

# Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ ).

Autora: Almudena Díaz Claro

Tutores: Juan Carlos Marín Vallejo  
Jesús Justo Estebaranz

Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras  
Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Aeronáutica

**Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ ).**

Autora:  
Almudena Díaz Claro

Tutores:  
Juan Carlos Marín Vallejo  
Profesor titular de Universidad  
Jesús Justo Estebanz  
Profesor ayudante doctor

Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teorías de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

Proyecto Fin de Carrera: Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ ).

Autora: Almudena Díaz Claro  
Tutor: Juan Carlos Marín Vallejo  
Jesús Justo Estebaranz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

*A mi madre,  
Chari Claro.*

*Por enseñarme a dibujar paisajes.  
Por enseñarme que perseguir lo que deseas es el aire que oxigena tus sueños.*

## Agradecimientos

---

La larga etapa académica que con este documento se cierra, deja detrás de mí una vivencia que no solo me ha formado como ingeniera, si no que ha dejado una huella en mí, desarrollándome como profesional pero muy especialmente como persona. Por ello en este apartado dejo constancia de las personas que no solo me han acompañado, si no que sin ellas las palabras aquí escritas no estarían ocurriendo.

En primer lugar una especial mención a mis tutores que me han ayudado y guiado a lo largo de este proyecto, Jesús Justo y especialmente a Juan Carlos Marín, por su paciencia y tiempo dedicado durante el desarrollo de este estudio.

Al equipo de la Sala Limpia del Laboratorio: Isabel, Miguel, Antonio, José Ramón, y a los estudiantes y compañeros que juntos realizaban el proyecto conmigo, como son Laura, Leo, Carmen, que me hicieron descubrir mi primer “equipo” de trabajo, disfrutando de ratos de diversión y análisis de la vida entre lámina y lámina de pre impregnado. Gracias a ellos, escoger este proyecto se ha convertido en una de las mejores decisiones de mi carrera.

A esos compañeros que los sufrimientos y horas de desesperación frente a problemas indescifrables han convertido en amigos sin los cuales las jornadas sin fin en la ESI no habrían sido posible: Patricia Zumaquero, Luca García y Domingo Acedo. Gracias por no solo coincidir conmigo si no también formar parte de mi vida.

A mis compañeros de cuatro patas que durante años han soportado fieles y siempre pacientes mis largas tardes de estudios, esperando a mi lado, con miradas cómplices y algún que otro lametón de ánimo, mis perros: Bella, Cuky, Freddie y Óscar.

A mi familia. A mi compañero de noches en vela y crisis pre y pos exámenes, José Manuel, por haber sabido amar y entender a una ingeniera durante todos estos largos años, sabiendo comprender vacaciones rodeadas de libros y esta locura que soy yo y fue (pasado que suena a música) esta carrera. A mi hermano, Antonio, por estar y convertir el sufrimiento de un año más de universidad en una broma tan nuestra aludiendo a su ya tan conocido “pues hubieras estudiado”. A mi madre, por el esfuerzo que sola ha llevado a cabo para que esta carrera y esta profesión fueran posibles, por tantas horas de trabajo para brindarme la posibilidad de tener unos estudios, por tantos ánimos, por levantarme cada vez que he tropezado y caído, por sus incasables “cariño, este es tu año” que nunca dejó de repetir, por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía, por ser una persona inmejorable, una madre no ideal pero si idónea, por no rendirse nunca y ser un ejemplo constante. Este trabajo y esta carrera son logros tan suyos como míos.

A mis abuelos que tanto desearon ver a su nieta ingeniera, Joaquín y Rosario, por haber hecho posible que de dos humildes campesinos surja una nieta ingeniera aeronáutica. Gracias allá donde estéis.

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

## Resumen

---

Este proyecto se ha dirigido y coordinado desde el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teorías de Estructuras, en concreto se ha desarrollado toda la actividad experimental en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales, situados en el edificio de laboratorios T-6 del conjunto de Talleres y Laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

Este trabajo se ha basado en el estudio experimental y analítico de probetas de material compuesto para configuraciones de laminados, en concreto de matriz epoxi reforzada con fibra de carbono, unidireccionales con fibras orientadas un determinado ángulo  $\Theta$ , con el objetivo de comparar los diversos resultados obtenidos de ensayar dichos especímenes a tracción, a través del ensayo off-axis.

Previamente a la realización del ensayo y posterior análisis de los resultados, se desarrollaran distintos apartados, como son la caracterización del material, descripción de todo el proceso realizado, criterios a aplicar, utensilios y equipos usados en todo el proceso durante la fase previa al ensayo y durante el propio ensayo.

Las actividades a nivel experimental llevadas a cabo son las siguientes: fabricación de los laminados, fabricación e instrumentación de las probetas, obtención de los tacos, pegado de las probetas y tacos, ensayo de los especímenes y obtención y análisis de los resultados.



## Índice general

---

<b>1.</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>19</b>
1.1.	Introducción.....	19
1.1.1	DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO.....	20
1.1.2	CLASIFICACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO .....	21
1.1.3	PROPIEDADES DE UN MATERIAL COMPUESTO .....	23
1.1.4	FABRICACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO.....	25
1.2.	Objetivos. ....	25
1.3.	Contenido. ....	26
<b>2.</b>	<b>El Ensayo.....</b>	<b>27</b>
2.1	Introducción.....	27
2.2	Descripción del ensayo. ....	27
2.3	Configuración con tacones oblicuos.....	29
2.4	Aplicación de criterios de fallo.....	32
2.4.1	TEORÍA DE LA MÁXIMA TENSIÓN. ....	32
2.4.2	CRITERIO DE TSAI-HILL .....	34
2.4.3	CRITERIO DE TSAI-WU.....	35
2.4.4	CRITERIO DE PUCK.....	37
<b>3.</b>	<b>Trabajo Experimental.....</b>	<b>44</b>
3.1	Introducción.....	44
3.1.1	MATERIAL DE FABRICACIÓN AS4/8552 .....	44
3.1.2	MATERIAL DE LOS TACONES .....	45
3.1.3	ADHESIVO.....	45
3.1.4	HERRAMIENTA DE CORTE .....	46
3.1.5	HERRAMIENTAS DE MEDIDA .....	47
3.1.6	AUTOCLAVE .....	47
3.1.7	MÁQUINA DE ENSAYO A TRACCIÓN .....	48
3.3	Preparación de probetas.....	64
3.3.1	CORTE DE LAS PROBETAS.....	64
3.3.2	FABRICACIÓN DE LOS TABS. ....	68
3.3.3	PEGADO PROBETAS-TABS. ....	73

<b>3.4</b>	<b>Ensayos de tracción fuera de ejes. ....</b>	<b>77</b>
<b>3.4.1</b>	<b>ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 0 GRADOS. ....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.2</b>	<b>ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 5 GRADOS. ....</b>	<b>81</b>
<b>3.4.3</b>	<b>ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 10 GRADOS. ....</b>	<b>83</b>
<b>3.4.4</b>	<b>ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 15 GRADOS. ....</b>	<b>85</b>
<b>3.4.5</b>	<b>ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 20 GRADOS. ....</b>	<b>87</b>
<b>3.4.6</b>	<b>ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 10 GRADOS CON MODIFICACIÓN EN LOS ÁNGULOS DE LOS TABS. ....</b>	<b>89</b>
<b>4.</b>	<b>Valoración de resultados. ....</b>	<b>91</b>
<b>4.1</b>	<b>Introducción. ....</b>	<b>91</b>
<b>4.2</b>	<b>Comparación de los gráficos <math>\sigma_x - \epsilon_x</math>. ....</b>	<b>91</b>
<b>4.3</b>	<b>Comparación de los gráficos <math>\sigma_x - \epsilon_x</math> de 10° (<math>\Phi=22^\circ</math>, <math>\Phi=25^\circ</math> y <math>\Phi=29^\circ</math>). 933</b>	
<b>4.4</b>	<b>Gráficos Resistencia vs. Ángulo de orientación. ....</b>	<b>96</b>
<b>4.5</b>	<b>Gráficos Deformación en rotura vs. Ángulo de orientación. ....</b>	<b>97</b>
<b>4.6</b>	<b>Comparación con predicciones analíticas. ....</b>	<b>98</b>
<b>4.6.1</b>	<b>MÁXIMA TENSIÓN. ....</b>	<b>98</b>
<b>4.6.2</b>	<b>CRITERIO DE TSAI-WU. ....</b>	<b>100</b>
<b>4.6.3</b>	<b>CRITERIO DE TSAI-HILL. ....</b>	<b>101</b>
<b>4.7</b>	<b>Cálculo de resistencia a cizalladura intralaminar, S. ....</b>	<b>104</b>
<b>4.7.1</b>	<b>CRITERIO DE MÁXIMA TENSIÓN. ....</b>	<b>104</b>
<b>4.7.2</b>	<b>CRITERIO DE TSAI-WU. ....</b>	<b>104</b>
<b>4.7.3</b>	<b>CRITERIO DE TSAI-HILL. ....</b>	<b>106</b>
<b>4.8</b>	<b>Cálculo del módulo de cortadura, <math>G_{12}</math>. ....</b>	<b>107</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusiones. ....</b>	<b>115</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusiones. ....</b>	<b>115</b>
<b>5.2</b>	<b>Desarrollos futuros. ....</b>	<b>116</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía. ....</b>	<b>117</b>

## Índice de figuras

---

Figura 1. Esquema del análisis de un laminado.....	21
Figura 2. Propiedades mecánicas de la matriz, refuerzo y material compuesto. .....	21
Figura 3. Clasificación de material compuesto..	22
Figura 4. Deformación sufrida por una placa cuadrada de una lámina unidireccional con las fibras orientadas.....	23
Figura 5. Ejemplo general de una probeta sometida a tracción en la dirección del eje X.....	28
Figura 6. Deformada de la probeta.....	29
Figura 7. Configuración del ensayo Off-Axis sobre un espécimen de laminado unidireccional con fibras orientadas un determinado ángulo.....	30
Figura 8. Configuración del espécimen con tabs oblicuos.....	30
Figura 9. Tensión de tracción normal máxima en la dirección x en función del ángulo de la lámina según el criterio de máxima tensión.....	34
Figura 10. Tensión de tracción normal máxima en la dirección x en función del ángulo de la lámina según el Criterio de Tsai-Hill.....	36
Figura 11. Tensión de tracción normal máxima en la dirección x en función del ángulo de la lámina según Tsai-Wu.....	37
Figura 12. Mecanismos de fallo del Criterio de Puck.....	38
Figura 13. Esquema del estado tensional y componentes de tensión en el plano de fallo.....	40
Figura 14. Curva de fallo de la matriz que predice el criterio de Puck.....	44
Figura 15. Cinta de material AS4/8552.....	45
Figura 16. Adhesivo SAFRAN EA9394 A+B usado para la unión tacones y probetas.....	47
Figura 17. Máquina de corte con disco de polvo de diamante.....	48
Figura 18. Calibre digital <i>Mitutoyo</i> .....	48
Figura 19. Maquina de ensayo Instron 4483.....	49
Figura 20. Diseño de probetas con tacones.....	49

Figura 21. Lámina obtenida del rollo de pre-preg de donde se obtendrá el panel de 0 grados. ....	51
Figura 22. Diseño del panel de 5 grados obtenido del rollo de pre-preg.. ¡Error! Marcador no definido.52	
Figura 23. Corte de la lámina orientada 5 grados. ....	53
Figura 24. Proceso de compactado de las láminas en la Sala Limpia. ....	53
Figura 25. Diseño del panel de compuesto con fibras orientadas 10 grados. ....	54
Figura 26. Diseño de las láminas de fibras orientadas 15 grados sobre el trozo rectangular de pre-impregnado.. ....	55
Figura 27. Diseño del panel de fibras orientadas 20 grados sobre el trozo de pre-preg. ....	56
Figura 28. Preparación de bolsa de vacío lista para ser introducida en autoclave. ....	58
Figura 29. Preparación bolsa de vacío sobre plancha para proceso de curado.59	
Figura 30. Preparación de las dos bolsas de vacío para su procesado en autoclave. ....	60
Figura 31. Autoclave con la plancha preparada para comenzar el proceso de curado. ....	61
Figura 32. Paneles con fibras orientadas 10, 15 y 20 grados tras su procesado en autoclave. ....	62
Figura 33. Paneles con fibras orientadas 5 y 10 grados tras su curado en autoclave. ....	63
Figura34. Los 4 paneles con fibras orientadas 5, 10, 15 y 20 grados y el cero original para asegurar su orientación.. .... ¡Error! Marcador no definido.65	
Figura 35. Configuración del panel a cero grados y sus tabs de configuración recta. ....	69
Figura 36. Configuración tabs y probetas, caso concreto de probetas orientadas 10 grados y tabs a 22 grados. ....	70
Figura 37. Diseño previo al corte de los tabs. ....	70
Figura 38. Corte de los tacos no efectivo. ....	71
Figura 39. Diseño del corte de las tacos de un trozo triangular de fibra de vidrio. ....	71
Figura 40. Trozo de fibra de vidrio cortada con un ángulo de 28 y 22 grados para las probetas de 5 y 10 grados. ....	72

<b>Figura 41. Trozo de fibra de vidrio cortada con un ángulo de 28 y 22 grados para las probetas de 15 y 20 grados.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 42. Diseño de tabs.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 43. - Probetas de 5, 10, 15 y 20 grados con sus respectivos tabs, lijados y listos para el pagado.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 44. Panel y probetas orientadas 0 grados con tacones rectos adheridos.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 45. Probetas orientadas 5 grados con tacos de 28 grados pegados.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 46. Probetas orientadas 10 grados con tacos de 22 grados pegados.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 47. Probetas orientadas 15 grados con tacos de 24 grados pegados.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 48. Probetas orientadas 20 grados con tacos de 27 grados pegados.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 49. Probeta colocado sobre el equipo de ensayo con extensómetro.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 50. Nueve probetas de 0 grados ensayadas a tracción.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 51. Ocho probetas de 5 grados ensayadas a tracción.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 52. Siete probetas de 10 grados ensayadas a tracción.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 53. Seis probetas de 15 grados ensayadas a tracción.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 54. Seis probetas de 20 grados ensayadas a tracción.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 55. Probetas con fibras orientadas 10° y tabs orientados 25° y 29°.....</b>	<b>89</b>

## Índice de tablas

---

Tabla 1. <b>Propiedades recomendadas por Puck para parámetros del criterio...</b>	43
<b>Tabla 2. Propiedades del material compuesto AS4/8552.....</b>	45
Tabla 3. <b>Medidas de los paneles obtenidos. ....</b>	57
Tabla 4. <b>Condiciones del proceso de curado en autoclave según el material AS4/8552.....</b>	62
Tabla 5. <b>Registro de medidas y cantidades de probetas obtenidas. ....</b>	66
Tabla 6. <b>Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 0 grados, una vez cortadas y resanadas.....</b>	66
Tabla 7. <b>Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 5 grados, una vez cortadas y resanadas.....</b>	67
Tabla 8. <b>Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 10 grados, una vez cortadas y resanadas. ....</b>	67
Tabla 9. <b>Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 15 grados, una vez cortadas y resanadas. ....</b>	67
Tabla 10. <b>Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 20 grados, una vez cortadas y resanadas. ....</b>	70
Tabla 11. <b>Condiciones iniciales para el ensayo de tracción (off-axis).....</b>	78
Tabla 12. <b>Datos del ensayo de la modificación con tabs orientados 25°. ....</b>	90
Tabla 13. <b>Datos del ensayo de la modificación con tabs orientados 29°. ....</b>	90
Tabla 14. <b>Datos de la resistencia en función del ángulo de orientación de las fibras.....</b>	96
Tabla 15. <b>Datos de la deformación en función del ángulo de orientación de las fibras.....</b>	97
Tabla 16. <b>Datos de las propiedades del material compuesto AS4/8552.....</b>	98

## Índice de gráficos

---

Gráfico 1. Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 0 grados .....	82
Gráfico 2. Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 5 grados.....	84
Gráfico 3. Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 10 grados .....	86
Gráfico 4. Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 15 grados .....	88
Gráfico 5. Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 20 grados .....	90
Gráfico 6. Comparación de todas las probetas ensayadas a tracción.....	93
Gráfico 7. Resistencia Vs Deformación para probetas orientadas 10° y tabs 25°.....	95
Gráfico 8. - Resistencia Vs Deformación para probetas orientadas 10° y tabs 29°.....	96
Gráfico 9. Representación de la variación de la resistencia en función del ángulo de orientación de la fibra. ..	97
Gráfico 10. Representación de la variación de la deformación en función del ángulo de orientación de la fibra .....	98
Gráfico 11. Comparación de los datos experimentales frente al Criterio de Máx. Tensión .....	¡Error! Marcador no definido.01
Gráfico 12. Comparación de los datos experimentales frente al Criterio de Tsai-Wu ..	02
Gráfico 13. Comparación de los datos experimentales frente al Criterio de Tsai-Hill.....	¡Error! Marcador no definido.110

# Capítulo 1. Introducción.

---

## 1.1. Introducción.

El avance experimentado en el campo de los materiales compuestos en las últimas décadas, tanto científica como tecnológicamente, ha propiciado la consideración de estos materiales para sustituir a los tradicionales en funciones estructurales. La reducción en peso que se logra con el uso de estos materiales ha hecho que se conviertan en uno de los componentes básicos en la industria aeronáutica, como prueba que los diseños más recientes contengan más del 50% en peso de material compuesto (AIRBUS 350, Boeing 787), lo que supone un considerable ahorro en combustible y por tanto un decidido compromiso con la sostenibilidad. Sin embargo, el conocimiento actual de estos materiales sigue siendo limitado en comparación con los materiales estructurales convencionales, lo que supone que aún no se haya alcanzado un aprovechamiento óptimo de las capacidades que aportan los materiales compuestos.

