas de fibra de plátano longitudinal orientadas (0°, 0°, 0°).

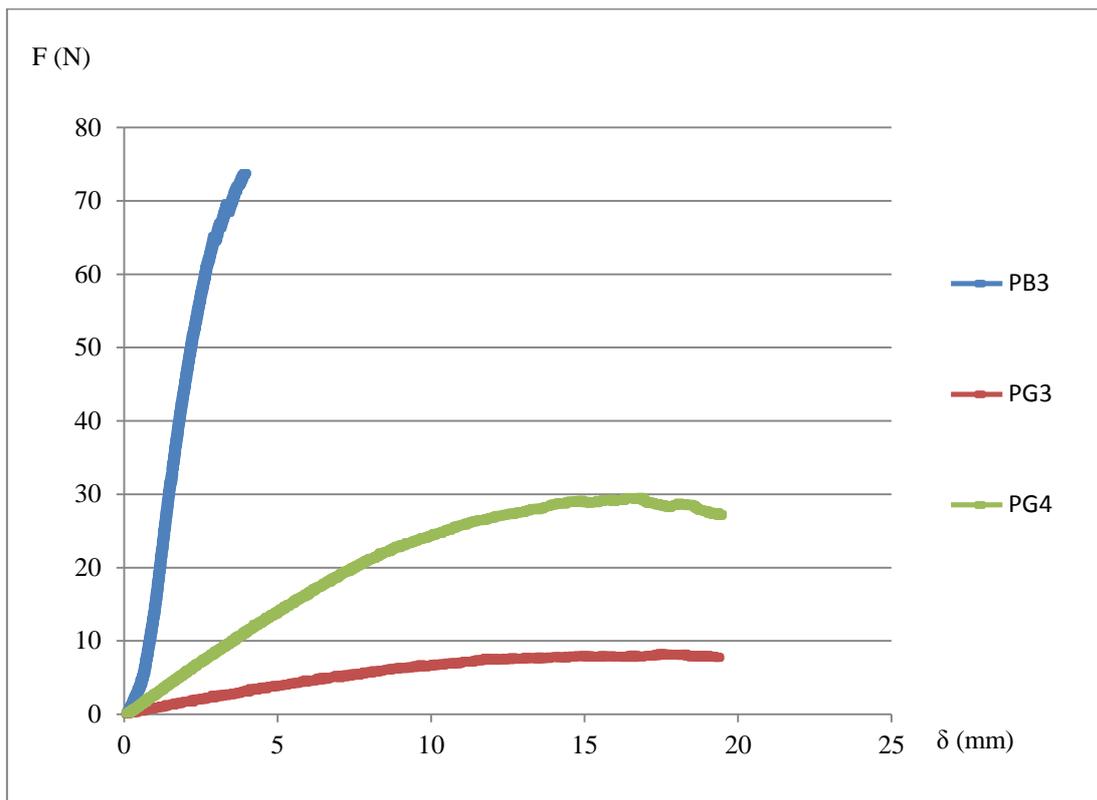


Gráfico 7.5 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y tres capas de fibras de refuerzo

De nuevo la probeta fabricada con refuerzo de fibra de plátano es la que soporta una carga mayor, seguida de PG4 y por último PG3. De nuevo hay que tener en cuenta que los resultados reales se ven corregidos con las dimensiones de las probetas, modificándose esta clasificación después de estas operaciones (ver tabla 7.5). La mejor resistencia a flexión la presenta la probeta con fibra de vidrio en disposición aleatoria, seguida de la fibra de vidrio entrecruzada, obteniéndose los peores resultados para la muestra con fibra de plátano.

Propiedades a flexión	PB3	PG4	PG3
σ_f (MPa)	6,018	107,133	123,147
E_f (MPa)	300,149	9.598,903	6.897,536
ϵ_f (%)	3,15	1,76	3,13

Tabla 7.5 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Poliéster y tres capas de fibras de refuerzo

7.2.5 Probetas fabricadas con resina Epoxi y tres capas de fibras de refuerzo

De nuevo se observa que la probeta fabricada con fibra de plátano, es la que presenta una mayor resistencia a carga, seguida por la probeta con fibra de carbono y por último la de fibra de vidrio.

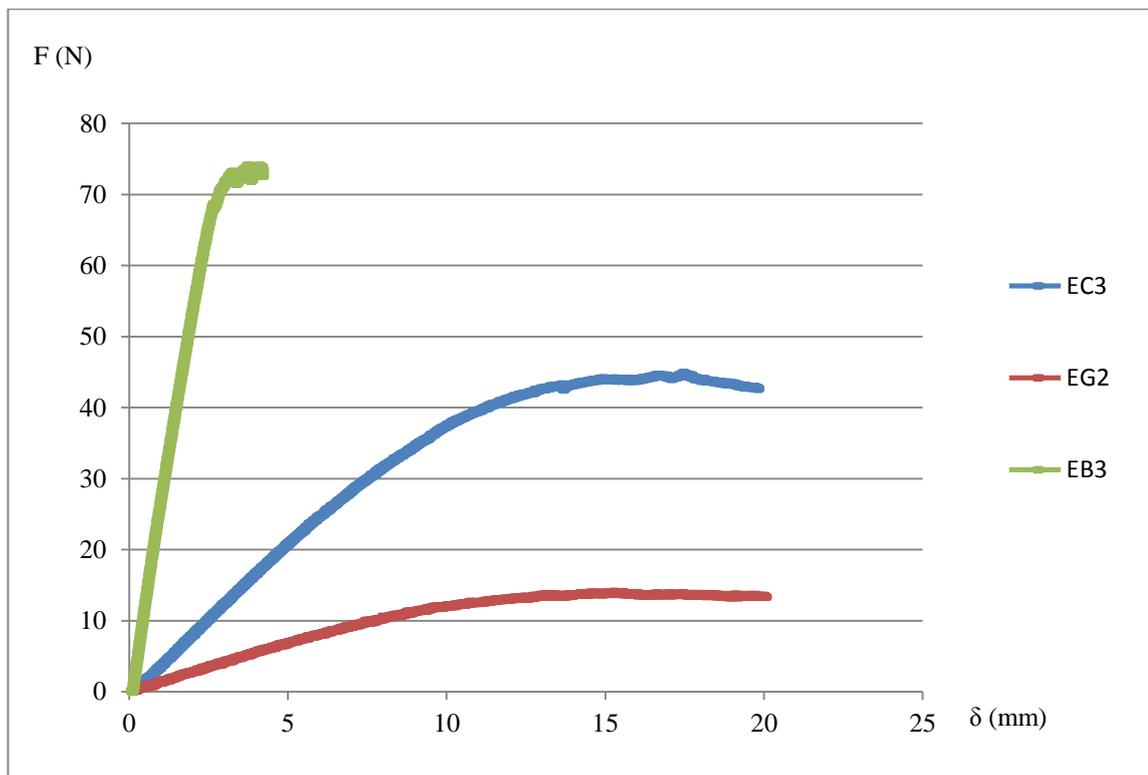


Gráfico 7.6 Curva fuerza – deflexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y tres capas de fibras de refuerzo

Los parámetros obtenidos a partir de estos resultados, teniendo en cuenta las diferentes dimensiones de las probetas preparadas se muestran en la tabla siguiente.

Propiedades a flexión	EC3	EG2	EB3
σ_f (MPa)	328,275	164,429	12,966
E_f (MPa)	28.678,681	15.172,864	806,124
ϵ_f (%)	1,98	1,87	2,39

Tabla 7.6 Propiedades a flexión de las probetas fabricadas con resina Epoxi y tres capas de fibras de refuerzo

Como parece lógico esperar, los mejores valores corresponden al espécimen fabricado con fibra de carbono tanto en resistencia como en el módulo a flexión, seguida de la probeta de fibra de vidrio y siendo la peor la de fibra de plátano.

De las gráficas y las tablas comentadas en los apartados anteriores, vemos que la introducción de fibras lleva consigo siempre una mejora en las propiedades mecánicas con respecto a la probeta original sin refuerzo. También observamos que las probetas fabricadas con resina epoxi presentan valores de resistencia a flexión y módulo de flexión superiores a las correspondientes probetas fabricadas con poliéster.

7.3 Comparación de las probetas preliminares

A continuación se presenta en la Tabla 7.7 los valores obtenidos para las probetas preliminares.

Resina	Fibra	Número de capas	Código	σ_f (MPa)	E_f (MPa)	ε_f (%)
Epoxi	-	-	E0	66,152	1.777,924	4,28
	Carbono	2	EC1	177,124	22.092,277	1,53
			EC2	96,528	15.530,299	1,01
		3	EC3	328,275	28.678,681	1,98
	Vidrio	2	EG1	93,937	14.395,585	1,16
		3	EG2	164,429	15.172,864	1,87
	Plátano	2	EB1	10,527	620,300	2,37
			EB2	9,257	702,195	1,71
		3	EB3	12,966	806,124	2,39
	Poliéster	-	-	P0	29,874	744,010
Vidrio		2	PG1	53,073	5.967,19	1,40
			PG2	89,722	4.733,984	1,85
		3	PG3	107,133	9.598,903	1,76
			PG4	123,147	6.897,536	3,13
Plátano		2	PB1	11,280	1.011,307	2,48
			PB2	7,837	551,959	1,78
		3	PB3	6,018	300,149	3,15

Tabla 7.7 Resumen de las probetas preliminares

De los gráficos anteriores y sus respectivas tablas se observa que tanto las fibras sintéticas de carbono como las de vidrio, tienen valores de resistencia a la flexión y módulo de elasticidad superiores a las probetas de epoxi sin refuerzo y a las de fibra de plátano. Siendo la más resistente la correspondiente a la fibra de carbono.

Que para el mismo número de capas, en este caso 3, la que presenta mayor resistencia a flexión es la probeta fabricada con fibra de carbono, que dobla el valor obtenido para la correspondiente fabricada con fibra de vidrio. La que peor resultado presenta en la fabricada con fibras naturales que muestra una resistencia a flexión inferior a la resina. Observamos el mismo comportamiento para el módulo de flexión. No obstante, si analizamos las deformaciones, las probetas con fibra de plátano presentan una deformación ligeramente superior.

Por otro lado, se refleja que las de fibra de plátano tiene una respuesta similar a las sintéticas en los siguientes apartados:

- Influencia del número de capas. A mayor número de capas se obtiene mayor resistencia como dan en los resultados de las probetas EB3 (3 capas) > EB1 (1 capa).
- Orientación de la fibra. Una disposición de todas las capas longitudinales (0°,0°), da resultados superiores a una disposición longitudinal y transversal (0°,90°), como en el caso de PB1 (0°,0°) > PB2 (0°,90°).

Respecto al tipo de resina utilizada era de esperar que las elaboradas con epoxi revelaran mejores resultados que las de poliéster, como ocurre con las de fibra de vidrio y fibra de carbono. Este fenómeno no se observa claramente en las probetas de fibra de plátano a primera vista y tras los ensayos preliminares, por lo que decidimos elaborar las nuevas probetas de materiales compuestos con refuerzo de fibras naturales según la norma.

En este aspecto volvemos a utilizar ambas resinas como matriz y en cuanto a la fibra de plátano, escogemos orientación longitudinal y como mínimo tres capas. En las tablas 5.2 y 5.3 queda reflejada la composición y orientación de estas nuevas probetas.

7.4 Probetas normalizadas para ensayo a flexión

En los apartados 5.6.2 y 5.6.3 quedan reflejadas la composición y la orientación de las fibras en estas nuevas probetas. Para su preparación, hemos modificado ligeramente el método de fabricación para intentar conseguir una mejor adhesión de la resina a la fibra, así como que las dimensiones de las mismas queden ajustadas a la norma. Estas correcciones de fabricación se refieren a una preimpregnación de las fibras de plátano con la resina para aumentar la flexibilidad y para conseguir la mejor adhesión posible, así como a la aplicación de mayor presión durante todo el proceso de curado.

7.4.1 Fibras de plátano reforzadas con epoxi

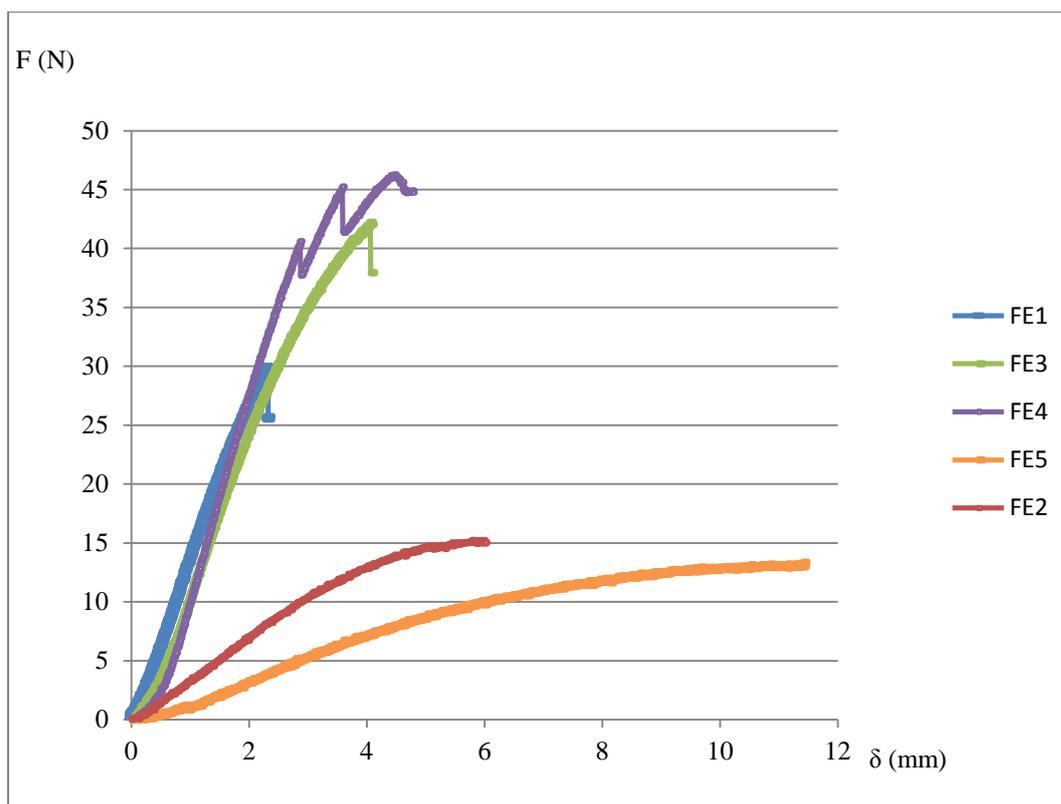


Gráfico 7.8 Curva fuerza – deflexión de las fibras de plátano reforzadas con epoxi

En la tabla 7.8 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo a flexión de las nuevas probetas normalizadas, cuyos resultados gráficos por separado se encuentran representados en el Anexo B.

