

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales

Máster en Ingeniería Mecánica y Materiales



Trabajo Fin de Máster

CARACTERIZACIÓN DE LAMINADOS

DE FIBRA DE CARBONO-EPOXI REFORZADOS CON OXIDO DE GRAFENO

Alumna: Osiris Redondo Herrero

Directores: Santiago Ferrándiz Bou / David Busquets Matraix

Valencia, Mayo del 2014





AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por haberme apoyado, en todo momento, especialmente a mi madre y a mi abuela.

A mis directores, los profesores Santiago Ferrándiz Bou y David Busquets Matraix por su dedicación y todos los conocimientos que me han transmitido.

A Antoine Battin gran compañero de investigación.

A la Universidad Politécnica de Valencia. Por su personal técnico y docente que siempre están dispuestos a ayudar y por todas sus instalaciones.

Al ministerio de Educación y ciencia y a la Generalitat, por haberme becado, para poder cursar mis estudios.



RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación es la caracterización de laminados de tejido tafetán de fibra de carbono – epoxi, troquelados con diferentes orientaciones y reforzado con óxido de grafeno (GO), para analizar su comportamiento mecánico e incremento de propiedades, en particular módulo de elasticidad y resistencia al impacto.

En las instalaciones del departamento de ingeniería mecánica y de materiales de la UPV, se dispone de todos los materiales de partida para fabricar los compuestos con las diferentes configuraciones, para la obtención y funcionalización del óxido de grafeno y para la caracterización mecánica de los materiales obtenidos.

Para la caracterización de las propiedades mecánicas del material se utilizaron los ensayos de tracción y de flexión mediante la máquina universal de ensayos. Para la evaluación de la tenacidad se utilizó una máquina de impacto.

La conclusión fundamental obtenida en la presente investigación es que la adición de GO en las matrices epoxi consigue incrementar tanto el módulo de elasticidad de la misma como su resistencia al impacto.



INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	Pág. 6
1.1 Motivación	
1.2 Objetivos	
1.3 Aportaciones de la tesina	
1.4 Contenido	
CAPITULO 2. ANTECEDENTES.....	Pág. 9
2.1 Materiales compuestos	
2.2 Resinas/Matrices	
2.3 Fibra de Carbono	
2.4 Tejidos	
2.5 Laminados	
2.6 Grafeno.	
2.7 Ensayos mecánicos	
CAPITULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	Pág. 41
3.1 Material y Maquinaria empleada	
3.1.1 Material	
3.1.2 Maquinaria y útiles	
3.2 Fabricación de Oxido de grafeno funcionalizado por vía química.	
3.3 Fabricación de probetas de laminados de fibra de carbono –epoxi	
3.4 Ensayos del material	
3.4.1 Ensayos de tracción	
3.4.2 Ensayos de impacto y flexión	
3.5 Preparación de la mezcla del óxido de grafeno con la resina	
3.6 Fabricación del material compuesto reforzado con óxido de grafeno.	
3.7 Ensayos de las probetas reforzadas con óxido de Grafeno Funcionalizado.	
3.7.1 Ensayos de tracción	
3.7.2 Ensayos de impacto y flexión.	
3.8 Comparación de resultados del material reforzado y sin reforzar	
3.8.1 Comparación ensayos de tracción	
3.8.2 Comparación de ensayos de impacto y flexión	
3.8.3 Comparación de densidades.	
CAPITULO 4. FRACTOGRAFIA.....	Pág. 109
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	Pág. 116
CAPITULO 6. PROUESTAS DE INVESTIGACIONES FUTURAS.....	Pág. 118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	Pág. 120



Capítulo 1

INTRODUCCIÓN



1.1 MOTIVACIÓN

Cada vez se tiende más a hacer productos que pesen poco y tengan resistencia. Por ejemplo Aviones, coches, para reducir el gasto de combustible, raquetas de tenis, cañas de pescar, tablas de snowboard, equipamiento deportivo. En todos estos productos se busca reducir peso para hacerlos más ergonómicos y económicos.

La fibra de carbono es uno de los materiales más ligeros y rígidos, que existen hoy en día, si se le añade oxido de grafeno funcionalizado de refuerzo y se aumentan sus propiedades de resistencia a tracción, impacto y flexión esto mejoraría el servicio de todos los productos citados anteriormente.

1.2 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo de investigación es la caracterización de laminados de tejido tafetán de fibra de carbono – epoxi, troquelados con diferentes orientaciones y dopado con grafeno, para analizar su comportamiento mecánico e incremento de propiedades.

El objetivo práctico o aplicado del presente trabajo de investigación, es caracterizar las propiedades mecánicas del material dopado con oxido de grafeno, para posibles aplicaciones en aeronáutica, automóviles, raquetas, cañas de pescar o equipamiento deportivo.



1.3 APORTACIONES DE LA TESINA.

Las principales aportaciones realizadas en esta Tesina se presentan a continuación:

- Se explica el procedimiento para la fabricación de material compuesto.
- Basándose en procedimientos anteriores se muestra que pasos seguir para la incorporación del óxido de grafeno al material compuesto de fibra de carbono-epoxi.
- Se ha hecho una caracterización del material compuesto, tejido tafetán de fibra de carbono con resina epoxi.
- Se ha documentado la fabricación y caracterización del material compuesto dopado con óxido de grafeno funcionalizado.

1.4 CONTENIDO

La presente Tesina consta de cinco capítulos, que se describen a continuación:

En el primer capítulo se recogen los diferentes motivos que justifican la realización de este trabajo, los objetivos planteados, las principales aportaciones realizadas con su desarrollo.

El capítulo 2, denominado antecedentes, muestra una recopilación de las investigaciones realizadas por diferentes autores.

En el capítulo 3 se presenta la metodología desarrollada para la realización de la parte experimental.

En el capítulo 4 se muestran imágenes tomadas con el Microscopio de barrido electrónico.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones.



Capítulo 2

ANTECEDENTES



2. INTRODUCCIÓN – CONTEXTO

En el presente capítulo se recoge una síntesis de la revisión bibliográfica que se realizó a lo largo del desarrollo de esta Tesina.

En la introducción se va a abordar en un sentido amplio lo que son los materiales compuestos reforzados con fibras y sus propiedades, resinas, aplicaciones e investigaciones.

En este espacio se van a explicar conceptos básicos de la teoría clásica de los laminados.

Se citan las características del grafeno, propiedades y métodos para obtenerlo.

Además se hace una breve descripción de que es Nanstram y la importancia de la simulación de elementos finitos.

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Definición material compuesto

Se entiende por materiales compuestos aquellos formados por dos o más materiales distintos sin que se produzca reacción química entre ellos.

En todo material compuesto se distinguen dos componentes:

- *La MATRIZ*, componente que se presenta en fase continua, actuando como ligante.
- *El REFUERZO*, en fase discontinua, que es el elemento resistente.

Las propiedades mecánicas del compuesto dependen de la calidad de la unión en la superficie de contacto matriz/fibra.

Esta calidad de unión depende, a su vez de las propiedades de la fibra y del grado de transmisión del esfuerzo de la matriz a la fibra.

Características materiales compuestos reforzados con fibras

Presentan elevada resistencia.

- Baja densidad
- Elevadas propiedades específicas

Fase matriz

- Une (cohesiona las fibras), es dúctil, poco resistentes
- Distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos.
- Protege las fibras del deterioro (abrasión y medio ambiente).
- Actúa como barrera para evitar la propagación de grietas.

Fase Refuerzo: Fibras

- Deben tener alta resistencia a tracción
- Tipos: fibras (son las más importantes) policristalinas o amorfas (poliméricas y cerámicas); whiskers: monocristalinas, casi sin defectos, insertos o alambres.

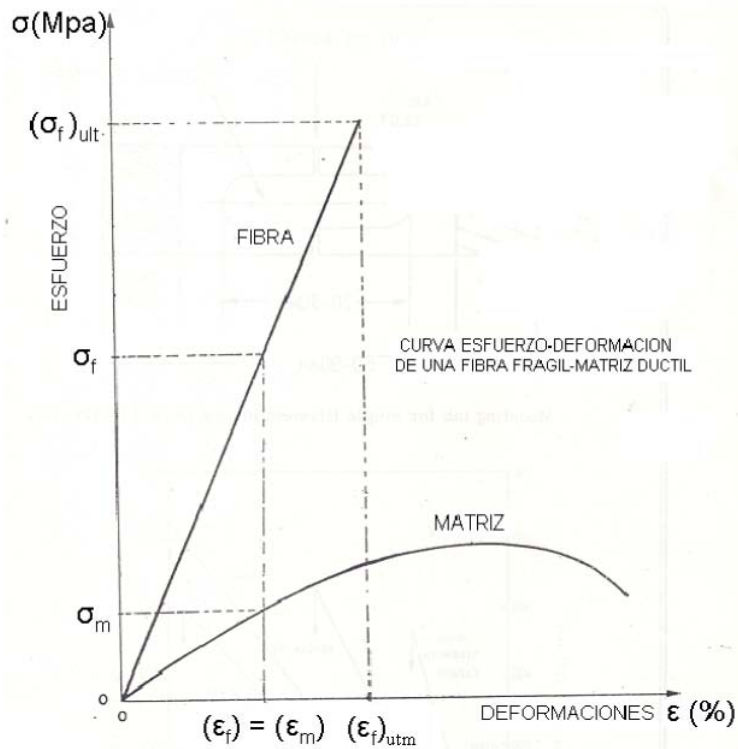


Figura 1: grafica que representa la resistencia y deformación de la fibra y matriz por separado.

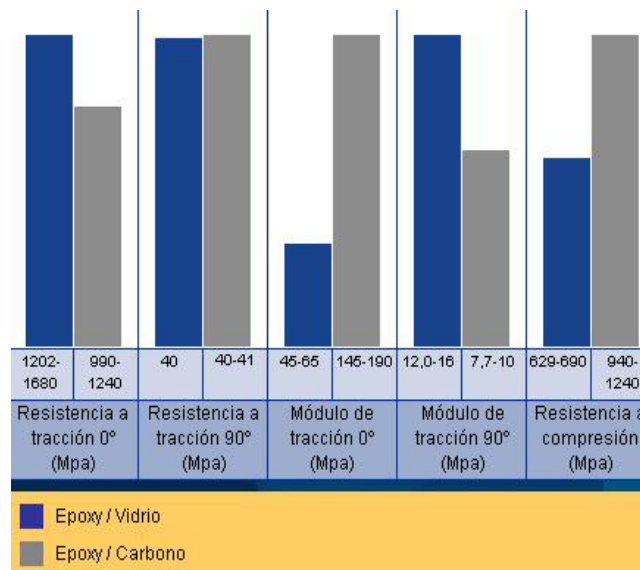


Figura 2: grafico que compara las propiedades de diferentes materiales compuestos.



2.2 RESINAS/ MATRIZ

Epoxi

Resinas termoestables son las de uso más general en altas prestaciones, con una temperatura máxima de uso en torno a los 170°.

Se presentan en forma líquida más o menos viscosa que pueden transformarse en material sólido infusible mediante la acción de endurecedores.

El tipo de epóxido, el catalizador o los agentes de reticulación, influyen en las características finales del sistema, como por ejemplo, la resistencia térmica, la ductilidad, y como no, el modo de endurecimiento.

La propiedad más destacable de las resinas epoxi es su buena capacidad de adhesión a una gran variedad de refuerzos lo que permite producir composites con un alto contenido en fibra.

Se caracterizan además por mostrar una muy baja contracción durante el curado, así como por sus excelentes propiedades eléctricas, químicas y térmicas.

Características deseadas en la matriz de resina.

- Buena adhesión a las fibras.
- Resistencia a los disolventes & agentes químicos.
- Baja absorción de la humedad.

- Alta resistencia
- Alta elongación elástica
- Alto modulo
- Alta resistencia a cortadura
- Alta resistencia al impacto
- Bajo “creep” a la temperatura de servicio
- Resistencia a la degradación térmica
- Expansión térmica cercana a la fibra
- Baja absorción de la humedad

- Buenas propiedades de “moje” con las fibras
- Buenas características de flujo
- Rápido curado o solidificación
- Largo tiempo de vida “shelf-life” y de aplicación “pot-life”
- Baja contracción durante y después del moldeo
- Temperatura de curado lo más cercana a temperatura ambiente.
- Bajo coste
- Baja densidad
- Baja constante dieléctrica
- Baja absorción de la humedad

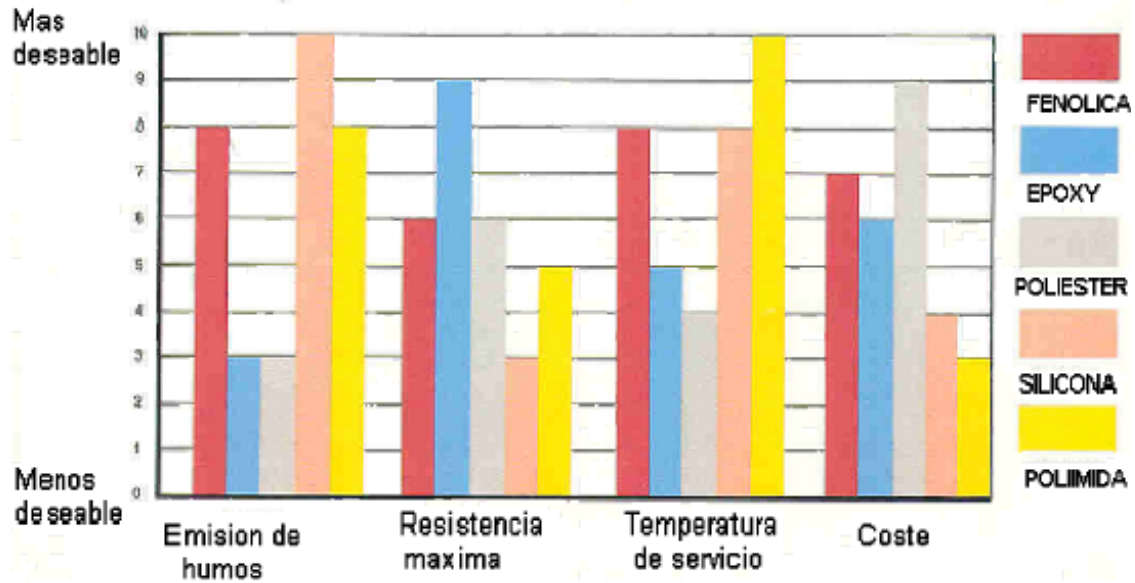


Figura 3. Grafico de las propiedades de distintas resinas.

Material	Densidad ρ , [g/cm ³]	Módulo elástico E , [GPa]	Resistencia tracción S_p , [MPa]	Alargamiento [%]	Coef. Poisson ν	Módulo específico [E/ρ]	Resist. específica [S_p/ρ]
<i>Termoplásticos</i>							
PEEK (*)	1,30 – 1,32	3,24	100,0	50	0,4	2,5	76,3
PPS (†)	1,36	3,3	82,7	4	—	2,4	60,8
<i>Termoestables</i>							
Poliéster	1,1 – 1,4	2,1 – 3,4	34,5 – 103,5	1 – 5	—	2,2	55,2
Epoxy	1,38	4,6	58,6	—	0,36	5,5	74,0
Poliamida	1,46	3,5	103,0	—	0,35	2,4	70,5

Figura 4. Grafica de las propiedades de distintas resinas.

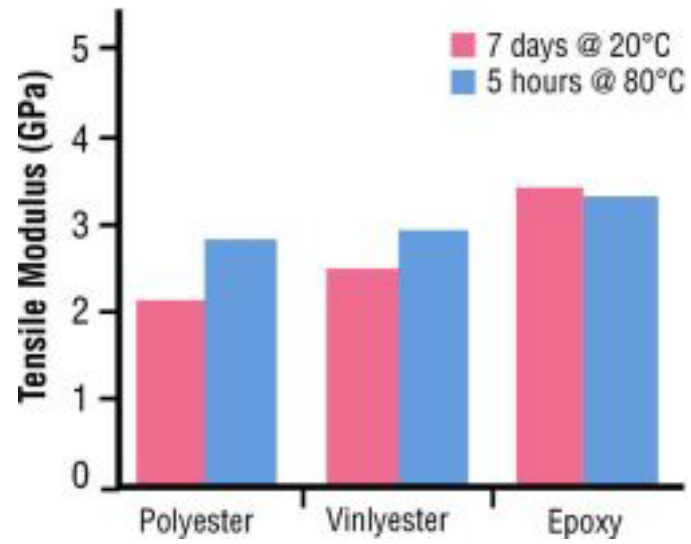


Figura 5. Grafico de las propiedades de rigidez.

2.3 FIBRA DE CARBONO

Fibras de carbono

- Las fibras de carbono se obtienen mediante la carbonización de PAN (polyacrylnitrile) en condiciones controladas.
- Inicialmente desarrolladas durante 1950-1960 para aplicaciones aeroespaciales, las fibras de carbono han llegado a ser cada vez más aplicadas en la última década.
- Inicialmente con un alto coste (> 100 US\$/kg), que ha ido reduciéndose hasta 20 US\$/kg, e incrementando, por tanto, el rango de aplicaciones posibles.
- Altas características específicas

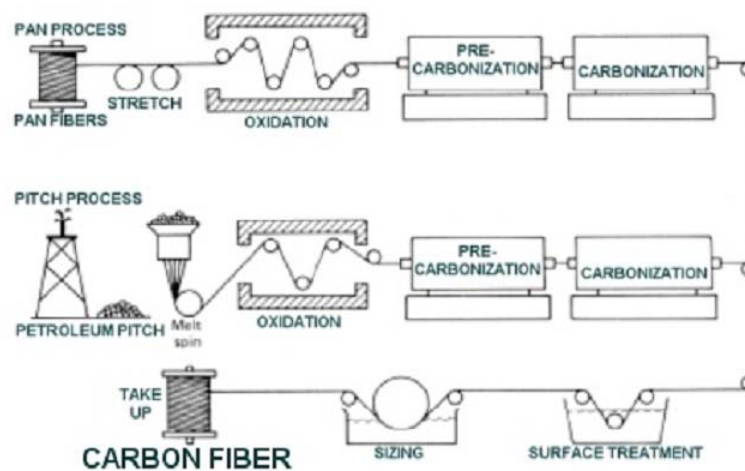


Figura 6. Fabricación de la fibra de carbono.

- Excelente resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, para un peso específico muy bajo de $1,75 \text{ g/cm}^3$.
- Resistencia a muy altas temperaturas.
- Conductividad eléctrica.
- Excelente comportamiento bajo carga dinámica.
- Las fibras de carbono se obtienen mediante la carbonización de PAN (polyacrylnitrile) en condiciones controladas.
- Inicialmente desarrolladas durante 1950-1960 para aplicaciones aeroespaciales, las fibras de carbono han llegado a ser cada vez más aplicadas en la última década.
- Inicialmente con un alto coste (> 100 US\$/kg), que ha ido reduciéndose hasta 20 US\$/kg, e incrementando, por tanto, el rango de aplicaciones posibles.

- Altas características específicas

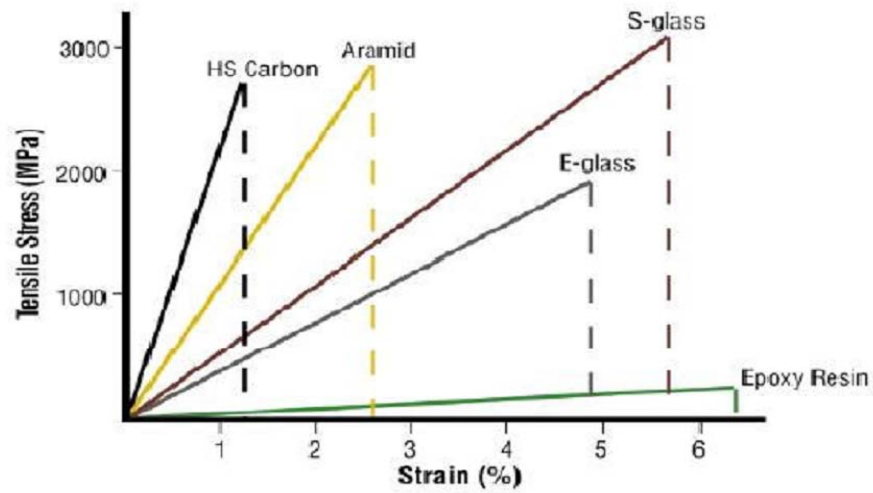


Figura 7. Gráfico de las propiedades mecánicas de distintas fibras.

Typical Lot Average Properties

Fiber Type	Number of Filaments	Tensile Strength (ksi / MPa)		Tensile Modulus* (Msi / GPa)		Strain** (%)	Weight/Length (g/m)	Density (g/cm ³)	Standard Spool Size (lb)
AS4C	3000	650	4482	33.5	231	1.8	0.200	1.78	4.0
	6000	625	4309	33.5	231	1.7	0.400	1.78	4.0
	12000	635	4378	33.5	231	1.8	0.800	1.78	8.0
AS4D	12000	685	4723	35.0	241	1.8	0.765	1.79	8.0
AS7	12000	645	4447	36.0	248	1.7	0.800	1.79	8.0
IM2A	12000	770	5309	40.0	276	1.7	0.446	1.78	4.0
IM2C	12000	830	5723	43.0	296	1.8	0.446	1.78	4.0
IM8	12000	870	5998	45.0	310	1.8	0.446	1.78	4.0
IM9	12000	890	6136	44.0	303	1.9	0.335	1.80	2.0
IM10	12000	1010	6964	45.0	310	2.0	0.324	1.79	2.0
AS4	3000	670	4619	33.5	231	1.8	0.210	1.79	4.0
	6000	640	4413	33.5	231	1.7	0.427	1.79	4.0
	12000	640	4413	33.5	231	1.7	0.858	1.79	8.0
IM6	12000	830	5723	40.5	279	1.9	0.446	1.76	8.0
IM7	6000	800	5516	40.0	276	1.9	0.223	1.78	4.0
	12000	820	5654	40.0	276	1.9	0.446	1.78	4.0

*Tensile Modulus Calculated as Chord (6000 - 1000)

**Strain at Failure

Information can be used for material selection purposes only

Figura 8. Gráfica de las características de distintos tipos de fibra de carbono de la empresa Hexcel

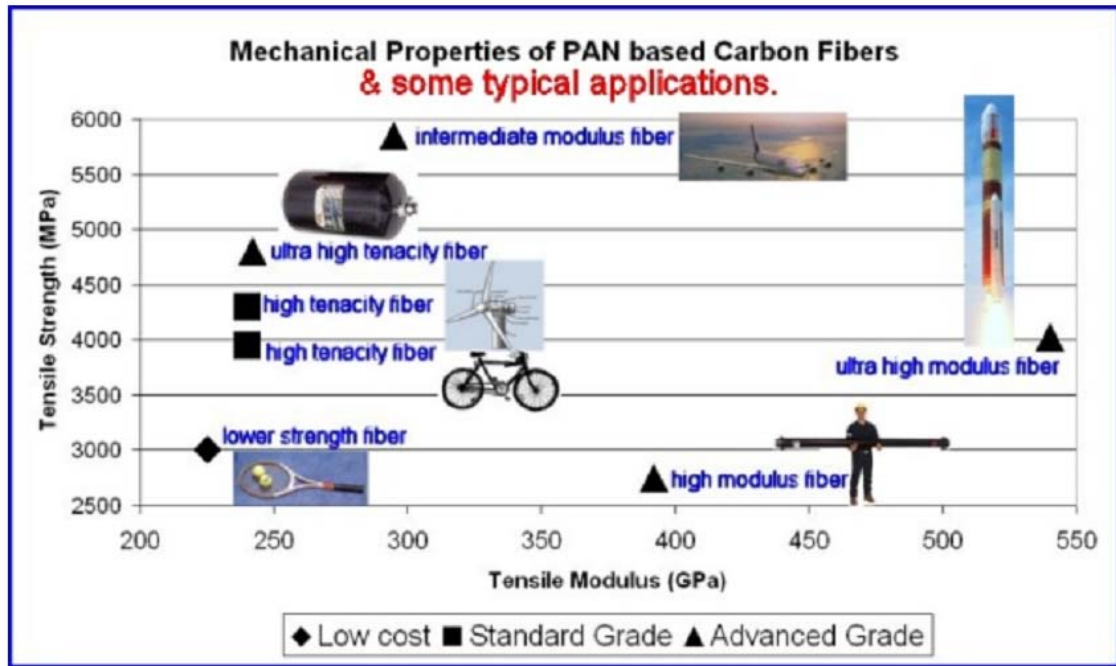


Figura 9. Gráfico de las propiedades mecánicas de la fibra de carbono y sus aplicaciones típicas.

2.4 TEJIDOS.

Hay diferentes formas de servir la fibra de carbono, una de las más comunes son las bobinas de tejidos.

Los tejidos más comunes son los de calada con la orientación de la fibra en dos direcciones la más habitual 0/90 y el tejido multiaxial donde las fibras están orientadas en cualquier ángulo de los 360°.

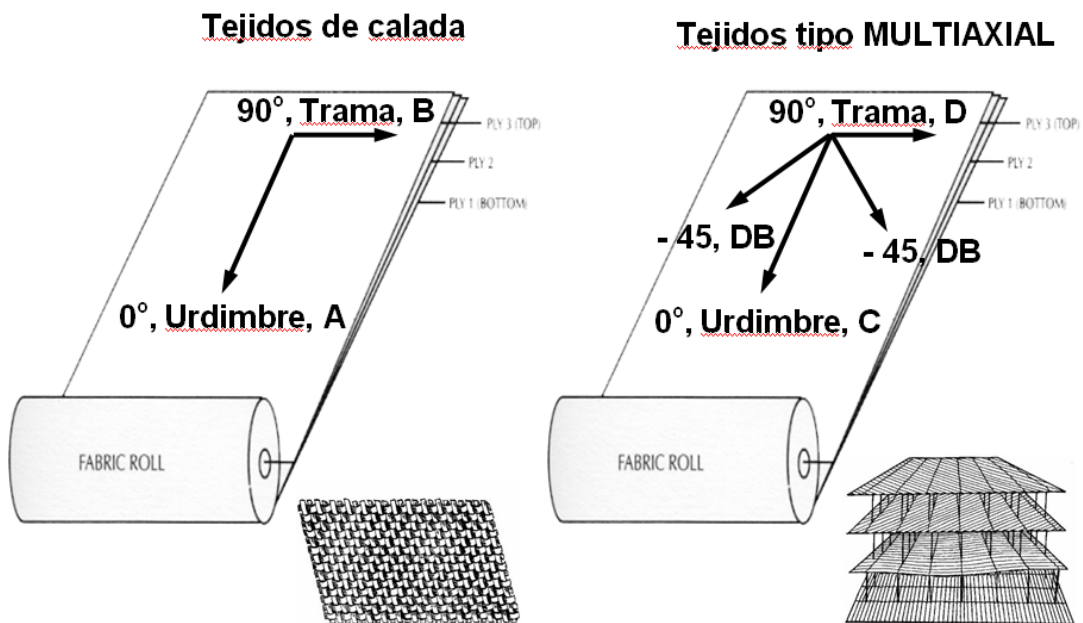


Figura 10. Tejidos de calada y de tipo multiaxial.