Una de estas capacidades es, sin duda, el diferente comportamiento que presenta una lámina de material compuesto respecto a las distintas direcciones en su plano. A efectos de rigidez, es bien conocido, que se puede modelar este comportamiento tratando la lámina como una lámina equivalente homogénea ortótropa [1]. En cuanto al comportamiento resistente, a lo largo de la última mitad del siglo pasado y el principio del presente, se han propuesto una gran cantidad de criterios de fallo [2, 3] para tratar de predecir cuándo se produciría el fallo de una lámina bajo diferentes sollicitaciones.

Una forma simple de observar experimentalmente el diferente comportamiento resistente de la lámina, cuando se somete a sollicitaciones en las distintas direcciones, es el ensayo de tracción fuera de ejes o ensayo "off-axis". Este ensayo ha sido empleado habitualmente para verificar experimentalmente algunas teorías de fallo de la lámina [4]. Por otra parte, son bien conocidas las dificultades que presenta la materialización correcta del ensayo [5], particularmente para orientaciones de las fibras inferiores a  $30^\circ$ . Para solventar estos problemas, se han propuesto dos líneas de actuación diferenciadas. Una primera línea que trata de mantener la configuración básica del ensayo y corregir los resultados directos del mismo. En esta línea se encuentran la corrección analítica propuesta por Pindera y Herakovich [6], y la corrección numérica propuesta por Marín et al. [7]. Y una segunda línea, que trata de reproducir la configuración ideal del ensayo modificando la ejecución del mismo, en esta línea la propuesta que más repercusión ha logrado es la de Sun y Chung [8], que supone la utilización de unos refuerzos laterales oblicuos, teoría que se va a estudiar detalladamente en este documento.

Por todo lo anteriormente mencionado y debido a la importancia que está ganando en la ingeniería los materiales compuestos, como una solución de combinar capacidades de materiales diversos como cerámicos, plásticos y metales, es que en los últimos años se ha incrementado el uso de los materiales compuestos para multitud de aplicaciones ingenieriles como son la automoción, la construcción civil, industria aeronáutica, medicina... Y todo indica que este uso irá incrementando en el futuro.

### 1.1.1 DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO

A modo de breve descripción se pasará a definir el material compuesto como una combinación de dos o más materiales, a escala microscópica, con interfaces de separación entre los mencionados materiales, para de este modo formar un nuevo material con nuevas propiedades.

De este modo se obtendrán propiedades que no se podían alcanzar por ninguno de los materiales que conforman el material compuesto de manera individual. Por tanto el objetivo de la fabricación del material compuesto viene caracterizado por la necesidad de aunar las propiedades de los constituyentes de este en un solo material.

Los materiales compuestos se pueden distinguir dos fases o componentes principales:

- **Refuerzo:** es la fase discontinua y más rígida del material
- **Matriz:** es la fase continua y generalmente menos rígida dentro de la cual se encuentran embebidas los refuerzos.

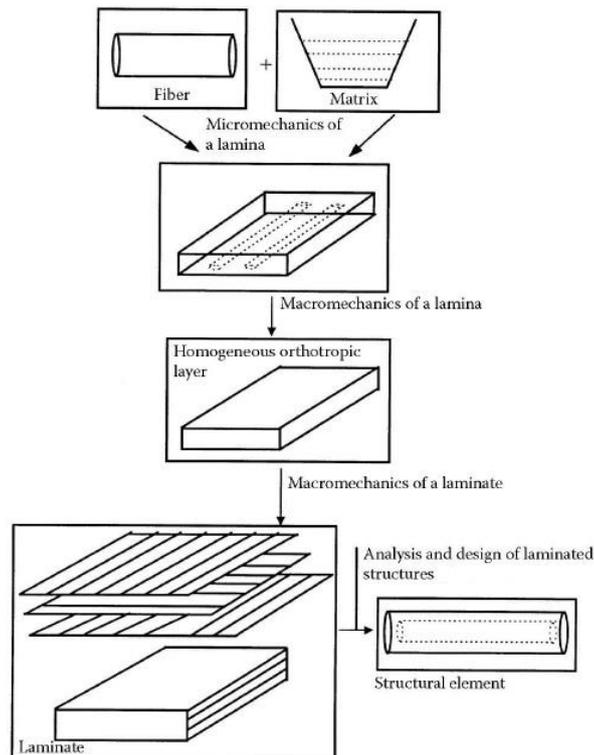


Figura 1 - Esquema del análisis de un laminado

El refuerzo será el encargado de absorber las tensiones así como incrementar la rigidez y resistencia del compuesto. Mientras que la matriz constituye el elemento transmisor de tensiones entre los refuerzos, así como actúa de ligante fijando la posición del refuerzo y protegiéndolo del medio exterior.

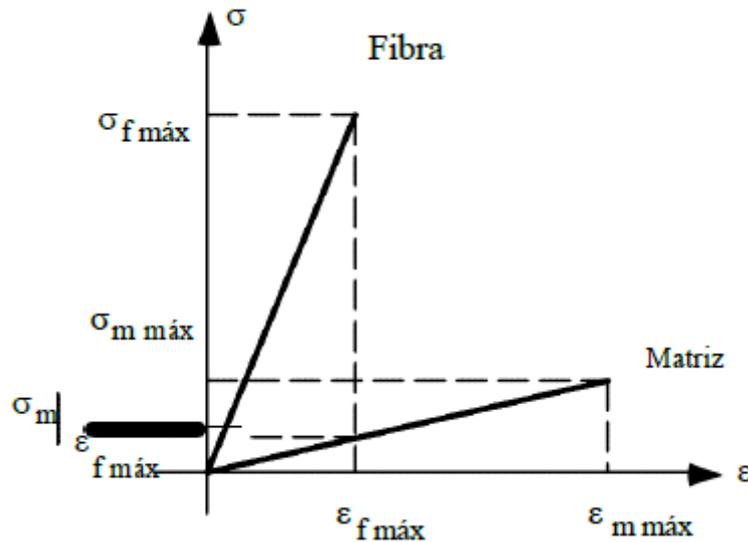


Figura 2-Propiedades mecánicas de la matriz, refuerzo y material compuesto.

### 1.1.2 CLASIFICACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO

Los materiales compuestos se pueden definir según diferentes criterios, siendo difícil aceptar una sola clasificación, por ello de manera escueta se puede realizar un registro de los principales materiales compuesto teniendo en cuenta **geometría del refuerzo**, como se puede observar en el siguiente esquema. Para ello habría que diferenciar entre fibra y partícula, distinguiéndose en que la primera presenta una dimensión (la longitud) mucho mayor que las otras dos (las características de la sección transversal), a diferencia de esta, los refuerzos de partículas no tienden a absorber una parte importante de la carga que soporta el material compuesto.

El caso que atañe a este estudio se encontraría dentro de la clasificación de material compuesto reforzado con fibras, en concreto se trata de un laminado de varias capas orientadas todas en la misma dirección, que encajaría dentro de la categoría de una sola capa, en concreto de fibra continua. La rama establecida por refuerzos con fibras presenta unas muy buenas propiedades mecánicas. Debido a las pequeñas dimensiones que presenta la sección transversal de las fibras, no son de aplicación directa en el sector, por ello son embebidas en matrices. Por otro lado las fibras continuas, se caracteriza según la longitud de la fibra como continua o discontinua, entendiéndose por continua aquella fibra cuya carga es soportada principalmente por las fibras, siendo la función de la matriz la de mantener unidas las fibras y protegerlas.

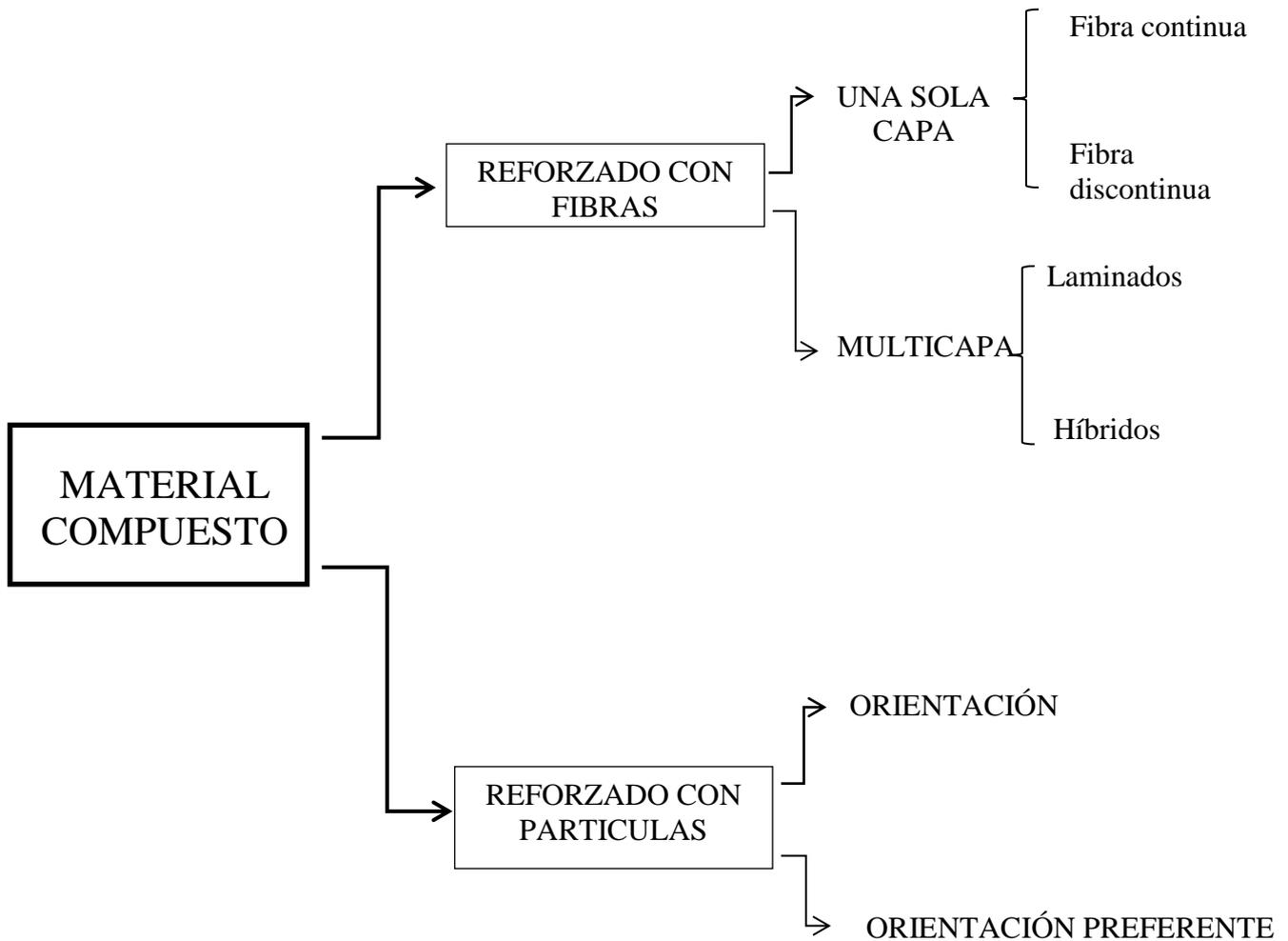


Figura 3 - Clasificación de material compuesto.

Otro tipo de clasificación se puede realizar según el **tipo de matriz**, como materiales compuestos de matriz metálica, cerámica, matriz orgánica o polimérica, también conocida como matriz de plástico.

- **Matriz metálica:** caracterizada por ofrecer mayor capacidad resistente al material compuesto, buena rigidez y tenacidad a la fractura, así como un buen comportamiento a altas temperaturas. Sin embargo presenta limitaciones respecto a la densidad, ya que presenta una alta densidad así como dificultad en el procesado y mecanizado.
- **Matriz cerámica:** ofrece al material compuesto una elevada resistencia a los esfuerzos mecánicos, incluso a altas temperaturas. En su contra presenta una tenacidad muy baja, e igualmente ocurre con sus conductividades térmica y eléctrica.
- **Matriz orgánica o polimérica:** presenta baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo coste, rapidez y sencillez de conformado. Es necesario tener en cuenta la influencia en estas

matrices de condiciones medioambientales tales como la humedad, temperatura y radiación solar. Existen diferentes tipos dentro de estas matrices como son las termoplásticas, duroplásticos o termoestables, elastómeros.