Resina	Fibra	Número de capas	Código	σ_f (MPa)	E_f (MPa)	ϵ_f (%)
Epoxi	Plátano	3	FE1	13,043	1.214,522	1,15
			FE2	14,842	905,251	2,17
			FE3	15,289	1.066,146	2,58
			FE4	15,462	828,703	3,42
			FE5	11,257	708,188	4,37

Tabla 7.8 Propiedades a flexión de las fibras de plátano reforzadas con epoxi

De los valores obtenidos anteriormente calcularemos, los siguientes parámetros definidos por la norma utilizada:

- La media aritmética: $\bar{\sigma} = 13,978$ MPa
- Desviación típica: $s = 1,798$
- Intervalo de confianza: $11,745 \text{ MPa} < \bar{\sigma} < 16,212 \text{ MPa}$

De las cinco probetas ensayadas se observa que tres de ellas (F1, F2, F3), dan un comportamiento similar en cuanto a la pendiente de la curva como se observa en la Gráfico 7.8, mientras F4 y F5 son algo distintas a pesar de dar valores parecidos en sus propiedades. Esto es debido que en la memoria se muestran 5 probetas más representativas, como aconseja la norma, de varias probetas que se iban elaborando por series y es posible que no tuvieran exactamente las mismas dimensiones, pero están explicadas por separado en el Anexo B.

En general las probetas después del ensayo presentan deformación permanente. La fractura se produce en la resina y en parte de las fibras, por lo que el material no se fractura por completo. Las fibras que se rompen son las del lado contrario a la aplicación de la carga.

Si comparamos los ensayos preliminares con la muestra anterior EB3 (Anexo A), observamos que resisten más carga aplicada debido a sus dimensiones pero da un MOR algo más bajo que la media ($12,966 \text{ MPa} < 13,978 \text{ MPa}$) aunque está dentro del intervalo de confianza.

7.4.2 Fibras de plátano reforzadas con poliéster

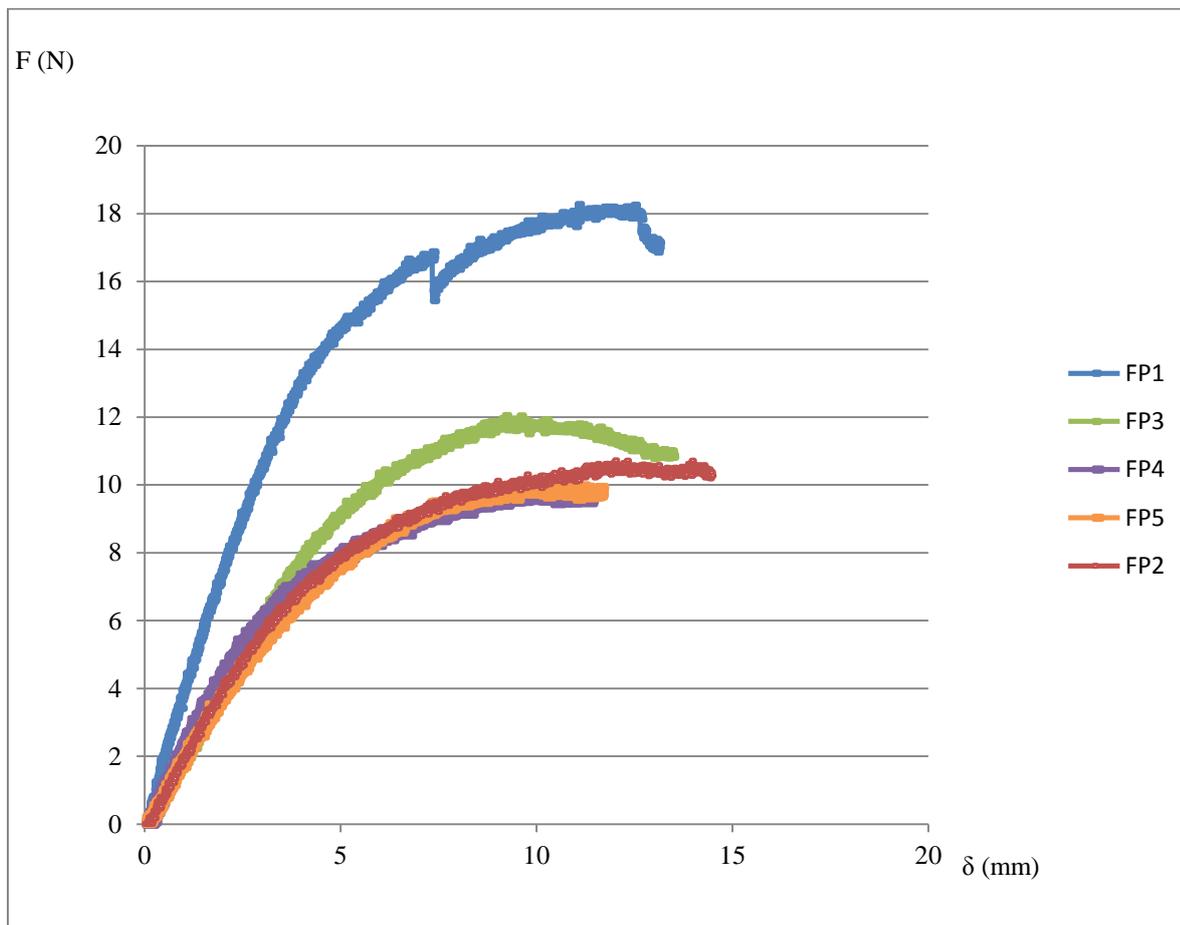


Gráfico 7.9 Curva fuerza – deflexión de las fibras de plátano reforzadas con poliéster

En la tabla 7.9 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo a flexión de las nuevas probetas normalizadas, cuyos resultados gráficos por separado se encuentran representados en el Anexo C.

Resina	Fibra	Número de capas	Código	σ_f (MPa)	E_f (MPa)	ϵ_f (%)
Poliéster	Plátano	3	FP1	12,579	648,009	4,80
			FP2	12,870	769,231	4,02
			FP3	11,753	851,822	3,17
			FP4	10,767	584,045	3,45
			FP5	11,921	690,878	4,11

Tabla 7.9 Propiedades a flexión de las fibras de plátano reforzadas con poliéster

De los valores anteriores calculamos:

- La media aritmética: $\bar{\sigma} = 11,978 \text{ MPa}$
- Desviación típica: $s = 0,818$
- Intervalo de confianza: $10,962 \text{ MPa} < \bar{\sigma} < 12,994 \text{ MPa}$

De las cinco probetas ensayadas se observa que cuatro de ellas soportan valores de carga aplicada muy próximos, mientras que FP1 alcanza los 18 N. Como se ha explicado en el apartado 7.4.1 esto se explica con número de probetas seleccionadas en remesas distintas, que están explicadas por separado en el Anexo C.

En general las probetas después del ensayo presentan deformación permanente. La fractura se produce en la resina y en parte de las fibras, por lo que el material no se fractura por completo. Las fibras que se rompen son las del lado contrario a la aplicación de la carga.

Si comparamos con la muestra anterior PB3 (Anexo A) de los ensayos preliminares, tiene un valor de resistencia a flexión muy bajo a la media, incluso inferior al intervalo de confianza. Aunque si atendemos a la curva fuerza-deflexión la muestra PB1 alcanza los 70 N mientras que las normalizadas están cercanos a 10 N. Aquí la importancia de su buena elaboración, ya que muchas probetas contenían un exceso de resina frente a poca fibra, por lo que dan valores paramétricos distorsionados.

Este ensayo ayuda a verificar que el número de capas también influye y que dicha influencia es mayor con 3 capas que con 2, porque en el poliéster (ver tabla 7.7) se podía plantear que la muestra PB1 (2 capas) era mejor que PB3 (3 capas).

7.5 Probetas normalizadas para ensayo a tracción

7.5.1 Fibras de plátano reforzadas con epoxi

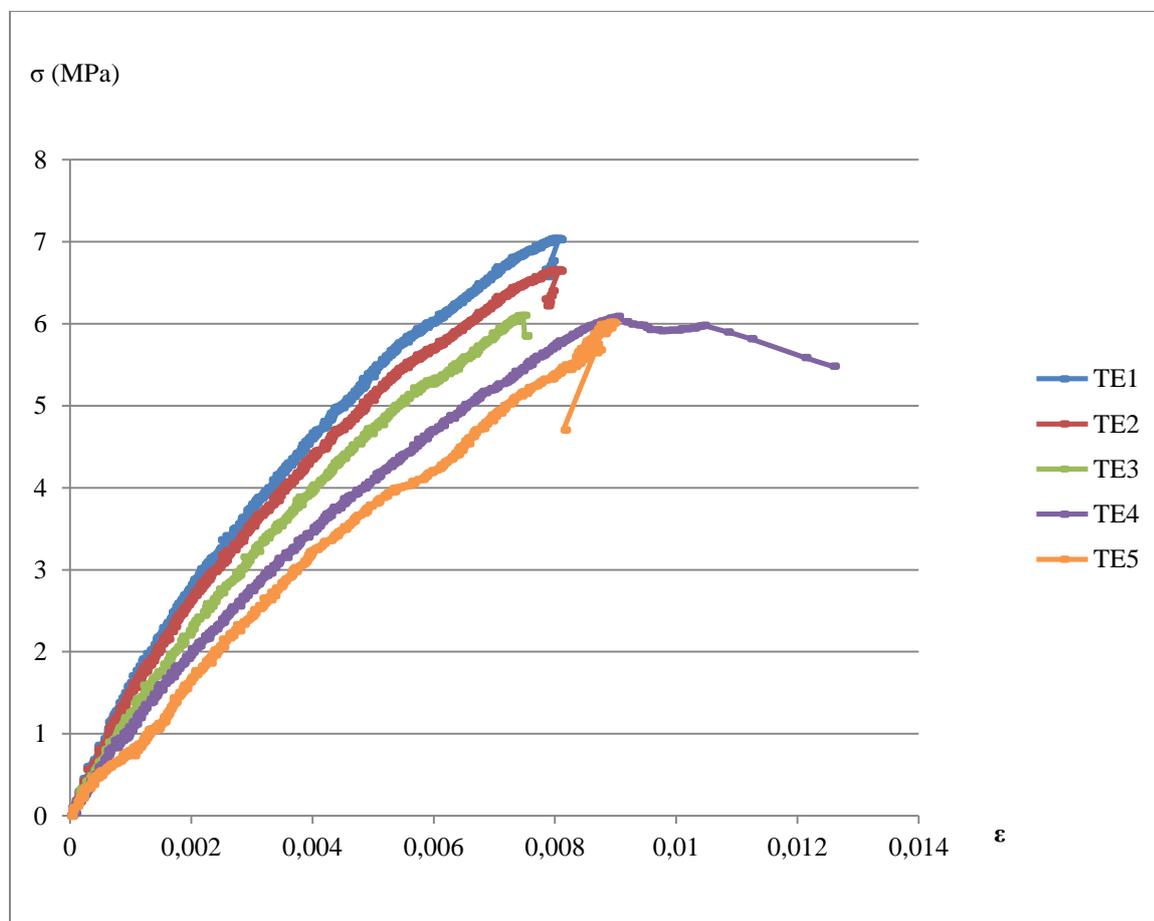


Gráfico 7.10 Curva esfuerzo-deformación de las fibras de plátano reforzadas con epoxi

En la tabla 7.10 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo a flexión de las nuevas probetas normalizadas, cuyos resultados gráficos por separado se encuentran representados en el Anexo D.

Resina	Fibra	Número de capas	Código	σ_f (MPa)	E_f (MPa)	ϵ_f (%)
Epoxi	Plátano	3	TE1	7,040	895,460	0,81
			TE2	6,659	875,730	0,81
			TE3	6,105	728,980	0,75
			TE4	6,091	839,620	1,2
			TE5	6,023	756,270	0,89

Tabla 7.10 Propiedades a tracción de las fibras de plátano reforzadas con epoxi

De los valores anteriores calculamos:

- La media aritmética: $\bar{\sigma} = 6,383\text{MPa}$
- Desviación típica: $s = 0,400$
- Intervalo de confianza: $5,887\text{ MPa} < \bar{\sigma} < 6,881\text{ MPa}$

De las probetas ensayadas vemos que TE4 presenta una mayor deformación, esto se explica porque a diferencia de las demás que rompían a la vez la resina y la fibra, en esta probeta se observó que primero se rasgaba la resina y continuaba resistiendo un poco más hasta que la fibra se agotaba y también se fractura.

En general las probetas después del ensayo presentan fractura en la resina y en primera capa de fibra de plátano más próxima a la cara que empezaba a romper. Esto quiere decir que el material no fractura por completo sino parcialmente. También destacar que no siempre rompían de forma homogénea perpendicular a la sección flexionada con forma lineal sino en forma escalonada o incluso en diagonal, además no únicamente en el parte central de la muestra sino en varios puntos a lo largo de la probeta.