TAFETÁN (A)
ESTERILLA (B)
SEMIESTERILA (C)
SARGA (D)
RASO (E)
SATÉN DE ESPIGUILLA (F)

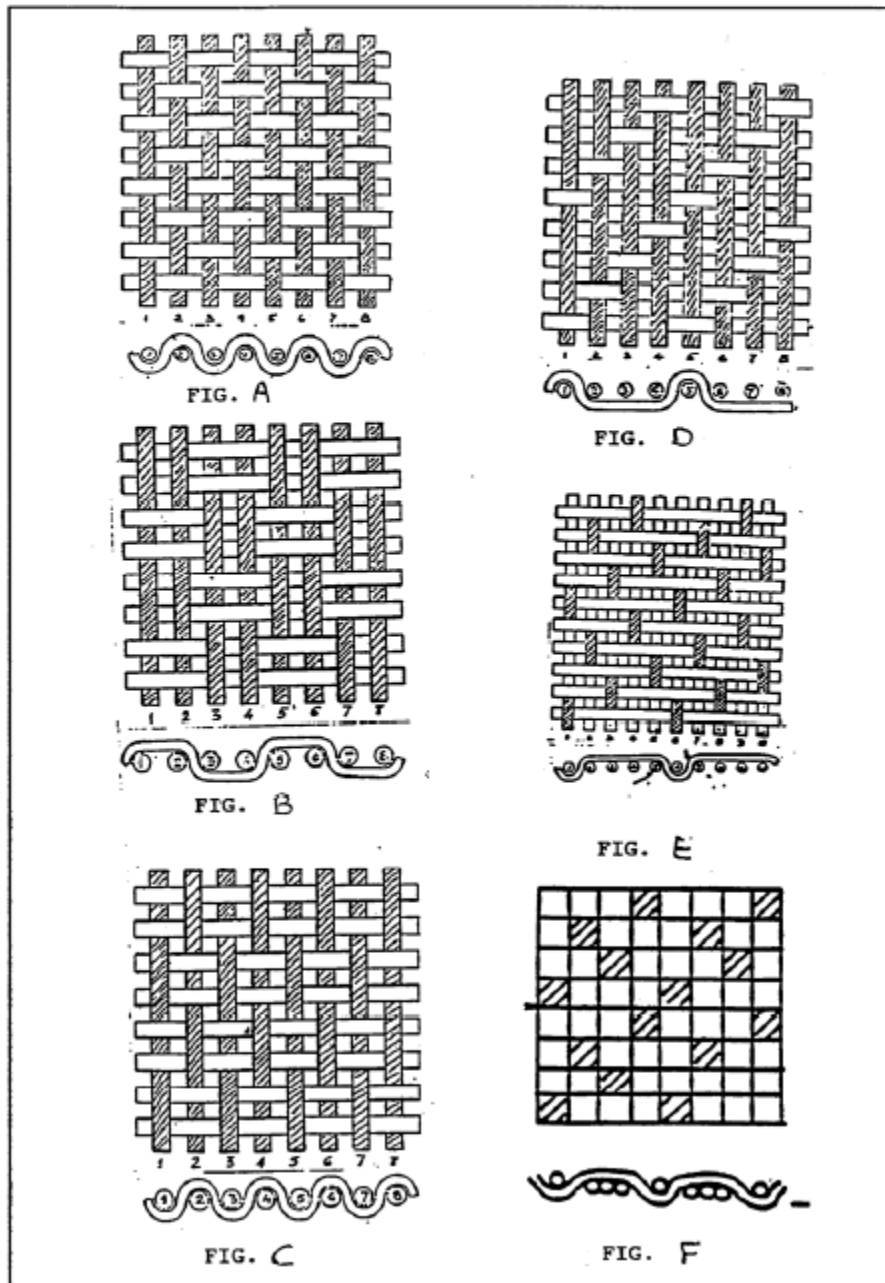


Figura 11. Tipos de tejidos de fibra de carbono.

2.5 LAMINADOS

Un laminado está formado por capas (láminas) de uno o más materiales, unidas entre sí.

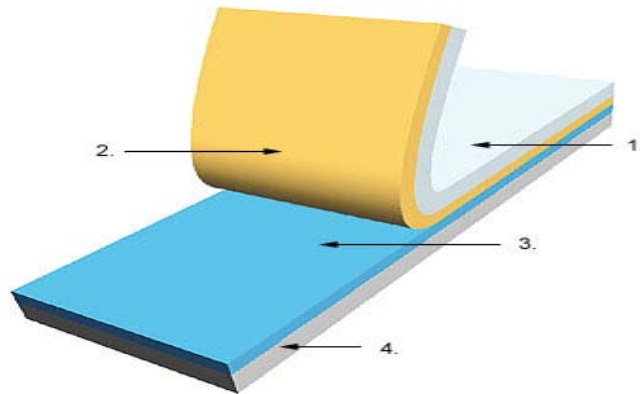


Figura 12. Laminado.

Un laminado de material compuesto está formado por una o más láminas que pueden tener distintos componentes u orientaciones.

Esta tesina está basada en la fabricación y comportamiento mecánico de laminados de fibra de carbono seguidamente se cita la teoría clásica de los laminados.

TEORIA CLASICA DE LOS LAMINADOS

Laminado: Conjunto de láminas, generalmente unidireccionales, con una dimensión mucho menor que las otras dos, colocadas unas sobre otras y unidas entre sí.

- Es la mejor opción cuando los esfuerzos principales son en el plano del laminado (**esfuerzos de membrana**).

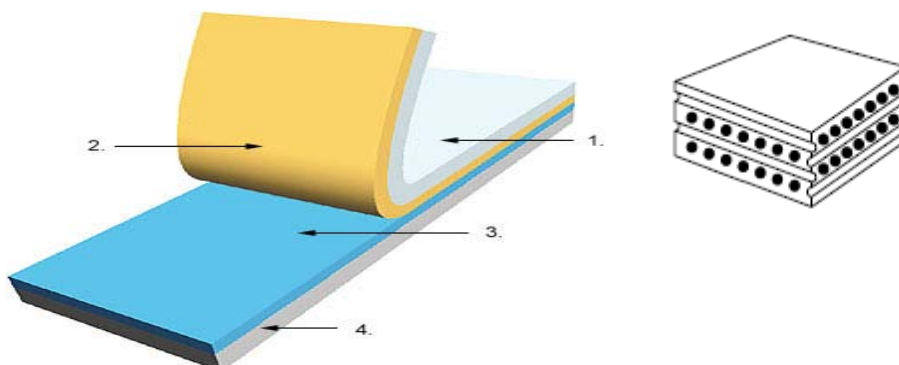


Figura 13. Laminados.

- **ESTRUCTURA EMPAREDADO (“SANDWICH”)**: Configuración de dos materiales con dos láminas más rígidas y resistentes entre las que se coloca una lámina de mayor espesor de un material con peores características.

- Es una buena opción para soportar **esfuerzos de flexión**.

NOMENCLATURA

LAMINADO SIMÉTRICO: Es aquel en que la secuencia de láminas, materiales y orientaciones son simétricas respecto al plano medio del laminado.

CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN (Tsai):

- Sistema de referencia de figura.
- Láminas y orientaciones se comienzan a numerar desde la capa superior.
- Si es simétrico se define hasta la capa media y se utiliza un subíndice **S**. Si no lo es se define todo y se utiliza una **T**.
- Si hay láminas contiguas iguales se indica con un subíndice numérico.
- Si hay sublaminados contiguos iguales se indica con un subíndice numérico.

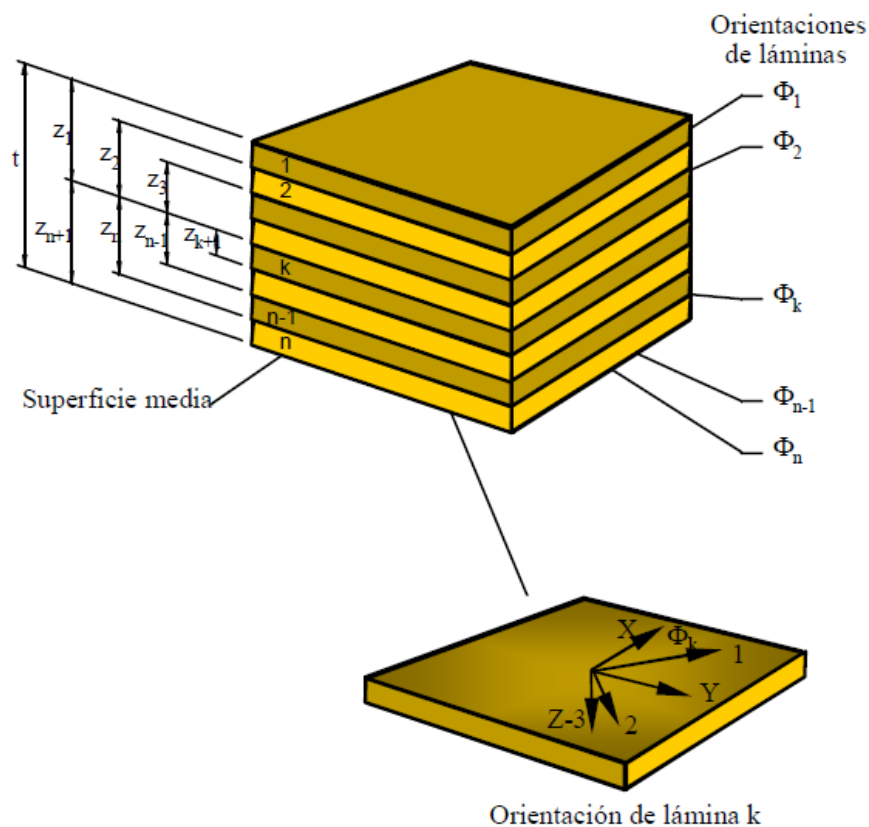


Figura 14. Imagen de un laminado con nomenclatura.

Ejemplo de nomenclatura:

El mismo laminado se puede identificar mediante:

- $[0_3/90_2/45/-45_3]_{2S}$
- $\{[0_3/90_2/45/-45_3]_2\}_S$
- $[0_3/90_2/45/-45_3/0_3/90_2/45/-45_3/-45_3/45/90_2/0_3/-45_3/45/90_2/0_3]_{1T}$

Figura 15. Ejemplos de nomenclatura.

TEORIA CLASICA DE LAMINADOS. MATRICES Y VECTORES

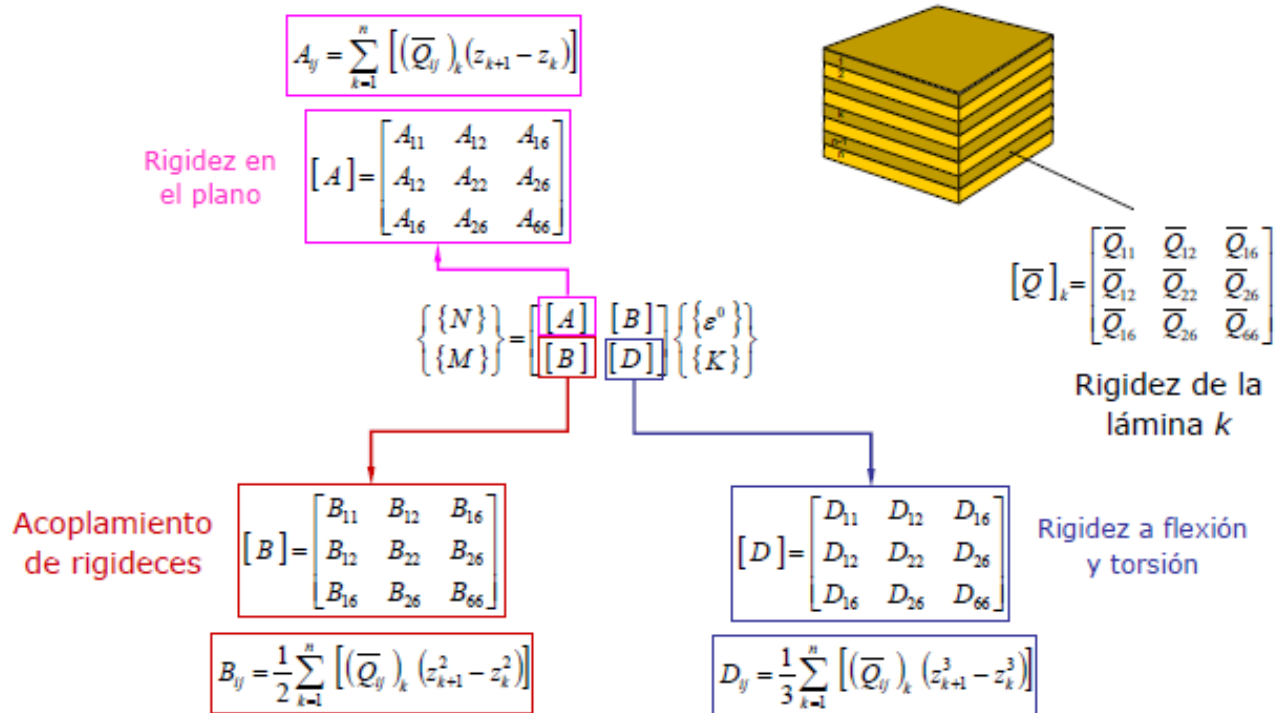


Figura 16. Matrices y vectores.

ACOPLAMIENTO FLEXIÓN Y TORSIÓN CON MEMBRANA

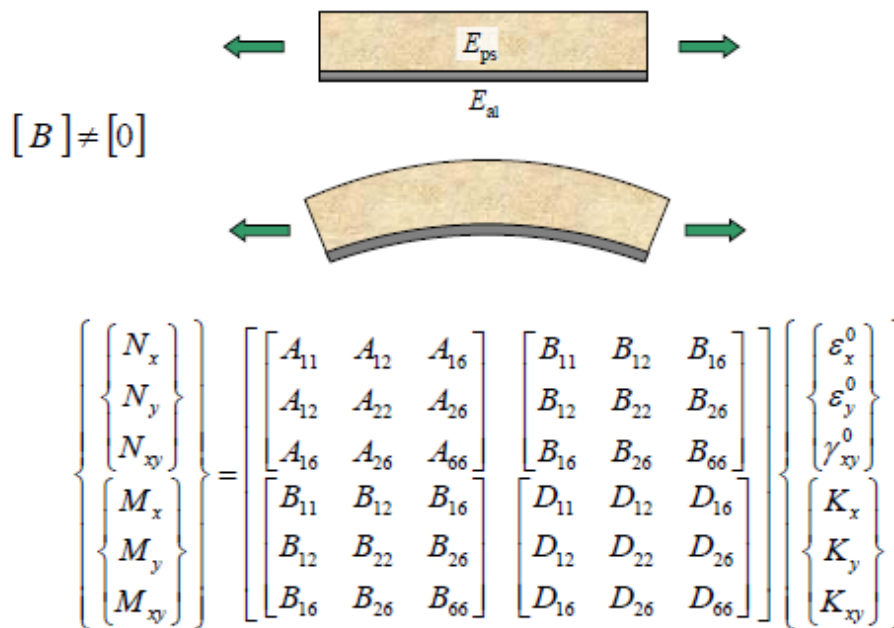


Figura 17. Acoplamientos.

PARAMETROS QUE DEFINEN UN LAMINADO. TIPOS DE LAMINADOS

• Parámetros que definen un laminado:

- Número de láminas
- Espesor de cada lámina
- Material de cada lámina
- Orientación del material de cada lámina
- Secuencia de apilado

• Tipos de laminados:

- **Laminado equilibrado:** Por cada lámina con orientación Φ existe otra con orientación $-\Phi$ (del mismo material y espesor). Ejemplos: $[+30/-30]$; $[0/45/-45]$
- **Laminado simétrico:** Por cada lámina con orientación Φ situada a una distancia z existe otra idéntica (igual material, espesor y orientación) a una distancia $-z$. Ejemplo: $[0/40/-30/-30/40/0]$
- **Laminado antisimétrico:** Por cada lámina con orientación Φ situada a una distancia z existe otra de igual material y espesor con orientación $-\Phi$ a una distancia $-z$. Todo laminado antisimétrico es **equilibrado**. Ejemplos: $[+30/-30]$; $[45/-45/0/90/0/45/-45]$
- **Laminado unidireccional:** Todas las láminas son del mismo material y tienen la misma orientación.
- **Laminado angular:** Las orientaciones de las láminas son arbitrarias. Ejemplo: $[30/60/30]$.

Si son equilibrados se denominan en inglés “**angle-ply**”. Ejemplo: [30/-30].

- **Laminado cuasiisótropo:** Un tipo especial de laminados, en el que su comportamiento a nivel de acoplamientos es parecido al de una lámina isótropa. Estos laminados necesariamente han de cumplir las siguientes condiciones:
 - Simétricos y equilibrados
 - Todas las láminas con igual **espesor y material**.
 - Las orientaciones de las láminas vienen dadas por $180^\circ/N + \Phi_0$, con $N \geq 3$
Ejemplos: [0/60/-60]S; [0/45/90/-45]S
- **Laminado isótropo:** Todas las láminas son de materiales isótropos. Si es simétrico, se comporta como una lámina isótropa.

ACOPLAMIENTOS

Acoplamiento entre deformaciones en el plano y fuera del plano (curvaturas):

- Si la matriz $[B]$ no es nula existen acoplamientos entre las tensiones y deformaciones en el plano y las curvaturas.
- Este acoplamiento no suele ser deseable.
- Se puede evitar utilizando **laminados simétricos** en los que la matriz $[B]$ es nula.

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n \left[(\bar{Q}_{ij})_k \int_{z_k}^{z_{k+1}} z \, dz \right] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k (z_{k+1}^2 - z_k^2)]$$



Figura 18. Acoplamiento.

Acoplamiento entre deformaciones normales y tangenciales en el plano:

- Si los términos A_{16} y A_{26} no son nulos existen acoplamientos entre las tensiones y deformaciones normales y tangenciales, todas ellas en el plano.
- Este acoplamiento no suele ser deseable.



- Se puede evitar utilizando laminados equilibrados, unidireccionales orientados o cruzados.

Acoplamiento entre curvaturas de flexión y de torsión:

- Si los términos D_{16} y D_{26} no son nulos existen acoplamientos entre las curvaturas de flexión y de torsión.
- Este acoplamiento no suele ser deseable.
- Se puede evitar utilizando laminados antisimétricos, unidireccionales o cruzados.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \left[(\bar{Q}_{ij})_k \int_{z_k}^{z_{k+1}} dz \right] = \sum_{k=1}^n \left[(\bar{Q}_{ij})_k (z_{k+1} - z_k) \right]$$

- Los laminados más utilizados son los **simétricos equilibrados** pues evitan los dos acoplamientos estudiados y su comportamiento es cuasiortótropo.

Acoplamiento entre curvaturas de flexión y de torsión:

- Si los términos D_{16} y D_{26} no son nulos existen acoplamientos entre las curvaturas de flexión y de torsión.
- Este acoplamiento no suele ser deseable.
- Se puede evitar utilizando **laminados antisimétricos, unidireccionales o cruzados**.

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n \left[(\bar{Q}_{ij})_k \int_{z_k}^{z_{k+1}} z^2 dz \right] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \left[(\bar{Q}_{ij})_k (z_{k+1}^3 - z_k^3) \right]$$

- En los laminados simétricos y equilibrados no se puede eliminar. Se minimiza colocando las láminas con orientaciones Φ y $-\Phi$ los más cerca posibles y al aumentar el número de láminas.
- A veces se aprovecha este acoplamiento. Ejemplo: álabes.

MATRICES DE ALGUNOS LAMINADOS

LAMINADO	Equilibrado	Simétrico	Antisimétrico	Cruzado
[A]	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$
[B]	$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & B_{16} \\ 0 & 0 & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
[D]	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$



Figura 19. Matrices de algunos laminados.

LAMINADO	Cuasiortótropo (simétrico + equilibrado)	Ortótropo (cruzado + simétrico)	Cuasiisótropo (simétrico + equilibrado + + mismo espesor + + $(\pi/N + \theta_0)$)	Isótropo (no simétrico)	Isótropo (simétrico)
[A]	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_{11} - A_{12}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_{11} - A_{12}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_{11} - A_{12}}{2} \end{bmatrix}$
[B]	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{11} - B_{12}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
[D]	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D_{11} - D_{12}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D_{11} - D_{12}}{2} \end{bmatrix}$

Figura 20. Matrices de algunos laminados.

INTERPRETACIÓN DE LA TEORÍA CLÁSICA DE LAMINADOS

- Relaciona esfuerzos por unidad de anchura con ϵ en el plano yK.
- Representa la ecuación de comportamiento del laminado (se promedian las propiedades en el espesor), pero no la rigidez de un pieza concreta.
- Sólo se pueden obtener las ϵ si se conocen los esfuerzos que actúan sobre la pieza y eso sólo es posible a priori en problemas isostáticos.
- La TCL se emplea para predimensionar piezas o seleccionar materiales.
- El M.E.F. puede utilizarse para analizar componentes.

EFFECTOS TERMICOS E HIGROSCOPICOS

- Las diferencias de temperatura o humedad producen deformaciones diferenciales y asociadas a ellas tensiones internas que modifican en comportamiento mecánico de los materiales, especialmente si estos no son isótropos.
- Los procesos de curado y las condiciones de funcionamiento modifican las condiciones de temperatura y de humedad y deben considerarse durante las fases de diseño.
- Si se somete a un cambio de T un conjunto de láminas estas se deforman de modo diferente.
- En un laminado como consecuencia de la continuidad de desplazamientos aparecen tensiones internas.
- El tratamiento de los efectos térmicos y los higroscópicos son completamente análogos.
- Las ecuaciones pueden expresarse como:



$$\{N\} = [A] \{\varepsilon^0\} + [B] \{K\} - \{N^T\}$$

$$\{M\} = [B] \{\varepsilon^0\} + [D] \{K\} - \{M^T\}$$

- Los esfuerzos térmicos equivalentes serán:

$$\{N^T\} = \sum_{k=1}^n \int_{z_k}^{z_{k+1}} \{\bar{F}\} \Delta T dz$$

$$\{M^T\} = \sum_{k=1}^n \int_{z_k}^{z_{k+1}} \{\bar{F}\} z \Delta T dz$$

- La TCL sólo resuelve problemas con variaciones de T o C en el espesor.
- Tipos de problemas:
 - T o C constante en todo el laminado pero diferente de la de referencia o de deformación nula. Aparece durante el curado.
 - Transitorio en el que la T o C dependen de la coordenada z. No suele presentarse en aplicaciones corrientes. Es difícil de resolver.
 - Régimen permanente en el que la T o C dependen de z. Aparece cuando existe diferencia de T o C en ambas caras del laminado.
- Además de existir deformaciones térmicas o higroscópicas se modifica la rigidez y sobre todo resistencia de fibras y matriz si estas son orgánicas. Afecta mayoritariamente a matrices. Es difícil de resolver este problema.

EFFECTOS DE BORDE

- Una de las **hipótesis de la TCL** es que cada lámina se encuentra en un estado de **tensión plana**. Ahora veremos que eso no siempre es posible. Considérese el **laminado cruzado simétrico** del mismo material sometido a una carga por unidad de anchura Nx.
 - Si las láminas no estuviesen unidas debido al coeficiente de Poisson se tendrían esas deformaciones en el borde del laminado.

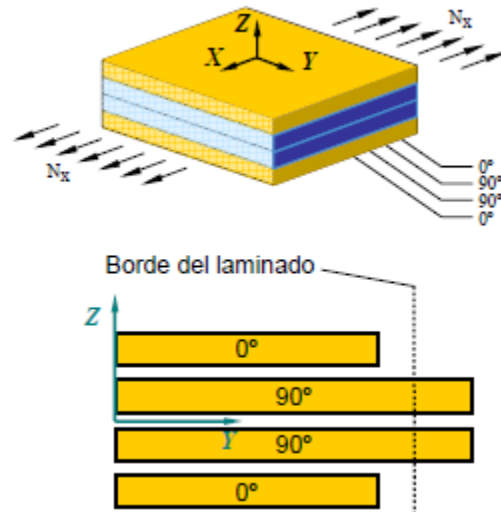


Figura 21. Efecto de borde a.

- Puesto que las láminas sí que están unidas debido a la continuidad de desplazamientos se tiene.

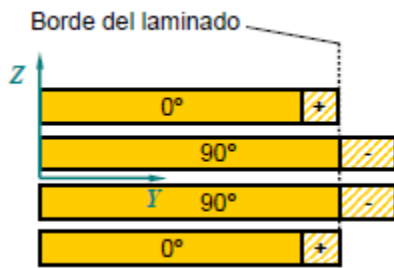


Figura 22. Gráfico de efecto de borde b.

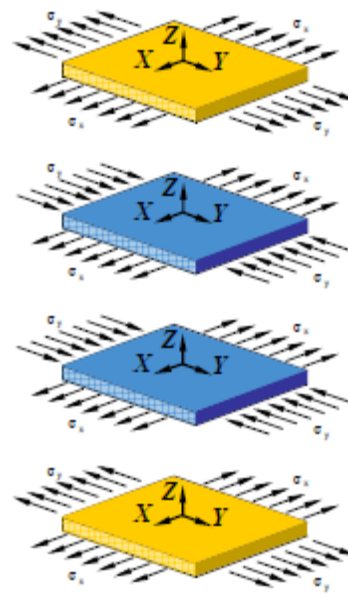


Figura 23. Efecto de borde b.

LIMITACIONES LAMINADO CRUZADO

- La **Teoría Clásica de Laminados**:

- Obtiene **N_y correcto** en el borde del laminado (obtiene bien la resultante de las σ_y en el borde y se mantiene el equilibrio).
- Obtiene unas **tensiones σ_y en el borde no nulas** que es imposible.

- Estos resultados son coherentes puesto que la Teoría Clásica de Laminados promedia las propiedades del material en el espesor y obtiene unas características medias del laminado y dicho laminado si esta en equilibrio aunque no lo estén cada una de las láminas que lo forman.

- Para obtener un equilibrio en el contorno es necesario que exista un **estado tridimensional de tensiones** en el borde del laminado.

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES REALES EN EL BORDE

- Para que las láminas del laminado cruzado que se está estudiando este en equilibrio se necesita el estado de tensiones tridimensional.

- Las **tensiones tangenciales interlaminares** son las encargadas de transferir la carga entre láminas contiguas.

- Una **distribución de tensiones normales σ_z** de resultante nula se encarga de evitar el giro de las láminas debido a las tensiones interlaminares.

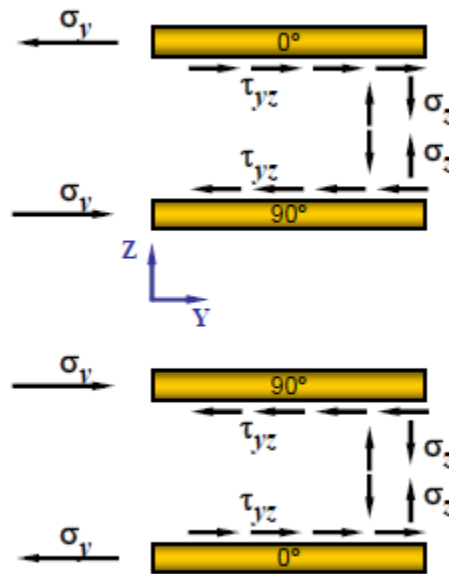


Figura 24. Distribución de tensiones reales en el borde.

TENSIONES INTERLAMINARES NORMALES

- La **distribución de tensiones interlaminares normales** es del tipo mostrado en la figura.
- Se obtiene una **resultante nula**.
- Existen **modelos simplificados** para estimar una distribución de tensiones normales interlaminares.
- La distancia a partir de la cual las tensiones normales interlaminares se anulan es aproximadamente **2 o 3 veces el espesor**.