### **1.1.3 PROPIEDADES DE UN MATERIAL COMPUESTO**

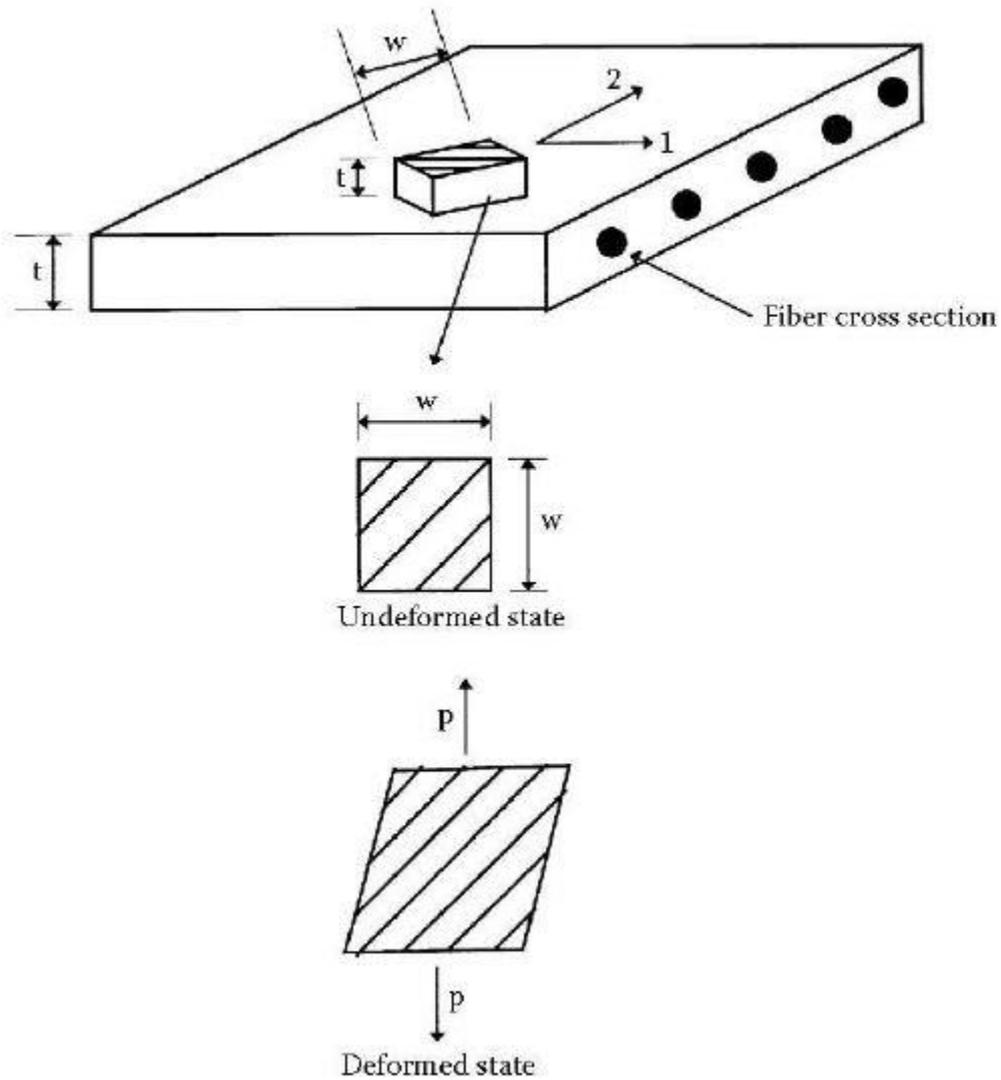
Existen dos estudios de las propiedades de un material compuesto: micromecánica y macromecánica.

La micromecánica, permite encontrar las propiedades promedio de una lámina a partir de las propiedades de los constituyentes individuales. La micromecánica va a ayudar a la comprensión de relaciones simples de los parámetros de la lámina, en términos de rigideces, resistencias, coeficientes de expansión térmica y de humedad de los componentes individuales del material compuesto, fracción volumétrica de fibras, geometría de empaquetamiento, etc.

Sin embargo la macromecánica, se encargará del desarrollo de relaciones tensión-deformación de un lámina unidireccional/bidireccional, además desarrolla las relaciones para la rigidez, los coeficientes de expansión térmica y humedad, y las resistencias de las láminas en ángulo- Las teorías de fallo de una lámina se basan en las tensiones en la lámina y las propiedades de resistencia de la lámina.

Los materiales compuestos tienen propiedades similares a las que poseen los materiales convencionales, otras sin embargo son completamente nuevas y requieren un estudio y experimentación diferentes. Para ellos hay que asegurarse de que un componente no se rompe, por tanto tenga la resistencia adecuada, o no sufra deformación excesiva, es decir, tenga una rigidez adecuada.

Se puede presentar diferentes tipos de láminas y laminados como se ha expuesto en apartados anteriores, pero si se toma como objeto de estudio una placa cuadrada obtenida de una lámina cuyas fibras presentan un ángulo respecto de los lados de la placa cuadrada, se ha de tener en cuenta que las deformaciones serán diferentes para diferentes ángulos. No solo presentará deformaciones en las direcciones normales, también se distorsionará. De manera que la caracterización mecánica de una lámina en ángulo, que es el estudio que se va a llevar a cabo, se complica aún más. [9]



**Figura 4 - Deformación sufrida por una placa cuadrada de una lámina unidireccional con las fibras orientadas.**

#### **1.1.4 FABRICACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO**

La fabricación de materiales compuestos se diferencia principalmente en dos fases, siendo estas: proceso de laminado y curado.

En un primer lugar se define el proceso de laminado o fabricación del laminado, como aquellas operaciones que se llevan a cabo para conformar la configuración del material compuesto. El caso que se describe en este proyecto consistirá de entre las múltiples variantes que puede presentar esta fase (apilado manual, enrollado de filamentos, etc.), al método de apilado o conformado por bolsa de vacío, presión o autoclave; en cuyos casos se suele utilizar como material base pre-preg, como es el caso. Este método consiste en colocar las láminas en la superficie del molde en el orden de apilamiento que se desea y con las direcciones adecuadas. Posteriormente se cubrirá con un saco de presión que se introducirá en el autoclave.

El segundo proceso como ya se ha comentado, consistirá en la fase de curado, que consiste en un proceso de secado o polimerización de la matriz para formar enlaces permanentes entre la matriz y las fibras en una lámina, y entre las propias láminas. Este proceso puede ser de manera natural, o como el caso que atañe a este estudio que consistirá en introducir la bolsa de vacío anteriormente descrita en un autoclave donde se acelera el proceso de polimerización con la aplicación de calor y presión.

La técnica anteriormente descrita de bolsa de vacío se desarrollará más detalladamente en este documento más adelante. Es una de los métodos más extendido en materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxi que se utilizan para paneles y elementos de aviones, y que es el origen de este estudio. [10]

## **1.2. Objetivos.**

En este proyecto se pretende conocer como varía el comportamiento resistente, en términos de tensiones y deformaciones de rotura, de una lámina de material compuesto (grafito-epoxy) cuando es sometida a tracción para distintas orientaciones. Para ello se fabricarán paneles de un material compuesto, de los que se obtendrán probetas con diferentes orientaciones, que se someterán a ensayos de tracción fuera de ejes ("off-axis").

Debido a que las orientaciones consideradas en este proyecto ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ ) son inferiores a  $30^\circ$ , se empleará la configuración de refuerzos laterales oblicuos, para tratar de conseguir un estado tensional aproximadamente uniforme.

Los resultados de los ensayos, permitirán obtener la evolución de la resistencia a tracción y de la deformación en rotura con el ángulo de orientación de las fibras. Así mismo, estos resultados permitirán comparar los valores de las predicciones que ofrecen

diversos criterios de fallo (Máxima Tensión, Máxima deformación, Tsai-Wu, Puck) con los valores experimentales.

### **1.3. Contenido.**

En el primer capítulo se desarrolla una breve introducción en los materiales compuestos, en su definición y clasificación, así como sus propiedades. Para posteriormente describir en qué consiste el proyecto y cuáles son los objetivos de este estudio.

En el segundo capítulo se describe extensamente el ensayo a tracción y la configuración de tacones oblicuos que aquí se desarrolla. Posteriormente se analizan criterios de predicción y sus expresiones analíticas.

En el tercer capítulo se detalla todo el trabajo experimental que se ha llevado a cabo para la fabricación de las probetas, así como el material utilizado, los utensilios y equipos y finalmente el ensayo a tracción al que es sometida cada una de las probetas.

En el capítulo cuatro se analiza los diferentes gráficos obtenidos de resistencia y deformación en función de los ángulos de orientación que presenta las distintas configuraciones de probetas. Además de las comparaciones con métodos predictivos. Finalmente se calcula analíticamente la resistencia a cizalladura intralaminar y el módulo de cortadura.

En el quinto capítulo se hace una reflexión sobre los resultados arrojados por el estudio dividiéndose en conclusiones y acciones o desarrollos futuros.

Por último en el capítulo seis se recogen todas las referencias bibliográficas que se han consultado durante el estudio de este proyecto

## Capítulo 2. El Ensayo.

---

### 2.1 Introducción.

A la hora de obtener experimentalmente las constantes ingenieriles de rigidez, se lleva a cabo a través de unos ensayos adecuados. Donde se busca obtener un estado tangencial puro para obtener propiedades del compuesto de manera experimental.

Para materiales compuestos, el ensayo más extendido para conocer las propiedades de un laminado es el ensayo de tracción (off-axis). Aunque numerosos ensayos son llevados a cabo para la determinación de propiedades de un laminado, en concreto para determinar tanto la rigidez ( $G_{12}$ ) como la resistencia a cizalladura interlaminar (S), ensayos como: *rail-shear test* (ensayo de cortadura con railes), *thin-walled tube torsión* (ensayo de torsión de tubos),  $\pm 45^\circ$  *tension test* (ensayo con fibras orientadas  $\pm 45^\circ$ ).

Los procedimientos mencionados son métodos indirectos y directos para obtener los valores deseados. Los primeros ensayos se encontrarían dentro de los métodos indirectos donde se pretende alcanzar un estado tensional donde la tensión tangencial sea influyente en mayor medida que otras componentes de tensión, sin embargo el último ensayo mencionado ( $\pm 45^\circ$  *tension test*) se catalogaría como método directo, donde se pretende alcanzar el estado tensional tangencial puro directamente.

Sin embargo el principal ensayo de entre los métodos indirectos es el ensayo Off-Axis, satisfaciendo dos condiciones esenciales que lo convierte en el candidato perfecto a la hora de la caracterización tanto de  $G_{12}$  como de S, como son: que el espécimen o probeta es de fácil preparación, y que el test es de fácil realización.

### 2.2 Descripción del ensayo.

Como se mencionaba anteriormente el ensayo a tracción permite conocer el valor de las constantes ingenieriles, con el cual se relacionaran de manera analítica, tensiones y deformaciones, a través de datos obtenidos experimentalmente (fuerzas y desplazamientos).

Para ello el ensayo off-axis somete una lámina cuyas fibras están orientadas un ángulo  $\theta$  respecto al eje x, a una carga de tracción uniforme F. Como se puede ver a continuación:

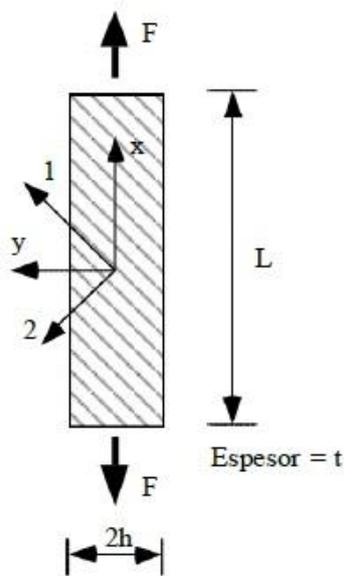


Figura 5 - Ejemplo general de una probeta sometida a tracción en la dirección del eje X.

La deformación  $\varepsilon_x$  se obtendrá con la ayuda de una galga extensiométrica situada según la dirección del eje x; y a partir del valor indicado, de la sección transversal del espécimen ( $A = 2ht$ ) y de la fuerza aplicada en el ensayo, se obtendrá  $E_x$ :

$$\sigma_x = \frac{F}{A} = E_x \varepsilon_x \quad \Rightarrow \quad E_x = \frac{F}{A\varepsilon_x} \quad (1)$$

Conocidos  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  y  $\nu_{12}$ , se puede determinar el valor de  $G_{12}$  de forma indirecta a través de la ecuación siguiente:

$$G_{12} = \frac{\cos^2(\theta)\text{sen}^2(\theta)}{\frac{1}{E_{11}}\cos^4(\theta) - \frac{1}{E_x} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}}\cos^2(\theta)\text{sen}^2(\theta) + \frac{1}{E_{22}}\text{sen}^4(\theta)} \quad (2)$$

También es posible realizar el cálculo de manera independiente del resto de propiedades, colocando una roseta en el centro del espécimen a ensayar, de donde se determinará  $\gamma_{12}$ , a partir de las medidas obtenidas y posteriormente se calcularía  $G_{12}$ , con la siguiente ecuación:

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{12} = -\frac{F}{A}\text{sen}\theta\cos\theta \quad (3)$$

Sin embargo se ha llegado a conocer que este test incurre en errores debido al acoplamiento de tensiones normales y deformaciones tangenciales, originándose una deformación tangencial, como consecuencia de que la carga no actúa uniformemente en las direcciones de ortotropía.[10]

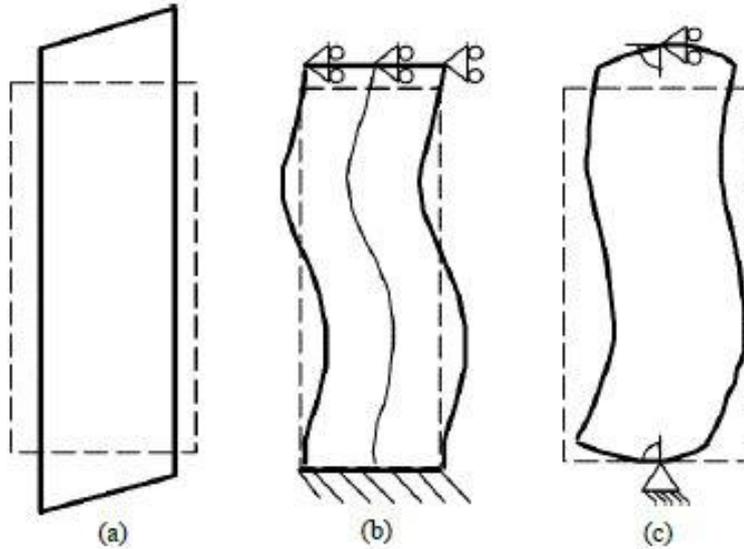


Figura 6: Deformada de la probeta.

### 2.3 Configuración con tacones oblicuos.

Las máquinas de ensayos limitan a la hora de desarrollar de manera ideal el ensayo, impidiendo que la anterior deformación tangencial descrita se produzca, de modo que se debería generar en los extremos de la probeta un esfuerzo cortante y un momento flector que anulara la deformación tangencial, generándose por tanto una estado tensional no uniforme del que se desconoce la solución analítica. [10]

Debido a los errores a la hora de determinar propiedades de rigidez y resistencia que presenta el ensayo, se han estudiado dos posibles líneas de actuación:

- La primera de ellas implica la modificación de la configuración del ensayo de manera que se pueda alcanzar en la mayor medida posible un estado uniforme de tensiones en la sección de ensayo de la probeta que correspondería a un agarre ideal.
- La segunda línea de actuación consistiría en la aplicación de un factor de corrección a los valores obtenidos de las medidas experimentales. [5].

Referente a la primera línea de actuación se han estudiado propuestas como las de Pindera y Herakovich que consistían el desarrollo de sistemas de agarre especiales que permiten la rotación de los extremos de las probetas, con el fin de evitar el momento flector y el esfuerzo cortante que hacen que se deforme el espécimen [6].

Otra propuesta respecto al cambio en la configuración del ensayo consistía en aumentar el ratio de la probeta, desarrollando probetas más esbeltas con el fin de minimizar la

aparición de deformaciones tangenciales. Originando una zona central del espécimen donde el estado es lo más uniforme posible. [11, 12]

Otros autores [8, 13], que es lo que se va a desarrollar en este estudio, se basaban en la modificación de los tabs, dirigido a reproducir de la manera más fiel posible un estado uniforme de tensiones en la parte central de la probeta, por un lado usando tabs de fibra de vidrio que permiten deformación por cizalladura, y por otro lado desarrollando tacones oblicuos, con una orientación determinada respecto a la sección transversal del espécimen coincidentes con las líneas de iso-desplazamiento para asemejar el problema ideal.