7.5.2 Fibras de plátano reforzadas con poliéster

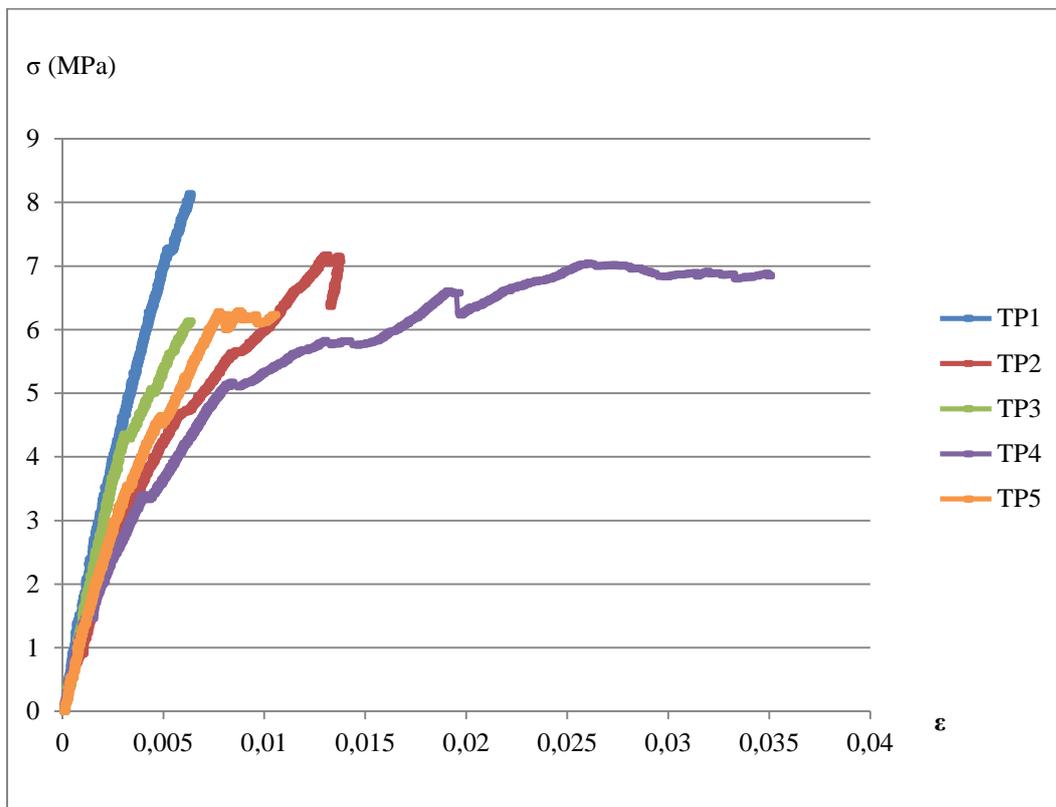


Gráfico 7.11 Curva esfuerzo-deformación de las fibras de plátano reforzadas con poliéster

En la tabla 7.11 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo a flexión de las nuevas probetas normalizadas, cuyos resultados gráficos por separado se encuentran representados en el Anexo E.

Resina	Fibra	Número de capas	Código	σ_f (MPa)	E_f (MPa)	ϵ_f (%)
Poliéster	Plátano	3	TP1	8,128	1.319,400	0,62
			TP2	7,169	716,480	1,36
			TP3	6,527	1.446,700	0,62
			TP4	7,044	736,780	3,49
			TP5	6,293	984,820	1,04

Tabla 7.11 Propiedades a tracción de las fibras de plátano reforzadas con poliéster

De los valores anteriores calculamos:

- La media aritmética: $\bar{\sigma} = 7,032\text{MPa}$
- Desviación típica: $s = 0,636$
- Intervalo de confianza: $6,243\text{ MPa} < \bar{\sigma} < 7,822\text{MPa}$

De las probetas ensayadas vemos que a TP4 le ocurre lo mismo que a TE4 en el apartado anterior, presentando una mayor deformación porque su fractura fue por partes, primero la resina y después la fibra de plátano.

En general las probetas después del ensayo presentan los mismos fallos que las de epoxi donde se fracturaba la resina y la primera capa de fibra de plátano más próxima a la cara que empezaba a romperse.

7.6 Comparación de las probetas normalizadas

A continuación se presenta en la Tabla 7.12 los valores de la media aritmética para las probetas normalizadas.

	Refuerzo de Fibra de plátano con epoxi	Refuerzo de Fibra de plátano con poliéster
Propiedades a Flexión		
$\bar{\sigma}_f$ (MPa)	13,978	11,978
Propiedades a Tracción		
$\bar{\sigma}_t$ (MPa)	6,383	7,032

Tabla 7.12 Resumen de las probetas normalizadas

De estos resultados se observa que las fibras de plátano reforzadas con epoxi no suponen una mejora tan significativa respecto a las reforzadas con poliéster como ocurre en las fibras sintéticas. Además si vemos la Tabla 7.1, tampoco superan las propiedades mecánicas de las resinas sin refuerzo.

Por otro lado se mantienen mejores propiedades a flexión que a tracción, además se ha mejorado respecto a la fibra de plátano sola, multiplicando por 10 su valor inicial.

7.7 Ensayo de ultrasonidos

No todas las probetas con fibras de plátano han superado el ensayo de ultrasonidos. En el osciloscopio se podía apreciar un descenso en la intensidad de señal en varias zonas a lo largo de la probeta. Esto es debido a la falta de adhesión entre la fibra de plátano y la resina epoxi.

El problema de mala adherencia provoca que exista una fina capa de aire entre las capas en la probeta o pequeñas burbujas de aire en la superficie. En el osciloscopio esto es percibido debido a que la señal encuentra esta capa de aire y se refleja dando un eco intermedio que se interpreta como un defecto, no llegando hasta el final de la probeta.

7.8 Microscopía digital

En este apartado nos centraremos en el análisis microscópico digital de las probetas fabricadas con fibra de plátano, realizado con Dinolyte (x150A). En primer lugar, en la Figura 7.1 se puede ver la microestructura de las fibras de plátano sin tratamiento previo.



Figura 7.1 Microestructura de las fibras de plátano

Por otro lado, una vez preparadas y ensayadas presentaban los siguientes aspectos comunes:

- La formación de burbujas de aire en las caras superficiales (Figura 7.2).

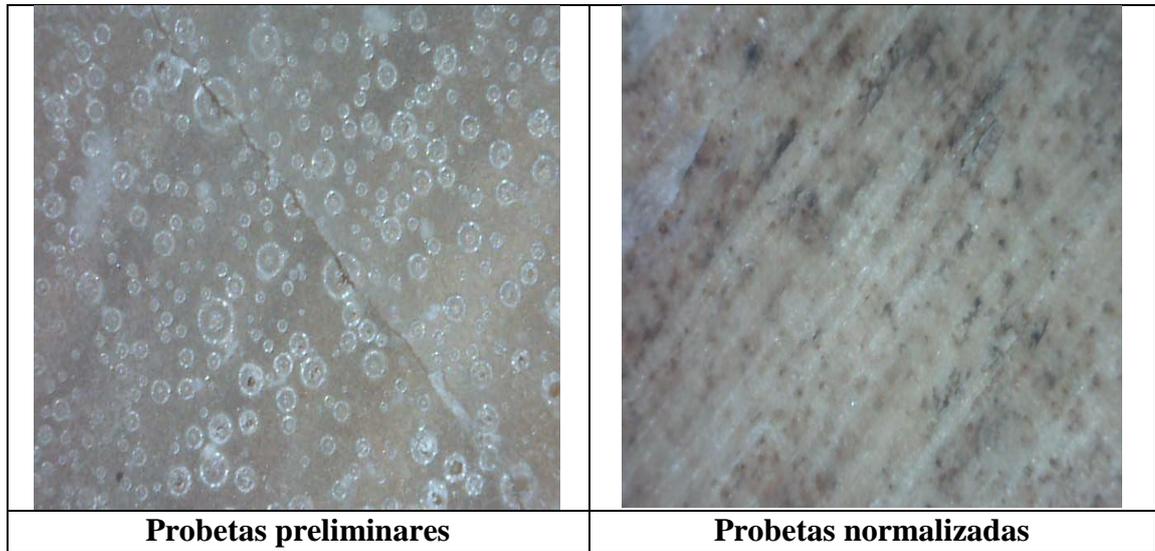


Figura 7.2 Formación de las burbujas de aire

- Capa de aire entre las fibras (Figura 7.3).

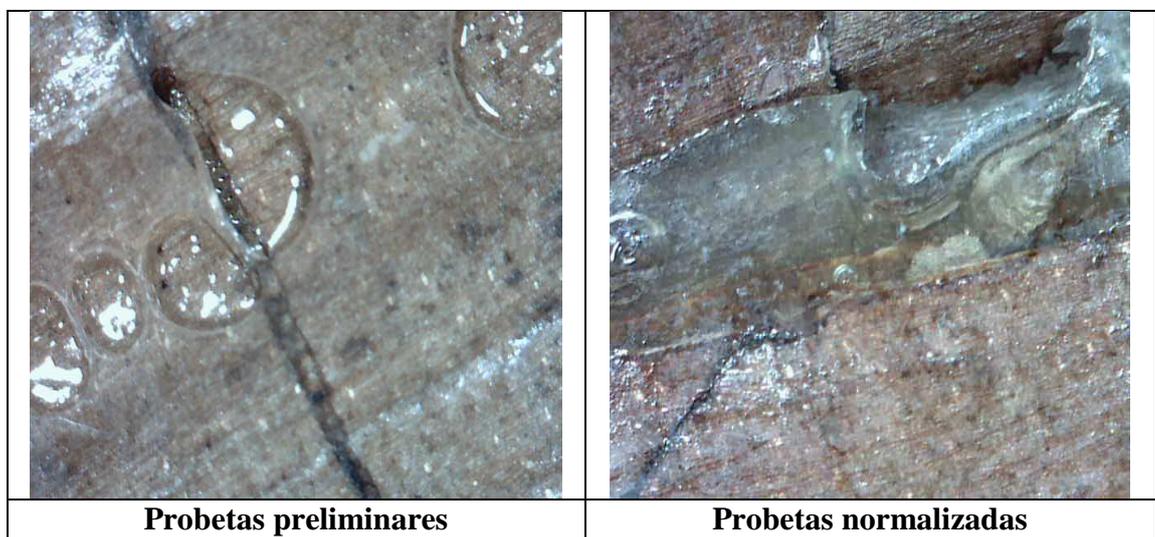


Figura 7.3 Capa de aire entre las fibras

- Mala adhesión entre la resina y la fibra (Figura 7.4).

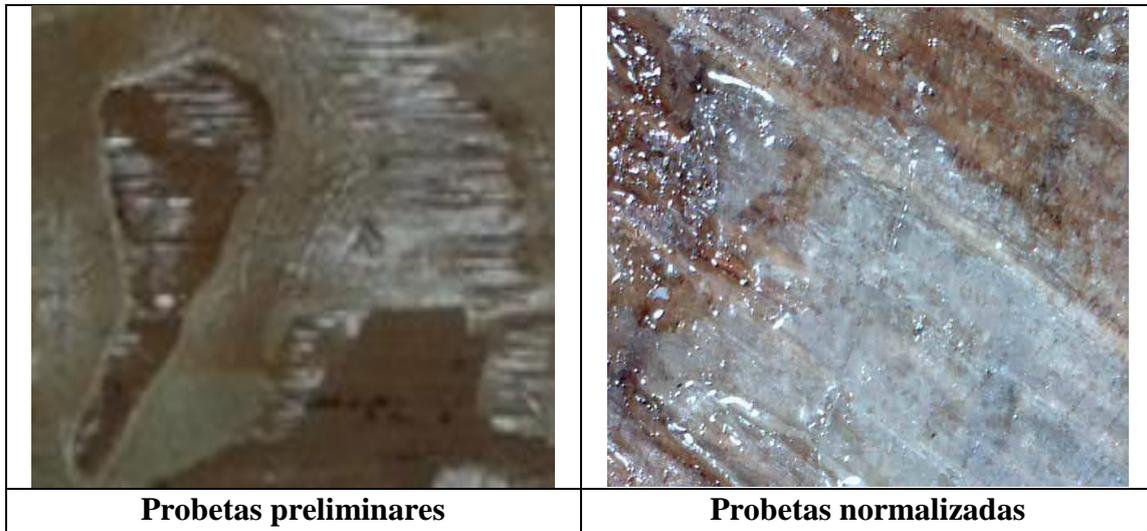


Figura 7.4 Mala adhesión entre la resina y la fibra

- Rotura de las probetas a flexión (Figura 7.5).

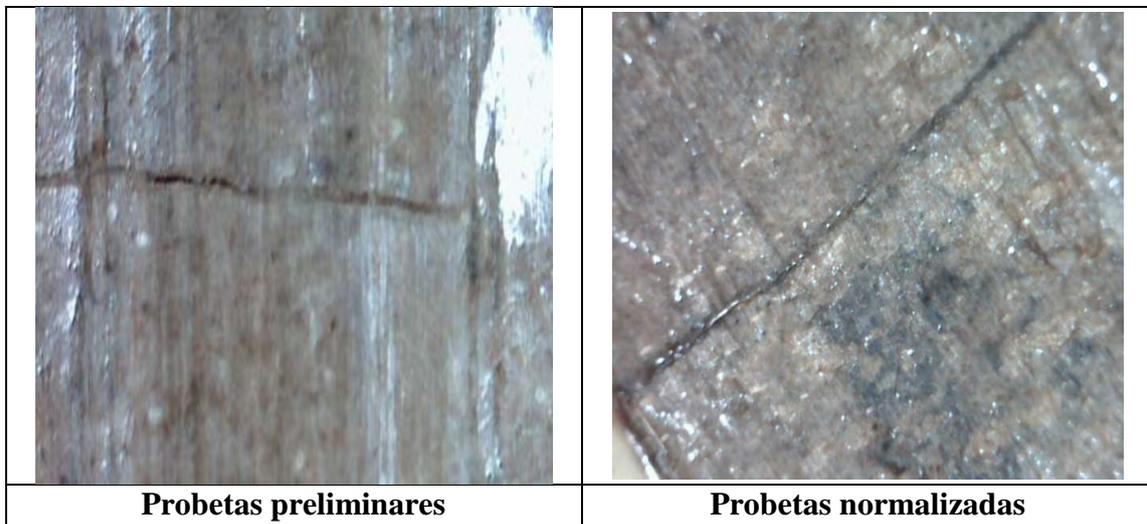


Figura 7.5 Rotura de las probetas a flexión

- Rotura de las probetas normalizadas a tracción (Figura 7.6).