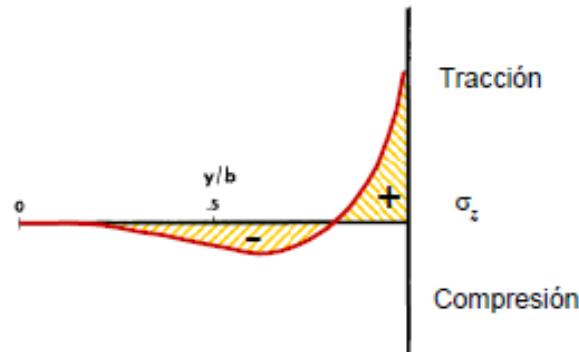


Figura 25. Tensiones interlaminares normales.

EFFECTO DE BORDE EN LAMINADO ANGULAR

- Además del efecto de borde estudiado y que es debido al efecto que produce el coeficiente de Poisson en las láminas, existe otro debido a la diferencia de deformación angular en láminas adyacentes.
- Para considerarlo estudiaremos un laminado angular equilibrado con carga según la dirección X. Este fue el primer problema estudiado por Pipes y Pagano para demostrar el efecto de borde utilizando un laminado ($\pm 45^\circ$)s.

TENSIONES SEGÚN LA TCL

- Además del efecto de borde, que es debido al efecto que produce el coeficiente de Poisson en las láminas, existe otro debido a la diferencia de deformación angular en láminas adyacentes.
- Para considerarlo estudiaremos un laminado angular equilibrado con carga según la dirección X. Este fue el primer problema estudiado por Pipes y Pagano para demostrar el efecto de borde utilizando un laminado ($\pm 45^\circ$)s.

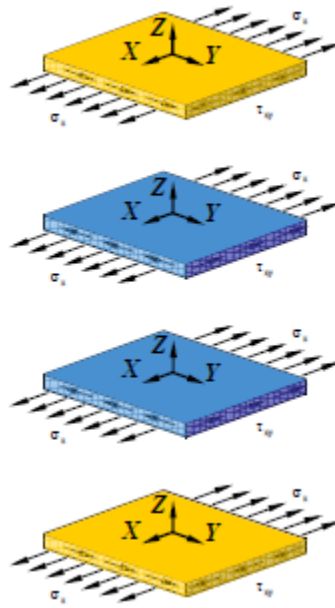


Figura 26. Tensiones según la TCL.

CONCLUSIONES:

- La **TCL** calcula bien los esfuerzos en zonas alejadas de los contornos libres donde la distribución de tensiones en las láminas es prácticamente bidimensional y puede considerarse que se encuentran en tensión plana.
- **Cerca de los bordes la TCL falla** si existe una distribución tridimensional de tensiones y.
- Las tensiones tangenciales interlaminares y tensiones normales interlaminares condicionan la aparición de **delaminaciones**.
- **El signo de las tensiones normales interlaminares** depende de la secuencia de apilado y por ello es uno de los factores más importantes a la hora de estudiar los efectos de borde.



2.6 GRAFENO

El Grafeno es un nuevo material nanométrico bidimensional, obtenido en 2004 por exfoliación micromecánica del grafito. Es una lámina cuasi plana con pequeñas ondulaciones, dando la apariencia de un panal de abeja, con un grosor de un átomo de carbono (0.1 nm).

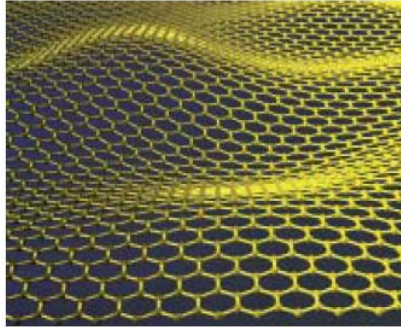


Figura 27. Estructura bidimensional de grafeno.

Historia

El grafeno es una monocapa de átomos de carbono, con la estructura hexagonal de las capas que forman el grafito tridimensional. Su posible existencia se ha discutido durante mucho tiempo. En los años setenta y ochenta se estudiaron intensivamente los compuestos intercalares de grafito, formados por unidades de una pocas capas de grafeno, aisladas del grupo contiguo por láminas de otros materiales. Posteriormente se descubrieron los fullerenos, formados por una sola capa de grafeno con forma aproximadamente esférica, y los nanotubos de carbono, compuestos de una o más capas de grafeno con la estructura de un cilindro. También se conoce, desde los años sesenta, la existencia de monocapas de grafeno formadas en la superficie de metales de transición.

La investigación en grafeno cambió sustancialmente al aislarse monocapas de grafeno de forma controlada. Es, además, posible cambiar el número de portadores en estas capas mediante la aplicación de un campo eléctrico, de forma similar a la modulación de la carga en capas de inversión de semiconductores. Paralelamente, se ha conseguido producir muestras de unas pocas capas de grafeno de espesor por la descomposición de SiC.

Propiedades del grafeno

El grafeno es un material con propiedades únicas, que lo hacen especialmente atractivo, tanto desde el punto de vista de la investigación fundamental como por sus posibles aplicaciones. Sus bandas electrónicas lo definen como un **semimetal**, en una situación intermedia entre los metales convencionales y los aislantes.

Además de sus excelentes propiedades de transporte electrónico, podemos destacar:

- El grafeno es a la vez metálico, flexible y transparente, lo que le permite un gran número de aplicaciones.
- Es muy rígido, y sus constantes elásticas son las más altas medidas en un material. Admite tensiones muy elevadas sin romperse.
- Es muy impermeable, y no permite el paso de átomos y moléculas, a pesar de su pequeño espesor.
- Es inerte químicamente, y mantiene sus propiedades a temperatura ambiente y presión atmosférica.



Aspectos fundamentales del grafeno:

- La dispersión de los estados electrónicos con energías próximas al potencial químico es lineal. La dinámica de los electrones corresponde a la de cuasipartículas de masa efectiva nula. Uno de los experimentos más llamativos donde se refleja esta propiedad es el Efecto Hall Cuántico.
- La densidad de estados al nivel de Fermi en el punto de neutralidad es cero. El grafeno se comporta como un semimetal, porque tampoco presenta un gap (brecha entre la banda energía de valencia y la de conducción para metales). Los campos electrostáticos no son apantallados, y la interacción entre electrones es de largo alcance. Ello implica que el efecto de las interacciones no pueda ser incluido como una modificación sencilla de la dispersión de las cuasipartículas, como ocurre en los metales.
- Determinados efectos de desorden generan perturbaciones que modifican el momento cristalino de los electrones, de la misma forma que un campo gauge (calibrados, estimado) en los modelos de teoría cuántica de campos. Ello se refleja en propiedades observables como la coherencia cuántica de los electrones en presencia de campos magnéticos.
- El grafeno puede considerarse como el límite de un semiconductor de gap estrecho, cuando el gap tiende a cero. Por ello, pueden existir estados localizados cerca de superficies y defectos, a energías próximas al nivel de Fermi (nivel de energía máximo hasta el que llegan los electrones de un sólido).
- El grafeno es, también, una membrana bidimensional. Las fluctuaciones debidas a desorden externo o a efectos de la temperatura de esta membrana inducen defectos topológicos, como dislocaciones y disclinaciones, que, a su vez, actúan como campos gauge sobre los electrones.
- Es finalmente de destacar que las propiedades electrónicas del grafito, en determinadas circunstancias, son cuasi bidimensionales, y muy similares a las de muestras con una o muy pocas capas de grafeno. Se ha observado también un comportamiento ferromagnético en grafito irradiado con protones.

EXTRUCTURA DEL GRAFENO

El grafeno es una estructura nanométrica, bidimensional, de átomos de carbono fuertemente cohesionados en una superficie uniforme, ligeramente plana, con ondulaciones, de un átomo de espesor, con una apariencia semejante a una capa de panal de abejas por su configuración atómica hexagonal.

De esta configuración o arreglo peculiar se desprenden las propiedades electrónicas, mecánicas y químicas excepcionales del grafeno.

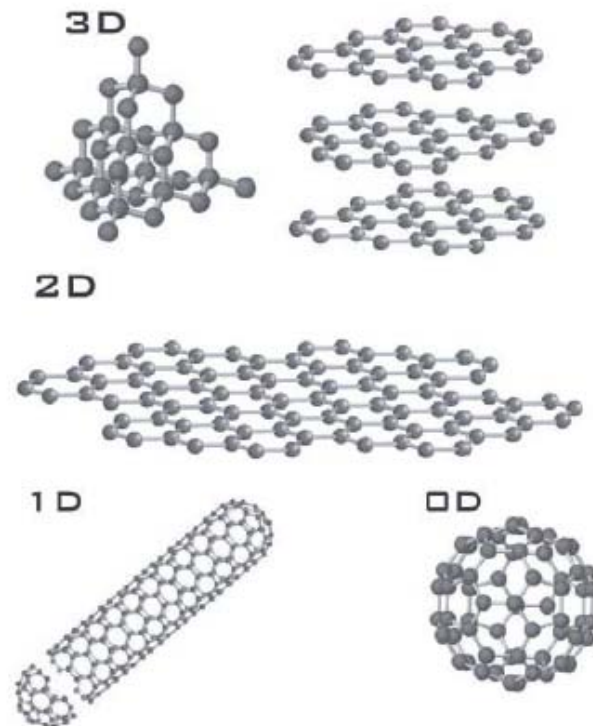


Figura 28. Estructura del grafeno.

MÉTODOS DE OBTENCIÓN

Exfoliación micromecánica:

La exfoliación es la separación de la capa más externa de un sólido en laminillas o escamas. La técnica de exfoliación micromecánica consiste en lo siguiente: a la superficie limpia, nueva, tersa de un cristal de grafito- el grafito es un material constituido por un gran número de placas superpuestas cristales de grafeno débilmente unidas- se le somete a un raspado fino, de arriba abajo, mediante el empleo de cualquier objeto de superficie sólida, o bien, al descascaramiento repetido utilizando cinta adhesiva con el propósito de extraer hojuelas extremadamente delgadas unidas a estos objetos.

La mayoría de estas son láminas tridimensionales, es decir, son grafito; sin embargo, entre éstas se hayan también bidimensionales, grafeno. Para identificar tentativamente a estas últimas, se utiliza microscopía óptica, aprovechando la característica de los cristalitas bidimensionales de volverse visibles en la parte superior de la hoja delgada –oblea- de óxido de silicio, y producir un débil constaste de interferencias a color con respecto a una oblea vacía. Para su identificación definitiva, se selecciona, de entre las laminas obtenidas en el paso anterior, aquéllas que exhiban un grosor aparente de aproximadamente la distancia intercapas en los correspondientes cristales tridimensionales y se les analiza utilizando microscopía de fuerza atómica y microscopía electrónica de barrido.

Posteriormente, para confirmar que las laminas- cristalitas bidimensionales- permanecieron sin ninguna degradación en condiciones ambientales, se analiza mediante microscopia electrónica de transmisión de alta resolución. La base del merito en la aplicación de esta técnica para



obtener grafeno es cumplir puntualmente con las siguientes condiciones: Seleccionar cuidadosamente el material grafitico inicial, usar superficies limpias y raspado fresco del grafito, y medir con exactitud el grosor de óxido de silicio (SiO_2). Esta técnica se emplea no sólo para aislar el grafeno, sino para investigar otros diferentes cristales bidimensionales.

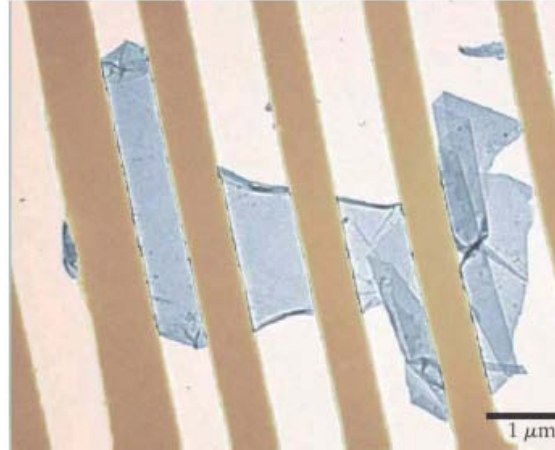


Figura 29. Cristal de grafeno de un átomo de grosor libremente suspendida en la estructura de alambres de oro, utilizando microscopía de transmisión electrónica.

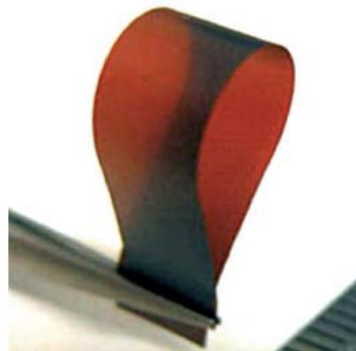


Figura 30. Hoja de oxido de grafeno

Exfoliación química:

Consiste en insertar intercaladamente, moléculas o átomos en la masa del grafito, de tal manera que los planos de grafeno, puedan ser separados en capas unidos a las moléculas o átomos insertados. Generalmente lo que se obtienen es grafito, pero si la molécula insertada en los planos atómicos del grafito es grande y proporciona una separación mayor, los compuestos resultantes son capas de grafeno unidas a la capa de grafito formando un lecho o cama, aunque la probabilidad de éxito de que así ocurra es baja.

Después, mediante una reacción química, se separan los átomos o moléculas que se insertaron obteniéndose un sedimento consistente de residuos y hojas de grafeno enrolladas. Sin embargo, del sedimento grafitico resultante no se ha podido aislar grafeno en estado libre, debido a que



las monocapas sólo existen en estado transitorio e implican separación sobre regiones microscópicas. Por otro lado, según Novoselov. “ los estudios de grafito exfoliado químicamente han mostrado que sus sedimentos consisten en residuos y hojas de múltiples capas enrolladas en lugar de monocapas individuales”.

Deposición química de vapor y térmica.

Aplicaciones electrónicas capas mínimo láminas de 100 capas de grosor.
Método de crecimiento epitaxial.

2.7 ENSAYOS DE RESISTENCIA.

En las siguientes imágenes se muestran dos tipos de ensayos de resistencia el primero a tracción y el segundo a compresión.

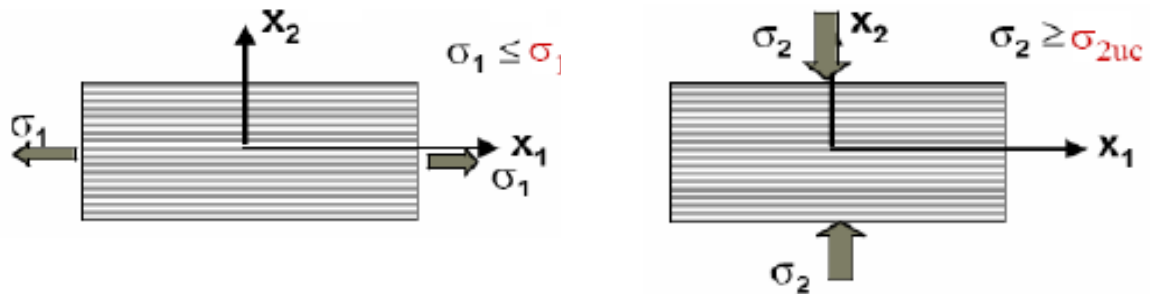


Figura 31: Ensayo de tracción longitudinal en la figura de la izquierda, ensayo de compresión derecha.

Ensayo de tracción

El **ensayo de tracción' o ensayo a la tensión** de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas ($\epsilon = 10^{-4}$ a 10^{-2} s^{-1}).



Figura 32. Máquina para ensayo de tracción por computadora.

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young, que cuantifica la proporcionalidad anterior. Es el resultado de dividir la tensión por la deformación unitaria, dentro de la región elástica de un diagrama esfuerzo-deformación.
- Coeficiente de Poisson, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.
- Límite de proporcionalidad: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- Límite de fluencia o límite elástico aparente: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- Límite elástico (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado. Es la máxima tensión aplicable sin que se produzcan deformaciones permanentes en el material.
- Carga de rotura o resistencia a tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- Estricción: es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

Con estos datos se puede hallar la rigidez del material.

$$\text{extensión} = \frac{\text{desplazamiento}}{\text{distancia entre los dientes del extensómetro}}$$

$$E(\text{GPa}) = \frac{\text{pendiente}}{A_0} = \frac{\text{pendiente}}{\text{ancho} * \text{espesor} * 10^3}$$

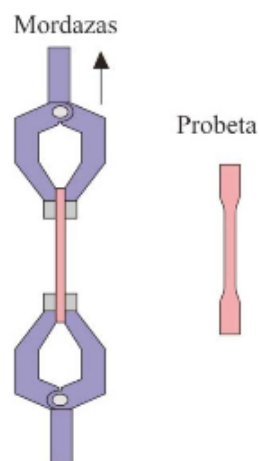


Figura 33. Mordaza y probeta ensayos de tracción.

Ensayo a Flexión.

Si las fuerzas que actúan sobre un cuerpo tienden a inducir una sollicitación de tracción en una parte de su sección transversal, y una sollicitación de compresión en la sección restante, entonces el cuerpo está sometido a flexión.

En la figura 5, parte superior, se indica una probeta de sección rectangular sometida a una fuerza en el centro. En la parte central de dicha figura, se indica el diagrama de fuerzas cortantes y, a continuación, en la parte inferior, se indica el diagrama de momento flector correspondiente.

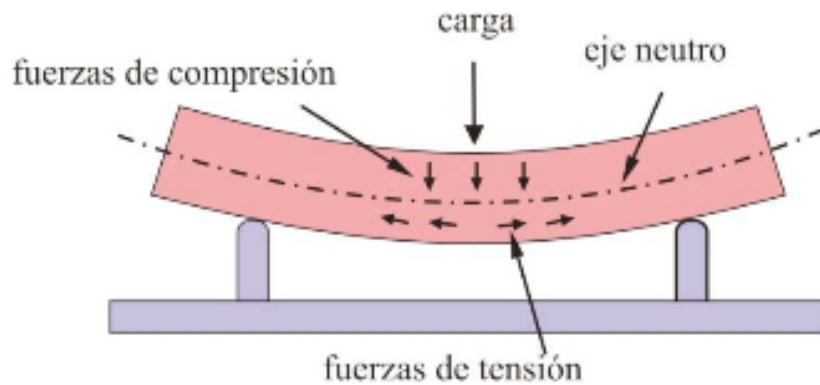


Figura 34. Fuerzas implicadas en los ensayos de flexión.

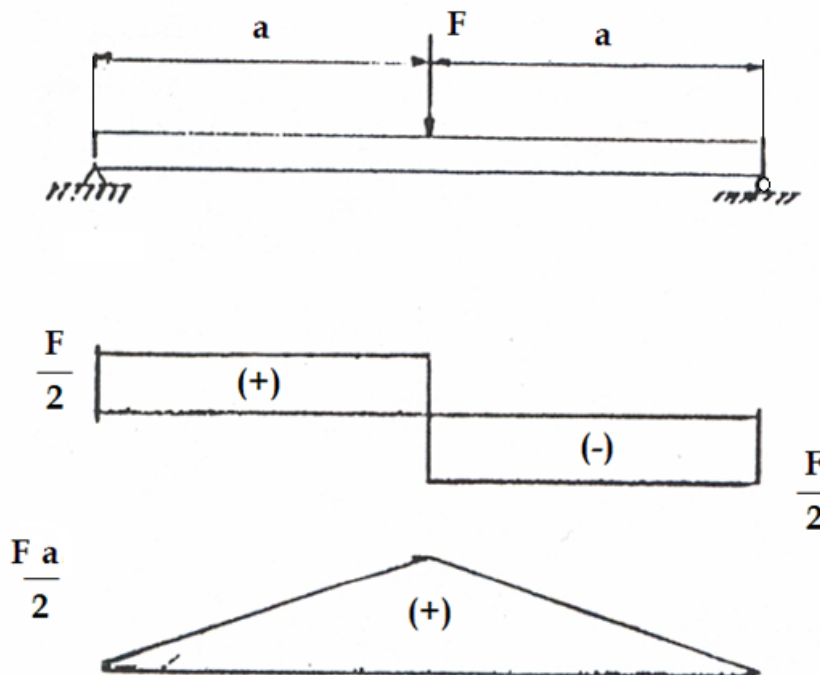


Figura 35. Probeta solicitada con una fuerza central, con los diagramas de fuerza cortante y momento flector respectivos.



La distribución de esfuerzos que se indica, se presenta cuando las tensiones son inferiores al límite de proporcionalidad.

Si los esfuerzos normales no sobrepasan el límite de proporcionalidad, dicho esfuerzo se distribuye linealmente. Es igual a cero en el eje central de la probeta y tiene un valor máximo en la parte más alejada de dicho eje.

Formulas:

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

Siendo M el momento flector y W el módulo resistente a la flexión. El valor máximo de M es igual a:

$$M = \frac{FL}{4}$$

Siendo P la fuerza aplicada y L la distancia entre apoyos, es decir $L=2a$.

El valor del módulo resistente a la flexión es igual a:

$$W = \frac{1}{h} I_{\text{ecuatorial}}$$

Donde $I_{\text{ecuatorial}}$ corresponde al momento de inercia ecuatorial de la sección transversal de la probeta. El momento de inercia, en este caso, es igual a:

$$I_{\text{Ecuatorial}} = \frac{1}{12} bh^3$$



Siendo b el ancho de la sección transversal de la probeta y h su altura respectiva.

Por lo tanto, el esfuerzo por flexión en la fibra más alejada de la probeta es:

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2}$$

La ecuación diferencial de la elástica para una viga sometida a flexión, en general, se expresa de la siguiente manera:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = \pm M(x)$$

Donde, EI es la rigidez a la flexión, y es la deflexión, x es la variable independiente y $M(x)$ es el momento flector, el cual depende de la variable x . El signo se elige de acuerdo a la curvatura que presenta la viga en su configuración de equilibrio.

Resolviendo la ecuación diferencial de segundo orden, de acuerdo a las condiciones de borde, se obtiene la deflexión δ_{\max} dada por la siguiente expresión:

$$\delta_{\max} = \frac{PL^3}{48EI}$$

El módulo de elasticidad E , se puede obtener de la ecuación anterior, esto es:

$$E = \frac{PL^3}{48I\delta_{\max}}$$

Ensayo de impacto

El ensayo de impacto es ampliamente utilizado para la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos. Uno de estos ensayos es realizado utilizando una probeta en forma de disco circular plano, sobre la cual impacta una barra de acero con extremo hemisférico a una velocidad controlada.

Este tipo de ensayo provee respuestas carga-deformación bajo condiciones de deformación multiaxial, permitiendo conocer las propiedades de punzonado y de sensibilidad al impacto del material. A partir de estos registros carga-deformación se determina el valor pico de la carga, la deflexión correspondiente a este pico, y la energía total absorbida por la probeta. Estos registros carga- desplazamiento son dependientes de la geometría, tamaño y espesor de la probeta y de la velocidad de ensayo.

La respuesta multiaxial al impacto, depende parcialmente del espesor, por lo que no tiene necesariamente una correlación lineal con el espesor de la probeta. Por lo tanto, los resultados deben ser comparados solamente con especímenes del mismo espesor. En cuanto al procedimiento de ensayo, requiere un mínimo de cinco especímenes para cada velocidad especificada. Al mismo tiempo, si se desea medir la dependencia de las propiedades de punzonado con la velocidad de impacto, se deben realizar ensayos en una amplia gama de velocidades de impacto. Algunas de las velocidades recomendadas son 2.5, 25, 125, 200 y 250 m/min. Más detalles sobre este tipo de ensayos pueden ser encontrados en la norma ASTM D 3763 – 00 (2000).

La simulación numérica podría indicar cuáles serían las velocidades más recomendadas, disminuyendo la cantidad de ensayos a realizar.

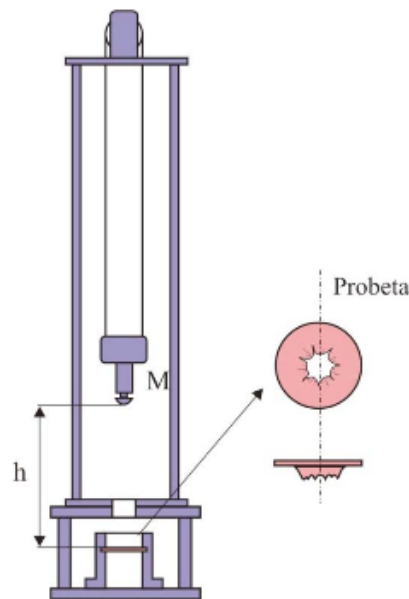


Figura 36. Equipo para medir la resistencia al impacto.



Capítulo 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL



En este capítulo se documenta, toda la parte experimental de la tesina, la fabricación del óxido de grafeno, la fabricación de las probetas de fibra de carbono-epoxi con y sin refuerzo del óxido de grafeno, el troquelado, los ensayos mecánicos de tracción, impacto y flexión.

3.1 MATERIAL Y MAQUINARIA EMPLEADA.

3.1.1 MATERIAL:

- 10g de grafito
- Hielo
- 300ml de ácido sulfúrico
- 10g de grafito
- 30g de permanganato de potasio
- Peróxido de hidrógeno líquido
- 5l de agua destilada
- 200ml de ácido clorhídrico
- 1x1,80 m de tejido tafetán de fibra de carbono.
- Resina epoxi (resina 136ml y endurecedor 55ml) del proveedor Jose Antonio Garcia, C/ Cardenal Benlloch 44 Valencia.
- Cera para desmoldear (Promade S.L.)
- 4.01g de Óxido de grafeno.
- 230ml de *Aminopropyltriethoxysilane (APTS)*
- 401ml de *Dicyclohexilcarbodimide (DCC)*
- 60ml de Acetona

3.1.2 MAQUINARIA Y UTILES.

- *Báscula*



Figura 37. Báscula del laboratorio de pulvimetalurgia del departamento de Ing. Mecánica y de materiales

- Un bol de cristal
- Un bol cerámico barnizado no poroso de diámetro 7 aprox.



- Vaso de mezcla 2l
- Vaso de 0,5l
- Mezclador Magnético
- Termómetro
- Cuchara de laboratorio
- Mezcladora



Figura 38. Mezcladora a la derecha y bol a la izquierda.

- Un Filtro



Figura 39. Filtrado de grafeno.

- Regla
- Rotulador azul
- Cinta adhesiva blanca
- Tijeras especializadas para cortar material compuesto



Figura 40. Bobina marcada con cinta adhesiva cuadrados 30 x 30, orientación de la fibra 45°.

- Molde de acero.
- Cinta selladora para vacío.



Figura 41. Molde con cinta selladora.

- Recipiente para mezclar la resina
- Vara de cristal para mezclar.



•
*Figura 42. Mezcla matriz epoxi, Araldite LY 3505/Hardener XB 3404.
Del proveedor Jose Antonio Garcia, C/ Cardenal Benlloch 44 Valencia.*

- Rodillo de pinto y rodillo de aluminio

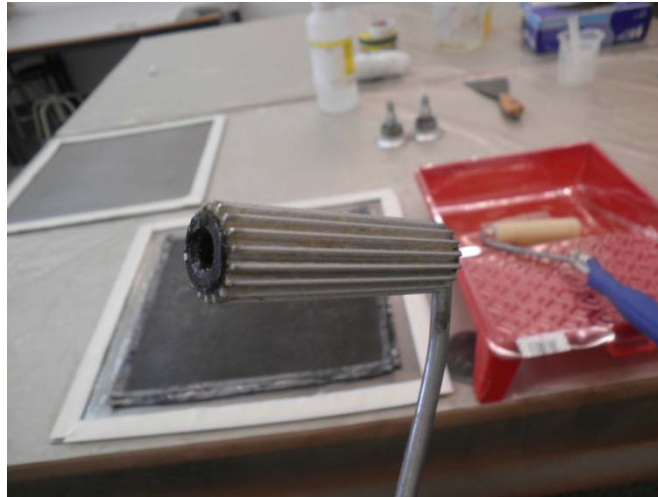


Figura 43. Rodillo de aluminio.