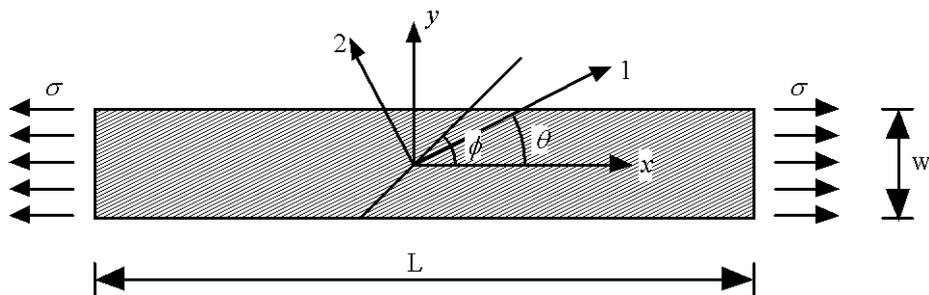


Figura 7 - Configuración del ensayo Off-Axis sobre un espécimen de laminado unidireccional con fibras orientadas un determinado ángulo.

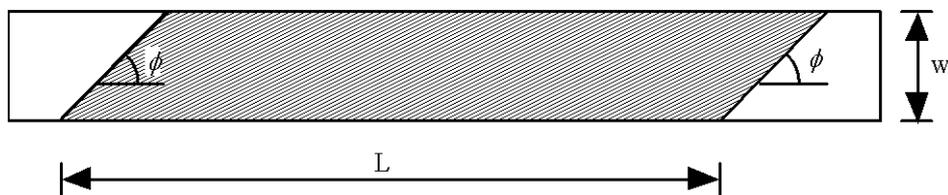


Figura 8 - Configuración del espécimen con tabs oblicuos.

Ciertos autores [14, 15] han estudiado la anterior configuración mencionada, confirmando analítica y experimentalmente un estado de deformación aproximadamente uniforme, así como evaluaron el potencial de usar esta configuración para calcular la resistencia. El inconveniente que presenta esta propuesta es que el ángulo de los tabs va a depender de las propiedades del material, principalmente de  $E_{11}$  y de  $G_{12}$ , así como de la orientación de las fibras. [7]

Por ello en el estudio [16] que precede al que se realiza en este documento, se investiga cuál debe ser la orientación más adecuada para las fibras para poder realizar el ensayo bajo la configuración de tabs oblicuos. Para ello, se realiza un estudio analítico de la dependencia del ángulo de inclinación de los tabs ( $\phi$ ) con el ángulo de las fibras ( $\theta$ ) y las propiedades del material:  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $\nu_{12}$  y  $G_{12}$ .

Básicamente, el ensayo de off-axis para este caso de tabs oblicuos consistirá en someter a una tensión uniforme  $\sigma$  en dirección longitudinal, a una probeta rectangular de un laminado unidireccional con fibras orientadas un ángulo  $\theta$  respecto a la dirección  $x$ . En

estas condiciones las líneas de iso-desplazamientos longitudinales son rectas inclinadas un ángulo  $\emptyset$  respecto del eje x, dicho ángulo vendrá dado por:

$$\cot \emptyset = -\frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{11}} \quad (4)$$

Siendo  $\bar{S}_{16}$  y  $\bar{S}_{11}$  coeficientes de flexibilidad, cuya expresión viene dada por:

$$\bar{S}_{11} = \frac{\cos^4 \theta}{E_{11}} + \left( -\frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_{22}} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{16} = \left( \frac{2}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin \theta \cos^3 \theta + \left( -\frac{2\nu_{12}}{E_{11}} - \frac{2}{E_{22}} + \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^3 \theta \cos \theta$$

Finalmente se observa en la expresión que el ángulo  $\emptyset$  dependerá de las propiedades del material, pudiendo ser muy variable este ángulo de los tabs dentro de la variedad de materiales, por ello es poco razonable creer que exista un solo valor de este ángulo para todos los materiales, por ello del estudio [16] se obtiene la expresión correspondiente del ángulo  $\emptyset$  para un sistema compuesto concreto como es el grafito-epoxy, cuyas propiedades se encuentran dentro de los siguientes valores:

$$120 \text{ GPa} \leq E_{11} \leq 200 \text{ GPa}; 8 \text{ GPa} \leq E_{22} \leq 11 \text{ GPa};$$

$$3,5 \text{ GPa} \leq G_{12} \leq 8,5 \text{ GPa}; 0,28 \leq \nu_{12} \leq 0,34$$

Sustituyendo las expresiones (5) en la (4) y multiplicando numerador y denominador por  $E_{11}$  se obtiene:

$$\cot \emptyset = -\frac{\left( 2 + 2\nu_{12} - \frac{E_{11}}{G_{12}} \right) \sin \theta \cos^3 \theta + \left( -2\nu_{12} - \frac{2E_{11}}{E_{22}} + \frac{E_{11}}{G_{12}} \right) \sin^3 \theta \cos \theta}{\cos^4 \theta + \left( -2\nu_{12} + \frac{E_{11}}{G_{12}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{E_{11}}{E_{22}} \sin^4 \theta} \quad (6)$$

Si se denomina  $\mu$  al coeficiente  $G_{12}/E_{11}$ :

$$\emptyset = \arctan \left[ \frac{\frac{1}{\tan^2 \theta} - \left( 2\nu_{12} - \frac{1}{\mu} \right) + \frac{E_{11}}{E_{22}} \tan^2 \theta}{-\left( 2 + 2\nu_{12} - \frac{1}{\mu} \right) \frac{1}{\tan \theta} + \left( \frac{2E_{11}}{E_{22}} + 2\nu_{12} - \frac{1}{\mu} \right) \tan \theta} \right] \quad (7)$$

## 2.4 Aplicación de criterios de fallo.

A la hora de valorar los resultados obtenidos se va a tener en cuenta como elementos comparativos, los criterios de fallo que se van a exponer a continuación. De manera que con estos criterios se pueda relacionar las componentes del estado tensional y prediga la carga de rotura. Así se podrá evaluar la tensión de cortadura que provoca el fallo del material de manera indirecta a partir de los resultados obtenidos de los ensayos.

Se van a clasificar los criterios en dos grupos diferenciados por: aquellos criterios asociados al modo de fallo (Máxima tensión, máxima deformación, Hashin & Rotem, Hashin), y los no asociados al modo de fallo (Tsai-Hill, Tsai-Wu). A continuación se procede a desarrollar algunos de ellos.

### 2.4.1 TEORÍA DE LA MÁXIMA TENSIÓN.

Basado originalmente en el criterio de Rankine para la plastificación de materiales isótropos, desarrolla el criterio de fallo, prediciendo que la fractura en el material no ocurriría en el caso de estados de tracción, para:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11} < X_t \quad (\sigma_{11} > 0) & \quad |\sigma_{11}| < X_c \quad (\sigma_{11} < 0) \\
 \sigma_{22} < Y_t \quad (\sigma_{22} > 0) & \quad |\sigma_{22}| < X_c \quad (\sigma_{22} < 0) \\
 |\sigma_{12}| < S &
 \end{aligned} \tag{8}$$

Si alguna de las anteriores desigualdades no se cumpliera el material se fracturaría de acuerdo al mecanismo de fallo asociado a la ecuación incumplida.

Para obtener las tensiones en las direcciones principales del material y suponiendo que  $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ , se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \rightarrow \sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta \\
 \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \rightarrow \sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta \\
 \tau_{12} &= -\sigma_x \sin \theta \cos \theta + \sigma_y \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \rightarrow \tau_{12} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta
 \end{aligned} \tag{9}$$

Se calcula el estado de tensiones para un sistema de ejes que no sea el principal, obteniendo las siguientes desigualdades, que definirán el criterio:

$$\begin{aligned} \sigma_x |\sigma_x| &< \frac{X_c}{\cos^2 \theta} \\ \sigma_x |\sigma_x| &< \frac{Y_c}{\sen^2 \theta} \\ |\sigma_x| &< \frac{S}{\sen \theta \cos \theta} \end{aligned} \tag{10}$$

En la siguiente figura se puede observar que tensión máxima se registra para los diferentes ángulos de fibra según este criterio:

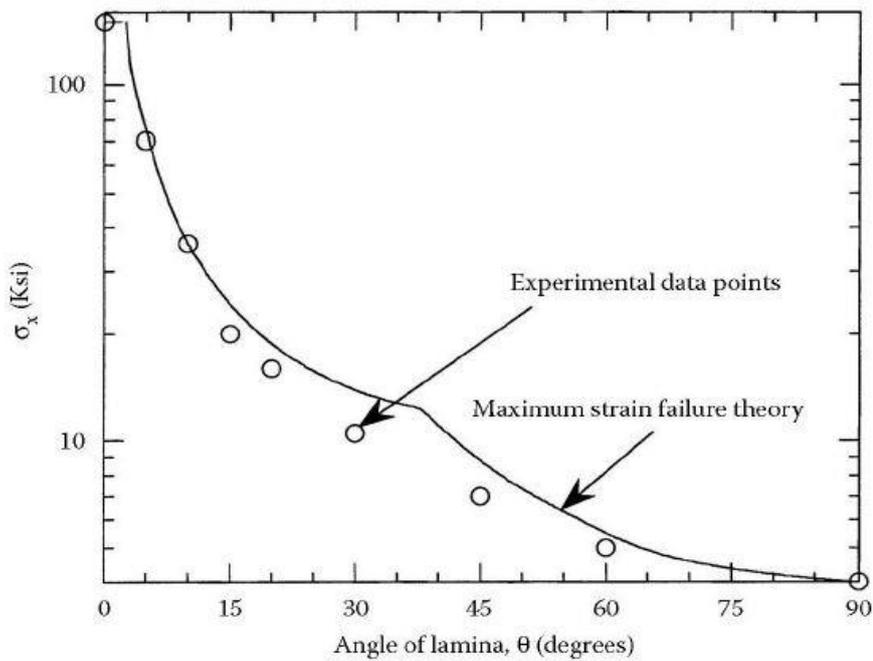


Figura 9: Tensión de tracción normal máxima en la dirección x en función del ángulo de la lámina según el criterio de máxima tensión

### 2.4.2 CRITERIO DE TSAI-HILL

Basado en el criterio de plastificación de Hill para materiales anisótropos y por tanto una extensión del criterio de Von-Mises para materiales isótropos.

Se enuncia el criterio de Hill de la siguiente manera:

$$(G + H)\sigma_{11}^2 + (F + H)\sigma_{22}^2 + (F + G)\sigma_{33}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} - 2G\sigma_{11}\sigma_{33} - 2F\sigma_{22}\sigma_{33} + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (11)$$

Si se admitiese un comportamiento elástico-lineal del material, el criterio anterior podría ser considerado como un criterio de rotura en el caso de materiales compuestos. Las constantes F, G, H, L, M y N, se pueden relacionar con las resistencias mecánicas en la dirección de las fibras, X, en dirección transversal a las fibras, Y, con la resistencia de la lámina en la dirección perpendicular a la misma, Z y con la resistencia a cortadura S, así lo hizo Tsai suponiendo ciertos estados de cargas sobre la lámina, quedando la expresión general:

$$\begin{aligned} \frac{1}{X^2}\sigma_x^2 + \frac{1}{Y^2}\sigma_y^2 + \frac{1}{Z^2}\sigma_z^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_x\sigma_y - \left(\frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_x\sigma_z \\ - \left(-\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_y\sigma_z + \frac{1}{S_{yz}^2}\tau_{yz}^2 + \frac{1}{S_{xz}^2}\tau_{xz}^2 + \frac{1}{S^2}\tau_{xy}^2 = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

Trabajando para el caso concreto de una lámina de fibra unidireccional operando fuera de ejes y admitiendo Z=Y, se obtiene la expresión final del criterio de fallo de Tsai-Hill:

$$\frac{\cos^4\theta}{X^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2}\right)\cos^2\theta\sin^2\theta + \frac{\sin^4\theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma^2} \quad (13)$$

En la siguiente figura se puede observar que tensión máxima se registra para los diferentes ángulos de fibra según este criterio:

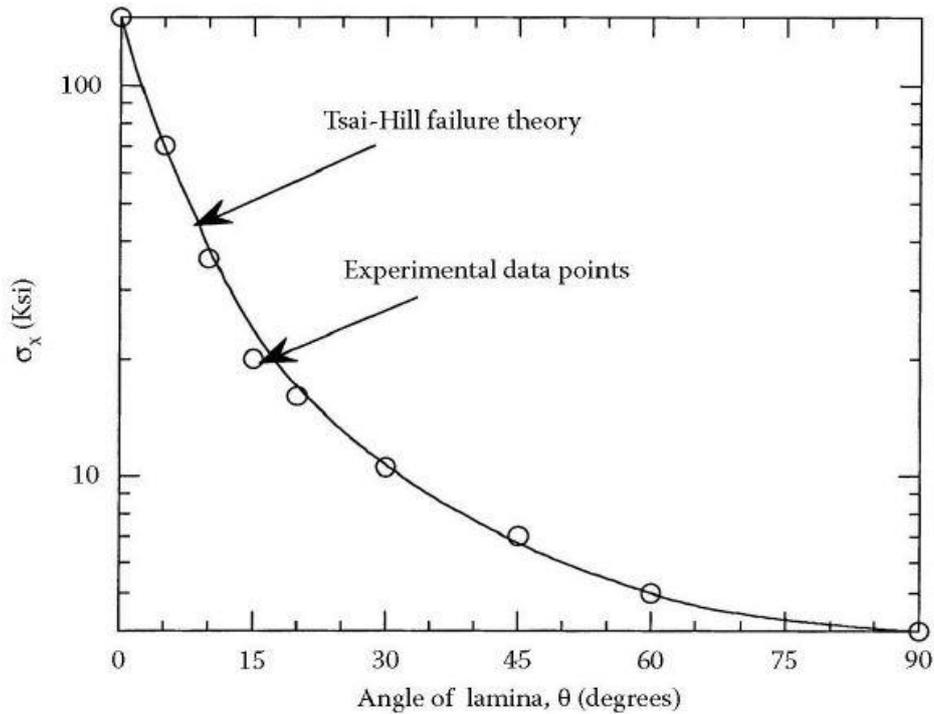


Figura 10: Tensión de tracción normal máxima en la dirección x en función del ángulo de la lámina según el Criterio de Tsai-Hill

### 2.4.3 CRITERIO DE TSAI-WU

Este criterio parte de la idea de generalizar el criterio de Tsai-Hill introduciendo términos que no aparecen en el anterior. Por lo que la expresión más general de este criterio consistiría en lo siguiente:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad |_{i,j=1 a 6} = 1 \quad (14)$$

Particularizando para una lámina, y despreciando la interacción entre tensiones normales y tangenciales:

$$F_1 \sigma_{11} + F_2 \sigma_{22} + F_6 \sigma_{12} + F_{11} \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + F_6 \sigma_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} = 1 \quad (15)$$

Las constantes se pueden obtener suponiendo estados concretos de carga, quedando el criterio, de la siguiente manera:

$$(F_1 + F_2) \sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12}) \sigma^2 = 1 \quad (16)$$

Por lo que el valor de  $F_{12}$  introduciendo los valores ya calculados, sería:

$$F_{12} = \frac{1}{2Z^2} \left[ 1 - \left( \frac{1}{X_t} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_c} \right) Z + \left( \frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) Z^2 \right] \quad (17)$$

Donde Z se define como: la resistencia a tensión biaxial de la lámina.