Figura 7.6 Rotura de las probetas normalizadas a tracción

En general del análisis de las fotografías anteriores se observa la mejora de las probetas normalizadas respecto a las preliminares porque como ya se explicó con anterioridad durante la fabricación se dejaron impregnadas con la resina unos minutos antes de prepararlas y así conseguir la mejor adhesión posible, además de aplicarles una mayor presión durante el proceso de curado para eliminar y reducir las burbujas de aire.

8. Conclusiones y futuros desarrollos

8.1 Español

Una vez analizados los materiales compuestos reforzados con fibras de plátano se concluye que siguen un comportamiento similar en cuanto que influye la orientación de las fibras o el número de capas, pero las propiedades de resistencia a flexión y a tracción no mejoran con la introducción de fibras a la matriz como sucede con la introducción de fibras sintéticas, pero sí obtenemos un material capaz de deformarse más antes de romperse que la resina sin fibra. En cuanto a la influencia de la resina utilizada, no hay mucha diferencia entre el epoxi y el poliéster en sus propiedades mecánicas pero si en su precio, por lo que su coste es menor fabricada con poliéster y da los mismo resultados.

Los materiales preparados con fibra natural procedente de la platanera, presentan un mejor comportamiento a flexión que a tracción. La resistencia a flexión es prácticamente el doble que a tracción.

El siguiente paso en nuestro estudio es mejorar el proceso de fabricación de las probetas para evitar la formación de burbujas de aire que rompen la continuidad del material y disminuyen la respuesta mecánica del mismo. Para ello se debe aumentar la presión en el proceso de fabricación.

En último lugar, destacar la mala adhesión entre la fibra y la matriz debida a la naturaleza de las fibras de plátano. Estas fibras están formadas por microfibras de celulosa enlazadas entre sí por puentes de hidrógeno, incrustadas en una matriz de lignina e insertada en una red formada por hemicelulosa.

La lignina es un elemento que aporta una capa impermeable que hace difícil la unión de la resina y la fibra. Por lo que deben ser químicamente tratadas con el fin de mejorar la poca adhesión que existe entre la matriz polimérica y la fibra de carácter hidrófilo. La extracción química con hidróxido de sodio (NaOH) permite disolver la lignina y mejorar su tenacidad, a la vez que aumenta su resistencia a la ruptura [13].

Por lo tanto se hace necesario un tratamiento previo de la fibra de plátano, sumergiéndola en una solución de hidróxido de sodio a diferentes concentraciones y durante diferentes tiempos, con el objetivo de encontrar el tratamiento más eficaz que nos permita mejorar la calidad de la fibra y las propiedades de los materiales compuestos fabricados.

8.2 English

Once analyzed the composites reinforced with fibers of banana concludes that follow a similar behavior in terms of influencing the orientation of the fibers or the number of layers, flexural and tensile strength properties do not improve with the introduction of fibers to the matrix as it is the case with the introduction of synthetic fibers, but if we get a material capable of warping more before breaking than the resin without fiber. In terms of the influence of used resin, there isn't much difference between epoxy and polyester in their mechanical properties but if in their price, so their cost is less manufactured with polyester and gives the same results.

Materials prepared with natural fiber from the banana tree, have the best flexural tensile. Flexural strength is practically double that to tensile strength properties.

The next step in our study is to improve the manufacturing process of the specimens to avoid the formation of air bubbles break the continuity of the material and reduce the mechanical response of the same. This pressure must be increased in the manufacturing process.

Lastly, highlight bad adhesion between fiber and matrix due to the nature of the banana fibers. These fibers are formed by micro-fiber cellulose linked together by hydrogen bonding, embedded in a matrix of lignin and inserted in a network formed by hemicellulose.

The lignin is an element that provides an impermeable layer which makes difficult the union of resin and fiber. So they must be chemically treated to improve little adhesion between polymer matrix and the fiber of hydrophilic character. The chemical

extraction with sodium hydroxide (NaOH) allows you to dissolve the lignin and improve his tenacity, to increase its resistance to breaking [13].

Therefore it is necessary a pretreatment of the banana fiber, by soaking it in a solution of sodium hydroxide at different levels and at different times, with the aim of finding the most effective treatment that will allow us to improve the quality of fiber and properties of composite materials manufactured.

9. Bibliografía

- [1] Unlocking the commercial potential of Natural Fibres. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Disponible en el URL: <http://www.fao.org/economic/futurefibres/resources2/es/>
- [2] Año Internacional de las Fibras Naturales. Disponible en el URL: <http://www.naturalfibres2009.org/es/aifn/index.html>
- [3] <http://www.platanodecanarias.net/news/view/175>
- [4] http://es.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A1tano_de_Canarias
- [5] <http://www.badana.eu/language/es-ES/About-Badana.aspx>
- [6] William D. Callister. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed: Reverté, S.A., 1996.
- [7] William F. Smith. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Tercera edición. Ed: Mc GrawHill, 2006.
- [8] Amigó V., Salvador M.D., Sahuquillo O., Llorens R., Martí F. Valorización de residuos de fibras vegetales como refuerzo de plásticos industriales. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, 2008.
- [9] Gañán P. and Mondragon I. Surface modification of fique fibers. Effect on their physico-mechanical properties, 2002.
- [10] Zamora R. Autor del guión de práctica 1 sobre preparación de materiales compuestos. Ingeniería de Materiales, campus virtual ULL, enero 2012.
- [11] AENOR. UNE-EN-ISO 178. “Plásticos. Determinación de los Propiedades a flexión”, Septiembre 2011.

[12] AENOR. UNE-EN-ISO 527. “Plásticos. Determinación de los Propiedades a tracción”, Noviembre 2012.

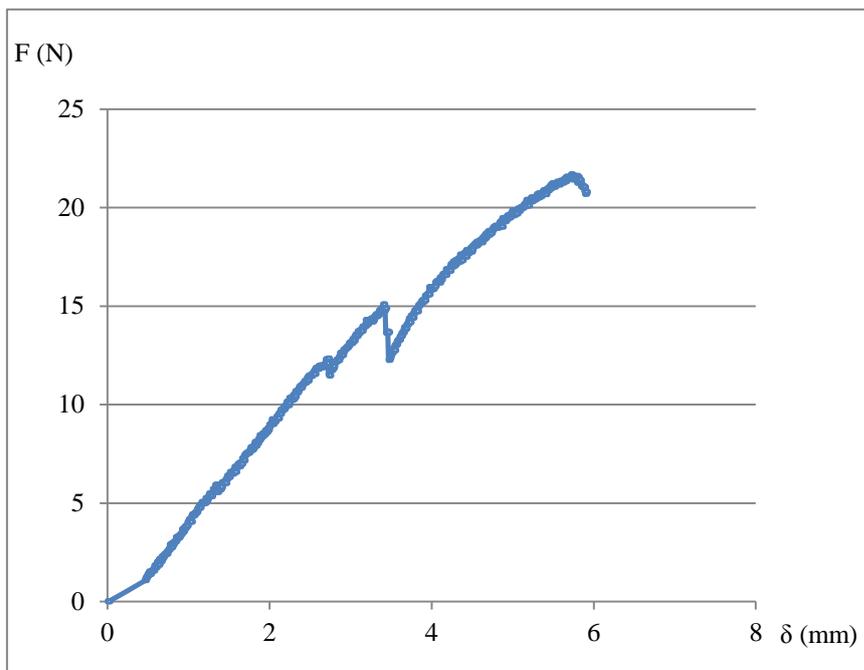
[13] Flores N., González O. Efectos del tratamiento químico en las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales como sustitutas de la fibra de vidrio en composites, 2011.

10. Anexos

Anexo A: Determinación de las propiedades a flexión de las probetas preliminares

PROBETA: EB1

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 2 Orientación: Las dos capas están longitudinalmente (0°,0°)
Dimensiones	Largo: 180 mm Ancho: 35 mm Espesor: 2,3 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 10,527 \text{ MPa}$$

$$E_f = 620,300 \text{ MPa}$$

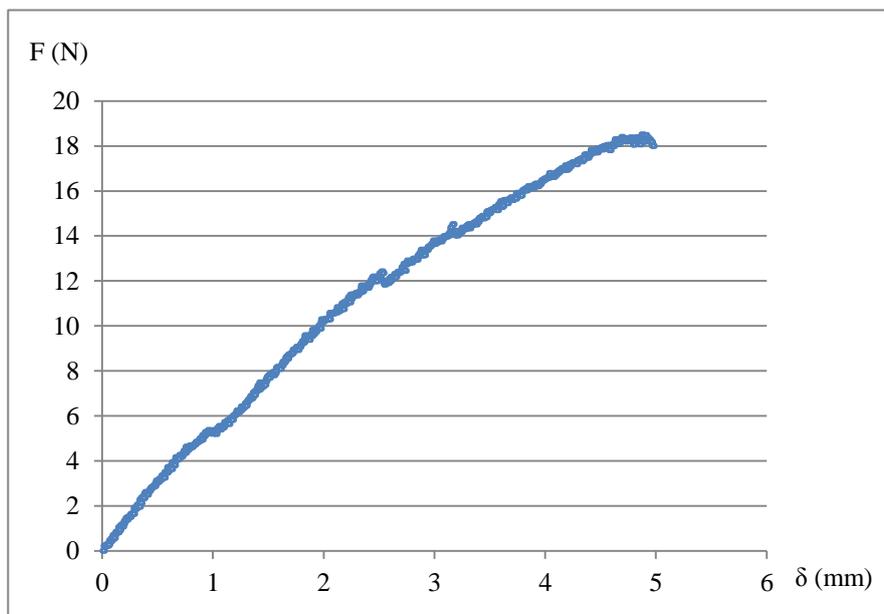
$$\varepsilon_f = 2,37 \%$$

Tipo de fallo:

La rotura inicial se produce en la capa inferior por tracción. En la curva fuerza-deflexión se observa que a los 15 N rompe por un lateral y continua resistiendo hasta rompe por completa.

PROBETA: EB2

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 2 Orientación: Capa superior está longitudinal (0°) y la inferior está transversal (90°)
Dimensiones	Largo: 180 mm Ancho: 45 mm Espesor: 2,0 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 9,257 \text{ MPa}$$

$$E_f = 702,195 \text{ MPa}$$

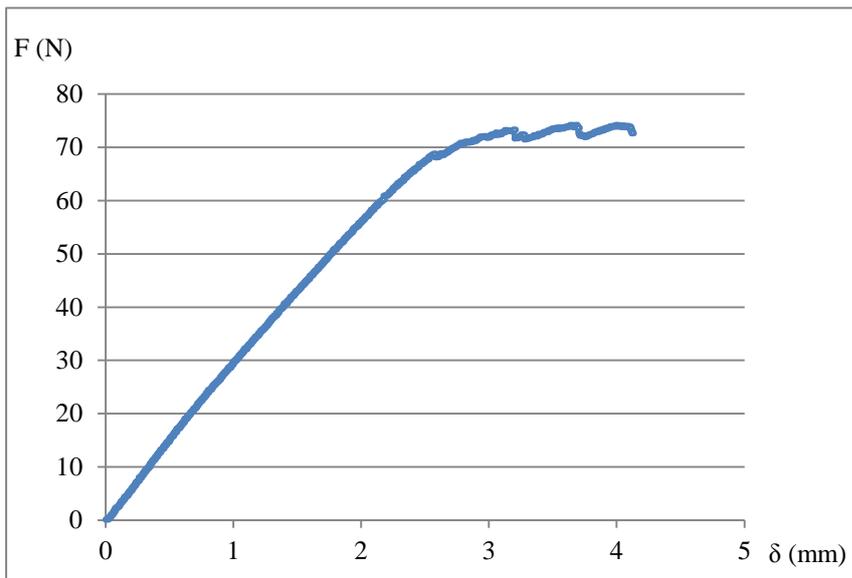
$$\varepsilon_f = 1,71 \%$$

Tipo de fallo:

La a rotura inicial se produce en la capa transversal inferior por tracción. Pero rompe esa capa por completo y empieza a deformarse la capa superior.

PROBETA: EB3

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 180 mm Ancho: 42 mm Espesor: 3,5 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 12,966 \text{ MPa}$$

$$E_f = 806,124 \text{ MPa}$$

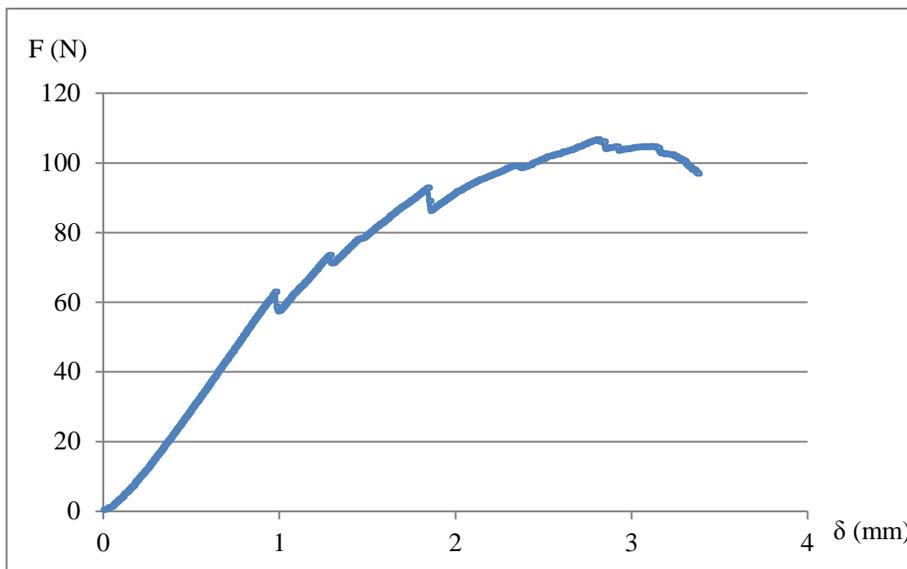
$$\varepsilon_f = 2,39 \%$$

Tipo de fallo:

La rotura inicial se produce en la capa inferior por tracción aunque no rompe toda la fibra como en casos anteriores de poliéster.