- Plástico transpirable.



Figura 44. Plástico transpirable.



- Filtros absorbentes 2 de 35x35cm y 2 de 15x15cm

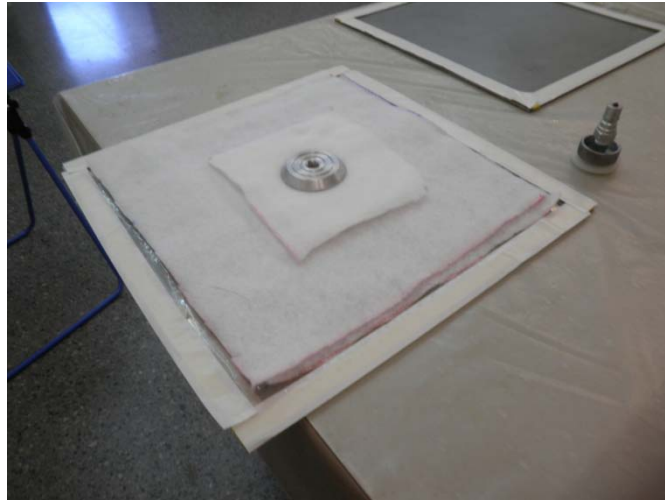


Figura 45. Filtros absorbentes con válvula de la bomba de vacío.

- Bolsa de Vacío.

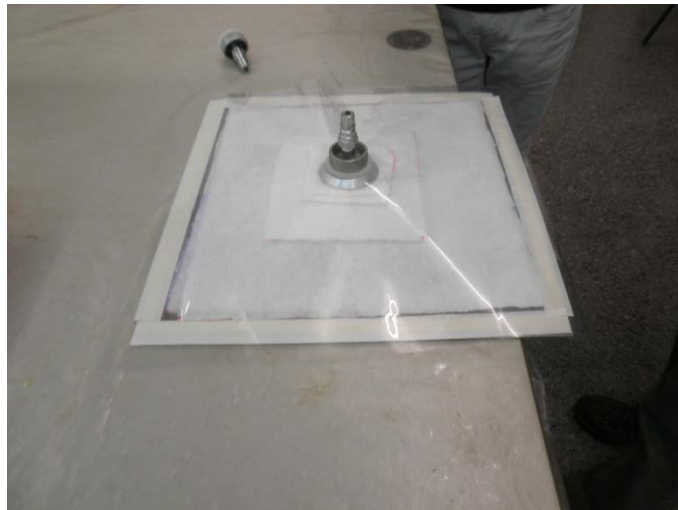


Figura 46. Imagen bolsa de vacío incorporada.

- Bomba de aire de 3380 r/min y 50Hz:0,55w



Figura 47. Izquierda bomba de vacío. Derecha molde con laminados.

- Horno laboratorio de pulvimetalurgia.
- Troqueladora con troquel.



Figura 48. Troqueladora ERICHSEN de la Nave Pesada de la UPV.

- Máquina de tracción Instron con células de carga de 1 y 50KN y con accesorios de tracción y flexión.



Figura 49. Máquina de tracción ISNTRON 4202 con una célula de carga de 50KN del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.

- Extensómetro.



Figura 50. Extensómetro del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.

- Micrómetro y pie de Rey.



Figura 51. Izquierda: Micrómetro. Derecha: Pie de Rey.

- Máquina de ultrasonidos.



Figura 52. Máquina de ultrasonidos ATU laboratorio electrodeposiciones UPV

- Máquina de Impacto

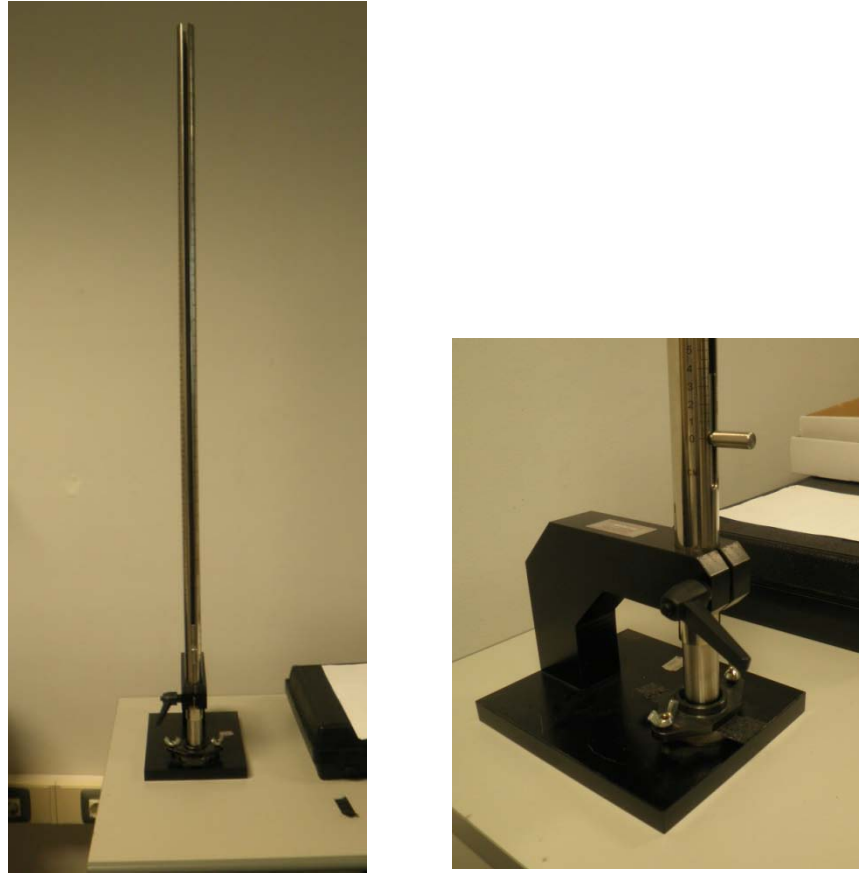


Figura 53. Máquina de impacto NEURTEC de 1m de longitud, del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.

3.2 FABRICACIÓN DE OXIDO DE GRAFENO FUNCIONALIZADO POR VIA QUÍMICA: (Duración de fabricación 6h+12h+3h aprox)

1º Se pesa 10g de grafito.



Figura 37: Báscula del laboratorio de pulvimetalurgia del departamento de Ing. Mecánica y de materiales

2º Se llena de hielo un bol y se coloca encima de este el vaso de mezcla.

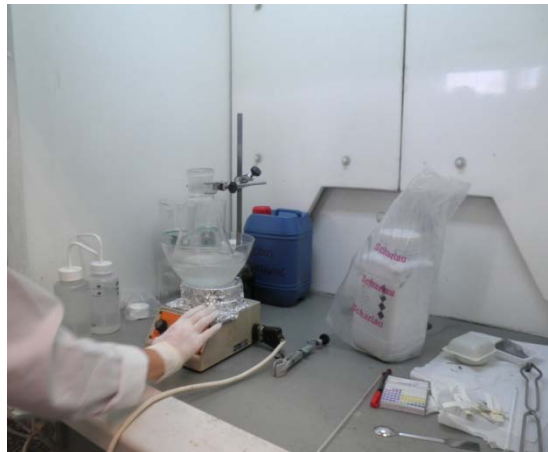


Figura 54: Imagen del montaje del bol y el vaso de mezcla en el laboratorio de pulvimetalurgia del departamento de Ing. Mecánica y de materiales

3º Se añaden 300ml de ácido sulfúrico al vaso de mezcla.

4º Se le incorpora un mezclador magnético al vaso

5º Se pone un termómetro para controlar que la temperatura no suba de 50°C.



Figura 55. Termómetro del laboratorio de pulvimetalurgia del departamento de Ing. Mecánica y de materiales

6º Se le va añadiendo poco a poco los 10g de grafito con una cuchara. (30min aprox.).



Figura 56. Imagen del equipo necesario para la fabricación del grafeno en el laboratorio de pulvimetalurgia del departamento de Ing. Mecánica y de materiales.

7º Seguidamente se le añaden 30g de permanganato de potasio a cucharadas para que se diluya bien. (Controlando que la temperatura no suba de 30°C por la reacción exotérmica que se produce). Se deja mezclando 2h.



Figura 57. 30g de permanganato de potasio.

8° Para ayudar a que se expandan las capas se añaden 400ml de agua destilada. (Poco a poco para controlar la T^a y la salida de gases).

9° Se añade peróxido de hidrogeno líquido, para que el grafito termine de oxidarse y para lo que no ha reaccionado reaccione. Se va añadiendo hasta que deja de burbujear.

10° Se ponen 100ml de agua destilada y 200ml de ácido clorhídrico en un vaso (el vaso se calienta debido a la reacción exotérmica que se produce). Y se le añade al vaso de mezcla.



Figura 58. Imagen del mezclado de ácido clorhídrico.

11° Dejar reposar 15min.

12° Se decanta, retirándole el mezclador magnético y dejándolo reposar 12h.

13° Se filtra hasta llegar a un pH 5 o 7.



Figura 39. Filtrado de grafeno.



Figura 59. Grafeno filtrado.

14° Se seca en el horno 24h.



Figura 60. Grafeno en polvo.

El grafeno se puede filtrar directamente. (Forma más costosa, se colapsa el filtro debido a que es un material hidrofílico y se expande). O se puede reducir con ácido de vitamina C, esto hace que el material sea hidrofóbico y las partículas de grafeno se aglomeren y sea más fácil de filtrar.



3.3 FABRICACIÓN DE PROBETAS DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO EPOXI

Las probetas son de dos tipos diferentes, un laminado de $(0-90)_{4S}$ de cuatro láminas. Y un segundo laminado con las orientaciones de $(0-90/\pm 45)_{2S}$

Partiendo de una bobina de tejido tafetán de fibra de carbono del proveedor, INP96 con características técnicas de $E= 4,25$ GPa (Módulo de Young, según proveedor) y una densidad de $1,78\text{g/cm}^3$, se procedió a hacer 9 cuadrados de 30×30 .

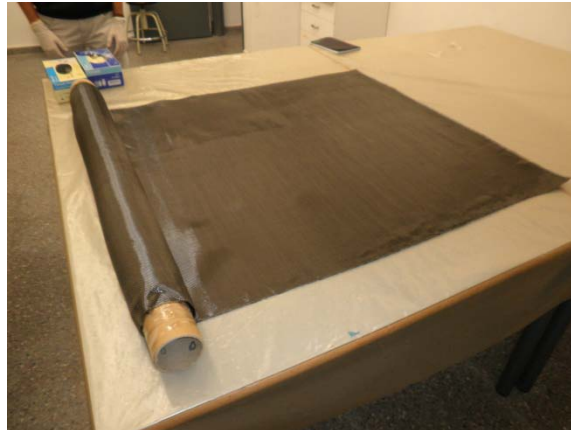


Figura 61. Bobina de tejido tafetán de fibra de carbono proveedor INP96. Instalaciones de la UPV, Nave Pesada.

Los cuadrados se marcaron con una regla de madera y cinta adhesiva blanca. (Si se mira a la altura de las fibras se ven las líneas rectas a seguir y se puede colocar la regla).



Figura 62. Bobina marcada con cinta adhesiva cuadrados 30×30 orientación de la fibra $0/90$.

Seguidamente se procedió al corte de las láminas con unas tijeras para material compuesto.

Y se marcaron los laminados con las orientaciones de $\pm 45^\circ$.



Figura 63. Bobina marcada con cinta adhesiva cuadrados 30 x 30, orientación de la fibra 45°.

Seguidamente se montó el laminado en el molde de acero en forma de cuadrado de 3ml de espesor.

Montaje:

Poner la cinta selladora para vacío, (con precaución de que todas las uniones del cuadrado estuvieran perfectamente selladas, para que posteriormente el vacío se haga correctamente).



Figura 41. Molde con cinta selladora.

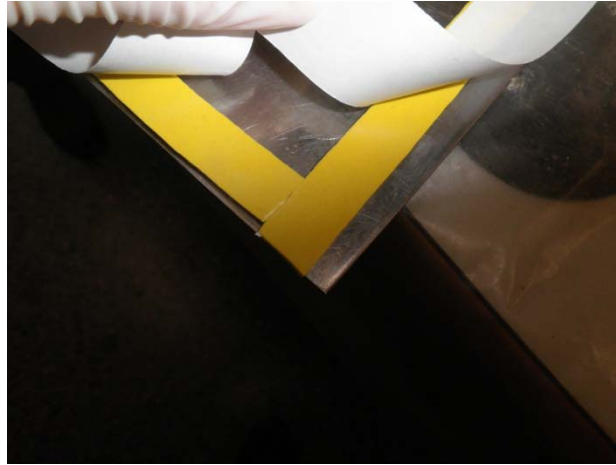


Figura 64: Detalle del sellado del molde.

Una vez está sellado, se pone cera al molde con un algodón, para que no se pegue el laminado. Se utilizó cera para muebles Promade S.L.



Figura 65. Molde encerado y cera Promade S.L.

Cuando la preparación se completa, se procede a la mezcla de la resina epoxi con el endurecedor para evitar la polimerización y curado que se produce a los 10 minutos aproximadamente.

La mezcla se hace a 2.5 resina 1 endurecedor, según las indicaciones del fabricante. Se utilizan 100ml de resina por 40ml de endurecedor. La resina se introduce en una bandeja de pintor con una jeringa. Para el mezclado se utiliza un palo de cristal, evitando la formación de burbujas.



Figura 42. Mezcla matriz epoxi, del proveedor Jose Antonio Garcia, C/ Cardenal Benlloch 44 Valencia.

Seguidamente, se deposita una capa de epoxi con un rodillo de pintor encima de la cera evitando tocar los bordes, se coloca una lámina y se le pasa un rodillo de aluminio para que se impregne de la resina depositada con anterioridad. Se vuelve a añadir resina con el rodillo de pintor, se pasa el rodillo de aluminio, y se repite la secuencia, acabando con una capa de resina.

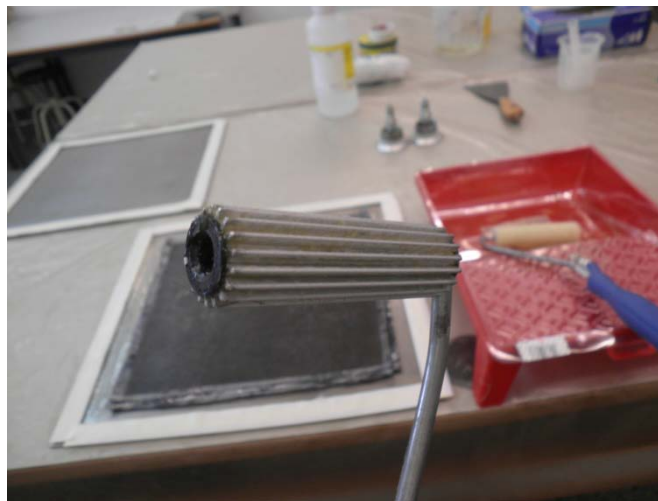


Figura 43. Rodillo de aluminio.

Cuando se termina de hacer el laminado, se coloca un plástico traspirable 35x35 como se muestra a continuación.

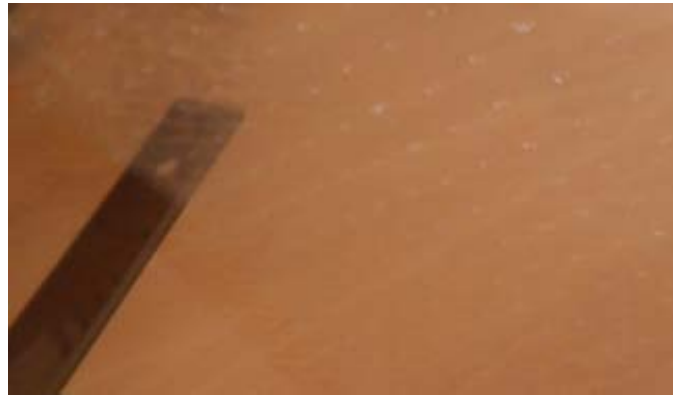


Figura 44. Plástico transpirable.

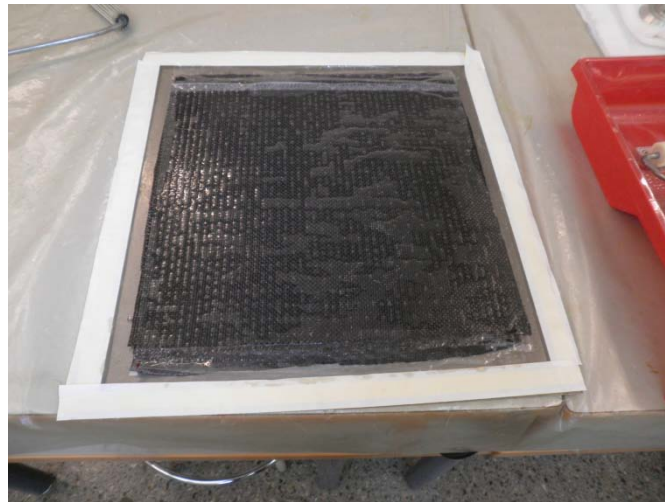


Figura 66. Montaje del laminado con el plástico transpirable.

Encima del plástico se incorporan 2 fieltros absorbentes de 35x35, un tercero de 15x15 y una parte de la válvula de vacío.



Figura 45. Fieltrros absorbentes con válvula de la bomba de vacío.



Después se unen las dos partes de la válvula, se despegan los protectores de la cinta selladora y se coloca la bolsa de vacío, habiéndole hecho un previo agujero para colocar la válvula. Es importante que la bolsa esté totalmente en contacto con la cinta y no haya ningún poro por donde se salga el aire, precaución siempre hay un lado de los 4 que es crítico.

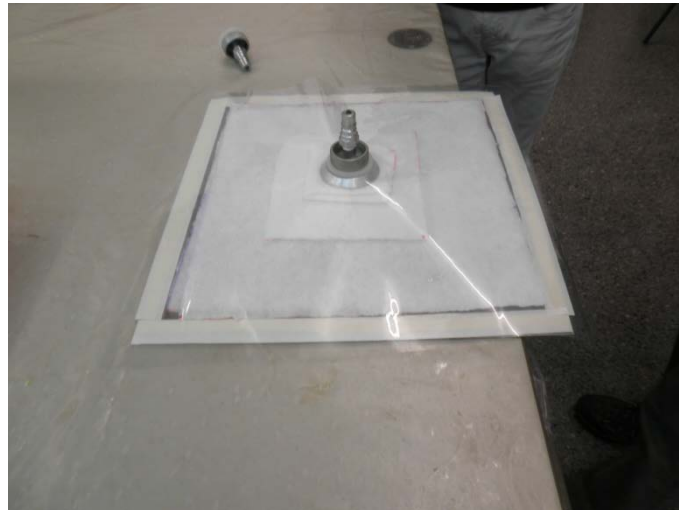


Figura 46. Imagen bolsa de vacío incorporada.

Una vez esta todo montado se hace el vacío con una bomba de aire de las características, se muestran en la siguiente imagen, durante 15 minutos:



Figura 67. Especificaciones bomba de vacío.



Figura 47. Izquierda bomba de vacío. Derecha molde con laminados.

Para finalizar se retira la parte superior de la válvula y se mete en el horno a 50° durante 16h.



Figura 48. Horno de 500° del laboratorio de pulvimetalurgia del departamento de Ing. Mecánica y de materiales de la UPV.

Una vez polimerizado el compuesto, se saca del horno y se desmolda con la ayuda de una palanca, obteniéndose como resultado, el laminado de fibra de carbono - epoxi.

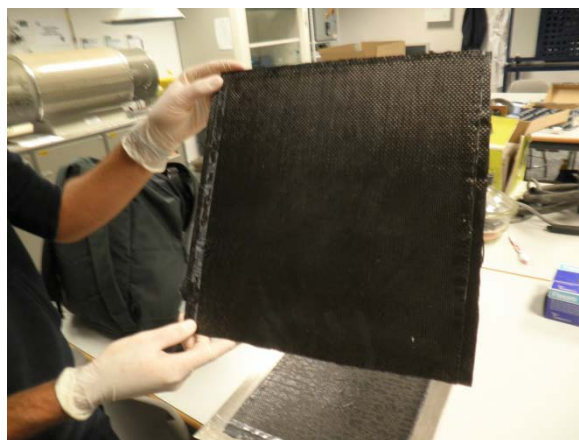


Figura 68. Laminado obtenido.

Seguidamente se troquelan las probetas, con diferentes orientaciones: 90° , 45° y 22.5° dos probetas de cada, en los dos laminados. Se utiliza una probeta con las dimensiones del troquel, para el marcado. Evitando, las arrugas producidas por la válvula.

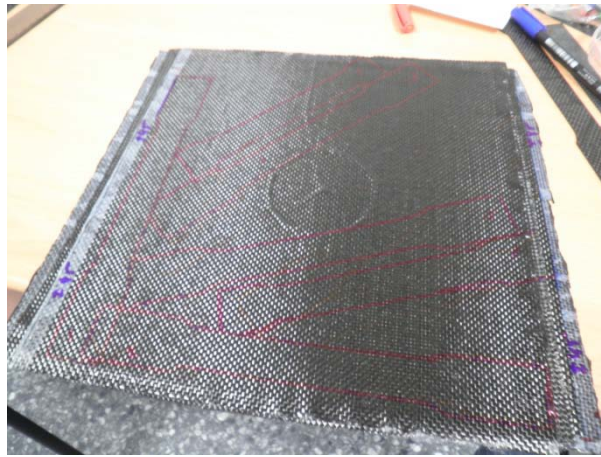


Figura 69a. Marcado del laminado.

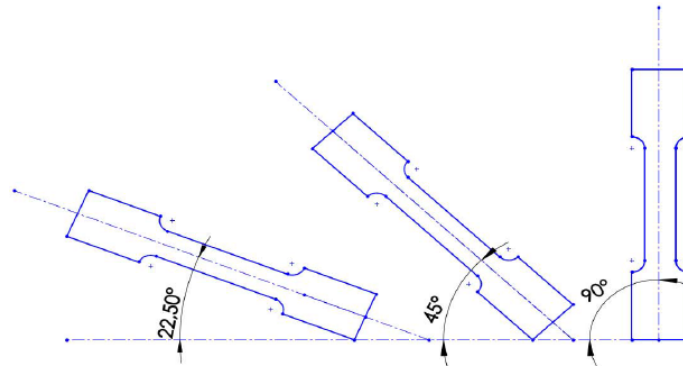


Figura 69b. direcciones de troquelado.

Para troquelar se utiliza la troqueladora ERICHSEN de las instalaciones de la nave pesada del departamento de Ingeniería mecánica y de materiales de la UPV.



Figura 48. Troqueladora ERICHSEN de la Nave Pesada de la UPV.

Las probetas se troquelan de forma individual. Con un previo centrado manual, marcado de secuencia de troquelado y orientación de fibra.



Figura 70. Laminado troquelado.

Se obtienen 12 probetas, con las orientaciones citadas anteriormente.



Figura 71. Probetas troqueladas.

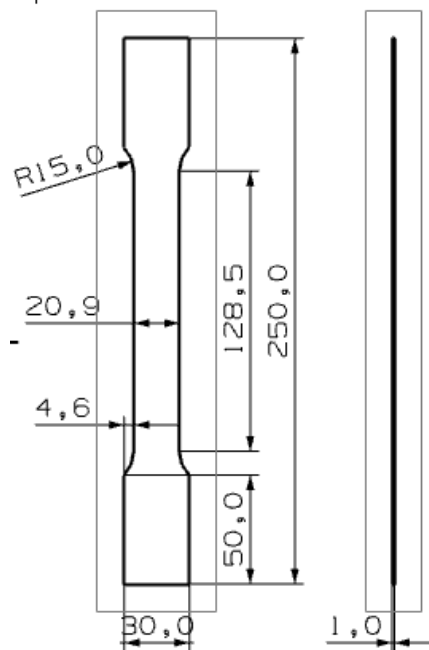


Figura 72. Dimensiones alzado y perfil, de las probetas troqueladas en (mm).

3.4 ENSAYOS DEL MATERIAL:

3.4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN:

Primero se hizo un ensayo de tracción con 6 probetas. 3 del laminado $(0-90)_{4s}$ y 3 del $(0-90/\pm 45)_{2s}$ troquelados con las direcciones 90° , 45° y $22,5^\circ$. Se utilizó la máquina de tracción del departamento de de mecánica y materiales de la UPV ISNTRON 4202



con una célula de carga de 50KN. Esta máquina va acompañada de una consola y un ordenador, además de llevar añadido un extensómetro. El método que se utilizó fue el ensayo inta axial 29 a tracción velocidad de avance 2 mm/min.



Figura 49. Máquina de tracción ISNTRON 4202 con una célula de carga de 50KN del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.

Esta máquina va acompañada de una consola y un ordenador y lleva añadido un extensómetro.



Figura 31: Ordenador y consola de la máquina de tracción ISNTRON 4202.



Figura 73. Extensómetro del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.

El procedimiento para medir el módulo elástico, la carga máxima y el desplazamiento máximo antes de la rotura, del material compuesto fue el siguiente:

1. Se marcaron las 12 probetas según el tipo de laminado 90 o 45 y la orientación de corte en el troquelado, haciendo dos grupos A y B para cada laminado, por las direcciones de troquelado repetidas.
2. Se midió el ancho de las probetas, con un pie de rey y el espesor con un micrómetro.



Figura 51. Izquierda: Micrómetro. Derecha: Pie de Rey

Obteniendo los siguientes resultados de la tabla:

Grupo	Orientación	Laminado (0-90) _{4S}		Laminado (0-90/±45) _{2S}	
		Ancho (mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)
A	90°	20,9	0,97	20,9	1,02
	45°	20,9	0,96	20,9	1,00
	22,5°	20,9	0,99	20,9	1,03
B	90°	20,9	1,00	20,9	0,99
	45°	20,9	1,00	20,9	1,01
	22,5°	20,9	1,00	20,9	1,01

Tabla 1. Anchura y espesor de las probetas troqueladas.

3. Se introdujo la probeta en la máquina de tracción y se le colocó el extensómetro
4. Introducción de datos en el ordenador y puesta en marcha del ensayo.



Figura 74. Máquina de tracción y extensómetro en funcionamiento.

Se ensayaron las probetas del grupo A del tipo de laminado $(0/90)_{4s}$ y las del grupo B del tipo de laminado $(0-90/\pm 45)_{2s}$



Figura 74b. Máquina de tracción y extensómetro en funcionamiento.

Probetas ensayadas.



Figura 75. Probetas ensayadas.