En la siguiente figura se puede observar que tensión máxima se registra para los diferentes ángulos de fibra según este criterio:

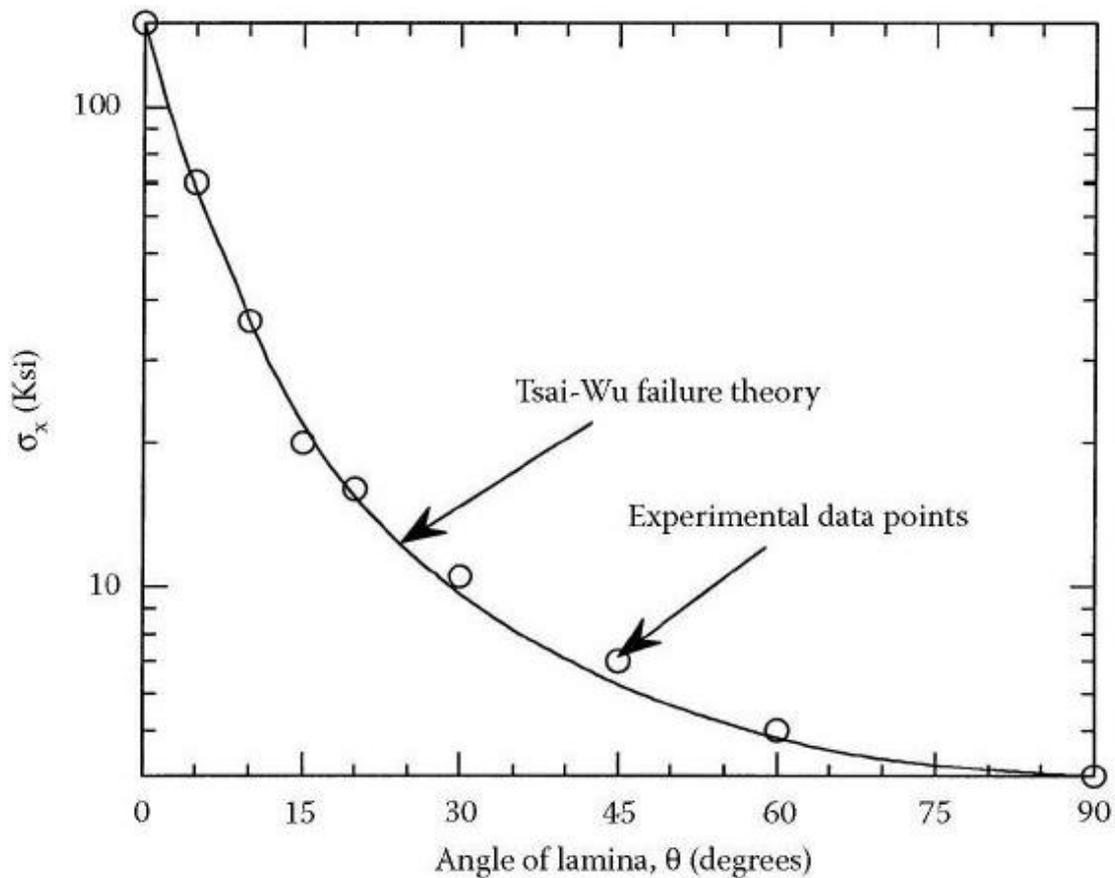


Figura 11: Tensión de tracción normal máxima en la dirección x en función del ángulo de la lámina según Tsai-Wu.

#### 2.4.4 CRITERIO DE PUCK

Este criterio se va a basar en el desarrollo de modos de fallo independientes, de modo que se presentan dos modos de fallo distintos: el fallo de la fibra (FF) y el fallo entre fibras o de la matriz (IFF). Cada uno de los modos admiten que la envolvente de fallo pueda estar compuesta de distintos tramos, que modelen los diferentes comportamientos resistentes ante tracción y compresión.

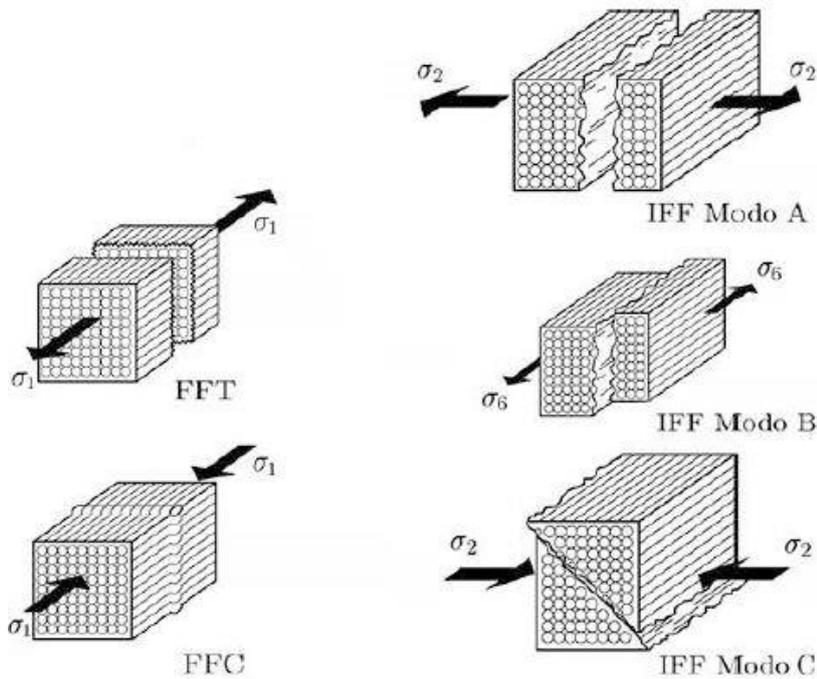


Figura 12: Mecanismos de fallo del Criterio de Puck

- **Fallo de la fibra:**

Considera que se producirá el fallo cuando se alcance en las fibras una tensión normal longitudinal igual a la que provoca el fallo bajo un estado de tensión uniaxial  $\sigma_1$ . Esto implica las siguientes condiciones:

$$\sigma_{f1} = X_{fT} (\sigma_{f1} \geq 0) \quad (18)$$

$$\sigma_{f1} = -X_{fC} (\sigma_{f1} < 0) \quad (19)$$

Donde se define los parámetros como:

$\sigma_{f1}$ : Tensión normal en las fibras en dirección paralela a las mismas

$X_{fT}$ : Resistencia a la tracción de las fibras

$X_{fC}$ : Resistencia a la compresión de las fibras Siendo las dos últimas las tensiones existentes en las fibras, en el seno de la lámina, cuando se produce el fallo de las fibras bajo un estado uniaxial  $\sigma_1$  aplicado sobre la lámina.

Asumiendo un comportamiento elástico lineal del compuesto, ambas resistencias pueden definirse como:

$$X_{fC} = \frac{X_C}{E_1} E_{f1} = \varepsilon_{1C} E_{f1} ; X_{fT} = \frac{X_T}{E_1} E_{f1} = \varepsilon_{1T} E_{f1} \quad (20)$$

Sus componentes se definen como:

$\varepsilon_{1T}$  y  $\varepsilon_{1C}$ : Deformaciones asociadas del conjunto, en dirección de la fibra, a tracción y compresión. Aún en un estado tensional solo transversal, pueden aparecer tensiones en la dirección paralela a las fibras, tanto a ellas como en la matriz. Por ello es necesario reducir la magnitud de los valores a través de un coeficiente denominado factor de magnificación:  $m_{\sigma f}$ . El valor recomendado de este parámetro va a depender del material, siendo 1.3 para los compuestos de vidrio y 1.1 para los compuestos de grafito. [17]

La deformación normal longitudinal en la fibra se puede expresar a través de la ley de comportamiento:

$$\varepsilon_{f1} = \frac{\sigma_{f1}}{E_{f1}} - \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \quad (21)$$

Dónde la tensión  $\sigma_{f2}$  se ha supuesto igual a  $\sigma_2$  del conjunto multiplicada por el factor de magnificación. Asumiendo un pegado perfecto entre las fibras y la matriz, se puede suponer que la deformación longitudinal de las fibras es igual a la del conjunto y por tanto la tensión  $\sigma_{1f}$  se puede expresar como:

$$\sigma_{1f} = \varepsilon_1 E_{f1} + \nu_{f12} m_{\sigma f} \sigma_2 \quad (22)$$

Finalmente el criterio quedaría sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

$$\frac{1}{\varepsilon_{1T}} \left( \varepsilon_1 + \frac{\nu_{F12}}{E_{f1}} m_{\sigma 2} \sigma_2 \right) = 1 \text{ para } \sigma_{f1} \geq 0 \quad (23)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1C}} \left( \varepsilon_1 + \frac{\nu_{F12}}{E_{f1}} m_{\sigma 2} \sigma_2 \right) = -1 \text{ para } \sigma_{f1} \leq 0 \quad (24)$$

Adicionalmente, se introduciría un cambio en la componente de compresión, dado que el mecanismo de fallo de la fibra en compresión provoca fenómenos de inestabilidad local (micro-pandeo). Por ello se propone una corrección de tipo empírico de la expresión (24), quedando las expresiones del criterio para modo de fallo de fibra:

$$\frac{1}{\varepsilon_{1T}} \left( \varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma 2} \sigma_2 \right) = 1 \text{ para } \sigma_{f1} \geq 0 \quad (25)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1T}} \left| \varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma 2} \sigma_2 \right| + (10\gamma_{12})^2 = 1 \text{ para } \sigma_{f1} \leq 0 \quad (26)$$

- **Fallo de la matriz:**

El fallo de matriz en materiales compuestos presenta un comportamiento en rotura frágil. Por ello en este criterio se propone seguir un planteamiento similar al criterio de Mohr (criterio de fallo en materiales frágiles).

La idea consiste en admitir el fallo provocado exclusivamente por las componentes de tensión asociadas al plano de fallo. Ha sido desarrollada por Puck determinando la inclinación del plano de fallo como función del estado tensional. [18].

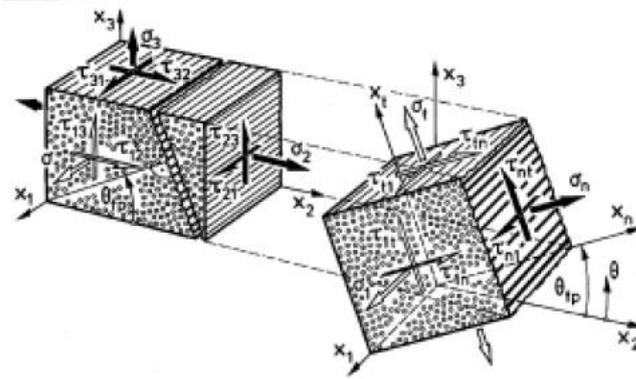


Figura 13: Esquema del estado tensional y componentes de tensión en el plano de fallo.

Se definen los planos de ortotropía del material ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ ), y las componentes de tensión en el plano de fallo ( $\sigma_n, \tau_{n1}, \tau_{nt}$ ).

En el caso de que la tensión normal al plano de fallo sea positiva ( $\sigma_n \geq 0$ ), las tres componentes de tensión contribuyen al fallo, y el criterio debe expresar interacción entre dichas componentes, usando una interacción cuadrática se obtendría de manera simple una adecuada expresión del criterio:

$$\left( \frac{\sigma_n}{R_{\perp}^{(+A)}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 = 1 \text{ para } \sigma_n \geq 0 \quad (27)$$

Donde los términos que aparecen como (R) a cada una de las resistencias asociadas a cada componente de tensión en el plano de fallo, de modo que:

$R_{\perp}^{(+A)}$ : Resistencia a la tracción en dirección perpendicular a las fibras  $Y_T$ .

$R_{\perp\parallel}^A$ : Resistencia a cizalladura intrañamimar  $S_{12}$ .

$R_{\perp\perp}^A$ : Resulta complicada de medir ya que un estado de cortadura pura  $\tau_{nt}$  produce un fallo por tracción en un plano a 45°. Puede obtenerse una medida indirecta en función de la resistencia a compresión perpendicular a las fibras  $Y_C$ .

Para conseguir un mejor ajuste con resultados experimentales, la expresión anterior, se modifica e introducen coeficientes  $c_1, c_2$  y un término lineal, de la siguiente manera:

$$C_2 \left( \frac{\sigma_n}{R_{\perp}^{(+A)}} \right)^2 + C_1 \frac{\sigma_n}{R_{\perp}^{(+A)}} + \left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 = 1 \text{ para } \sigma_n \geq 0 \quad (28)$$

Para el caso de tensión plana, las componentes en el plano de fallo se pueden evaluar como:

$$\sigma_n = \sigma_2 \cos^2 \theta; \quad \tau_{tn} = -\sigma_2 \sin \theta \cos \theta; \quad \tau_{n1} = \sigma_{12} \cos \theta \quad (29)$$

Definiéndose  $\theta$  como el ángulo que forma la normal al plano de fallo con la dirección del eje principal 2. Para el caso que ocupa de  $\sigma_n \geq 0$  (implica  $\sigma_2 \geq 0$ ), la evidencia experimental indica que el ángulo sería  $\theta = 0$ . Sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

$$\sigma_n = \sigma_2; \quad \tau_{tn} = 0; \quad \tau_{n1} = \sigma_{12} \quad (30)$$

Sustituyendo en la expresión del criterio:

$$C_2 \left( \frac{\sigma_2}{R_{\perp}^{(+A)}} \right)^2 + C_1 \frac{\sigma_2}{R_{\perp}^{(+A)}} + \left( \frac{\tau_{12}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 = 1 \text{ para } \sigma_2 \geq 0 \quad (31)$$

Trabajando con la anterior expresión y estimando los coeficientes de ajuste experimental, se llega a la expresión siguiente:

$$\sqrt{\left( \frac{\sigma_2}{R_{\perp}^{(+A)}} \right)^2 + \left( 1 - \frac{p_{\perp\parallel}^{(+)}}{R_{\perp\parallel}^A} R_{\perp}^{(+A)} \right) \left( \frac{\sigma_2}{R_{\perp}^{(+A)}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2} + \frac{p_{\perp\parallel}^{(+)}}{R_{\perp\parallel}^A} \sigma_2 = 1, \quad (32)$$

para  $\sigma_2 \geq 0$ .

Siendo  $p_{\perp\parallel}^{(+)}$  la pendiente de la curva de fallo para  $\sigma_2 \geq 0$ . En el punto de  $\sigma_2 = 0$ . La anterior expresión constituiría la expresión del criterio para el modo de fallo de la matriz en tracción o **Modo A**.

Para el caso de  $\sigma_n < 0$ , dicha componente de tensión normal contribuye impidiendo el fallo a cortadura que propician las componentes tangenciales. La explicación viene dada por el hecho de que la componente de  $\sigma_n$  de compresión genera una fricción interna en el materia que se opone a las acción de las componentes tangenciales. Esto se traduciría a la expresión es reduciendo el valor de las resistencias tangenciales en el

plano de fallo proporcionalmente al valor de la tensión normal  $\sigma_n$ . La expresión del criterio para  $\sigma_n < 0$ , sería:

$$\left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A - p_{\perp\perp}^{(-)}\sigma_n} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A - p_{\perp\parallel}^{(-)}\sigma_n} \right)^2 = 1 \text{ para } \sigma_n < 0$$

Donde:

$p_{\perp\parallel}^{(-)}$ : pendiente de la curva de fallo ( $\sigma_n, \tau_{n1}$ ) para  $\sigma_n < 0$  en el punto de  $\sigma_n = 0$ .

$p_{\perp\perp}^{(-)}$ : pendiente de la curva de fallo ( $\sigma_n, \tau_{nt}$ ) para  $\sigma_n < 0$  en el punto de  $\sigma_n = 0$ .

Se modifica la anterior expresión para obtener mejor resultado experimental, de la siguiente manera:

$$\frac{\tau_{nt}^2}{(R_{\perp\perp}^A)^2 - 2p_{\perp\perp}^{(-)}R_{\perp\perp}^A\sigma_n} + \frac{\tau_{n1}^2}{(R_{\perp\parallel}^A)^2 - 2p_{\perp\parallel}^{(-)}R_{\perp\parallel}^A\sigma_n} = 1 \text{ para } \sigma_n < 0 \quad (33)$$

Para simplificar la expresión, Puck asumió en base a la experiencia, que era razonable establecer una relación entre las pendientes y las resistencias en el plano de fallo del tipo:

$$\frac{p_{\perp\perp}^{(-)}}{R_{\perp\perp}^A} = \frac{p_{\perp\parallel}^{(-)}}{R_{\perp\parallel}^A} = \frac{p}{R} = cte \quad (34)$$

Usando esta simplificación, la expresión del criterio se reduce a:

$$\left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 + 2\left(\frac{p}{R}\right)\sigma_n = 1 \text{ para } \sigma_n < 0 \quad (35)$$

Para el caso de tensión plana las componentes del plano de tensión pueden evaluarse del mismo modo como se ha realizado anteriormente.