PROBETA: PB1

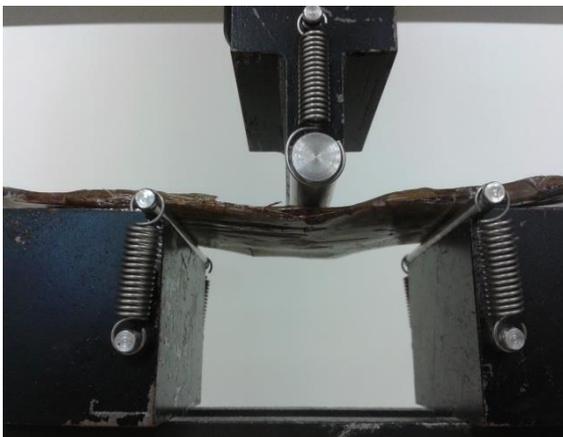
Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 2 Orientación: Las dos capas están longitudinalmente (0°,0°)
Dimensiones	Largo: 190 mm Ancho: 46 mm Espesor: 4,6 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 11,280 \text{ MPa}$$

$$E_f = 1.011,307 \text{ MPa}$$

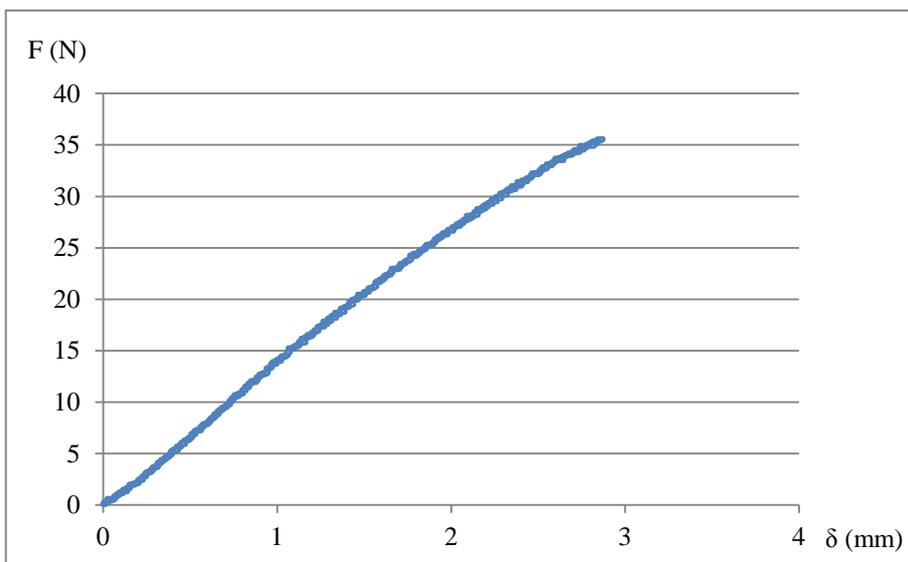
$$\varepsilon_f = 2,48 \%$$

Tipo de fallo:

En la gráfica fuerza – deflexión, lo primero que se observa son saltos en la curva, explicados por las roturas de las burbujas de aire. Finalmente, la fractura de la probeta se produce por tracción en las capas inferiores.

PROBETA: PB2

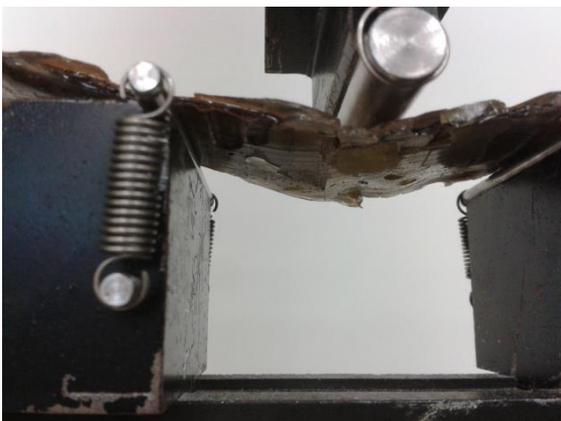
Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 2 Orientación: La capa superior la orientación de las fibras está longitudinal (0°) y la inferior está transversal (90°)
Dimensiones	Largo: 190 mm Ancho: 43 mm Espesor: 4,1 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 7,837 \text{ MPa}$$

$$E_f = 551,959 \text{ MPa}$$

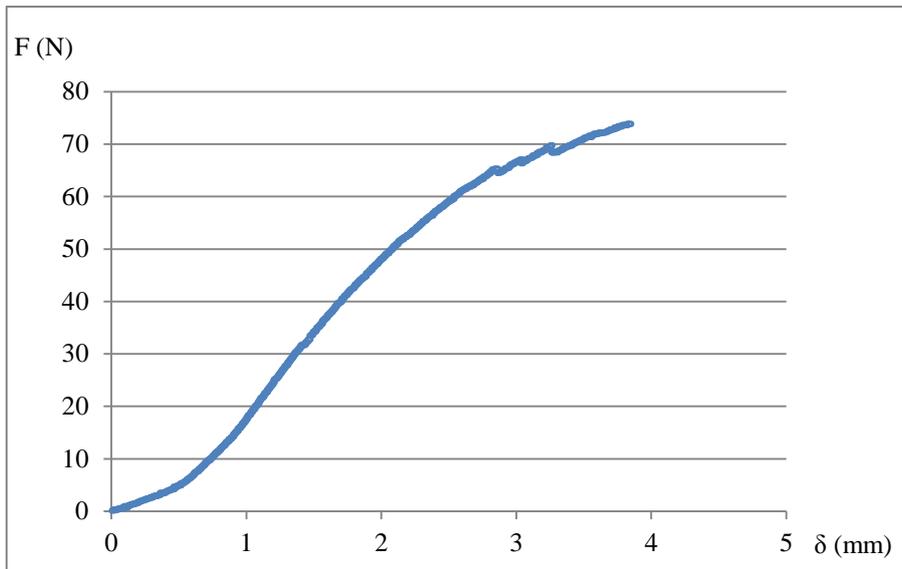
$$\varepsilon_f = 1,78 \%$$

Tipo de fallo:

La rotura inicial se produce en la capa transversal inferior por tracción de forma uniforme. La fractura se encuentra entre la unión de las fibras.

PROBETA: PB3

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 190 mm Ancho: 45 mm Espesor: 4,95 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 6,018 \text{ MPa}$$

$$E_f = 300,149 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_f = 3,15 \%$$

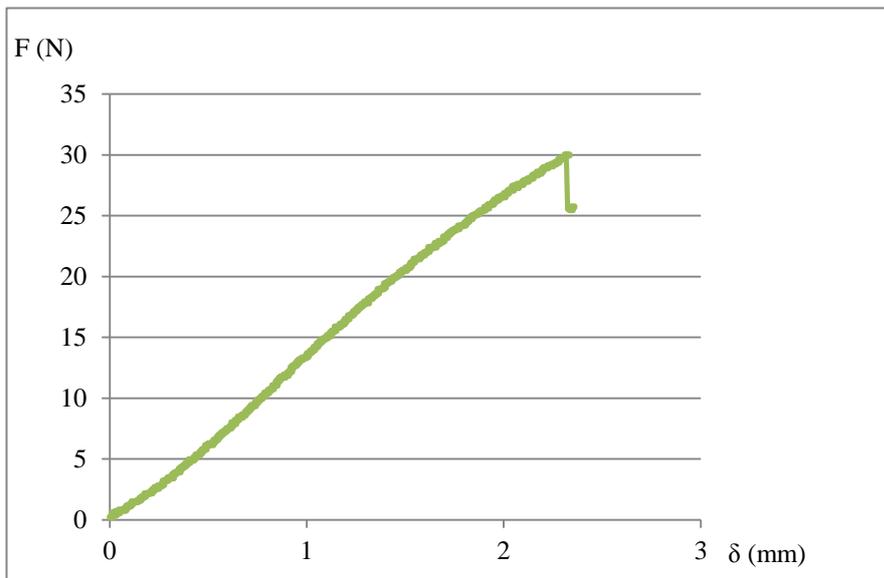
Tipo de fallo:

La rotura inicial se produce en la capa inferior por tracción aunque no rompe toda la fibra como en casos anteriores de poliéster.

Anexo B: Determinación de las propiedades de flexión de las probetas normalizadas reforzadas con epoxi

PROBETA: FE1

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 85 mm Ancho: 35 mm Espesor: 2,3 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 13,043 \text{ MPa}$$

$$E_f = 1.214,522 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_f = 1,15 \%$$

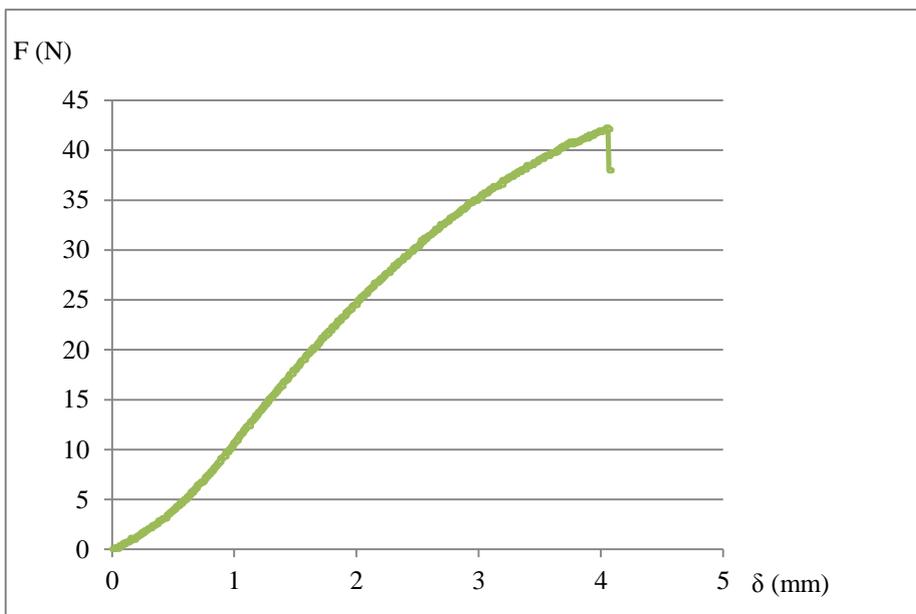
Tipo de fallo:

La rotura inicial se produce en la capa inferior, rompiendo antes el epoxi que las fibras de plátano. Se desgarran por las pequeñas burbujas de aire que se quedaron en la capa superficial.

PROBETA: FE2

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 86 mm Ancho: 25 mm Espesor: 3,2 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión



Parámetros:

$\sigma_f = 14,842 \text{ MPa}$

$E_f = 905,251 \text{ MPa}$

$\epsilon_f = 2,17 \%$

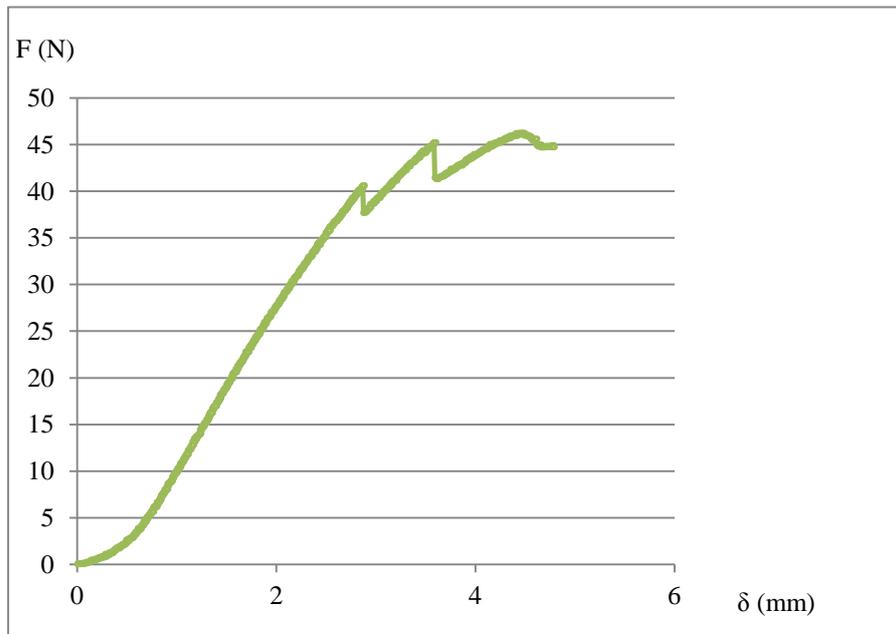
Tipo de fallo:



Tiene un comportamiento como la muestra FE1 y la rotura de la probeta se produce en la capa inferior por tracción.