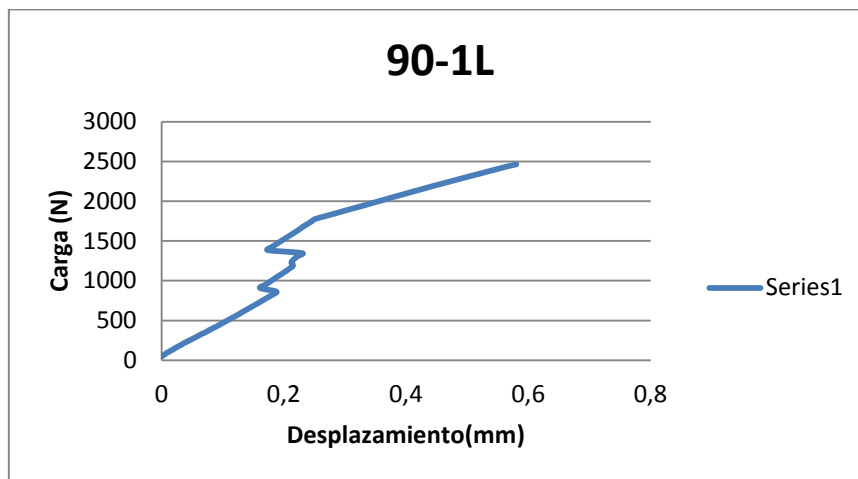
RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.

Las formulas utilizadas para hallar rigidez del material fueron las siguientes.

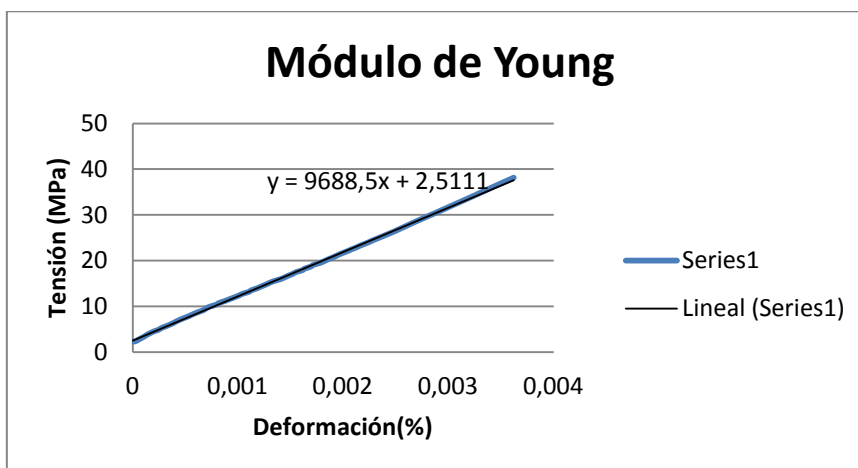
$$\text{extensión} = \frac{\text{desplazamiento}}{\text{distancia entre los dientes del extensómetro}} = \frac{\text{desplazamiento}}{50 \text{ mm}}$$

$$E(\text{GPa}) = \frac{\text{pendiente}}{A_0} = \frac{\text{pendiente}}{\text{ancho} * \text{espesor} * 10^3}$$

Una lamina del material compuesto, troquelada a 90° tiene un Módulo de Young de 9,688GPa.



Gráfica 1: probeta de una única lámina orientación de troquelado 90°.



Gráfica 2: Módulo de Young probeta de una única lámina orientación de troquelado 90°.

A esta probeta se le omitió el proceso de vacío, debido que no necesitaba que las capas se adhirieran entre sí.

Tipo de laminado (0-90)_{4s} de Grupo A, troquelado a 90° paralelo a la fibra de la lámina exterior.

Este laminado soportó una carga máxima de 8614,423 y tuvo un alargamiento máximo de 0.83mm, alcanzados estos valores, se produjo una rotura total de sus fibras. El módulo de Young del material compuesto es 51,107GPa. (El pico de la primera gráfica es debido a la retirada del extensómetro).

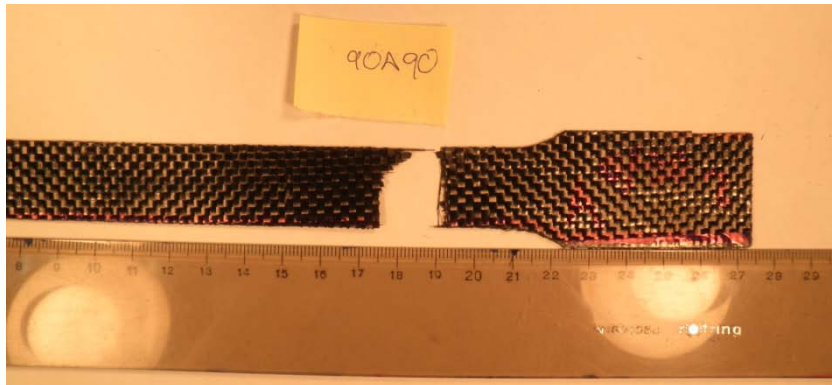
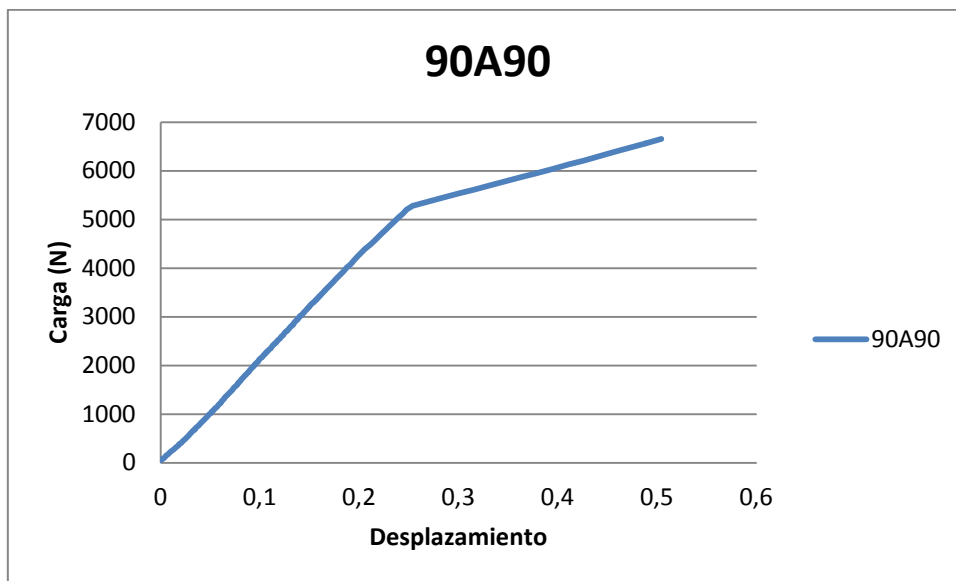
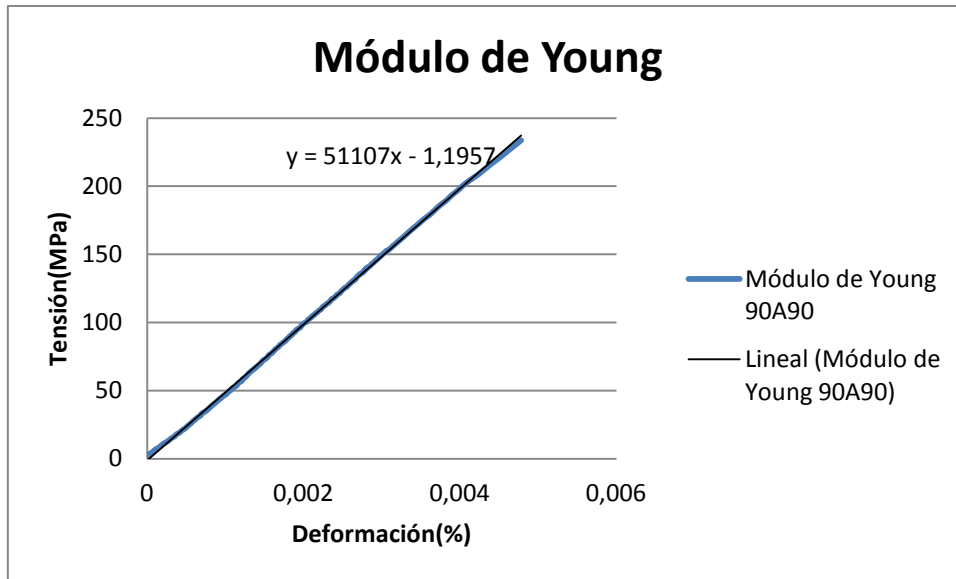


Figura 76. Probeta 90A90 ensayada.



Grafica 1: Probeta 90A90 ensayada.



Gráfica 2: Módulo de Young probeta 90A90 ensayada.

Tipo de laminado (0-90)_{4s} de Grupo A, troquelado a 45°.

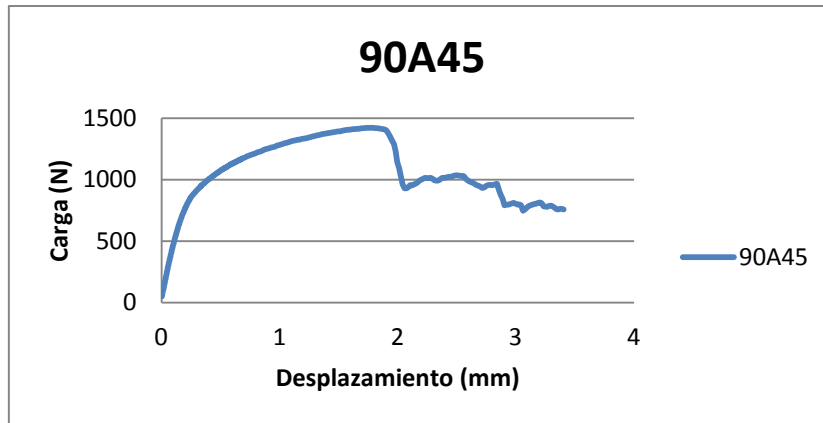
El siguiente laminado soportó una carga máxima de 1420,520N y tuvo un alargamiento máximo de 1,79mm, alcanzados estos valores, el material empezó a perder propiedades sin llegar a romper.

El módulo de Young del laminado de material compuesto es 10,008GPa.

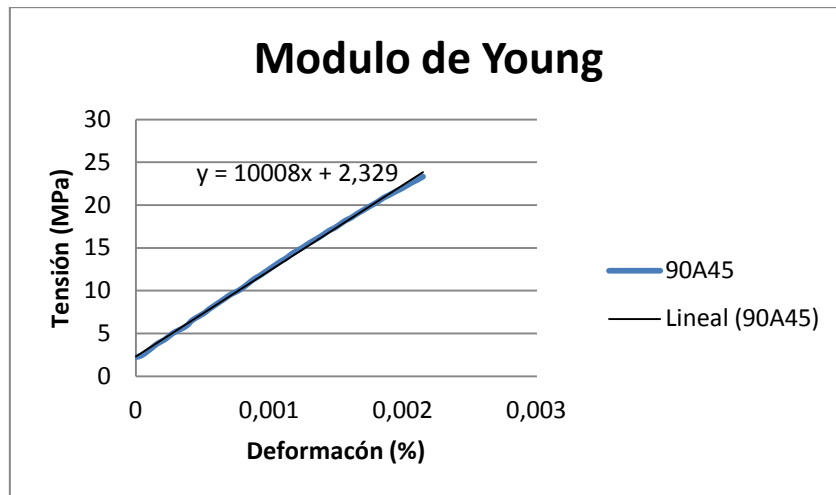
En la primera gráfica se puede observar como el material llega a su máxima resistencia y una vez alcanzado este valor las propiedades bajan.



Figura 77. Probeta 90A45 ensayada.



Gráfica 3: Probeta 90A45.



Gráfica 4: Módulo de Young 90A45.



Tipo de laminado (0-90)_{4s} de Grupo A, troquelado a 22,5°.

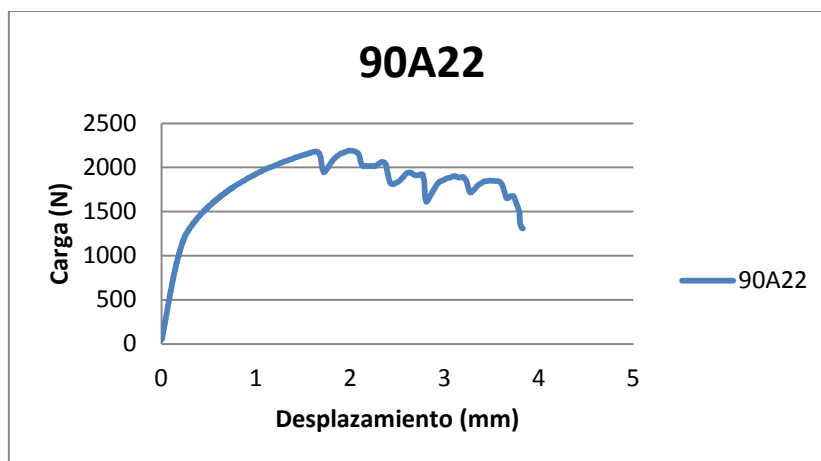
El siguiente laminado soportó una carga máxima de 2181,171 (N) y tuvo un alargamiento máximo de 1,639mm, alcanzados estos valores, el material empezó a perder propiedades sin que se llegaran a romper todas las fibras.

El módulo de Young del laminado es 13,202GPa.

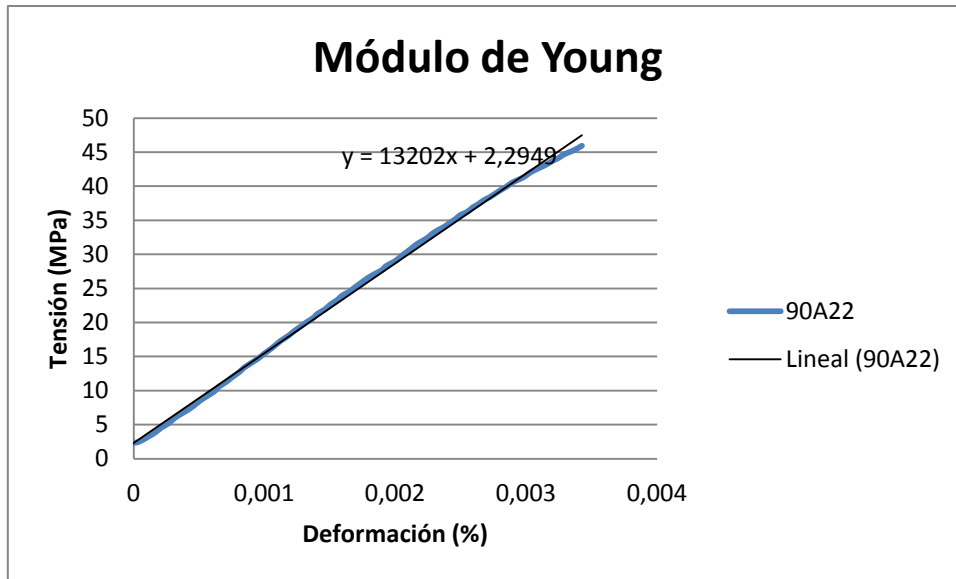
En las gráficas se puede observar como el material pierde sus propiedades poco a poco sin producirse una rotura de repente.



Figura 78. Probeta 90A22 ensayada.



Gráfica 5: Probeta 90A22.



Gráfica 6: Módulo de Young probeta 90A22.

Tipo de laminado (0-90/±45)_{2S} de Grupo B, troquelado a 90°

El siguiente laminado soportó una carga máxima de 6819,121(N) y tuvo un alargamiento máximo de 0.99mm, alcanzados estos valores, el material empezó a perder propiedades sin llegar a romper todas las fibras.

El módulo de Young es 32,456GPa.

Al pasar la frontera de la carga máxima todas las láminas se rompieron.

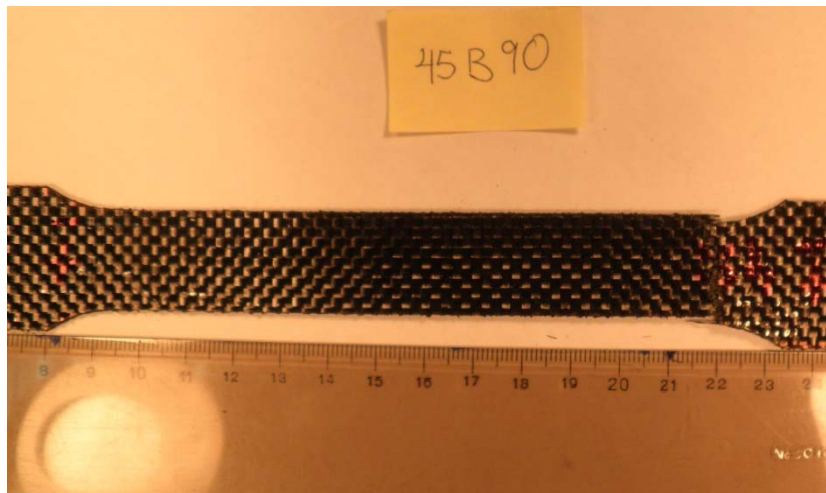
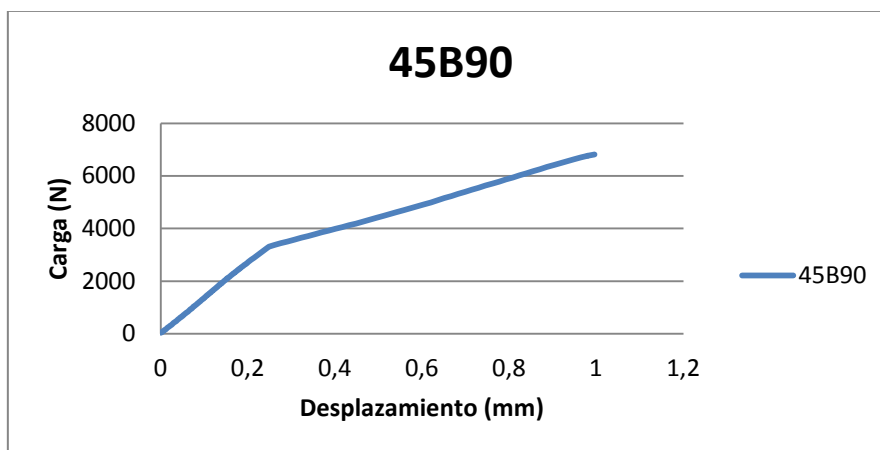
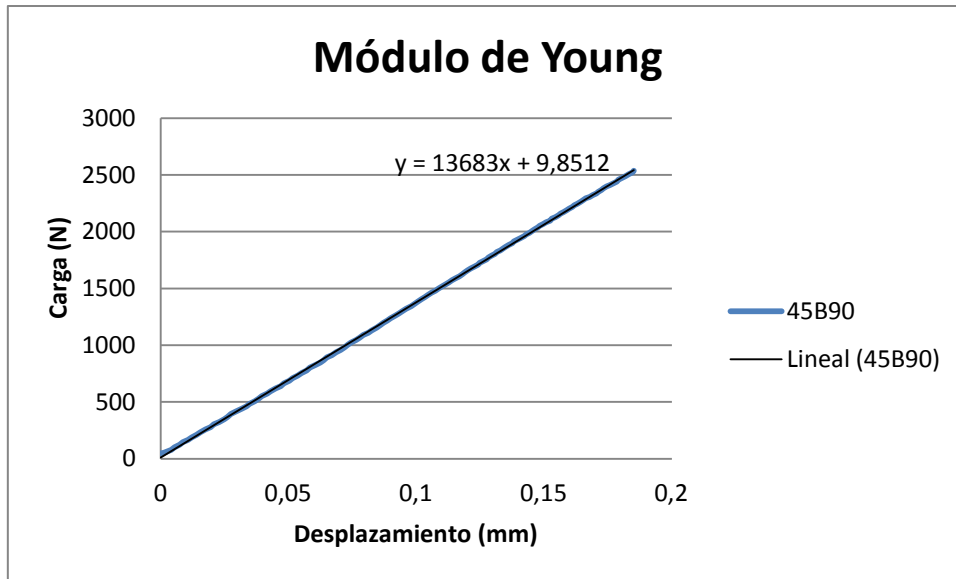


Figura 79. Probeta 45B90 ensayada.



Gráfica 7: Probeta 45B90.



Gráfica 8: Módulo de Young probeta 45B90.

Tipo de laminado (0-90/±45)_{2S} de Grupo B, troquelado a 45°.

El siguiente laminado soportó una carga máxima de 5819,250(N) y tuvo un alargamiento máximo de 0.87mm, alcanzados estos valores, el material empezó a perder propiedades sin llegar a romper todas las fibras.

El módulo de Young es 33,062GPa.

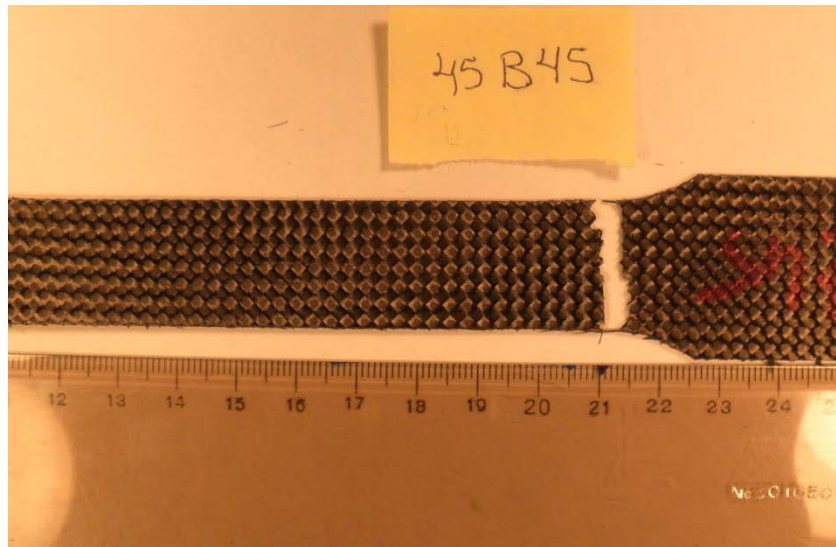
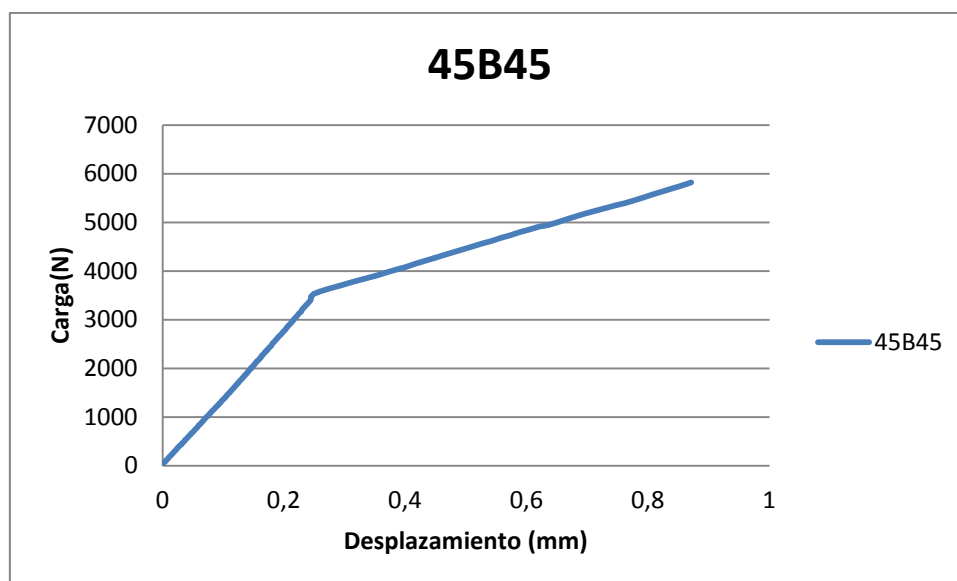
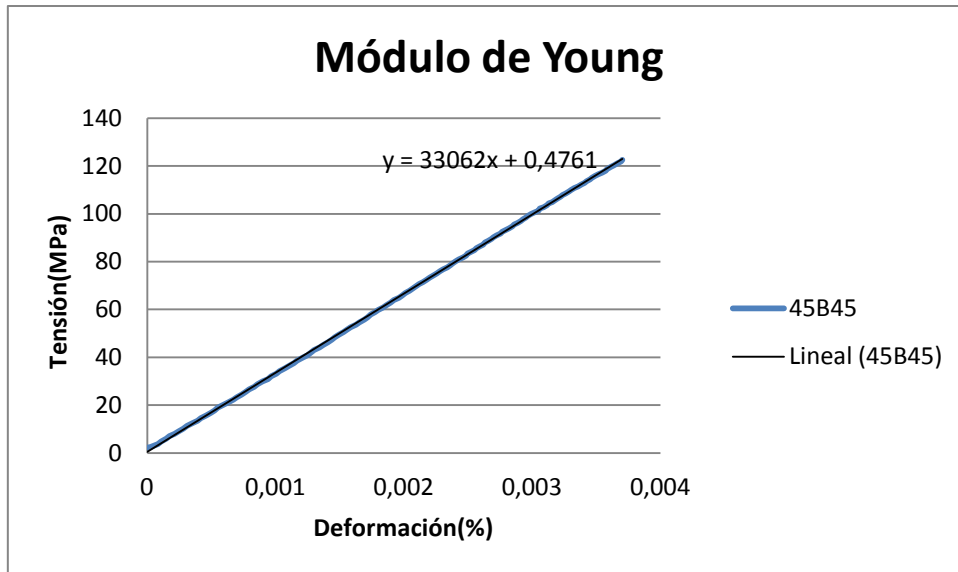


Figura 80. Probeta 45B45 ensayada.



Gráfica 9: Probeta 45B45.



Gráfica 10: Módulo de Young probeta 45B45.



Tipo de laminado (0-90/±45)_{2S} de Grupo B, troquelado a 22°.

El siguiente laminado soportó una carga máxima de 4496,94(N) y tuvo un alargamiento máximo de 0,64mm, alcanzados estos valores, el material sufrió delaminación empezó a perder propiedades sin llegar a romper todas las fibras.

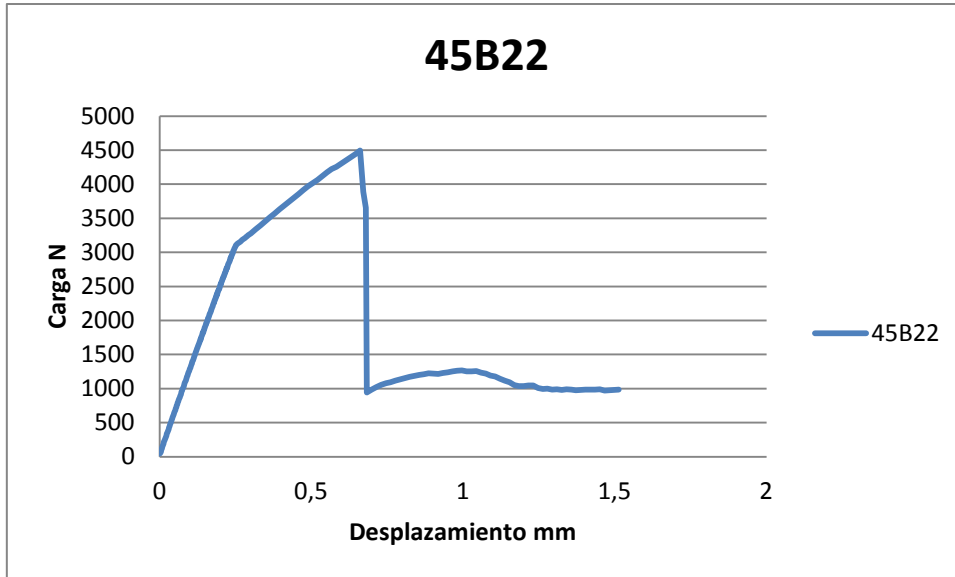
El módulo de Young es 29,691GPa.