Existe una primera zona del dominio del compresión

( $\sigma_2$  es pequeña relativamente frente a  $\sigma_{12}$ ) donde se puede observar experimentalmente que el ángulo del plano de fallo es  $\theta = 0$ . Esta zona del dominio de compresión se denomina **Modo B**.

Sustituyendo en las expresiones anteriores para el ángulo dicho:

$$\left( \frac{\sigma_{12}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 + 2\left(\frac{p}{R}\right)\sigma_2 = 1 \text{ para } \sigma_2 < 0 \quad (36)$$

Operando en ella:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{12}}{R_{\perp\parallel}^A}\right)^2 + \left(\frac{p}{R}\right)^2 \sigma_2^2} + \left(\frac{p}{R}\right) \sigma_2 = 1 \text{ para } \sigma_2 < 0 \quad (37)$$

Que constituye la expresión del criterio para el modo B de fallo de la matriz en compresión ( $\sigma_2 < 0$ ).

La otra zona que completa el dominio de compresión ( $\sigma_2$  es dominante frente a  $\sigma_{12}$ ) es aquella en que el ángulo del plano de fallo es  $\theta \neq 0$ . Esta zona se denomina **Modo C**. La determinación de las componentes de tensión en el plano de fallo, precisa del conocimiento del ángulo  $\theta$ . Para un caso tridimensional habría que barrer todo el rango de variación del ángulo y detectar cuál maximiza la expresión del criterio.

Sin embargo para el caso de tensión plana, se puede determinar analíticamente dicho ángulo. Siendo la expresión que maximiza el ángulo la siguiente:

$$\theta = \cos^{-1} \sqrt{\frac{R_{\perp\parallel}^A}{-\sigma_2}} \quad (38)$$

El valor de la componente normal asociada al plano de fallo, permanece constante:

$$\sigma_n = \sigma_2 \cos^2 \theta = -R_{\perp\parallel}^A \quad (39)$$

Este valor va a limitar los modos B y C, de manera que:

$$-R_{\perp\parallel}^A \leq \sigma_2 \leq 0 \rightarrow \text{Modo B} \quad (40)$$

$$\sigma_2 \leq -R_{\perp\parallel}^A \rightarrow \text{Modo C}$$

Sustituyendo el valor del ángulo que maximiza en la expresión del criterio y operando, se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2\left[1+\left(\frac{p}{R}\right)R_{\perp\parallel}^A\right]} \left[ \left(\frac{\sigma_2}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{R_{\perp\parallel}^A}\right)^2 \right] \frac{R_{\perp\perp}^A}{-\sigma_2} = 1 \text{ para } \sigma_2 < -R_{\perp\parallel}^A \quad (41)$$

Que constituye la expresión del criterio para el modo C de fallo de la matriz en compresión.

El criterio de Puck depende de varios parámetros que no son fáciles de determinar. Sin embargo el autor propone, en [19], valores basándose en la experiencia. Además de recomendar unas relaciones de las pendientes de las curvas:

$$R_{\perp\perp}^A = S_{23} = \frac{Y_c}{2(1 + p_{\perp\parallel}^{(-)})} \quad (42)$$

$$\frac{p_{\perp\parallel}^{(-)}}{R_{\perp\parallel}^A} = \frac{p_{\perp\parallel}^{(-)}}{R_{\perp\perp}^A} = \left(\frac{p}{R}\right) = cte$$

Otras recomendaciones del autor:

	$p_{\perp\parallel}^{(+)}$	$p_{\perp\parallel}^{(-)}$	$m_{\sigma f}$
<b>Grafito</b>	0.35	0.3	1.1
<b>Vidrio</b>	0.3	0.25	1.3

Tabla 1. Propiedades recomendadas por Puck para parámetros del criterio

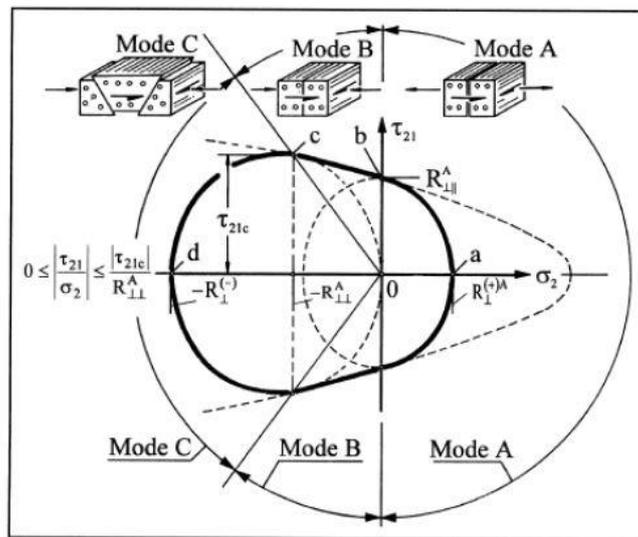


Figura 14: Curva de fallo de la matriz que predice el criterio de Puck

## Capítulo 3. Trabajo Experimental.

---

### 3.1 Introducción.

En este capítulo se va a llevar a cabo el desarrollo de todo el trabajo de laboratorio en lo referente a la fabricación de los especímenes, para su posterior ensayo.

Este desarrollo va a abarcar desde la configuración de los panales, su curado y posterior corte de donde se obtendrán las probetas, desarrollo de los tacones y todo el proceso de pegado y obtención final del espécimen.

Buscando encontrar una configuración del ensayo Off-Axis que permita acercarnos a un estado tensional uniforme, se van a fabricar, diferentes cantidades de probetas, en concreto probetas orientadas un determinado ángulo según el eje x, para de esta manera poder estudiar ángulos pequeños que son los que van a sufrir grandes desviaciones del modelo ideal.

Por todo ello se llevan a cabo la fabricación de 9 probetas de 0 grados, 8 probetas de 5 grados, 7 probetas de 10 grados, 6 probetas de 15 grados y otras 6 de 20 grados, con sus respectivos tacones.

#### 3.1.1 MATERIAL DE FABRICACIÓN AS4/8552

Se decide fabricar los especímenes con material pre-preg de fibra de carbono y resina epoxy, en concreto se ha utilizado un laminado CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) con fibras unidireccionales AS4 Magnamite® y una matriz epoxy 8552 de HEXCEL. Ya que este material se ajusta a las propiedades de resistencia y deformación que se desean probar y estudiar en este proyecto.

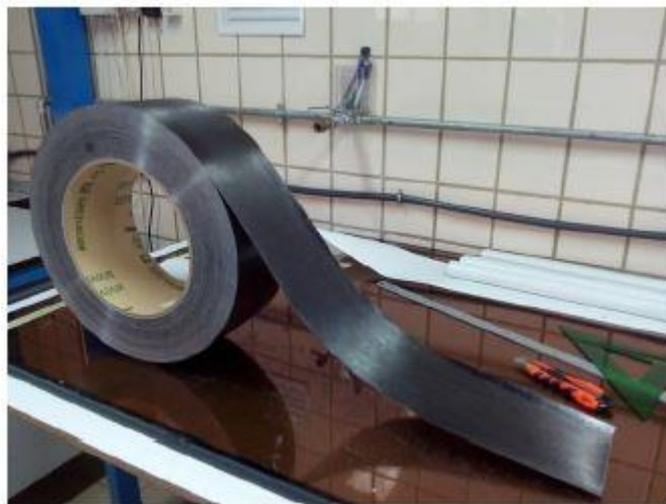


Figura 15 - Cinta de material AS4/8552

El uso de este material es usual en la industria militar pudiendo encontrarlo en los aviones f18, f22, f35 o Eurofighter Typhoon. Se caracteriza por un excelente comportamiento a corrosión y resistencia a fatiga con un peso muy ligero y altos valores de resistencia.

El material se presenta como un pre impregnado en forma de cinta unidireccional, cuyas propiedades se registran a continuación:

	<b>Fibra</b>	<b>Resina</b>
<b>Designación</b>	AS4, 12K	Hexcel 8552
<b>Configuración</b>	Fibra de Carbono, 12000 filamentos	Epoxy, de curado a 180°
<b>Densidad</b>	1.78 ± 0.05 g/cm <sup>3</sup>	1.30 g/cm <sup>3</sup>
<b>Longitud por unidad de peso</b>	1.17 ± 0.06 m/g	
<b>Resistencia a tracción</b>	3100 MPa mínimo	
<b>Módulo elástico a tracción</b>	220-240 GPa	
<b>Alargamiento a rotura</b>	1.28% mínimo	

**Tabla 2. Propiedades del material compuesto AS4/8552**

El material propiedad del laboratorio del Grupo de Elasticidad y Resistencia de los Materiales, se encuentra preservado en todo momento en las condiciones adecuadas de temperatura y humedad. Encontrándose en una cámara frigorífica a una temperatura de entre -18°C y -20°C, sellado en una bolsa precintada.

### **3.1.2 MATERIAL DE LOS TACONES**

La probetas llevan en sus extremos tacones, en el caso de este estudio son tacones oblicuos, donde las mordazas de la máquina de ensayos ejercerán la fuerza unidireccional para llevar a cabo el ensayo de tracción.

Como ya estudiaron diferentes autores, como Sun CT [7,8 del documento de determination part I], la fibra de vidrio presenta las condiciones idóneas para el agarre de las probetas, así como permitiendo la deformación por cizalladura. La fibra de vidrio es uno de los refuerzos más utilizados por su alta disponibilidad, bajo costo y buenas propiedades mecánicas. Buscar más datos en el documento en ingles]

Estos tacones transfieren por cortadura la carga aplicada en las mordazas sobre las probetas, evitando de ese modo provocar daños en el material. Por ello en este estudio se va a utilizar concretamente un compuesto de fibra de vidrio y resina epoxy, con fibras orientadas ±45°, que presentan una alta resistencia a cortadura.

### **3.1.3 ADHESIVO**

Para realizar el pegado de los tacones a las probetas se va a hacer uso del adhesivo de la marca Safran, EA9394 Structil Part A mezclado con un endurecedor EA9394 Part B, siendo la proporción de la mezcla de 17 partes de B por cada 100 de A. Se trata de un adhesivo tixotrópico, que presenta un cambio en su viscosidad con el tiempo, presentando menor viscosidad cuando mayor sean los esfuerzos de cizalladura a los que sea sometido. Su temperatura de servicio es de 177°C, y el curado del adhesivo se puede dar tanto a temperatura ambiente en un periodo de 5-7 días o en un horno, a temperatura de 60-70 °C durante 2-3 horas.



Figura 16 - Adhesivo SAFRAN EA9394 A+B usado para la unión tacones y probetas.

### 3.1.4 HERRAMIENTA DE CORTE

A la hora de realizar el corte de los paneles y la posterior obtención de los especímenes, se va a utilizar una sierra de disco de polvo de diamante refrigerada con agua, consiste en un disco de 2.5 mm de espesor montado sobre una máquina de corte.

El deslizamiento del disco sobre la bancada se realiza de manera manual, ajustando en sus topes finales los elementos a cortar, en este caso, paneles o probetas, y realizando el paso del disco de manera continua y firme para obtener un corte limpio y homogéneo.

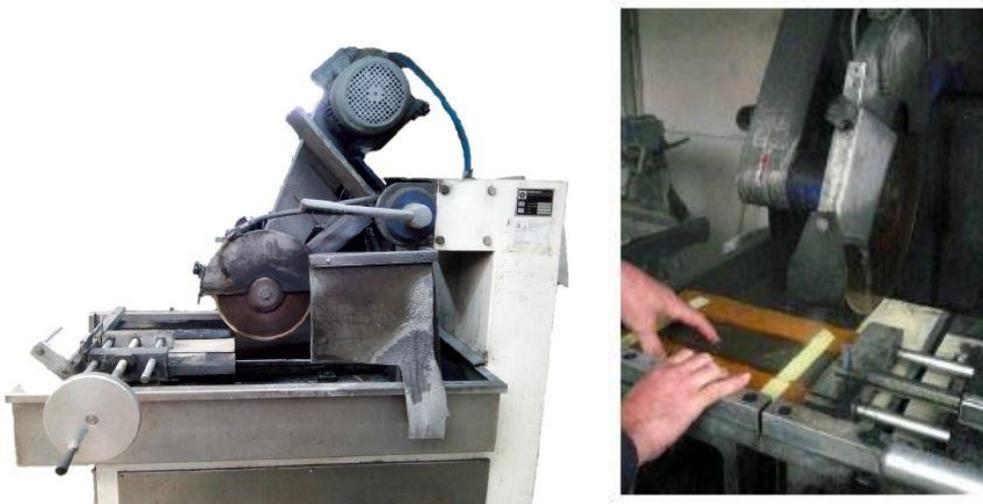


Figura 17 - Máquina de corte con disco de polvo de diamante.

### 3.1.5 HERRAMIENTAS DE MEDIDA

Como elemento de medida, a la hora de poder dimensionar espesores, anchos y longitudes de especímenes, se va a utilizar calibre o pie de rey digital. El modelo concreto que se va a usar es el que se puede observar en la imagen, el calibre digital de la marca Mitutoyo, con un rango de medida de 200 mm y con resolución de 0.01 mm.



Figura 18 - Calibre digital Mitutoyo

### 3.1.6 AUTOCLAVE

El Autoclave como ya se ha mencionado en anteriores capítulos va a permitir realizar la segunda fase en el proceso de fabricación de un laminado de material compuesto, el proceso de curado.

El autoclave es un recipiente o cámara presurizada donde dadas unas condiciones de temperatura y presión se va a propiciar la polimerización de la resina del material compuesto.

Estas condiciones se alcanzan introduciendo aire caliente a través de sus conductos, además consta de un sistema de presión de vacío que se conecta a la bolsa con los paneles y que se encarga de compactar los paneles que se hayan introducido.

Concretamente en este proyecto se va a trabajar con el autoclave que se encuentra en los laboratorios del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla, que se trata del modelo SCHOLZ BA-E44313-1. En la imagen a continuación podemos ver una imagen de este equipo.

### 3.1.7 MÁQUINA DE ENSAYO A TRACCIÓN

El elemento para poder realizar el ensayo a tracción desarrollado en el capítulo 4, es una máquina de tracción del modelo Instron 4483 así como un extensómetro para medir la deformación sufrida por los especímenes durante el ensayo.

Se trata de una máquina constituida por un bastidor fijo, una unidad móvil o cruceta que se desplaza en el sentido vertical aplicando una carga a las probetas, un sistema de medida de carga y otro de control montado en una consola desde donde manejar el instrumento de ensayo, como se puede ver en la imagen a continuación:



Figura 19 - Máquina de ensayo Instron 4483.

## 3.2 Fabricación de paneles.

Así como se explicaba anteriormente la necesidad de preservar el material en las condiciones requeridas, todo trabajo que se realice manipulando el pre-preg en su estado sin curar, las condiciones de trabajos deben estar controladas, tanto en temperatura, humedad y en la no presencia de impurezas en el entorno de trabajo. Por ello todo el proceso de fabricación es llevado a cabo en un ambiente aislado llamado Sala Limpia, donde las condiciones de temperatura, presión y humedad son las idóneas para preservar las propiedades del material así como evitar su polimerización de manera natural.