PROBETA: FE3

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 85 mm Ancho: 25 mm Espesor: 3,3 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 15,289 \text{ MPa}$$

$$E_f = 1.066,146 \text{ MPa}$$

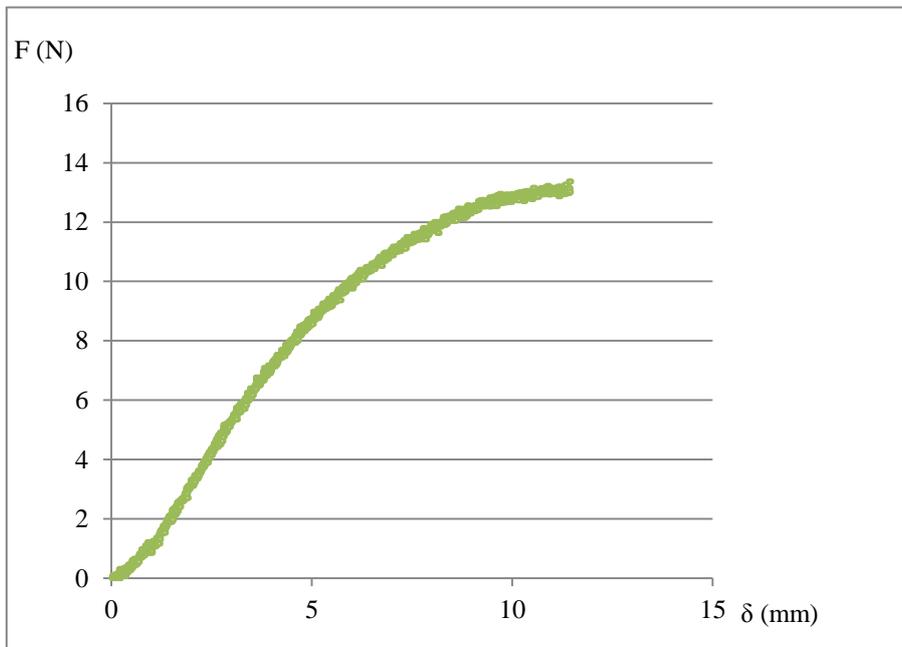
$$\varepsilon_f = 2,58 \%$$

Tipo de fallo:

En este caso empieza a fracturarse por un lado pero continua cargando hasta que rompe por el otro lateral y acaba con la rotura completa de la capa inferior. Este efecto se refleja en los saltos de la gráfica fuerza-deflexión.

PROBETA: FE4

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 84 mm Ancho: 24 mm Espesor: 1,8 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 15,462 \text{ MPa}$$

$$E_f = 828,703 \text{ MPa}$$

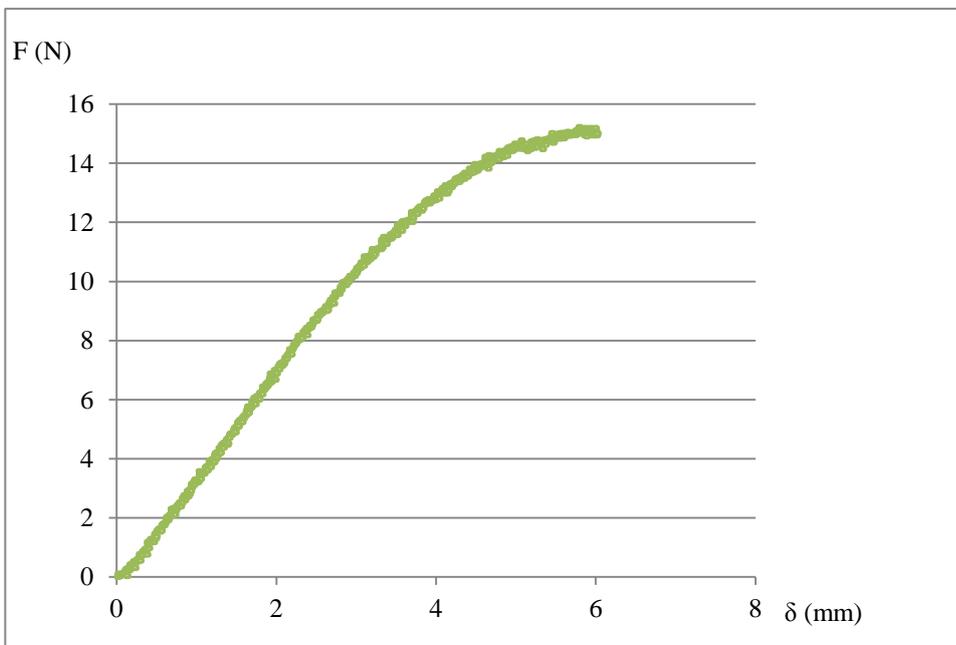
$$\varepsilon_f = 3,42 \%$$

Tipo de fallo:

Mismo comportamiento que las anteriores pero disminuye la carga máxima que soporta aunque hay un aumento en la deflexión. Rotura por tracción en la capa inferior.

PROBETA: FE5

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 87 mm Ancho: 23 mm Espesor: 2,3 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 11,257 \text{ MPa}$$

$$E_f = 708,188 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_f = 4,37 \%$$

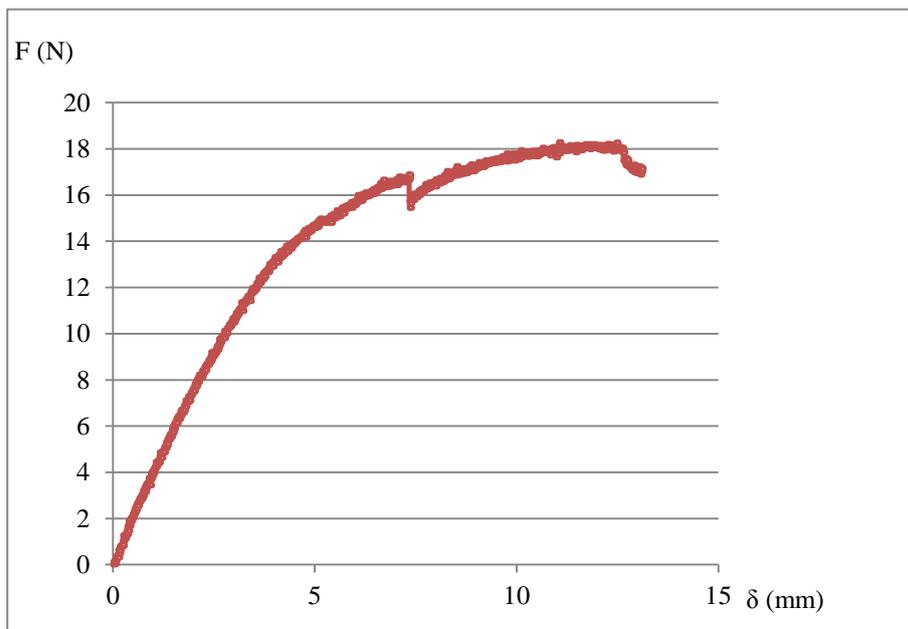
Tipo de fallo:

Se asemeja a la probeta FE4 al no soportar un valor elevado de carga como las demás pero es la que mayor deformación presenta. No hay rotura en la capa inferior sino entre las capas.

**Anexo C: Determinación de las propiedades a flexión de
las probetas normalizadas reforzadas con poliéster**

PROBETA: FP1

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 82 mm Ancho: 27 mm Espesor: 2,2 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 12,579 \text{ MPa}$$

$$E_f = 648,009 \text{ MPa}$$

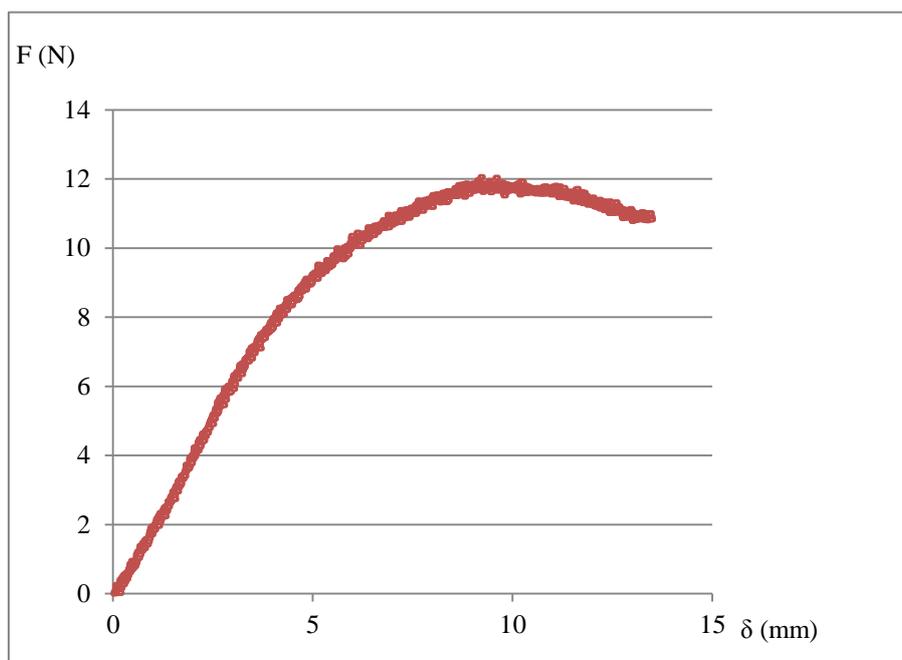
$$\varepsilon_f = 4,80 \%$$

Tipo de fallo:

A los 17 N hay una pequeña caída de la carga debida que comienza la rotura entre las capas superiores por falta de resina. Termina finalmente la rotura al separarse las capas.

PROBETA: FP2

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 86 mm Ancho: 26 mm Espesor: 1,8 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 12,870 \text{ MPa}$$

$$E_f = 769,231 \text{ MPa}$$

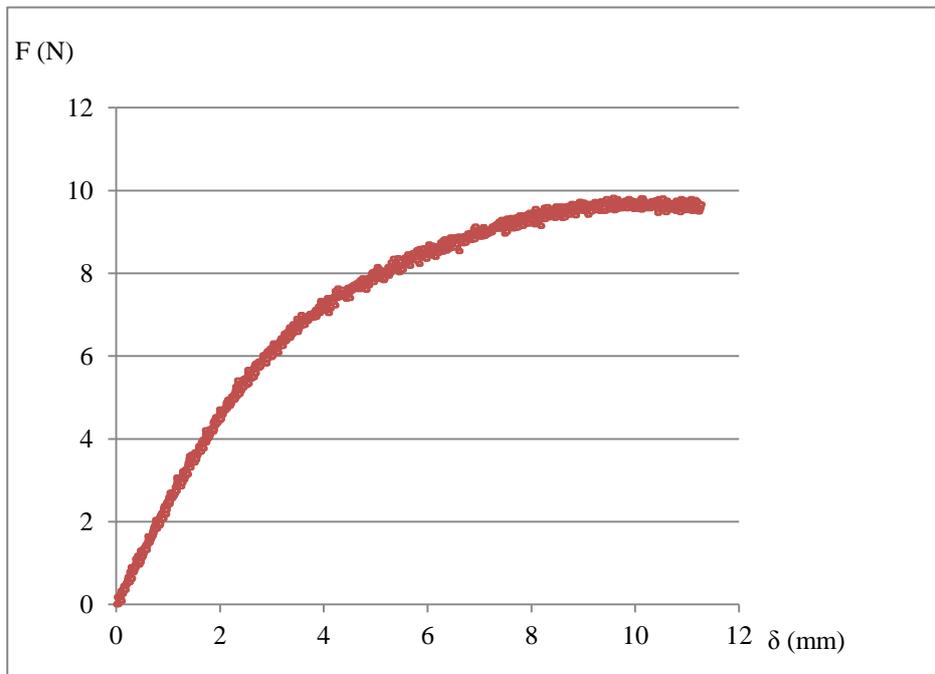
$$\varepsilon_f = 4,02 \%$$

Tipo de fallo:

La rotura de la probeta se produce en la capa inferior por tracción, además de una fisura en la capa superior.

PROBETA: FP3

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 85 mm Ancho: 26 mm Espesor: 1,7 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 11,753 \text{ MPa}$$

$$E_f = 851,821 \text{ MPa}$$

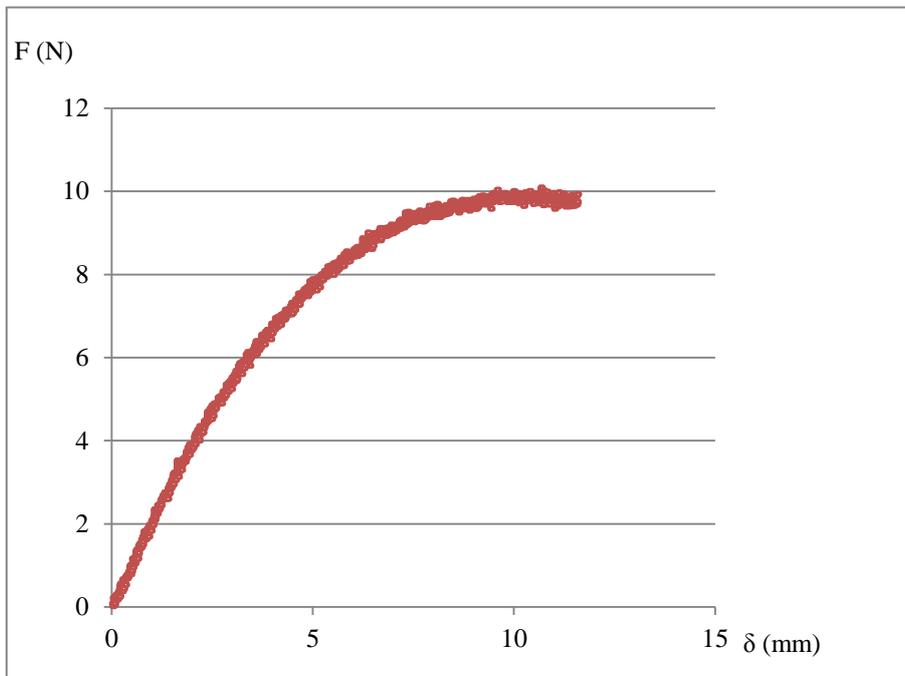
$$\varepsilon_f = 3,17 \%$$

Tipo de fallo:

El fallo que presenta es igual que la probeta FP1, donde no hay rotura en la capa inferior sino entre las capas.