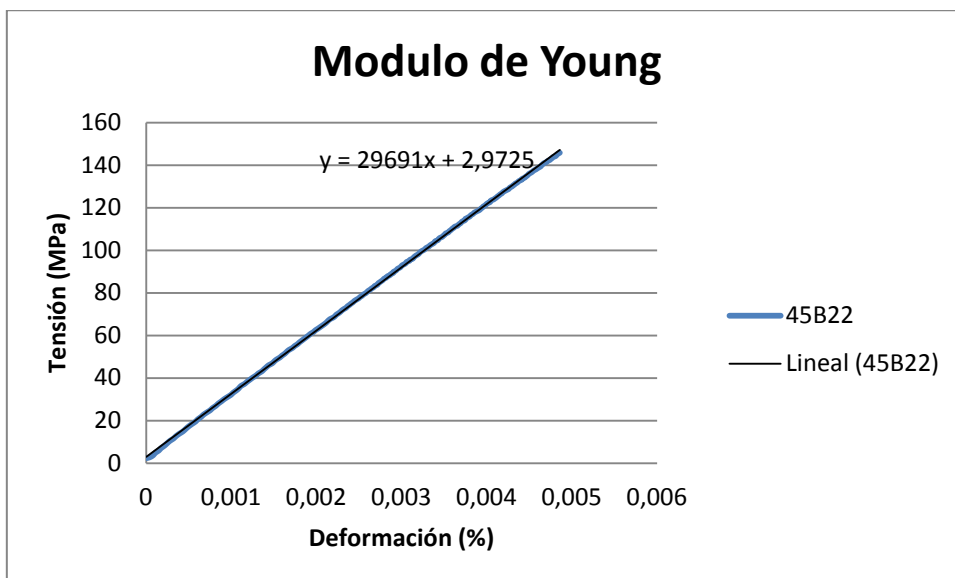
Figura 81a: Probeta 45B22 ensayada.



Figura 81b: Probeta 45B22 ensayada.



Gráfica11: Probeta 45B22.



Gráfica12: Módulo de Young probeta 45B22.



COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Grupo	Orientación del troquelado	Tipo de laminado (0-90) _{4S}		Tipo de laminado (0-90/±45) _{2S}	
		Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)
A	90°	20,9	0,97	20,9	1,02
	45°	20,9	0,96	20,9	1,00
	22,5°	20,9	0,99	20,9	1,03
B	90°	20,9	1,00	20,9	0,99
	45°	20,9	1,00	20,9	1,01
	22,5°	20,9	1,00	20,9	1,01

Tabla 1: espesores y achura de las probetas

Tipo de laminado	Orientación del troquelado	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Modulo de Young(GPa)
Grupo A (0-90) _{4S}	90°	8614,423	0,830	51,107
	45°	1420,520	1,790	10,008
	22,5°	2181,174	1,639	13,202
Grupo B (0-90/±45) _{2S}	90°	6819,121	0,990	32,456
	45°	5819,250	0,870	33,114
	22,5°	4496,940	0,640	29,691

Tabla 2: Resultados de tracción de las probetas

El laminado más resistente a tracción es (0-90)_{4S} con la orientación de 90°.

El laminado menos rígido es el orientado a 45° del tipo de laminado (0-90)_{4S}.

3.4.2 ENSAYO DE IMPACTO Y FLEXIÓN

Para realizar este ensayo se utilizaron: la máquina de impacto NEURTEC de 1 m de longitud y la misma máquina que se utilizó en el ensayo de tracción de la figura 30 cambiándole la célula de carga, por una de 1KN y el complemento de flexión con una separación de 32mm entre los soportes de 3mm de radio. El método de ensayo que se utilizó fue el de flexión a 3 puntos con 1KN de carga.

Se ensayaron las 6 probetas restantes.

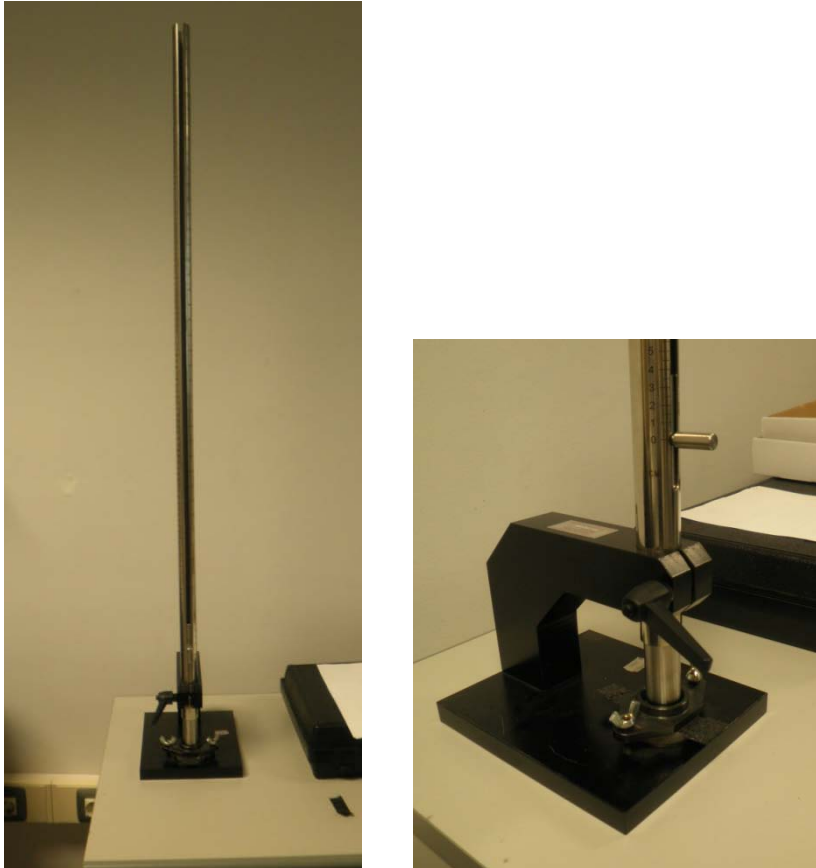


Figura 53. Máquina de impacto NEURTEC de 1m de longitud, del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.



Figura 82. Pesos y complementos, máquina de impacto NEURTEC de 1m de longitud, del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.



Figura 83. Complemento de flexión de la máquina INSTRON con 1KN Célula de carga, del 1r piso del departamento de mecánica y materiales de la UPV.

Procedimiento del ensayo:

- 1º Se marca la probeta con un rotulador en 3 puntos diferentes de su superficie.
- 2º Se mide la resistencia a flexión, sin previo impacto, sometiéndola a una carga de 50N, para no sobrepasar el límite elástico y poder medir el modulo de Flexión.
- 3º Se coloca la probeta en la máquina de impacto y se sube el peso a una altura determinada y se deja caer en el punto marcado de la probeta.



4º Se coloca el punto marcado de la probeta entre los soportes de la máquina de la figura 42 y se realiza el ensayo de flexión.

Con este ensayo se obtuvieron los siguientes datos del material:

Tipo de laminado	Orientación de las fibras	Alturas de Impacto (cm)	Carga Máx. (N)	Deformación máxima (mm)	Modulo de Flexión (GPa)	Perdida del E Flexión Después impacto (%)
Grupo B (0-90) _{4S}	90°	0	50,719	0,664	32,684	
		1	65,127	0,898	31,193	4,561
		3	53,729	0,999	22,412	31,426
		8	49,000	1,798	12,013	63,243
	45°	0	49,859	1,498	13,751	
		1	48,434	1,497	13,136	4,477
		3	47,761	1,999	9,901	24,622
		8	41,984	2,898	6,433	53,219
	22,5°	0	50,910	0,932	24,089	
		1	51,391	0,965	22,915	4,874
		3	51,632	1,165	19,286	19,938
		8	49,726	2,498	8,325	65,439
Grupo A (0-90/±45) _{2S}	90°	0	50,910	0,699	18,963	
		2	50,665	0,764	12,861	8,515
		3	50,692	1,065	7,627	37,389
	45	0	49,993	1,231	18,963	
		5	49,293	1,665	12,861	32,179
		8	49,267	2,665	7,627	59,777
	22,5°	0	48,759	0,831	23,523	
		1	50,852	0,897	22,885	2,711
		3	49,913	1,265	16,756	28,766
		8	50,745	2,197	9,315	60,397

Tabla 3: Resultados del ensayo de flexión.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO Y FLEXIÓN

El módulo de flexión se obtiene de las siguientes fórmulas:

$$E = \text{pendiente} * \frac{L^3}{48 I}$$

$$\text{con } I = \frac{bh^3}{12}$$

-Siendo L: longitud separación soporte (32mm).

-b: la base de la probeta.

-h: El espesor.

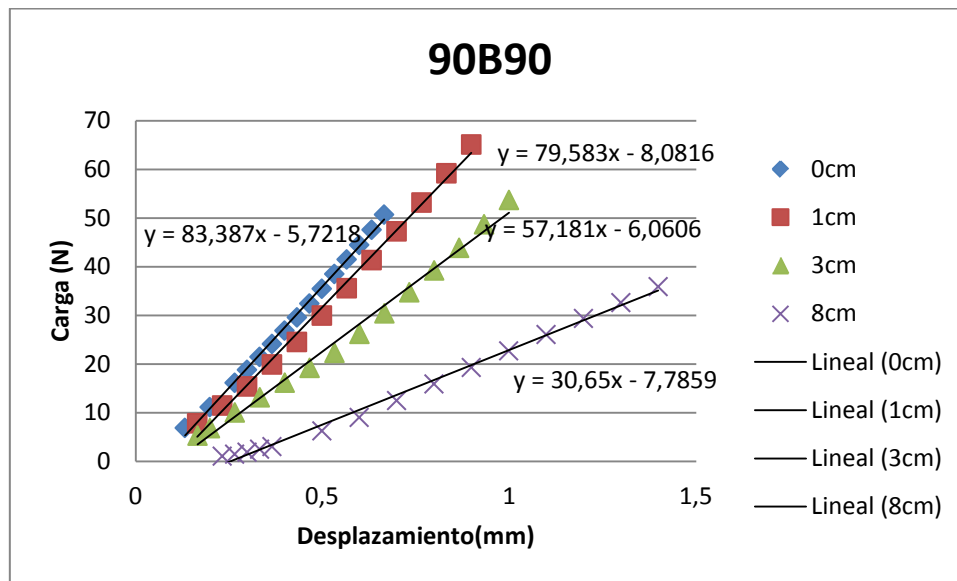
Tipo de laminado (0-90)_{4S} de Grupo B, troquelado a 90°.

Este laminado ha sufrido una reducción de su módulo significativa, tras el impacto de 3cm de altura, su módulo se ha reducido un 31,4%.

Sin impacto es la probeta que mejor se comporta a flexión teniendo el módulo de Young más alto.

0cm	E	32,684
2cm	E	31,193
3cm	E	22,412
8cm	E	12,013
Reducción 0/2		4,561
Reducción 0/3		31,426
Reducción 0/8		63,243

Tabla 4: datos de Módulo de flexión del laminado 90B90



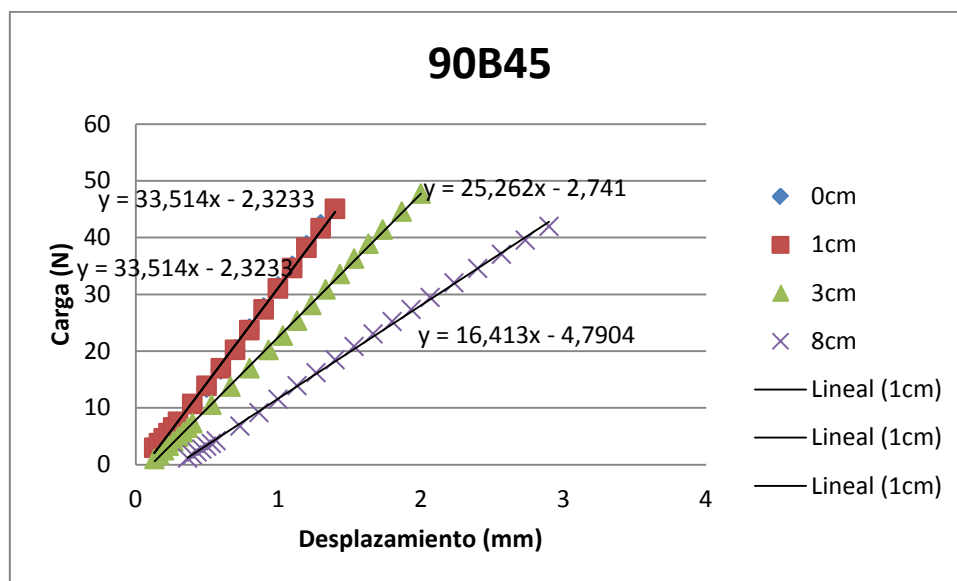
Grafica 13: Probeta 90B90 ensayada a flexión.

Tipo de laminado (0-90)_{4S} de Grupo B, troquelado a 45°.

Este laminado ha soportado mejor los impactos. Reduciéndose el módulo de flexión un 24,6% después del impacto del peso a 3cm.

0cm	E	13,751
1cm	E	13,136
3cm	E	9,901
8cm	E	6,433
Reducción 0/3		24,622
Reducción 0/8		53,219
Reducción 0/1		4,477

Tabla 5: datos de Módulo de flexión del laminado 90B45.



Gráfica 14: Probeta 90B45 ensayada a flexión.

Tipo de laminado (0-90)_{4S} de Grupo B, troquelado a 22,5°.

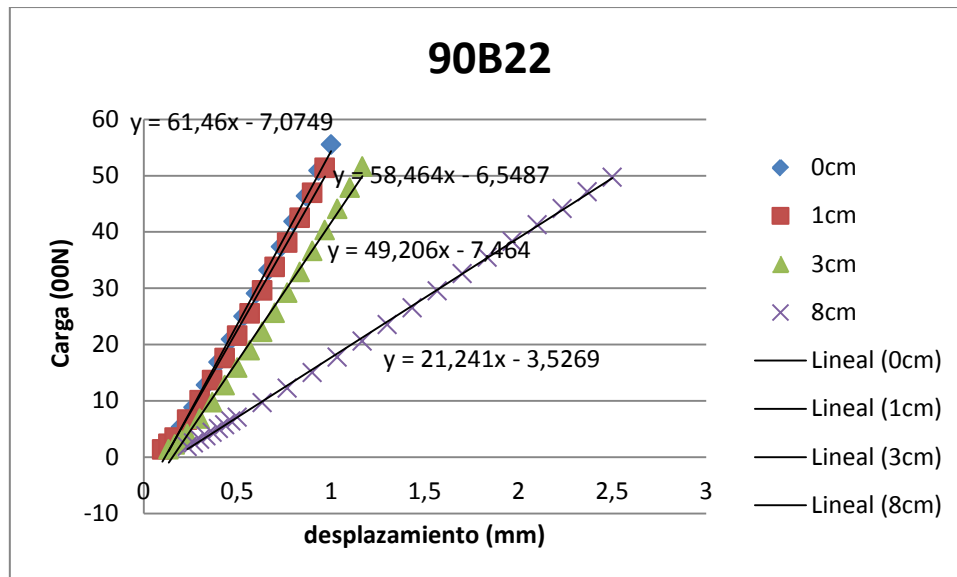
El siguiente laminado, ha reducido su módulo de flexión a un 19,9% tras el impacto de 3cm.

Al producirse a 8 cm de altura el impacto, las fibras se rompen y se pueden observar sin medio alguno.

0cm	E	24,089
1cm	E	22,915
3cm	E	19,286
8cm	E	8,325

Reducción 0/3	19,938
Reducción 0/8	65,439
Reducción 0/1	4,8747

Tabla 6: datos de Módulo de flexión del laminado 90B22.



Gráfica 15: Probeta 90B22 ensayada a flexión.

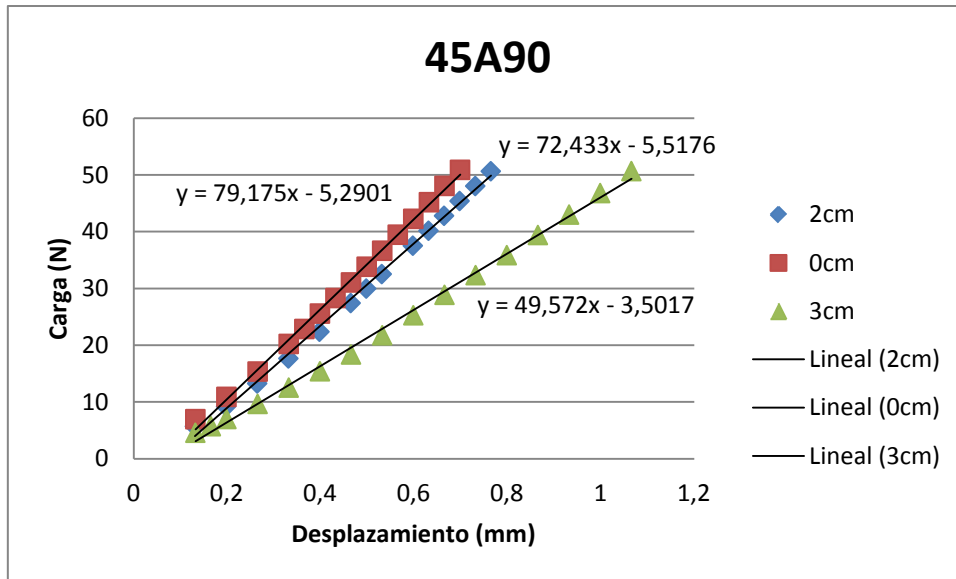
Tipo de laminado (0-90/±45)_{2S} de Grupo A, troquelado a 90°.

El módulo de flexión en este caso se ha reducido un 37% con un impacto de 3cm de altura.

0cm	E	31,033
2cm	E	28,390
3cm	E	19,430

Reducción 0/2	8,515
Reducción 0/3	37,389

Tabla 7: datos de Módulo de flexión del laminado 45A90.



Gráfica 16: Probeta 45A90 ensayada a flexión.

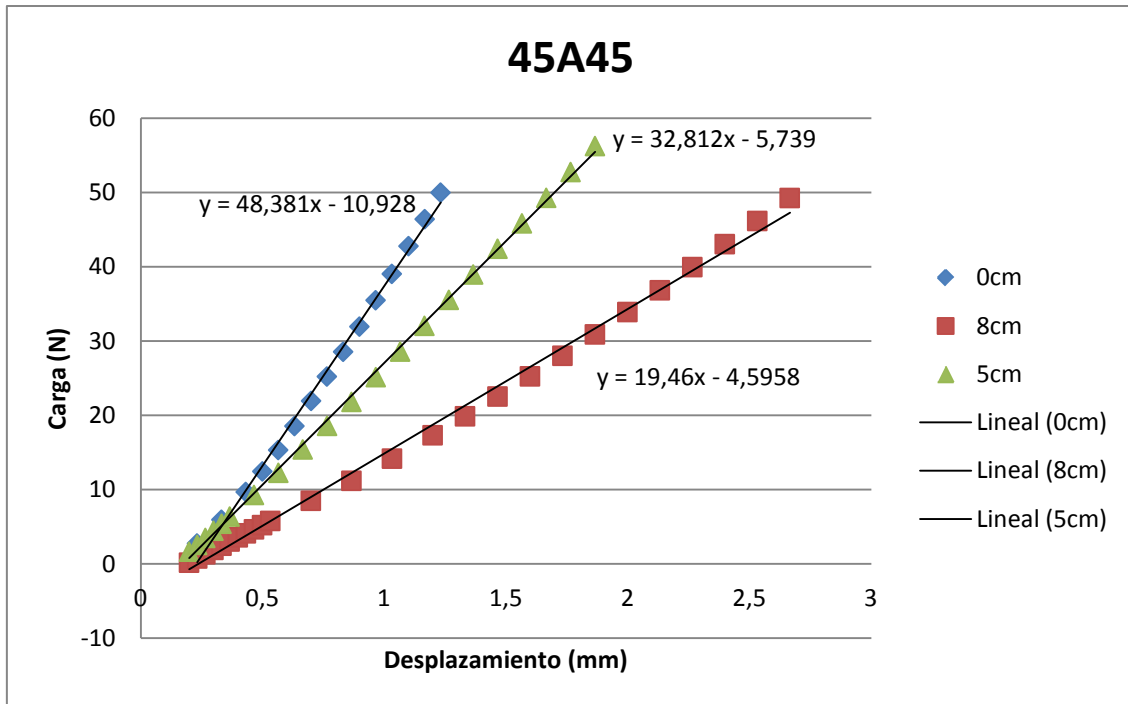
Tipo de laminado (0-90/±45)_{2S} de Grupo A, troquelado a 45°.

En este caso el módulo de flexión después del impacto de 8cm se reduce en un 59,7%.

0cm	E	18,963
5cm	E	12,861
8cm	E	7,627

Reducción 0/8	59,777
Reducción 0/5	32,179

Tabla 8: datos de Módulo de flexión del laminado 45A45.



Gráfica 17: Probeta 45B90 ensayada a flexión.

Tipo de laminado (0-90/±45)_{2S} de Grupo A, troquelado a 22,5°.

A esta probeta se le hicieron 4 ensayos de impacto y flexión en 3 puntos diferentes.

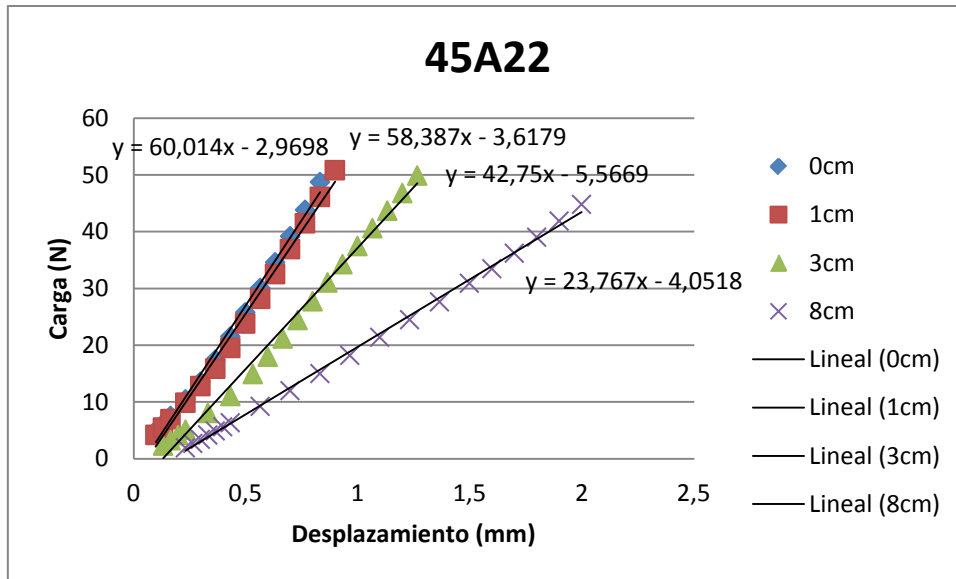
Los impactos se realizaron a las alturas de 0, 1, 3,8 cm.

En la tabla siguiente, se puede observar como baja el modulo según las diferentes alturas de los distintos impactos.

Altura		Modulo Flexión
0cm	E	23,523
2cm	E	22,885
3cm	E	16,756
8cm	E	9,315

Reducción 0/2	2,711
Reducción 0/3	28,766
Reducción 0/8	60,397

Tabla 9: datos de Módulo de flexión del laminado 45A22.



Gráfica 18: Probeta 45B22 ensayada a flexión.

3.5 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA DEL GRAFENO CON LA RESINA.

Se funcionalizaron 4,01g de GO (figura 9) con 230ml de APTS y 401ml de DCC.



Figura 84. Dicyclohexilcarbodimide (DCC), a la izquierda y Aminopropyltriethoxysilane (APTS) a la derecha.

El procedimiento fue el siguiente:

- 1º Se vertió en un vaso el APTS con un agitador magnético.
- 2º Seguidamente se añadió el Oxido de grafeno.
- 3º Después se dispersó en ultrasonidos 15 minutos.



Figura 52. Máquina de ultrasonidos ATU laboratorio electrodeposiciones UPV.



4° Se le añadieron los 401ml de DCC.

5° Se dejó mezclando 18h con el mezclador magnético, (el vaso de mezclado estuvo tapado).



Figura 85. Mezcla de G02 con APTS y DCC.

6° Se filtró 2 veces con abundante agua destilada, para que no emulsionara el APTS y se eliminara.



Figura 86: filtración del óxido de grafeno.



7° Se pesó el grafeno funcionalizado, como estaba húmedo su pesó fue de 17g.

8° Se secó en el horno a 50° durante 24h

9° Se volvió a pesar y pesó 4,6 g debido a que se había funcionalizado.

10° Se mezclaron los 4g de GO con los 50ml de Acetona.

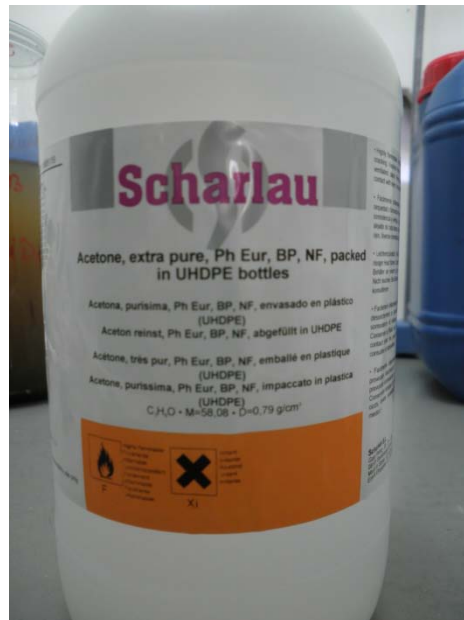


Figura 87. Acetona extra pura Scharlau

11° Se dispersó la mezcla en la máquina de ultrasonidos 15min.

12° Se añadió en un vaso, 14ml de la resina endurecedora catalizador y se marcó el nivel, seguidamente se le vertió el contenido del GO con la acetona.

13° Se dispersó la mezcla con ultrasonidos 15 min.

14° Se dejó mezclando 24h con el mezclador magnético. (La acetona, no se evaporó y se tuvo que meter en el horno a 30° durante 4h).

La resina mezclada presentaba una textura viscosa de color negro intenso, que reflejaba la luz.



Figura 88. Resultado de la mezcla del grafeno con la resina catalizadora.

3.6 FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON GRAFENO.

Se procede de la misma manera que sin grafeno.

Se fabricó el laminado de $(0-90)_{4s}$ utilizando 14ml de resina catalizadora componente A y 36ml del componente B de la resina Epoxi.

Para la dispersión del material entre capas se utilizó un utillaje metálico para que el material no fuera absorbido por el rodillo poroso.



Figura 89. Dispersión de la resina epoxi.

El laminado final aparentemente era muy similar al anterior, ligeramente más oscuro y denso, siendo la proporción aproximada de óxido de grafeno en la resina de un 2% en peso.

Se troquelaron dos probetas a 90° , una a 45° y una a $22,5^\circ$ con la troqueladora de la figura 27.