### 3.2.1 DISEÑO DE LAS PROBETAS

Se llega a la conclusión según los estudios que anteceden a este proyecto, que las probetas que se van a fabricar para ensayos a tracción van a presentar todas una longitud de unos 200 mm y 10 mm de ancho con espesores inferiores al milímetro, ya que se van a fabricar con 4 capas de tejido pre-preg.

Dado que los tacones también van a requerir diseño, se toma como condición respetar en las probetas una longitud libre ( $l_i$ ) de más de 100 mm de longitud, es decir, la condición a respetar es que el ratio  $l_i/h \geq 10$ .

Se deberá tener en cuenta el ángulo de los tacones ( $\emptyset$ ) y respetar tanto ese ángulo como el de la fibra ( $\theta$ ). En la siguiente imagen se observa el diseño que se realizó para el estudio de las probetas tanto a cero grados (tacones rectos) como con orientación de fibra (tacones oblicuos).

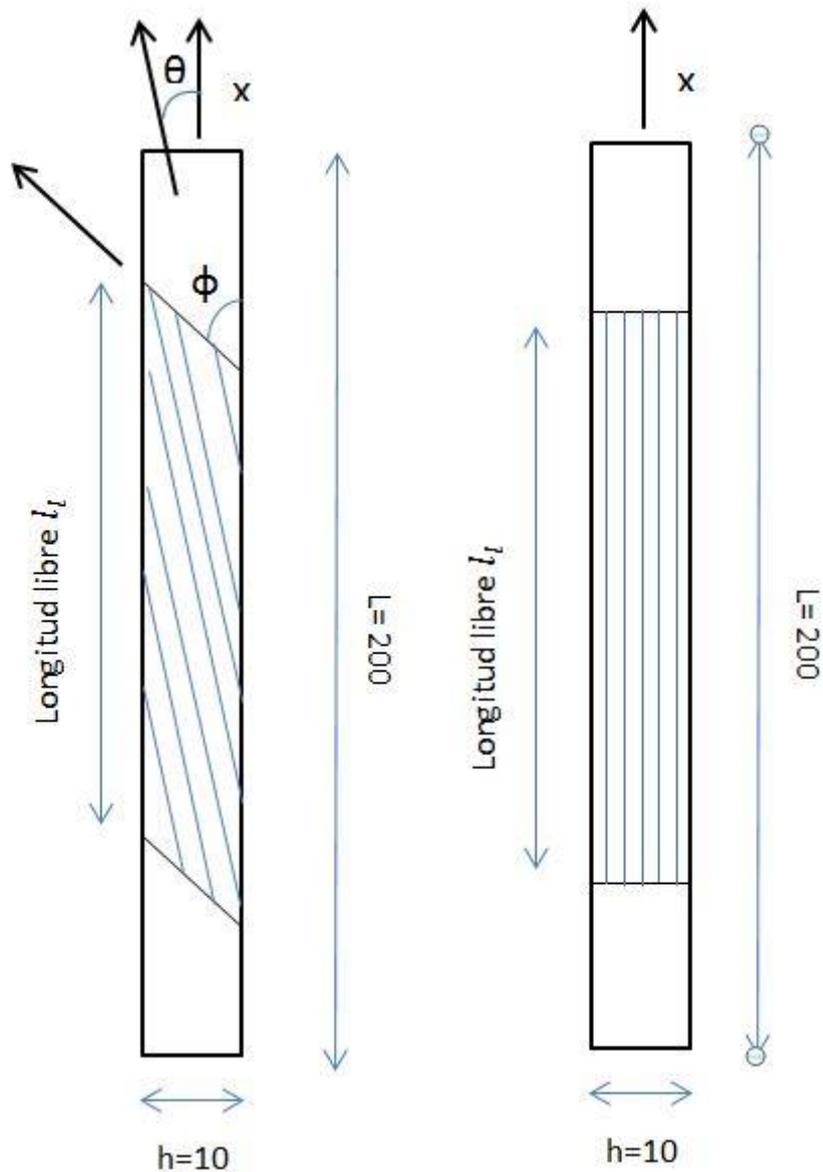
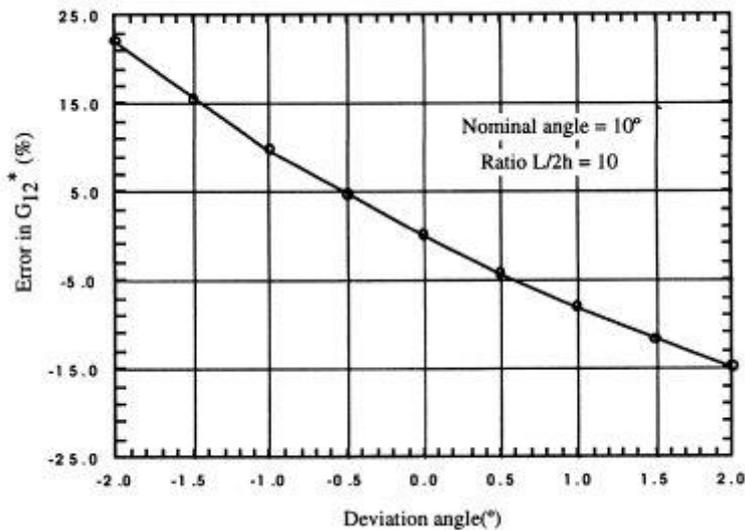


Figura 20 - Diseño de probetas con tacones

Para llevar a cabo la fabricación de dichos especímenes se va a requerir un cálculo minucioso de las medidas de los siguientes paneles para ajustarse al ancho del rollo y poder obtener las orientaciones deseadas, extremando que el error no sea mayor de medio grado en la orientación de las fibras, y de ese modo poder asegurarse un comportamiento lo más cercano posible a lo ideal.

Según se ha estudiado [5] es de vital importancia respetar una desviación máxima de  $\pm 1^\circ$  en el ángulo de la fibra, ya que la desviación del ángulo de la fibra respecto de su valor nominal puede tener una gran influencia sobre el valor aparente de  $G_{12}^*$ , como se puede ver en la siguiente gráfica, donde se muestra la variación de  $G_{12}^*$  obtenido de un análisis numérico frente a errores en la orientación de la fibra, para orientaciones de 5, 10, 15, 30, 45, 60 y 75 grados, y para un ratio de probeta de 10.



En este estudio se va a intentar ser precisos en la fabricación para que el rango de desviación no supere el  $\pm 0.5^\circ$ .

Para ello se usó, transportador de ángulos, elementos de fijación y tope para que ni la lámina ni las herramientas de medición y corte se moviesen.

### 3.2.2 OBTENCIÓN DE LOS PANELES DE 0 GRADOS

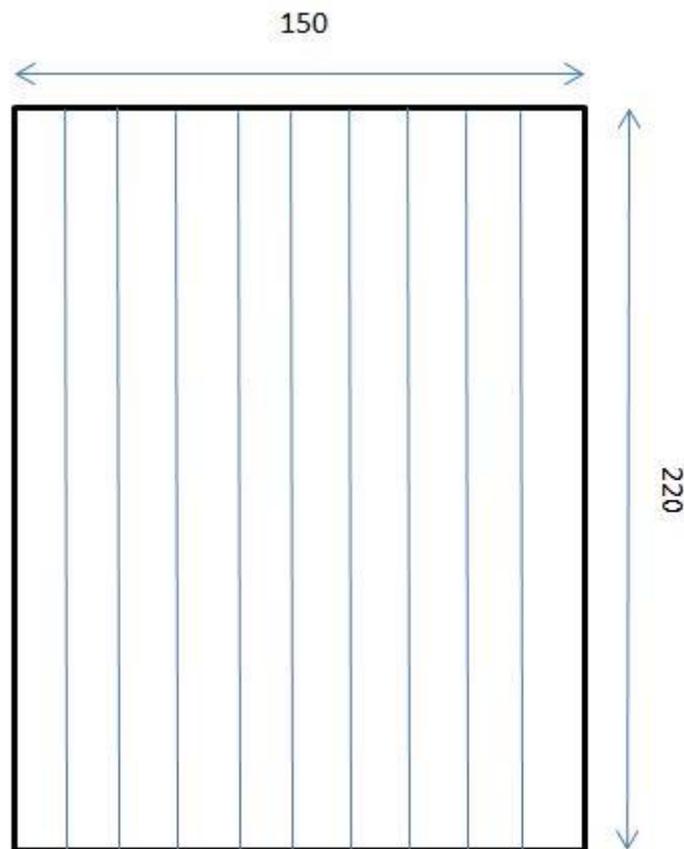
A la hora de la fabricación de los paneles de los cuales se obtendrán las probetas, se presenta la limitación provocada por el ancho del rollo de tejido pre impregnado, el cual presenta una extensa longitud pero un ancho de 150 milímetros. Lo cual limitará a la hora de obtener probetas con una orientación superior a 0 grados.

La primera fabricación que se realiza es el montaje del panel de pre impregnado con las fibras orientadas cero grados, mediante corte y apilado de cuatro láminas del material AS4/8552. Se obtuvo un panel de 220x150 milímetros de donde tras el resanado y futuro pegado de los tabs se sacarán probetas de 200x10 milímetros de fibras a cero grados.

Partiendo del rollo se miden 220 mm de longitud y haciendo uso de escuadra, cartabón y tacos de acero de 25x15x10 mm como topes y elementos de fijación, se realiza el corte, haciendo uso de una hoja afilada (cúter). Es importante realizar el corte de una sola pasada, de manera limpia y sin deshilar la fibra del tejido.

Puede parecer trivial para el corte de 0 grados, pero para los cortes de 5 y 10 grados sobre todo, también para los de 15 y 20 grados, será de vital importancia ser exhaustivo en el corte, la precisión y exactitud a la hora de medir, contener y cortar el tejido.

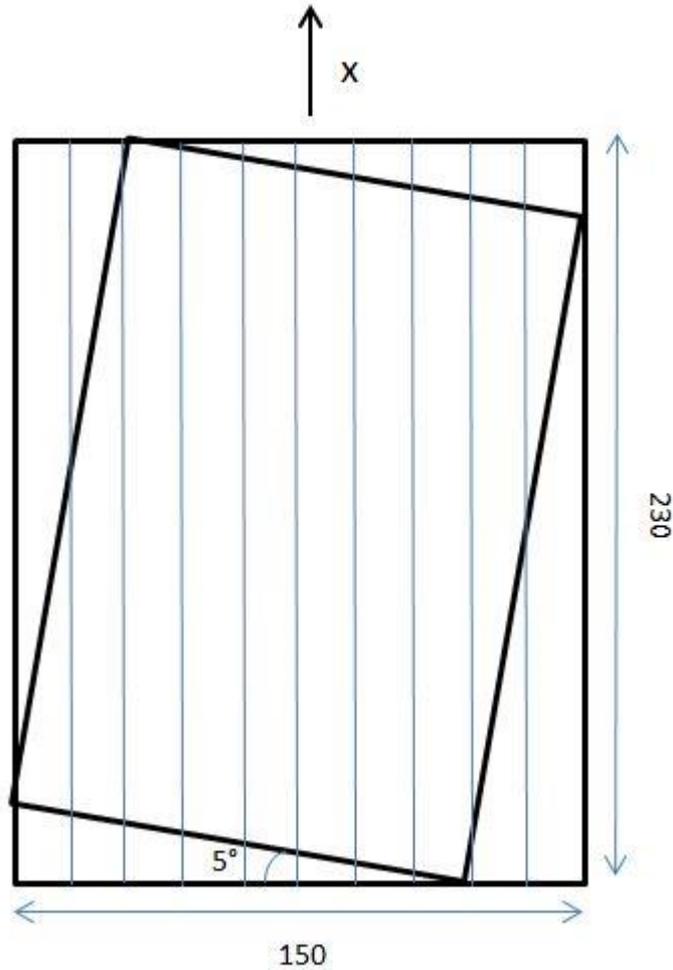
A continuación se observa el diseño previo que se hizo de las 4 láminas que se sacaron del rollo.



**Figura 21 - Lámina obtenida del rollo de pre-preg de donde se obtendrá el panel de  $0$  grados.**

### **3.2.3 OBTENCIÓN DEL PANEL DE $5$ GRADOS**

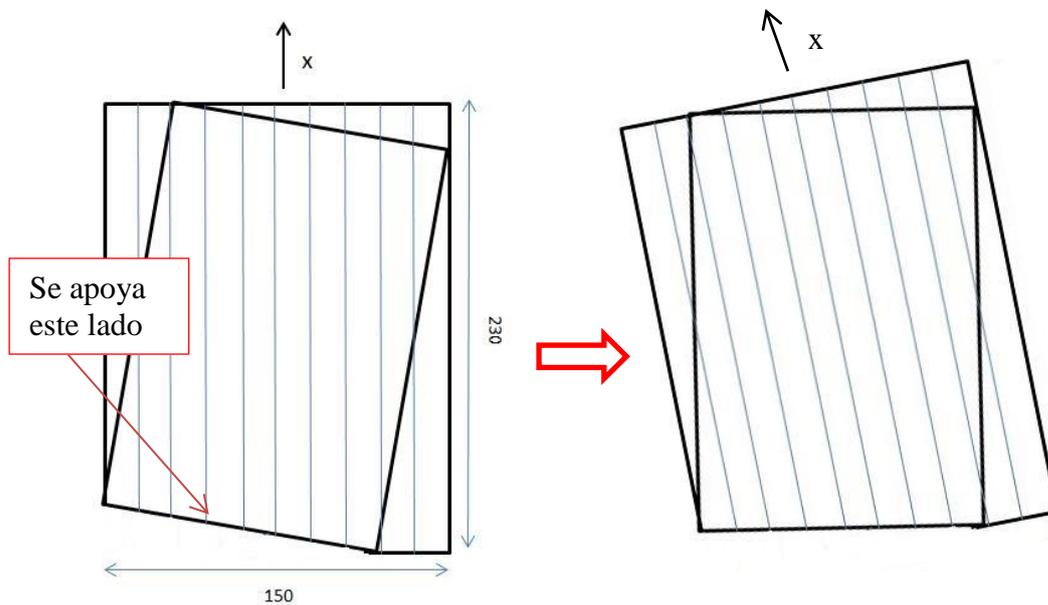
Al igual que el para el panel de cero grados, se hace para el panel de fibras orientadas cinco grados. Para ello se pasa primeramente a cortar cuatro trozos de pre impregnado de forma rectangular, teniendo en cuenta el siguiente diseño.



**Figura 22 - Diseño del panel de 5 grados obtenido del rollo de pre-preg.**

Una vez se corte el trozo rectangular de  $230 \times 150$ , y haciendo uso de un transportador, se dibuja el ángulo de  $5^\circ$ , siendo riguroso en la medida. Para ello, una vez se dibuja la orientación de 5 grados en la parte posterior del trozo de tejido, usando los tacos que hacen de tope y soporte del trozo rectangular, se corta.

Una vez se tiene un lado, haciendo uso de escuadra y cartabón, así como de los topes para asegurar la fijación de la lámina sobre la mesa, se cortará el resto de lados. Ver la siguiente imagen.



**Figura 23 - Corte de la lámina orientada 5 grados.**

Finalmente se obtiene una lámina rectangular de fibras orientadas 5 grados según la dirección del eje x.

El proceso se repetirá con cuatro láminas en total, que posteriormente se apilarán unas sobre otras, con las fibras orientadas unidireccionalmente, y se le aplicará presión para compactarlas con ayuda de una espátula de plástico. A modo de protección, se dejará el papel que protege la lámina (papel blanco que se ve en la imagen), tanto de la primera como de la última capa. Solo se quitará para dejar fijado el panel a la plancha a la hora del curado en autoclave.