PROBETA: FP4

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 87 mm Ancho: 26 mm Espesor: 1,8 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 10,767 \text{ MPa}$$

$$E_f = 584,045 \text{ MPa}$$

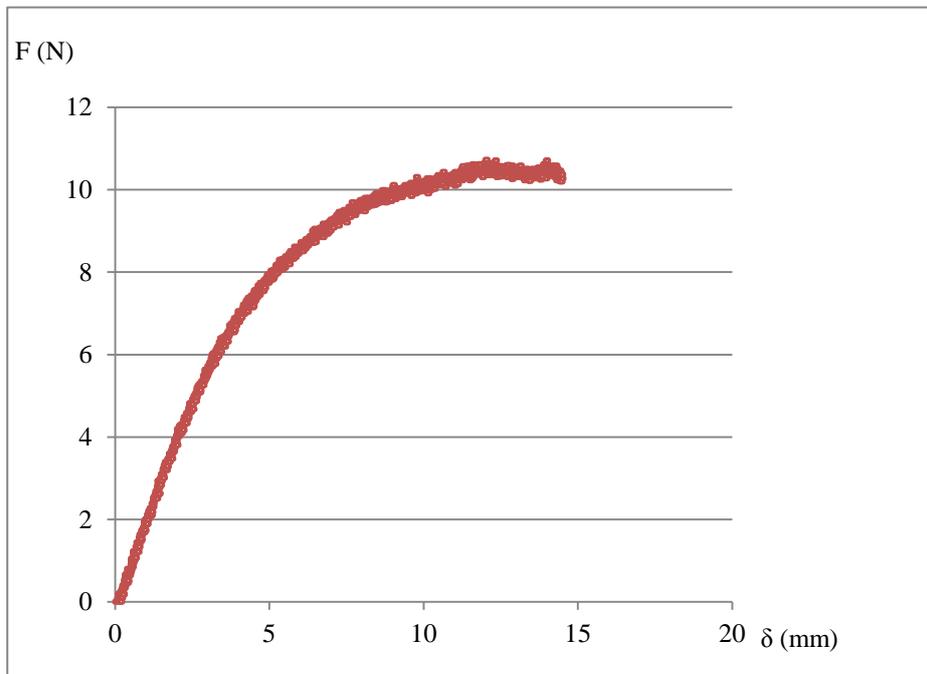
$$\varepsilon_f = 3,45 \%$$

Tipo de fallo:

En este caso se mantiene unos instantes alrededor de los 10 N de carga hasta que se produce la rotura por tracción en la capa inferior.

PROBETA: FP5

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 81 mm Ancho: 28 mm Espesor: 1,7 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 178. Método A. Distancia entre apoyos: 60 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva fuerza-deflexión**Parámetros:**

$$\sigma_f = 11,921 \text{ MPa}$$

$$E_f = 690,878 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_f = 4,11 \%$$

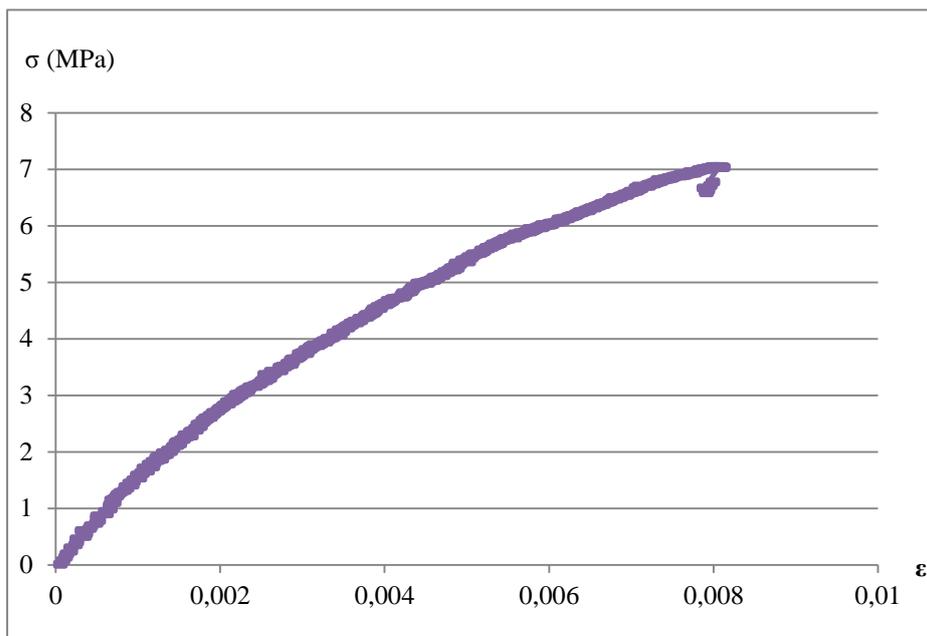
Tipo de fallo:

La fractura en esta probeta es la misma que en FP1 y FP3, donde no hay rotura en la capa inferior sino entre las capas.

**Anexo D: Determinación de las propiedades a tracción de
las probetas normalizadas reforzadas con epoxi**

PROBETA: TE1

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 255 mm Ancho: 30 mm Espesor: 3,5 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación**Parámetros:**

$$\sigma_t = 7,040 \text{ MPa}$$

$$E_t = 895,460 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_t = 0,81 \%$$

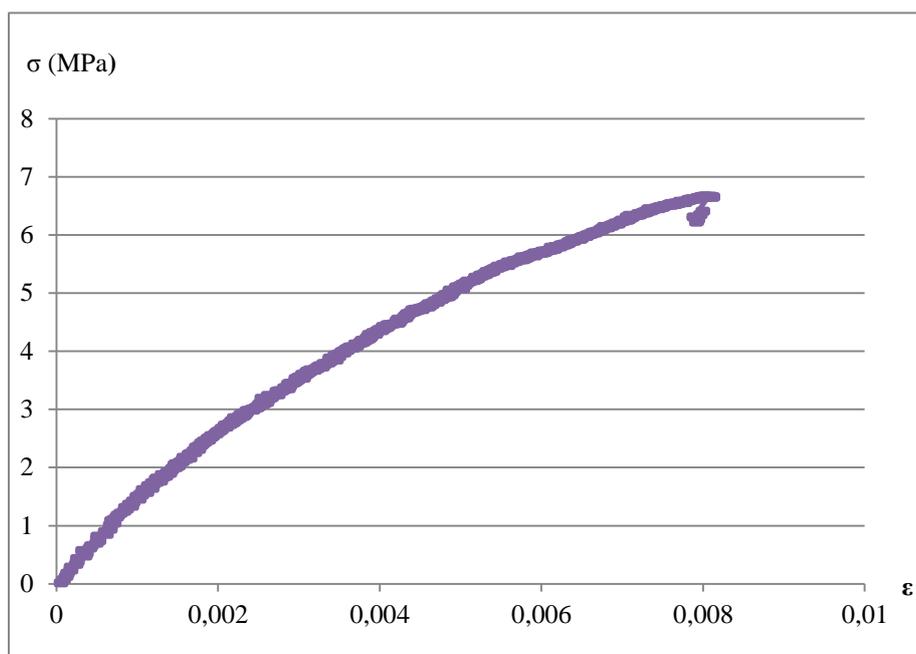
Tipo de fallo:

Se produce la rotura casi a la mitad de la probeta. Se fractura uno de los lados, dañando a una capa de las fibras de plátano.

PROBETA: TE2

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 255 mm Ancho: 30 mm Espesor: 3,7 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación



Parámetros:

$\sigma_t = 6,659 \text{ MPa}$

$E_t = 875,730 \text{ MPa}$

$\epsilon_t = 0,81 \%$

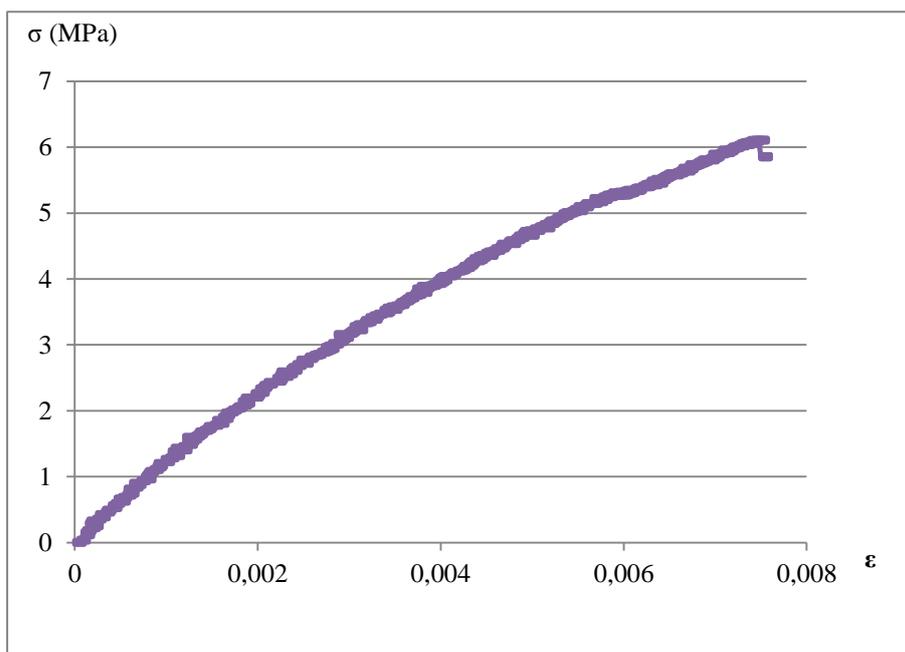
Tipo de fallo:



En este caso la rotura se produce de forma violenta en la zona de la mordaza, haciéndose un corte recto a lo largo de la probeta.

PROBETA: TE3

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 255 mm Ancho: 28 mm Espesor: 3,5 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación**Parámetros:**

$$\sigma_t = 6,105 \text{ MPa}$$

$$E_t = 728,980 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_t = 0,75 \%$$

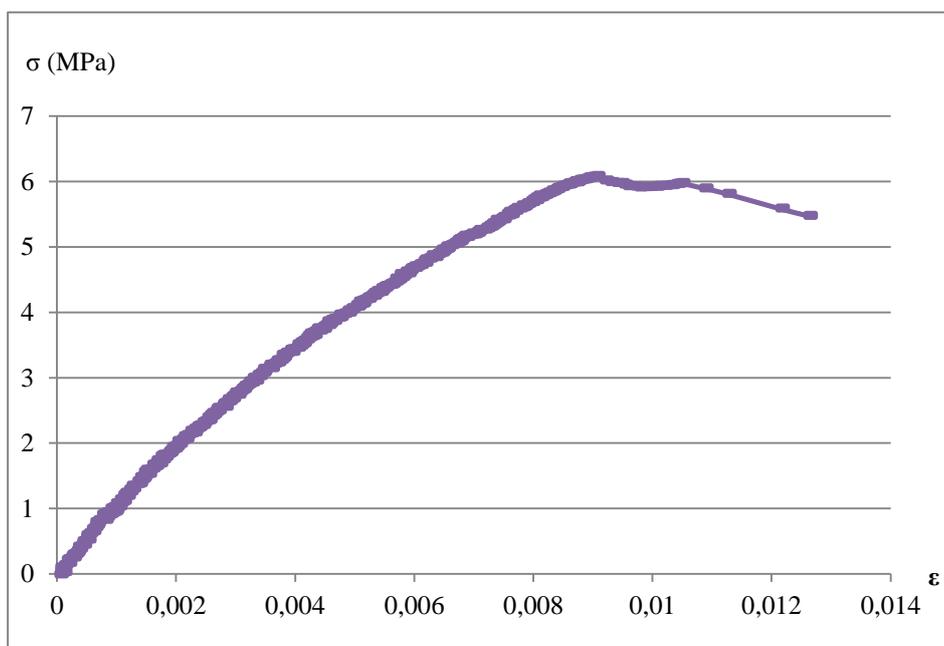
Tipo de fallo:

La rotura se produce en la mordaza, pero en este caso se rompen solo una capa de fibra de plátano de las tres capas que la conforman.

PROBETA: TE4

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 235 mm Ancho: 30 mm Espesor: 2,4 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación



Parámetros:

$\sigma_t = 6,091 \text{ MPa}$

$E_t = 839,620 \text{ MPa}$

$\epsilon_t = 1,2 \%$

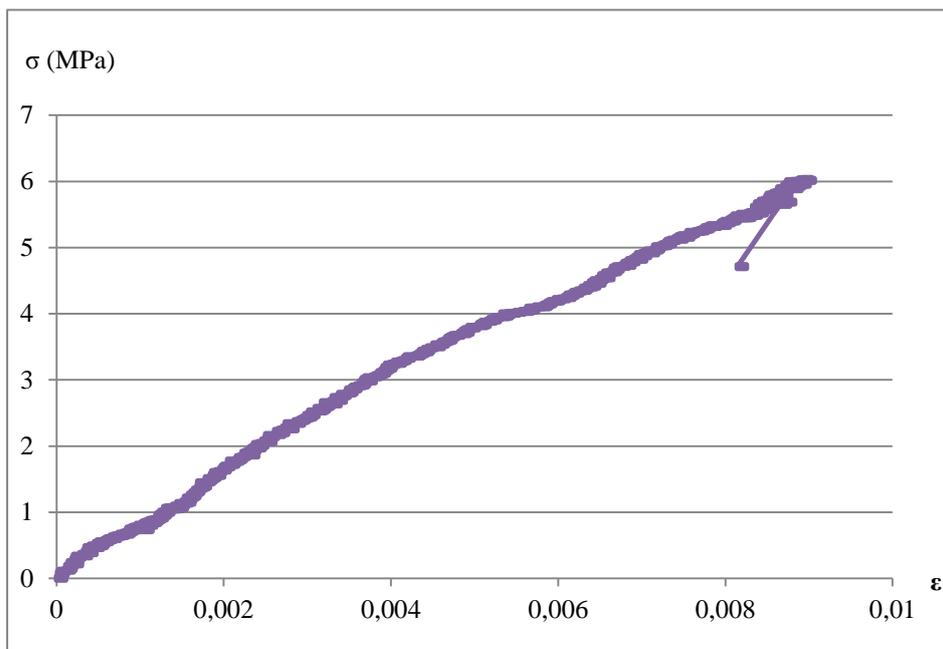
Tipo de fallo:



La fractura se efectuó en el centro de la probeta pero solo dañando a una capa de las fibras de plátano y el resto inalteradas, es por eso la desviación en la gráfica.