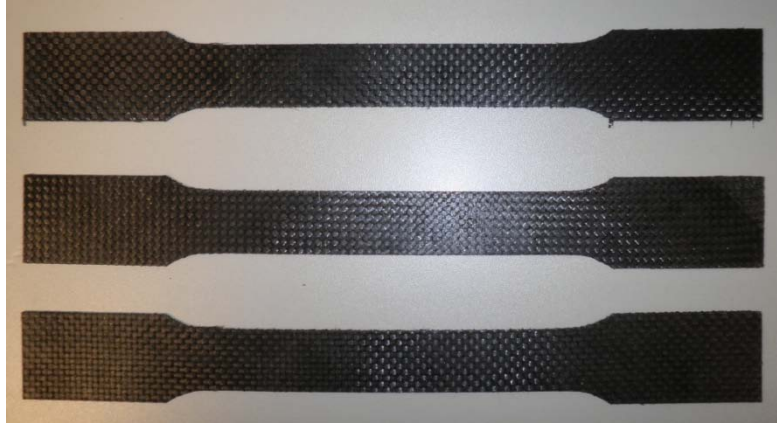


Figura 90. Probetas reforzadas con oxido de grafeno funcionalizado.

Los espesores de las probetas eran de 1mm.

3.7 ENSAYOS DE LAS PROBETAS REFORZADAS CON GO (óxido de grafeno funcionalizado).

3.7.1 ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Tipo de laminado (0-90)_{4S} reforzada con grafeno funcionalizado, troquelado a 90°

El siguiente laminado soportó una carga máxima de 9243(N) y tuvo un alargamiento máximo de 0,84mm, alcanzados estos valores, la probeta se rompió.

El módulo de Young es 56,079GPa. La probeta ha aumentado sus propiedades mecánicas soportando 5GPa más de carga.

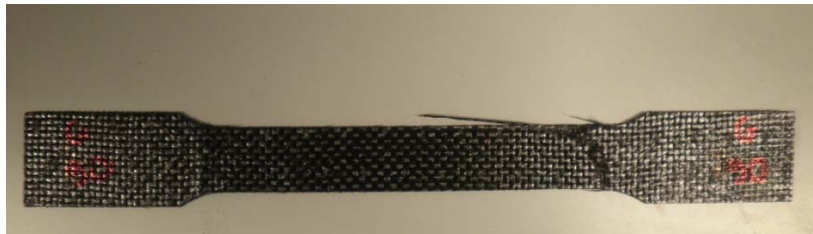
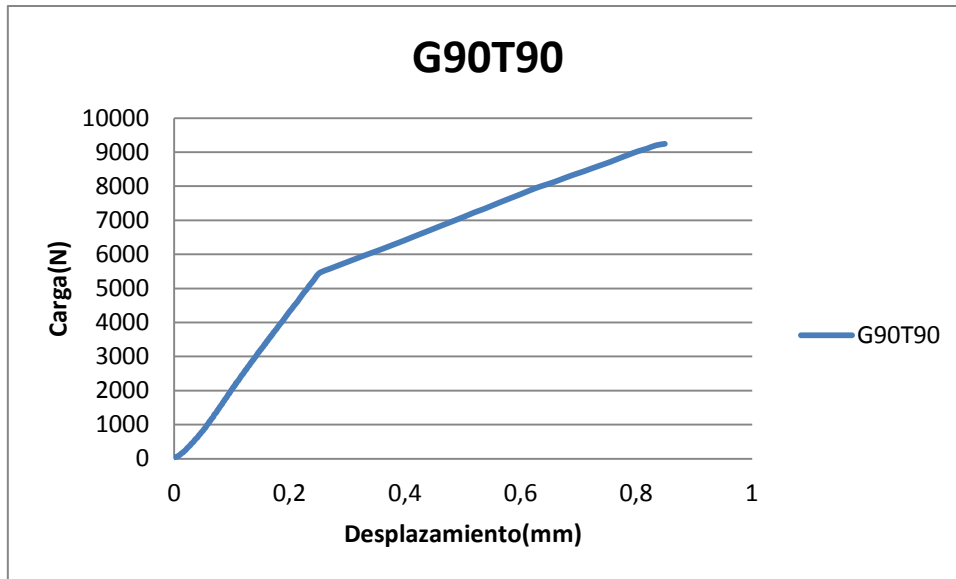
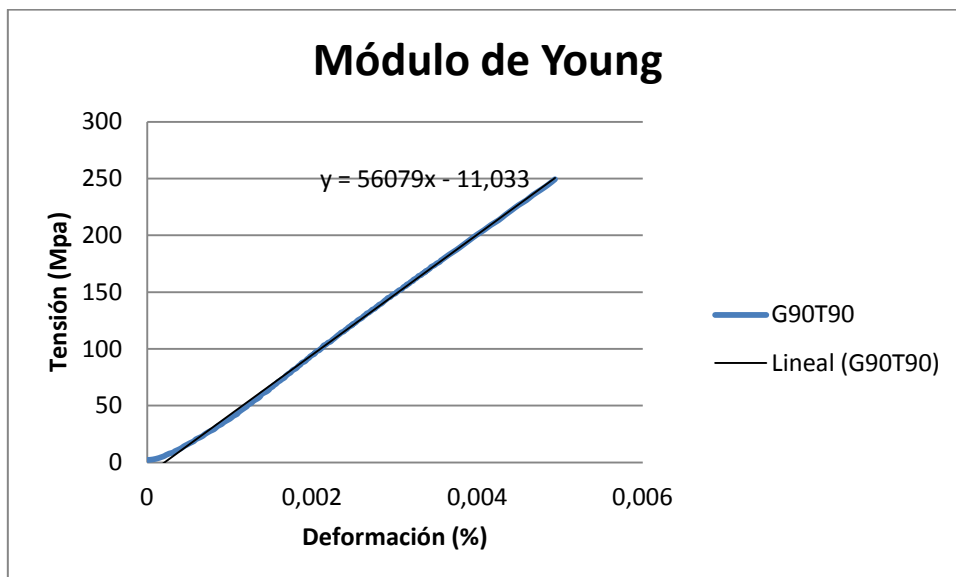


Figura 91. Probeta G90T90 ensayada a tracción.



Gráfica19: Probeta G90T90 ensayada a tracción.



Gráfica20: Módulo de Young, probeta G90T90 ensayada a tracción.

Tipo de laminado (0-90)_{4S} reforzada con óxido de grafeno funcionalizado, troquelado a 45°.

Este laminado laminado soportó una carga máxima de 1343,9(N) y tuvo un alargamiento máximo de 4.3 mm, alcanzados estos valores, la probeta se rompió

El módulo de Young es 7876,9 MPa. La probeta se deforma y curva según la figura 52b.

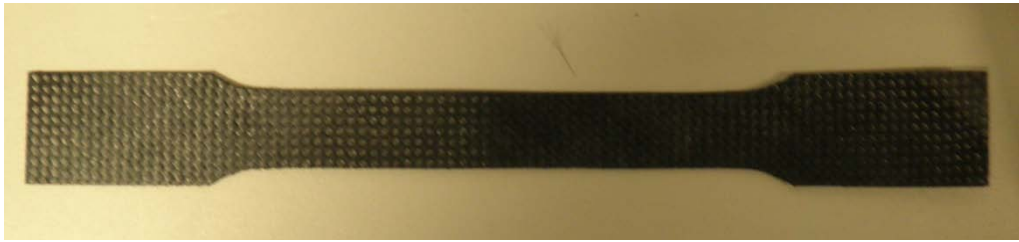


Figura 92a. Probeta G90T45 ensayada a tracción.

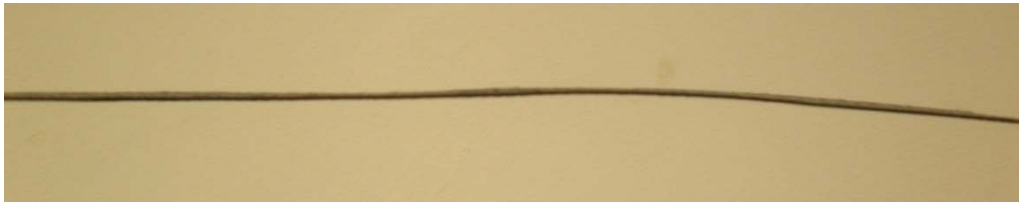
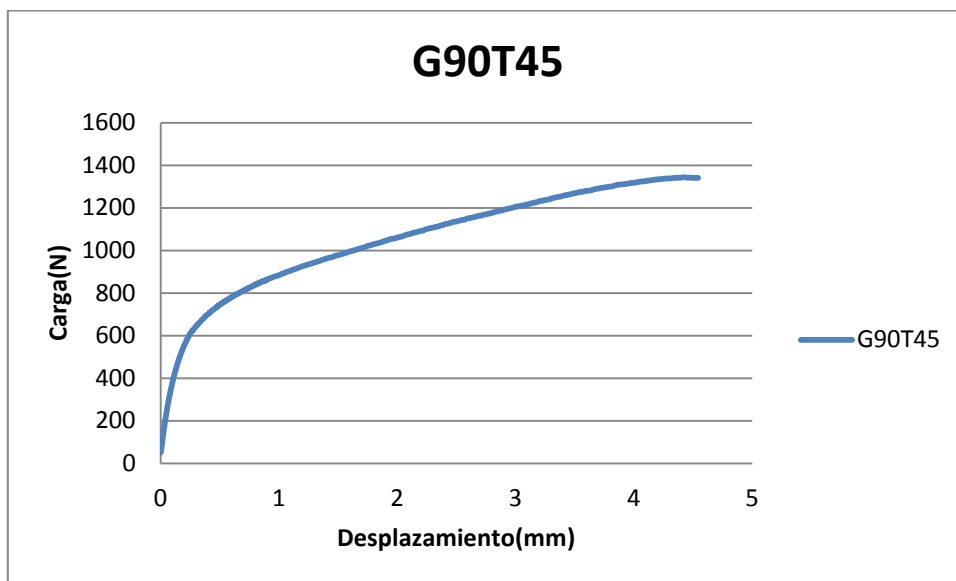
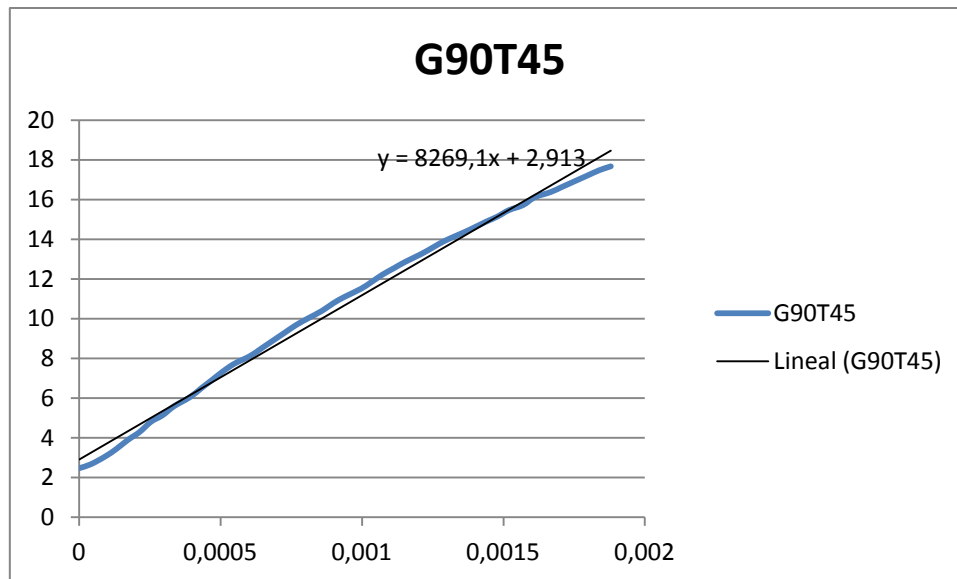


Figura 92b. Probeta G90T45 ensayada a tracción.



Gráfica21: Probeta G90T45 ensayada a tracción



Gráfica 22: Módulo de Young, probeta G90T45 ensayada a tracción.

Tipo de laminado	Orientación troquelado	Ancho (mm)	Espesor(mm)
(0-90) _{4S}	90°	20.9	1
Reforzado	45°	20.9	1

Tabla 10: Datos de la superficie de las probetas reforzadas.

Tipo de laminado	Orientación troquelado	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Modulo de Young
(0-90) _{4S}	90°	9243	0.848	56,079GPa
Reforzado	45°	1343,916	4,32	7876,9MPa

Tabla 11: Datos obtenidos en el ensayo de tracción.

3.7.2 ENSAYOS DE IMPACTO Y FLEXIÓN

Especímenes ensayados 3. Las probetas se ensayaron a impacto en 3 puntos diferentes y se les hicieron 4 ensayos de flexión.

Los impactos se realizaron a las alturas de 0, 1, 3,8 cm.

Se pudo comprobar que a partir de impactos producidos a 35cm se producía deformación plástica y delaminación en la probeta.



Tipo de laminado (0-90)_{4s} reforzado, troquelado a 90°.

A esta probeta se le hicieron 4 ensayos de impacto y flexión en 3 puntos diferentes.

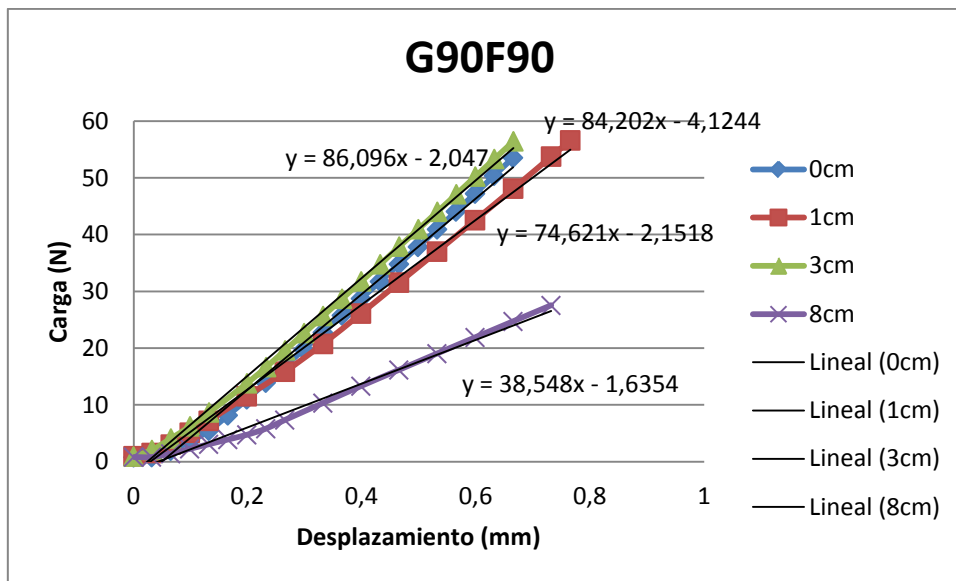
Los impactos se realizaron a las alturas de 0, 1, 3,8 cm.

En la tabla siguiente, se puede observar como baja el modulo según las diferentes alturas de los distintos impactos.

0cm	E	33,003
1cm	E	29,248
3cm	E	33,746
8cm	E	15,109

Reducción 0/1	11,378
Reducción 0/3	-2,249
Reducción 0/8	54,219

Tabla 12: datos de Módulo de flexión del laminado G90F90.



Gráfica 23: Probeta reforzada troquelada a 90° ensayada a flexión.



Tipo de laminado (0-90)_{4S} reforzado, troquelado a 45°.

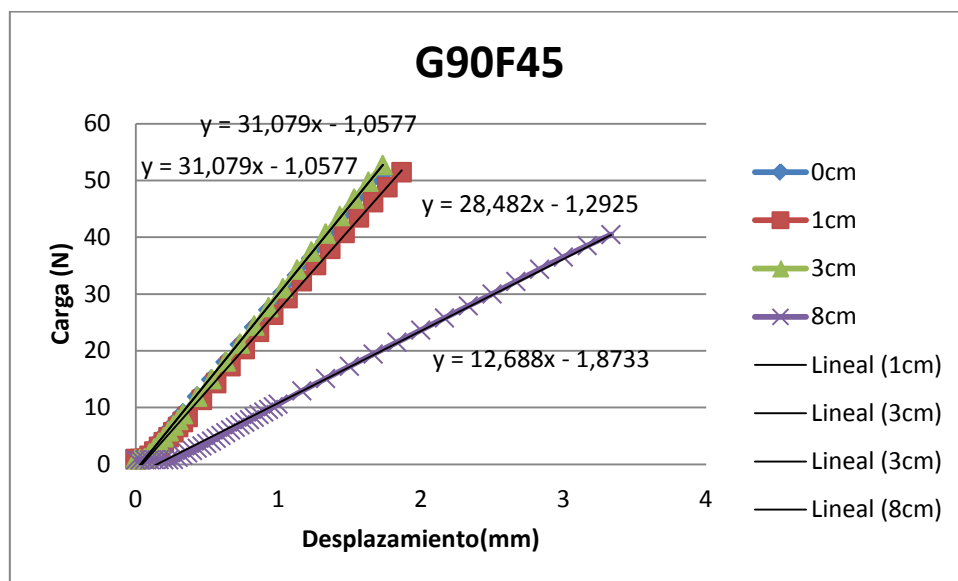
En este caso el las propiedades del modulo de flexión fueron muy similares tras los impactos de 1 y 3 cm.

La razón por la que la recta de 3cm esté por encima de la de 0cm, puede ser debida a que el espesor en los diferentes puntos de impacto, es ligeramente distinto o a que el óxido de grafeno no se ha dispersado correctamente.

0cm	E	12,181
1cm	E	11,163
3cm	E	11,163
8cm	E	4,973

Reducción 0/1	8,356
Reducción 0/3	8,356
Reducción 0/8	59,175

Tabla 13: datos de Módulo de flexión probeta reforzada troquelada a 45°.



Gráfica 24: Probeta reforzada troquelada a 45° ensayada a flexión.

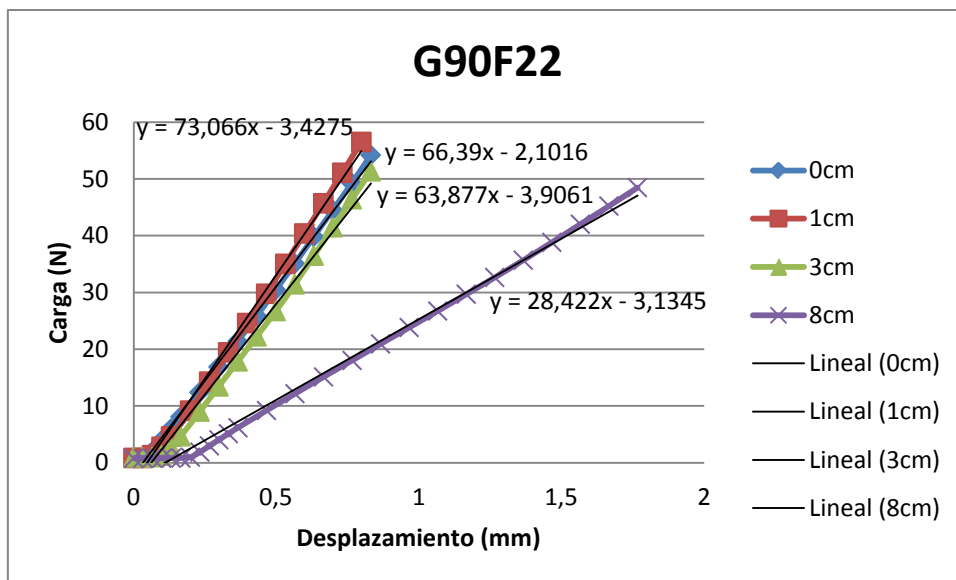


Tipo de laminado (0-90)_{4s} reforzado, troquelado a 22,5°.

Esta probeta no presentó un cambio importante de módulo tras los impactos de 1 y 3cm. Sin embargo tras el impacto de 8cm el módulo sufre una reducción del 57% disminuyendo significativamente sus propiedades de rigidez.

0cm	E	26,022
1cm	E	28,639
3cm	E	25,0373
8cm	E	11,140
Reducción 0/1		-10,055
Reducción 0/3		3,785
Reducción 0/8		57,189

Tabla 14: Datos de Módulo de flexión probeta reforzada troquelada a 22°.



Gráfica 25: Probeta reforzada troquelada a 22,5° ensayada a flexión.



Tipo de laminado	Orientación de troquelado	Alturas de Impacto (cm)	Carga Máx. (N)	Deformación máxima (mm)	Modulo de Flexión (GPa)	Perdida del E Flexión Después impacto (%)
(0-90) _{4S} Reforzado	90°	0	53,542	0,664	33,003	
		1	56,607	0,7653	29,248	11,378
		3	56,446	0,665	33,746	-2,249
		8	53,409	1,364	15,109	54,219
	45°	0	51,204	1,731	12,181	
		1	51,471	1,865	11,163	8,356
		3	52,736	1,732	11,163	8,356
		8	46,581	4,998	4,973	59,175
	22,5°	0	54,215	0,831	26,022	
		1	56,526	0,798	28,639	-10,055
		3	51,364	0,831	25,037	3,785
		8	48,487	1,766	11,140	57,189

Tabla 15: Resultados del ensayo de impacto y flexión de las probetas reforzadas con oxido de grafeno funcionalizado.

3.8 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PROBETAS DE FIBRA DE CARBONO – EPOXI REFORZADAS Y SIN REFORZAR.

3.8.1 COMPARACIÓN ENSAYOS DE TRACCIÓN

	Probetas sin Refuerzo	Probetas con Refuerzo
Orientación de Troquelado	Modulo de Young(GPa)	Modulo de Young
90°	51,107	56,079GPa
45°	10,008	7876,9MPa

Tabla 16: Comparación de módulo de Young del ensayo de tracción de las probetas reforzadas y sin reforzar.

Comparando resultados se observa que al reforzar las probetas con óxido de grafeno funcionalizado orientación de troquelado 90° el módulo de Young aumenta 5GPa, un 10%.

El módulo de la probeta reforzada con orientación 45° disminuye, esto puede ser debido a que únicamente había una muestra, para hacer el ensayo y hubo una compresión de la probeta en la realización del ensayo de tracción, que provocó pérdidas de propiedades entre ellas la de rigidez.

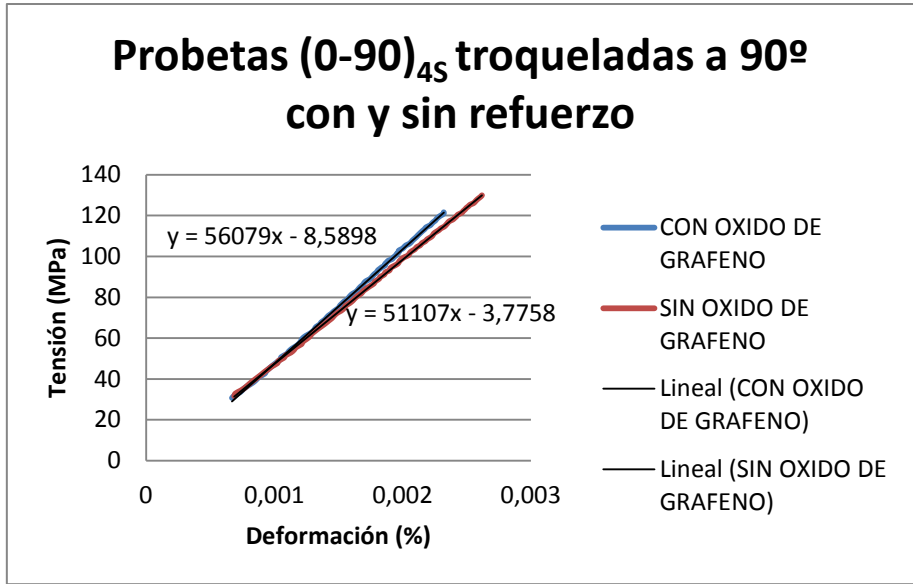


Gráfico 21: Comparación ensayos de tracción probetas (0-90)_{4s} troqueladas a 90° con y sin refuerzo de GO

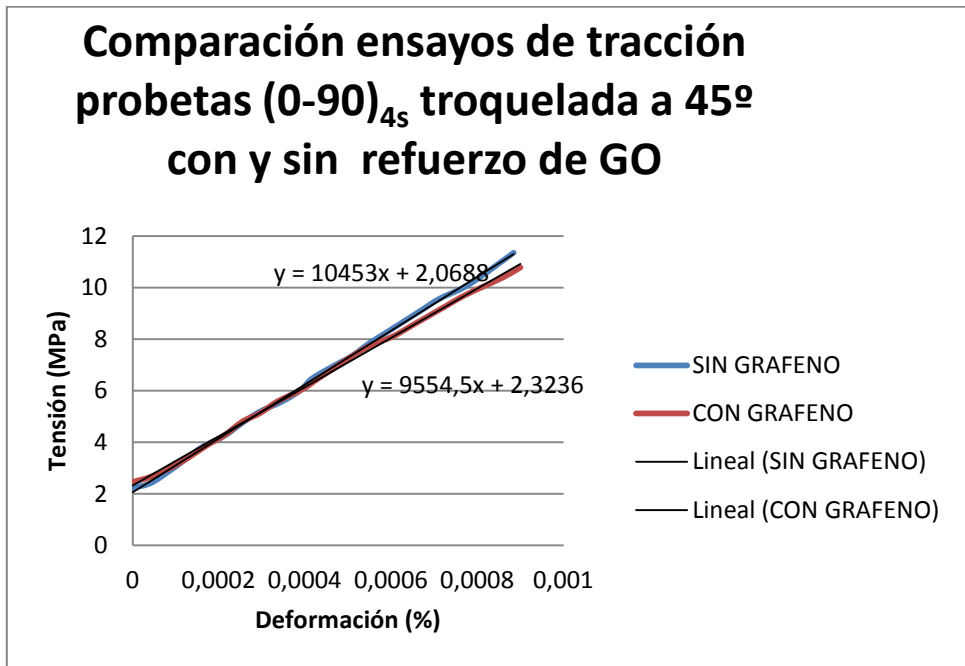


Gráfico 21: Comparación ensayo de Tracción probetas del laminado (0-90)_{4s} troqueladas 45° con y sin refuerzo de GO.

3.8.2 COMPARACIÓN ENSAYOS DE IMPACTO Y FLEXIÓN

Orientación de troquelado	Alturas de Impacto (cm)	(0-90) _{4s} Sin Refuerzo	(0-90) _{4s} Con GO	(0-90) _{4s} Sin Refuerzo	(0-90) _{4s} con GO
		Modulo de Flexión (GPa)	Modulo de Flexión (GPa)	Perdida del E Flexión Después impacto (%)	Perdida del E Flexión Después impacto (%)
90°	0	32,684	33,003		
	1	31,193	29,248	4,561	11,378
	3	22,412	33,746	31,426	-2,249
	8	12,013	15,109	63,243	54,219
45°	0	13,751	12,181		
	1	13,136	11,163	4,477	8,356
	3	9,901	11,163	24,622	8,356
	8	6,433	4,973	53,219	59,175
22,5°	0	24,089	26,022		
	1	22,915	28,639	4,874	-10,055
	3	19,286	25,037	19,938	3,785
	8	8,325	11,140	65,439	57,189

Tabla 17. Comparación de módulos de resistencia en el ensayo de Flexión e impacto.

Se puede observar en las probetas troqueladas a 22,5° y 90° que el modulo de flexión aumenta al reforzar los especímenes con oxido de grafeno.

Respecto a los resultados del ensayo de impacto, las probetas reforzadas, son más resistentes en los impactos de 3cm, siendo similares a los de 1 cm diferenciándose del ensayo hecho sin refuerzo.