PROBETA: TE5

Composición	Resina: Epoxi + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 235 mm Ancho: 29 mm Espesor: 2,3 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación**Parámetros:**

$$\sigma_t = 6,023 \text{ MPa}$$

$$E_t = 756,27 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_t = 0,89 \%$$

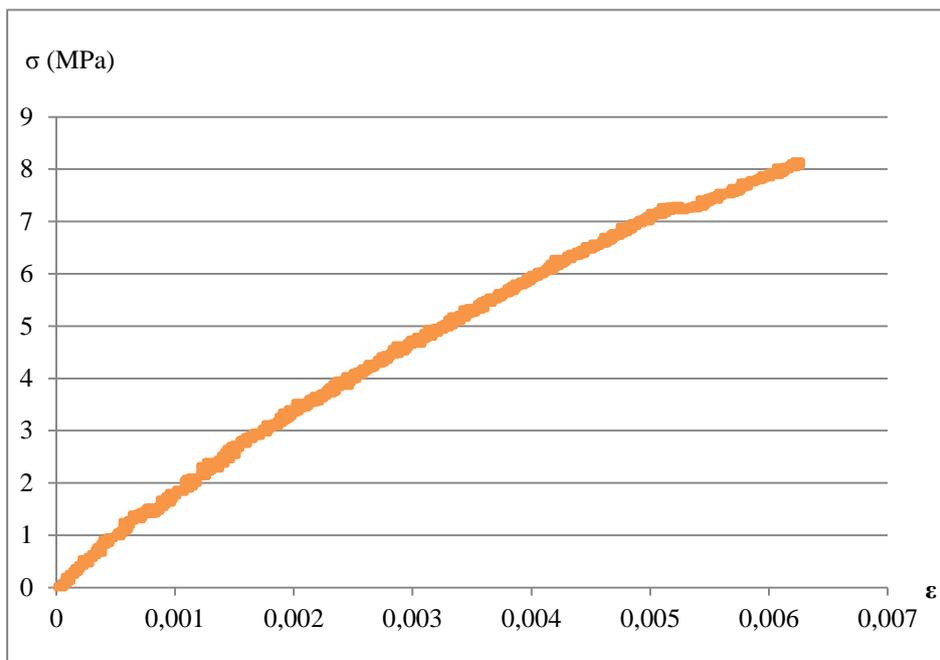
Tipo de fallo:

Cerca de la mordaza se observa la fractura parcial de la probeta en dirección diagonal.

**Anexo E: Determinación de las propiedades a tracción de
las probetas normalizadas reforzadas con poliéster**

PROBETA: TP1

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 237 mm Ancho: 30 mm Espesor: 2,4 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación**Parámetros:**

$$\sigma_t = 8,128 \text{ MPa}$$

$$E_t = 1.319,4 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_t = 0,62 \%$$

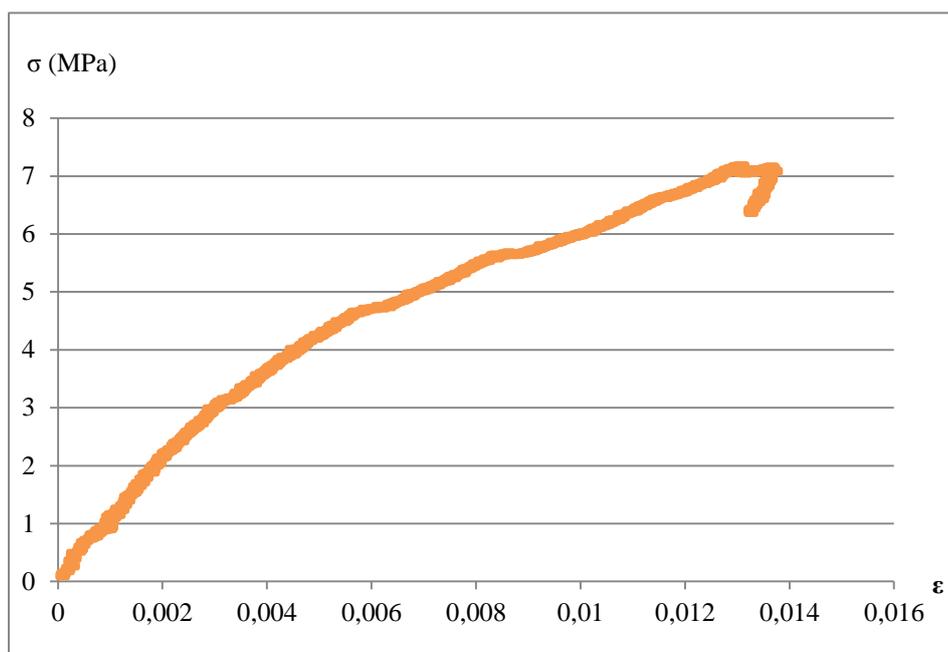
Tipo de fallo:

En este caso se producen varias fisuras del poliéster a lo largo de la probeta sin afectar a las fibras.

PROBETA: TP2

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 240 mm Ancho: 35 mm Espesor: 2,4 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación



Parámetros:

$\sigma_t = 7,169 \text{ MPa}$

$E_t = 716,480 \text{ MPa}$

$\epsilon_t = 1,36 \%$

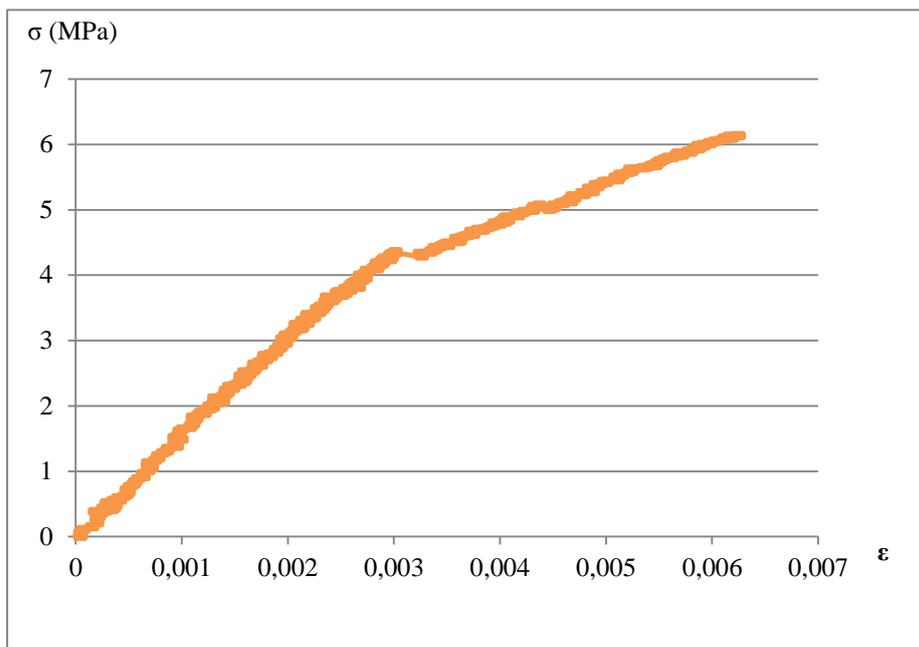
Tipo de fallo:



La fractura de la probeta se efectua de forma continua en la zona de la mordaza, quedando afectado un lado de la probeta, sin llegar a ser completa la rotura.

PROBETA: TP3

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 248 mm Ancho: 30 mm Espesor: 3,5 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación**Parámetros:**

$$\sigma_t = 6,527 \text{ MPa}$$

$$E_t = 1.446,700 \text{ MPa}$$

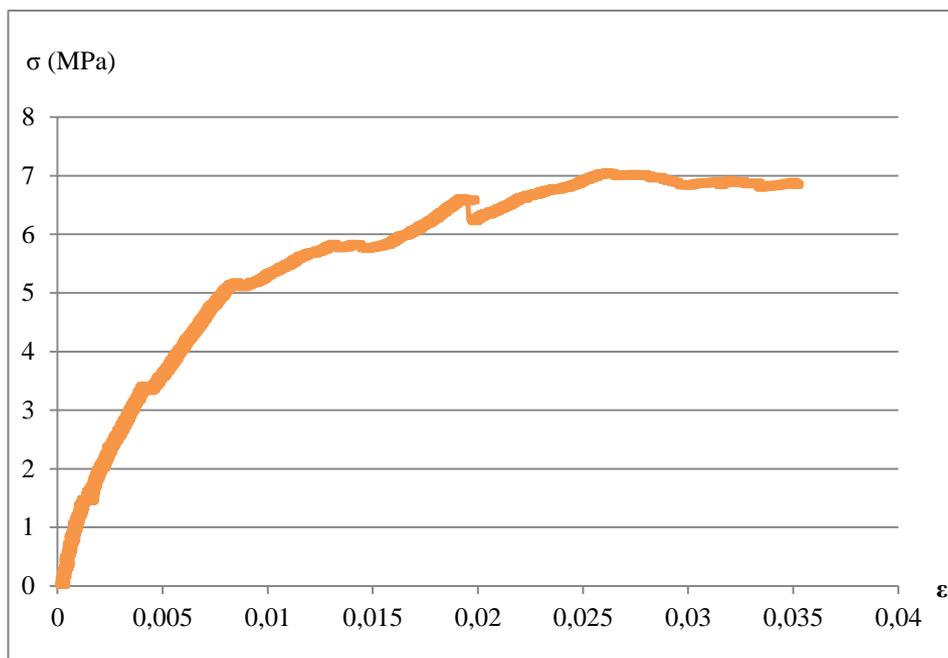
$$\varepsilon_t = 0,62 \%$$

Tipo de fallo:

La rotura de las fibras se aprecia a mitad de la probeta con una forma escalonada. El salto en la gráfica viene dado a que primero rompe el poliéster y después le sigue la fibra de plátano.

PROBETA: TP4

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 235 mm Ancho: 30 mm Espesor: 2,8 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación**Parámetros:**

$$\sigma_t = 7,044 \text{ MPa}$$

$$E_t = 736,780 \text{ MPa}$$

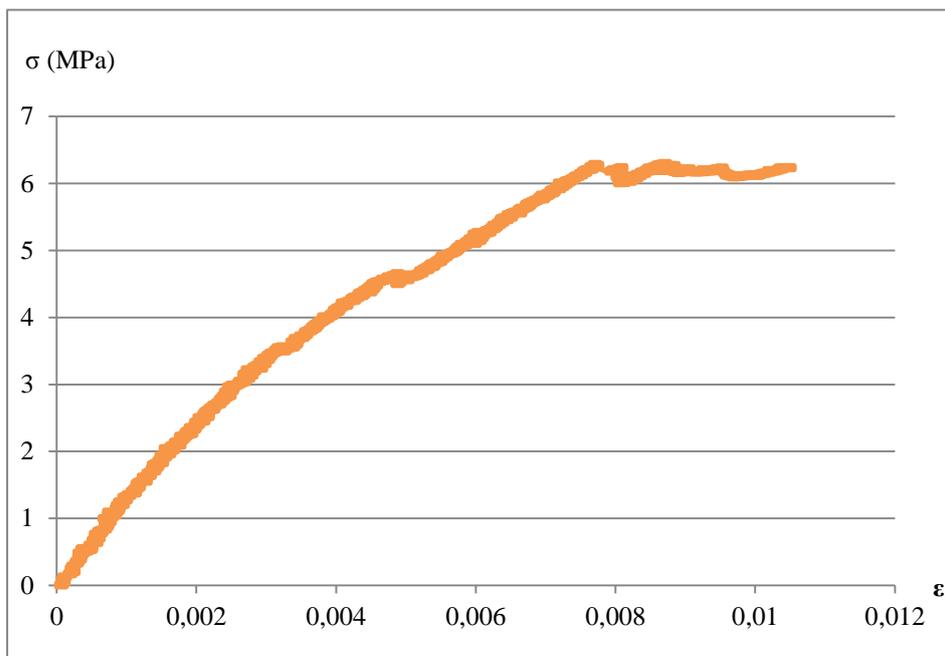
$$\epsilon_t = 3,49 \%$$

Tipo de fallo:

La rotura de la probeta es en forma diagonal afectando únicamente al poliéster. Los saltos vienen dados que aparte de la rotura principal se fue fracturando el poliéster en varios puntos a la vez.

PROBETA: TP5

Composición	Resina: Poliéster + Fibra: Plátano Nº de capas: 3 Orientación: Las tres capas están longitudinalmente (0°, 0°, 0°)
Dimensiones	Largo: 240 mm Ancho: 35 mm Espesor: 3,2 mm
Método de ensayo	Ensayo de flexión: Norma UNE-EN-ISO 527 Distancia mordazas: 150 mm Longitud de referencia: 50 mm Velocidad del ensayo: 2 mm/min

Gráfica: Curva esfuerzo-deformación**Parámetros:**

$$\sigma_t = 6,293 \text{ MPa}$$

$$E_t = 984,820 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_t = 1,42 \%$$

Tipo de fallo:

La fractura de la probeta es por una cara, afectando solo a una capa que la compone. El comportamiento en la gráfica explica que cuando rompe el poliéster continúa hasta la que fibra también se desgarró.