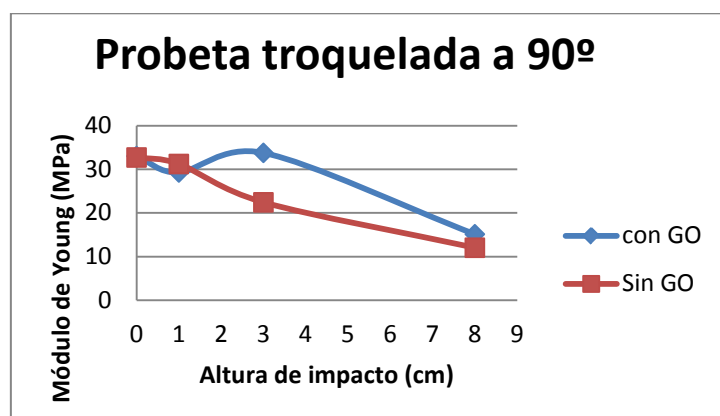


Gráfico 21: Comparación de resultados ensayo de Flexión, probeta (0-90)_{4s}, troquelada a 90°

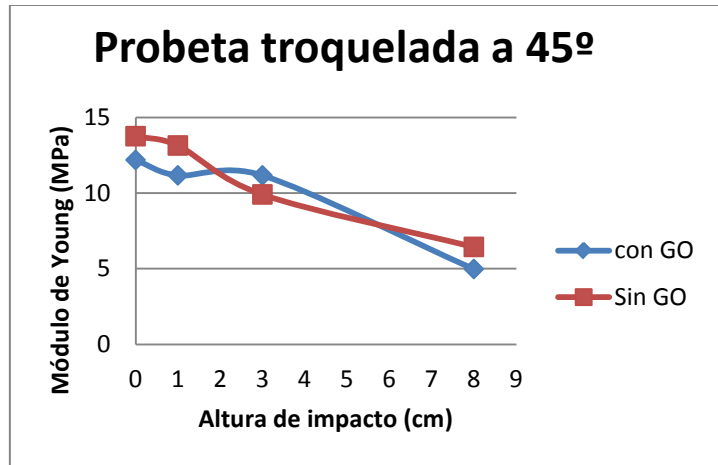


Gráfico 21: Comparación de resultados ensayo de Flexión, probeta (0-90)_{4s} troquelada a 45°

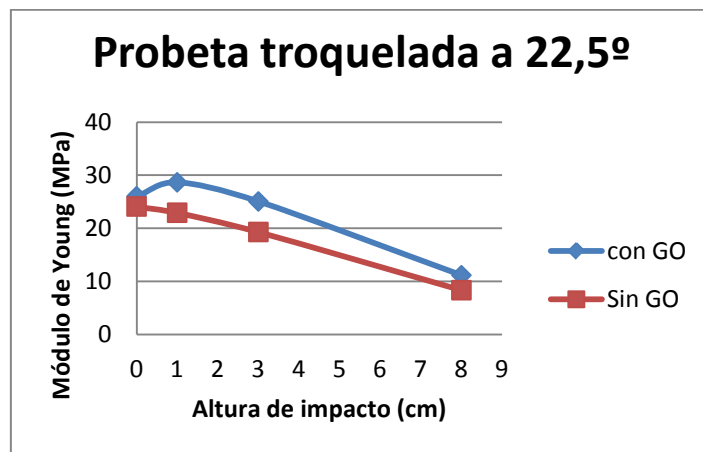


Gráfico 21: Comparación de resultados ensayo de Flexión probeta (0-90)_{4s} troquelada a 22,5°.



3.8.3 COMPARACIÓN DE DENSIDADES.

Tipo de probeta	Orientación del laminado	Densidad (g/ cm ³)
Sin Reforzar	(0-90)_{4s}	1.308
	(0-90/±45)_{2s}	1.338
Reforzado	(0-90)_{4s}	1.378

Tabla 18. Comparación de densidades.

Al añadir el óxido de grafeno la densidad aumenta un 0.04%.



CAPITULO 4

FRACTOGRAFÍA



En este apartado, se van a mostrar y a caracterizar, imágenes captadas con el (FE-SEM) Microscopio de barrido SEM con cañón de emisión de campo de la UPV.

El microscopio electrónico de barrido, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes.

Los nuevos microscopios SEM trabajan utilizando como fuente de electrones un cañón de emisión de campo (Field Emission Gun, FEG) que proporcionan haces de electrones de alta y baja energía más focalizados, lo que permite mejorar la resolución espacial, minimizar cargas sobre el espécimen a observar, causando además menos daños en muestras sensibles.



Figura 93. (FE-SEM) Universidad politécnica de Valencia.



Figura 94. Fe-SEM con monitores de visualización

En los monitores se pueden observar Micras y nanómetros de la muestra en el monitor de la izquierda y como se acerca la muestra a la lente, y el laser en el de la derecha.

Como la fibra de carbono es conductora no se recubre la muestra con carbono. Para evitar el enmascaramiento del grafeno.

Se montaron las dos muestras juntas. Para evitar cambios.



Figura 95. Muestra en soporte de aluminio con moneda para comparar tamaño

La preparación de la muestra se hizo con guantes para evitar inclusiones en la muestra

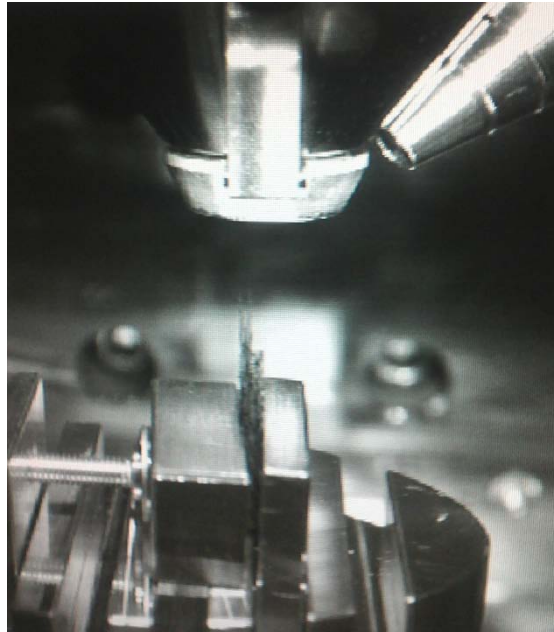


Figura 96. Muestra dentro del FE-SEM.

IMÁGENES CAPTADAS DE DETALLE

Se caracterizan 2 probetas: Una de ellas con óxido de grafeno y la otra sin él. La orientación de troquelado de las fibras de ambas muestras es 90° y el laminado $(0-90)_{4s}$ ya que este es, el que presenta mejores propiedades de resistencia.

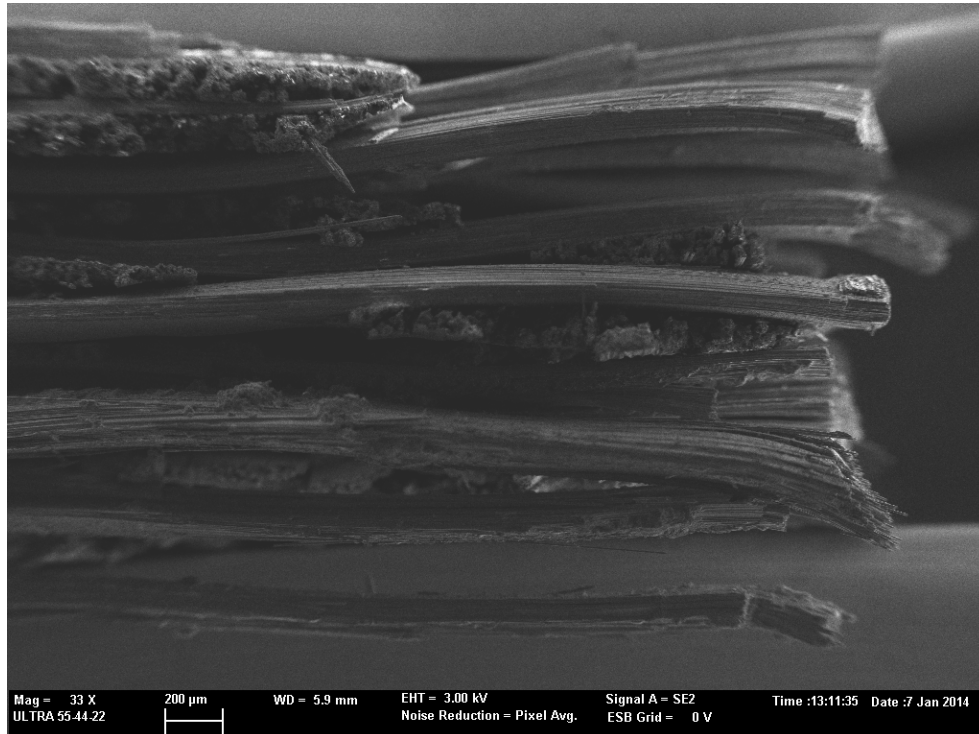


Figura 97. Laminados 200 μm .

Probeta sin grafeno:

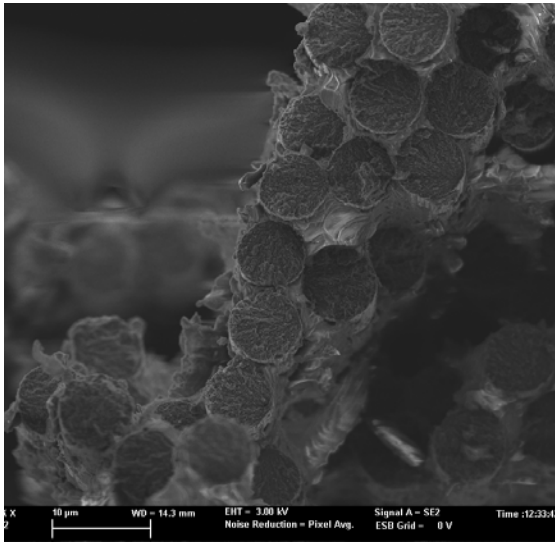


Figura 98. Fractura de la Probeta 10 μm sin grafeno.

La resina ha cohesionado las fibras con éxito. La fractura de la fibra es frágil se pueden observar marcas de rívers típicas en este tipo de fractura.

La resina se ha fracturado de forma dúctil, su superficie es irregular. Esto es debido a su bajo L.E.

Probetas con grafeno:

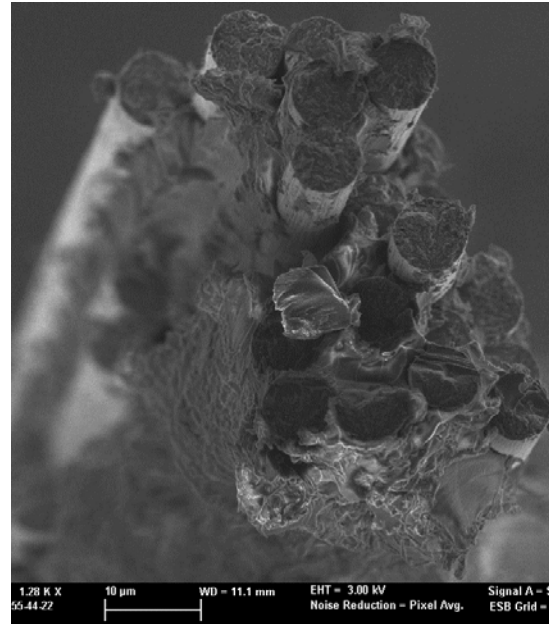


Figura 99. Fractura de la probeta 10 μm con grafeno

La resina se carga de electrones y brilla, porque no conduce como la fibra.

La fractura de la fibra es frágil, no se muestran marcas de rívers tan claras como en la probeta sin grafeno.

La resina se ha adherido por completo a las fibras.

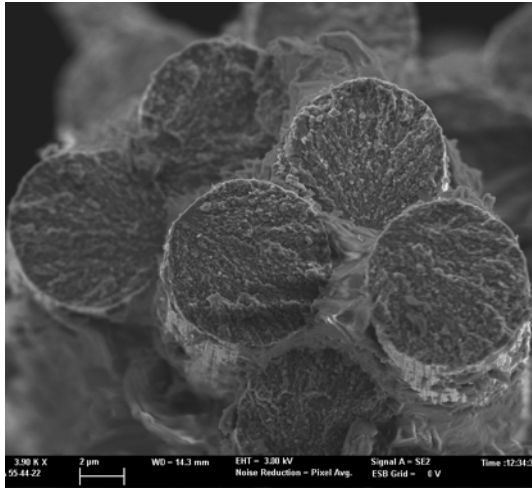


Figura 100. Fractura de la Probeta 2 μm sin grafeno.

En las fibras, se pueden observar marcas de rivers, típicas de materiales frágiles. Se puede comprobar que la fisura es aproximadamente perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y la superficie de fractura es relativamente plana.

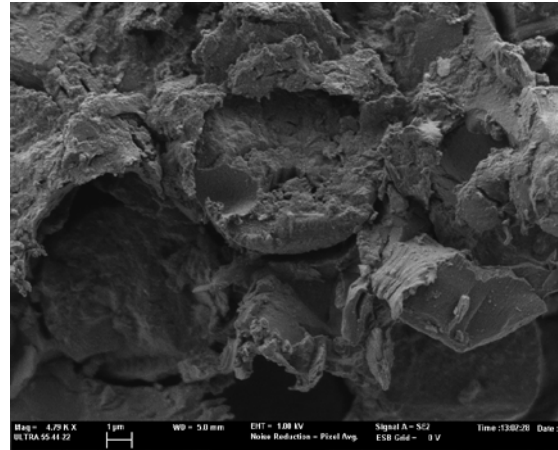


Figura 101. Fractura de la Probeta 2 μm con grafeno.

La matriz tiene una forma más abrupta.

Debido al esfuerzo de tracción las fibras se han separado de la matriz.

Las fibras presentan fractur fragil, debido a su rugosidad superficial.

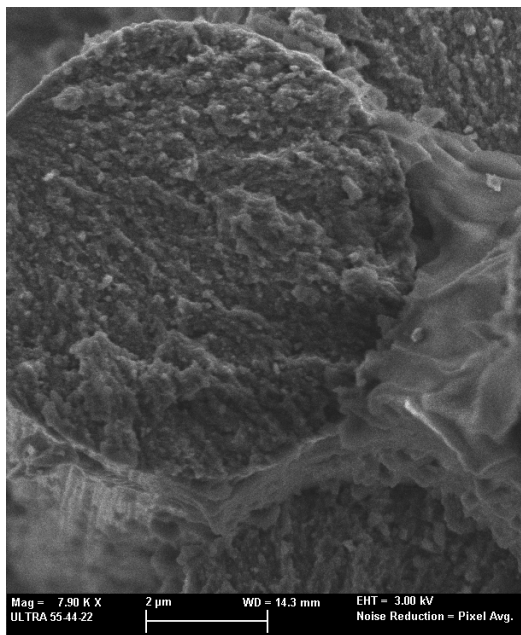


Figura 102. Fractura de la Probeta resolución 2 μm sin GO.

El diámetro de cada fibra es aproximadamente de 5 μm.

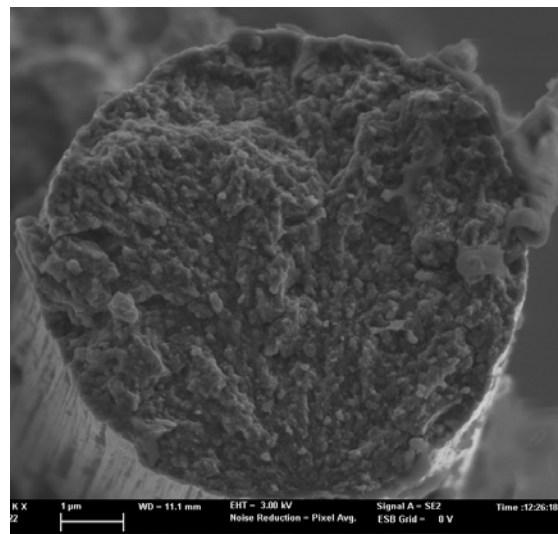


Figura 103. Fractura de la Probeta resolución 1 μm con grafeno.

Detalle de la fractura de una fibra. Fractura abrupta con restos de resina en los laterales.

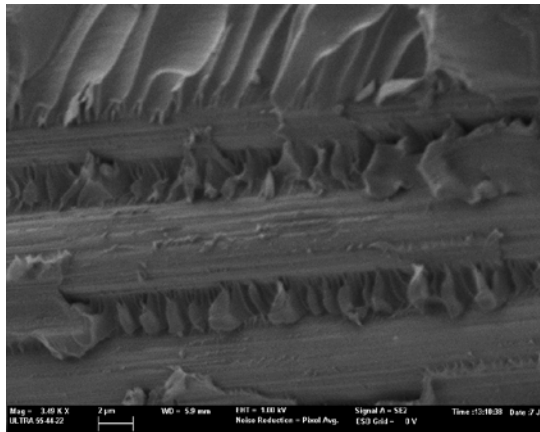


Figura 104. Fractura de la Probeta resolución 2 μm sin GO.

La fractura en este caso es lateral se ve la fibra con una rugosidad horizontal homogénea, debida al método de fabricación de estirado. La matriz presenta una fractura regular de crestas y valles.

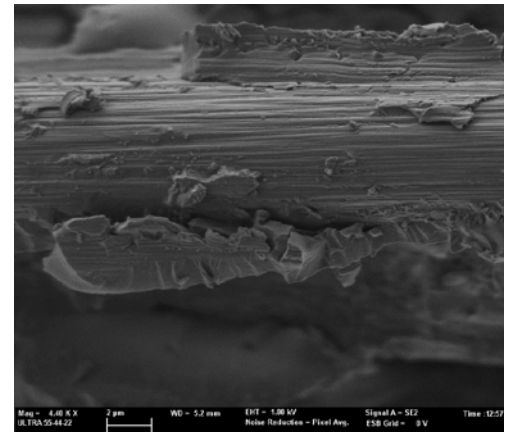


Figura 105. Fractura de la Probeta resolución 2 μm con GO.

Fractura de la resina más irregular por el GO. Este lo que provoca es el aumento de resistencia de la resina. Fractura más frágil en comparación con la Fig. 104.

Las partículas de resina en las fibras muestran una buena adherencia de la matriz al refuerzo.

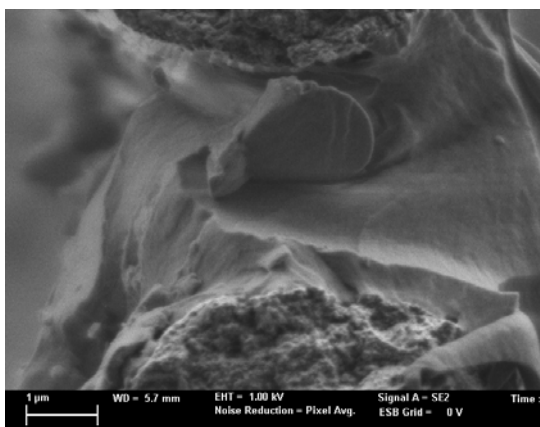


Figura 106. Fractura de la Probeta resolución 1 μm sin GO.

La fractura de la resina es lisa y dúctil en comparación con la fibra que presenta una fractura abrupta y frágil.

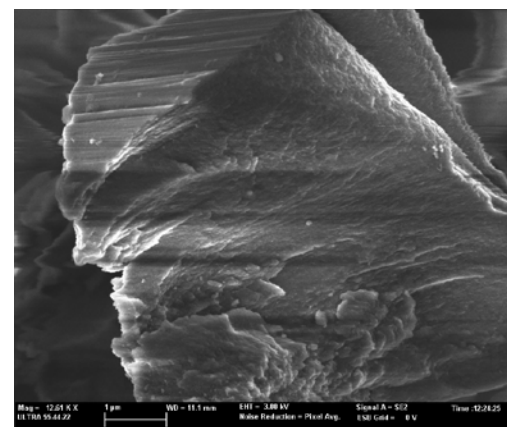


Figura 107. Fractura de la Probeta resolución 1 μm con GO.

La resina contiene GO, las inclusiones mas blancas pueden ser el oxido de grafeno

La matriz con grafeno presenta más rugosidad frente a la de sin GO.



CAPITULO 5

CONCLUSIONES



El material compuesto obtenido tiene muy buenas características de resistencia a tracción con y sin refuerzo de óxido de grafeno. El material compuesto sin refuerzo, es ligero, de color negro, rugoso y muy rígido, además de tener buen aspecto superficial. Al reforzarlo con óxido de grafeno presenta menos brillo que las probetas sin reforzar, presenta un acabado superficial más rugoso pero al mismo tiempo resulta más escurridizo, debido a la presencia del óxido de grafeno que actúa como lubricante.

Se ha corroborado que las propiedades mecánicas del material dependen grandemente de la orientación de las fibras. Como cabría esperar, las probetas que mejor han resistido los ensayos han sido las troqueladas a 90° del laminado (0-90)_{4s}, ya que el compuesto presenta un mayor nº de fibras alineadas en la dirección de carga.

El Módulo de Young aumenta 6 GPa (~10%) al añadir el refuerzo de GO, en la probeta ensayada a tracción con respecto a la no reforzada. Aparentemente las propiedades mecánicas aumentan con el refuerzo de óxido de grafeno, pero debido al escaso número de ensayos se deberían hacer ulteriores pruebas para corroborar los resultados obtenidos.

En los ensayos de flexión realizados tras aplicar diferentes energías de impacto, se observa que la presencia de óxido de grafeno en la matriz (aparte de aumentar el módulo en la mayoría de las probetas) reduce el daño de los impactos, al menos hasta niveles de energías intermedias (0.3 J). Las pequeñas incongruencias observadas en algunos de los resultados pueden ser debidas tanto a fuentes de error del propio ensayo como del material debido a la dificultad de conseguir laminados totalmente planos, por la falta de obtener un GO funcionalizado puro y por la dispersión del Oxido de grafeno funcionalizado.

Por último, en el estudio fractográfico realizado con FE-SEM, se pueden observar, en la fractura de la fibra, marcas de ríos, típicas en las fracturas frágiles. También se pueden observar las marcas de procesado del material. La matriz sin refuerzo, presenta una fractura lisa y dúctil, sin embargo, la reforzada presenta más rugosidad en la fractura, esto puede ser atribuido a la presencia de GO. No se han podido observar las láminas de grafeno debido a su pequeño tamaño.



CAPITULO 6

PROUESTAS DE INVESTIGACIONES FUTURAS



La investigación realizada en el presente trabajo fin de máster, ha permitido caracterizar el comportamiento mecánico a tracción, flexión e impacto, del material compuesto, tejido tafetán de fibra de carbono con resina epoxi y se han podido comparar los resultados obtenidos con el mismo material reforzado con óxido de grafeno. También se ha procedido a la fabricación de óxido de grafeno y se ha comprobado la adherencia de la resina y el refuerzo a la fibra, con un microscopio FE-SEM. Con el fin de complementar el nivel de conocimiento alcanzado, se propone ampliar el campo de estudio en los siguientes aspectos:

1. Para hacer una investigación más exhaustiva, se considera conveniente realizar, un número elevado de probetas, con la misma metodología y comparar resultados de los ensayos mecánicos.
2. Se recomienda realizar ensayos a diferentes temperaturas y atmosferas, para ver el comportamiento del material y caracterizarlo con mayor profundidad.
3. Sería deseable poder llevar a cabo la fabricación de cantidades mayores de grafeno siempre que se asegure una adecuada dispersión. Reduciendo el tiempo de fabricación, utilizando equipamiento de mayor tamaño, sobre todo en el proceso de filtrado, que es uno de los más críticos.
4. Empleando una metodología similar, pueden caracterizarse otros materiales reforzados con grafeno y comprobar si aumentan las propiedades del material, para posibles aplicaciones en industria.
5. Se podrían realizar laminados de mayor espesor y diferentes tejidos, para comprobar cómo aumenta la resistencia a impacto, tracción y flexión, controlando el peso.
6. También se podría comprobar la tribología del material, rugosidad y resistencia al rozamiento por fricción, con diferentes materiales.
7. Sería interesante analizar el mecanizado del material y ver qué tipo de herramientas son las más adecuadas, para su transformación en: fresas, torno, taladro. Según el material y las características de la herramienta, qué diferencia hay entre unas y otras.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tesis doctoral análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto. Autora: Shirley Kalamis García Castillo.
- [2] UPV. Apuntes de materiales composites máster MIMM
- [3] http://www.hexcel.com/Products/Industries/ICF_ContFibers
- [4] Proyecto final de carrera de D. Javier Moreno Fernández, comparativa entre los resultados obtenidos con Matlab y Nastran mediante el método de los elementos finitos. Universidad Carlos III
- [5] <http://www.goodfellow.com/S/Carbono-Epoxy.html>
- [6] Apuntes de la asignatura diseño de materiales compuestos MIMM UPV
- [7] Artículo: Francisco Guinea Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sor Juana Inés de la Cruz 3. 28049 Madrid
- [8] Artículo: propiedades y aplicaciones del grafeno. Claramaría Rodríguez Gonzales, Oxana Vasilievna Kharissova Facultad de Ciencia Físico-Matemáticas, UANL
- [9] Guía de laboratorio de la Universidad de Santiago de Chile Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería.
- [10] Publicación artículo SIMULACION NUMERICA DEL ENSAYO DE IMPACTO EN PROBETAS DE POLIMEROS UTILIZANDO EL METODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS Universidade Federal do Rio Grande do Sul Ricardo J. Barrios D'Ambra.
- [11] Libro introducción a la química de los polímeros Raimond B. Seymour. Editorial Reverte.
- [12] Final Report: Study of carbon reinforced nanocomposite materials By Eva Lindmark UPV.
- [13] Artículo: Graphene-reinforced epoxy resin with enhanced atomic oxygen erosion resistance. Wen Zang. Nin Yi. Published online: 27 Noviembre 2012 Springer Science+Business Media New York 2012
- [14] Mechanical properties of grapheme papers. By Yilun Liu. Published online 11 January 2012 by ElSevier.



- [15] Artículo: Síntesis del grafeno con altos rendimientos a partir de materiales nanométricos. Autores Varela-Rizo. Universidad de Alicante. Publicado en Marzo 2011. Grupo Español del Carbón.
- [16] Artículo: Métodos respetuosos con el medio ambiente para la producción de grafeno a gran escala. De J.I. Paredes. Publicado en Marzo 2011. Grupo Español del Carbón.
- [17] ASM Handbook Volume 21 composite. ASM international.
- [18] Apuntes de ensayos mecánicos de la Universidad Carlos III de Madrid. De William F. Smith Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales.
- [19] Artículo: Behavior dynamic-mechanic of $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ]_S$ of carbon fibre/epoxy composites. De Brito Júnior. Instituto Tecnológico de Aeronautica San Jose dos Campos Brasil. Revista Materia.
- [20] Apuntes de la asignatura de diagnóstico de Fallo del Máster de Ing. Mecánica y de Materiales de la UPV.
- [21] www.grafeno.com
- [22] www.wikipedia.com
- [23] Libro: Materiales compuestos de Antonio Miravete.
- [24] Libro: Mecánica del automóvil de Jesus Calvo Martím y Antonio Miravete
- [25] <http://www.icmm.csic.es/divulgacion/posters/TECMicroscopia%20Electronica%20de%20Barrido.pdf>
- [26] <http://www.metactual.com/revista/11/materialescarbono.pdf>
- [27] http://aulanet.umb.edu.co/aulanet_jh/archivos/30110/Tareas_UMB/Fracturademateriales_fractura_fatiga_Creep.pdf
- [28] Hummers WS, Offeman RE. Preparation of graphitic oxide. J Am Chem Soc, 1958;80:1339.
- [29] Wang et al. Composites Science and Technology 72 (2012) 737–743.