**Figura 24 - Proceso de compactado de las láminas en la Sala Limpia**

### 3.2.4 OBTENCIÓN DEL PANEL DE 10 GRADOS

El proceso se repite para el panel de 10 grados. Primero se diseña el trozo rectangular a cero grados que se va a cortar directamente del rollo de pre-preg. Debido a que cada vez el ángulo de orientación que se busca de la fibra es más acusado, se requerirá más longitud del trozo original, por ello se corta en esta ocasión un rectángulo de 240x150 mm.

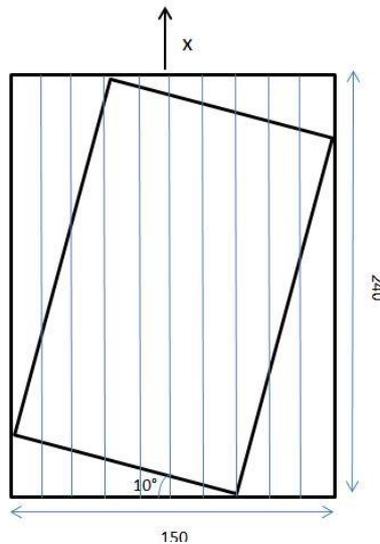
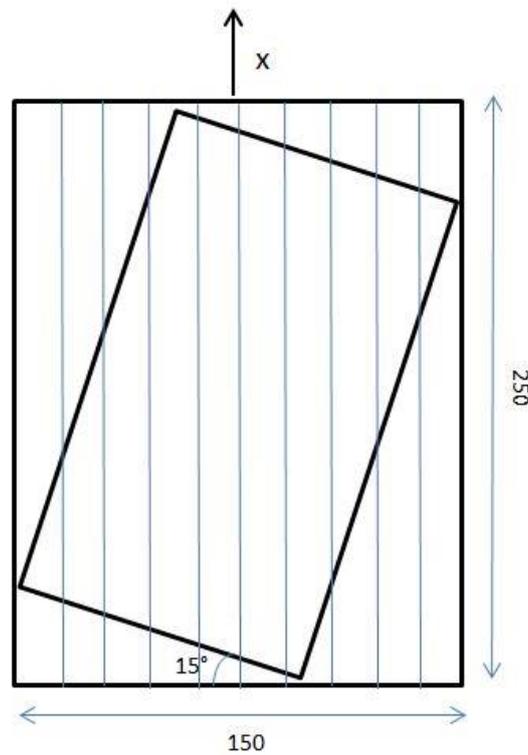


Figura 25 - Diseño del panel de compuesto con fibras orientadas 10 grados.

A la hora de realizar el corte, se actúa al igual que con los paneles de 5 grados, se sostiene de manera firme la lámina con ayuda de los topes y se corta, para posteriormente compactar una lámina sobre otra hasta obtener cuatro capas.

### 3.2.5 OBTENCIÓN DEL PANEL DE 15 GRADOS

De igual modo a lo anteriormente descrito se diseña de la siguiente manera sobre el trozo rectangular directamente cortado del rollo, el panel de pre impregnado con fibras orientadas un ángulo de 15 grados.



**Figura 26 - Diseño de las láminas de fibras orientadas 15 grados sobre el trozo rectangular de pre-impregnado.**

Posteriormente a su diseño sobre el trozo rectangular de lámina sacada del rollo de pre-preg, en este caso de 250x150 mm se corta, obteniéndose el panel orientado 15 grados.

### **3.2.6 OBTENCIÓN DEL PANEL DE 20 GRADOS**

Tal cual se ha visto en los anteriores apartados, se diseña, corta y apilan las láminas en este caso orientadas 20 grados, de acuerdo al diseño que se observa en la imagen siguiente:

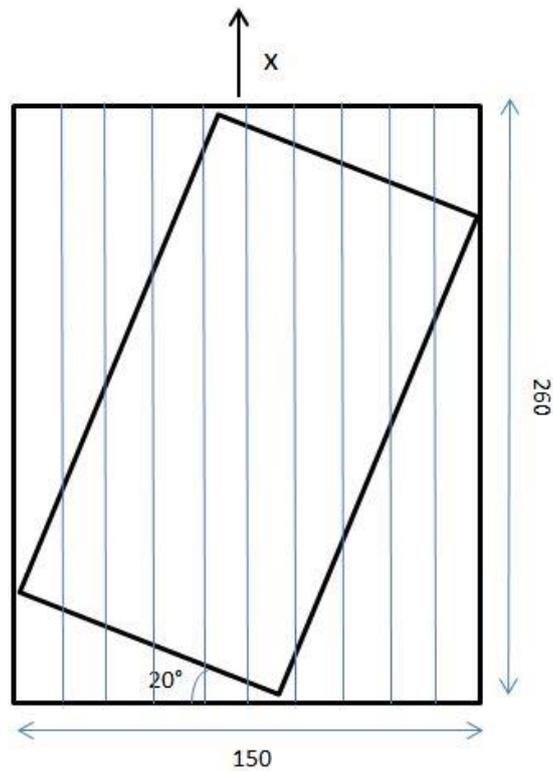


Figura 27 - Diseño del panel de fibras orientadas 20 grados sobre el trozo de pre-preg

Finalmente tras este último corte y apilado de las cuatro láminas de 20 grados, se tendría todos los paneles cortados y compactados, listos para el siguiente proceso.

Las medidas de cada panel son las siguientes:

Orientación de las fibras	Dimensiones a 0 grados		Dimensiones una vez orientadas (sin resanar)	
	LONGITUD	ANCHO	LONGITUD	ANCHO
$0^\circ$	220	150	220	150
$5^\circ$	230	150	215	123
$10^\circ$	240	150	207	115
$15^\circ$	250	150	208	97
$20^\circ$	260	150	199	88

Tabla 3 - Medidas de los paneles obtenidos

Las dimensiones de la columna nombrada como “Dimensiones a 0 grados” es donde se ha clasificado las dimensiones del panel que en primer lugar se obtiene del rollo de tejido de fibra de carbono. Primeramente se corta un trozo rectangular de las dimensiones especificadas en la tabla, cambiando dichas dimensiones dependiendo de la orientación posterior que vamos a darle, y de ese trozo rectangular (orientado a 0 grados), como se ha visto en los apartados inmediatamente anteriores, dándole la orientación deseada se obtendrá el panel final que se someterá al curado del autoclave.

### 3.2.7 PREPARACIÓN DE LA BOLSA DE VACÍO

En estos procesos tan iniciales de la fabricación es importante ser rigurosos, ya que un fallo en las primeras fases de la etapa de fabricación puede llevar a un error en el corte del ángulo y por tanto a arrastras esa falla, a lo largo de todo el proceso y posteriores cálculos. Con lo que las conclusiones obtenidas pudieran no ser las deseadas.

La bolsa de vacío va a permitir a la hora de introducir los paneles de laminados pre impregnados en el autoclave a ciclos de altas temperaturas y presión, una aplicación uniforme de la presión. La misión de la presurización del laminado se puede dividir en varias: primeramente cumple una función de eliminación de aire entre capas, evitando posibles futuras delaminaciones o defectos del laminado; por otra lado compacta la capas y distribuye uniformemente al laminado, consiguiendo una laminación homogénea y uniforme; y por otro lado evita que durante el curado la resina al sufrir los ciclos de altas temperaturas y su viscosidad aumente, y esta fluya, pudiendo llevar a la modificación de la orientación de las fibras por el movimiento de las capas.

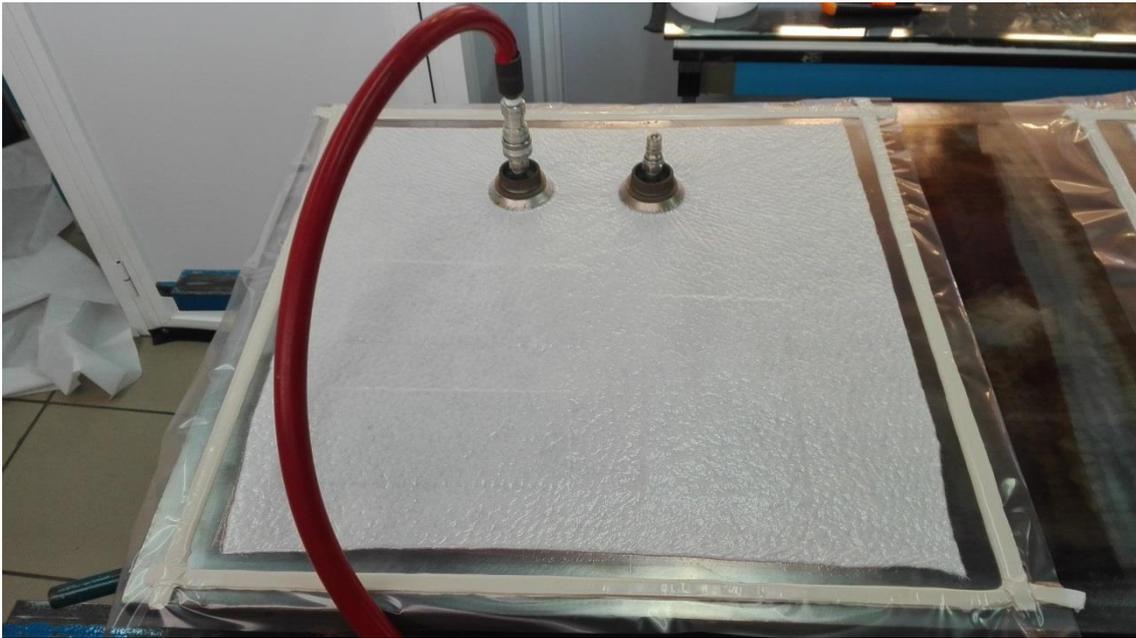
Una buena bolsa de vacío nos permitirá obtener unas probetas bien orientadas, sin defectos y conservando las propiedades del material.

Por ello el vacío se realiza sobre una plancha de acero o aluminio, previamente limpiada y eliminado toda posibilidad de restos de material, con acetona y posterior pulido de la placa.

Se colocará el panel entre dos trozos de teflón, posterior se tapa el “sándwich” de teflón y el panel con un trozo de airwave que cubra sobradamente al teflón. Y bordeando al airwave pero sin llegar a pegar sobre él, se pone cromato encuadrando a todo, el cual va a hacer de adhesivo entre la playa y trozo de plástico que lo cubrirá todo como muestra la imagen- El trozo de plástico transparente debe adherirse con sumo cuidado al cromato ya pegado en la plancha, procurando no dejar arrugas donde se pueda quedar aire a la hora de realizar el curado.

Antes de pegar definitivamente el plástico al cromato, se ha tenido que situar dos tomas de vacío sobre el airwave, que serán las tomas por donde se realice la presurización de la bolsa.

De esa manera se obtendrá una bolsa de vacío como la mostrada a continuación:



**Figura 28 - Preparación de bolsa de vacío lista para ser introducida en autoclave.**

Para realizar un mejor compactado antes de introducir en autoclave y para comprobar la correcta preparación de la bolsa de vacío, se aplicará vacío a través de una de las tomas. Retirando la manguera unos segundos después, de este modo comprobaremos que no se filtra aire por ningún sitio ni que la bolsa pierde presión, de manera que la comprobación queda hecha y la bolsa estará lista para autoclave.

Todo el proceso de preparación de la bolsa de vacío se lleva a cabo, como todo lo hecho hasta ahora, dentro del aislamiento de la Sala Limpia, a excepción de la limpieza con acetona y pulido de la plancha que se ha realizado en el exterior, en otra sala habilitada para ello.

### **3.2.8 PROCESO DE CURADO**

El proceso de curado se lleva a cabo en primer lugar y como primera toma de contacto del panel de cero grado. Y posteriormente en una sola plancha de aluminio se curaron el resto de paneles: uno de 5 grados, 2 paneles de 10 grados (el panel sobrante se utilizará para una modificación final en el ensayo, apartado 3.4), uno de 15 grados y otro de 20 grados, distribuidos en dos bolsas de vacíos para de ese modo optimizar el espacio, pero también asegurarse de que si una de las bolsas de vacío no está bien preparada y los paneles se quema en el proceso de curado, no perder todos los paneles.

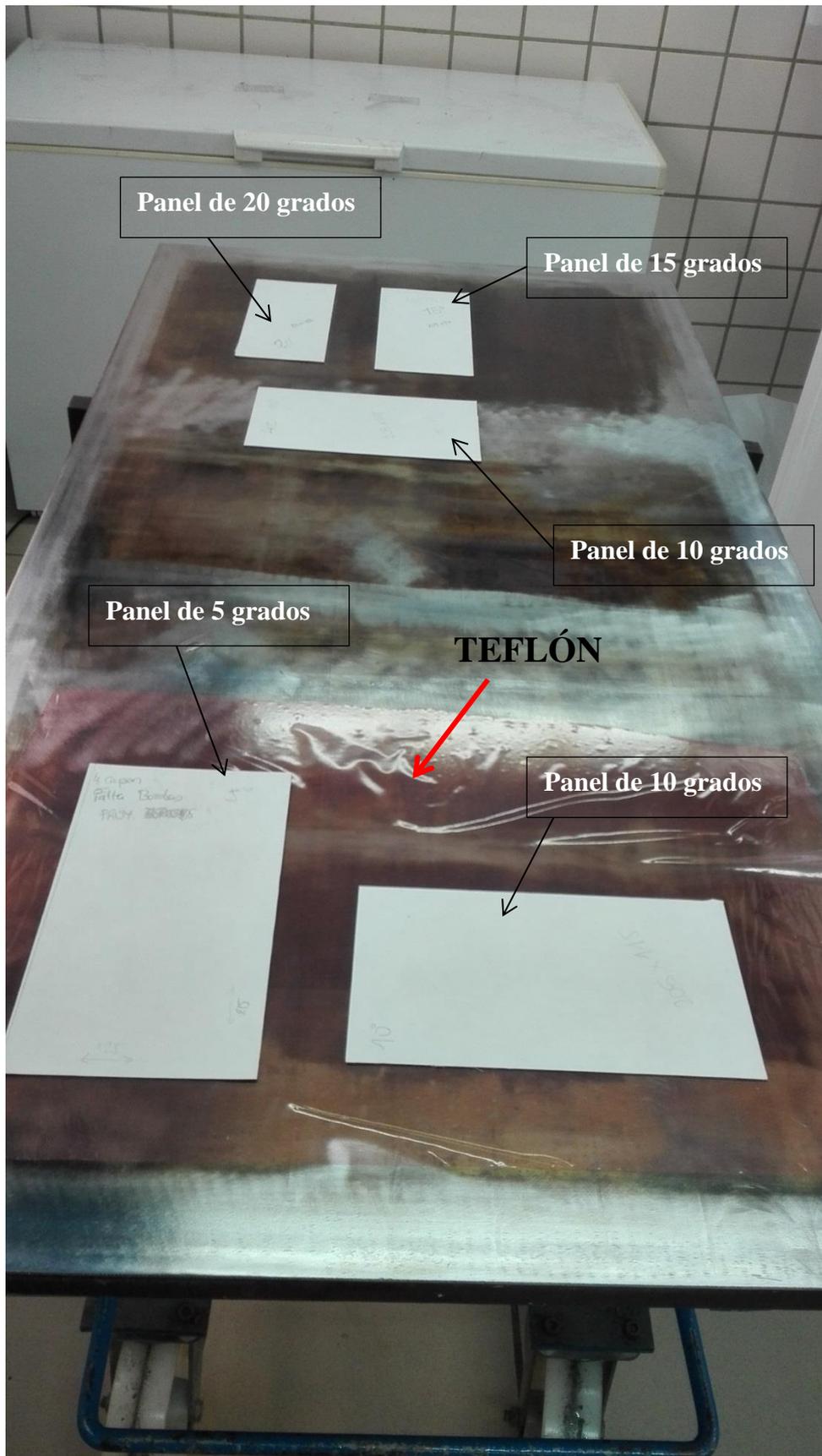
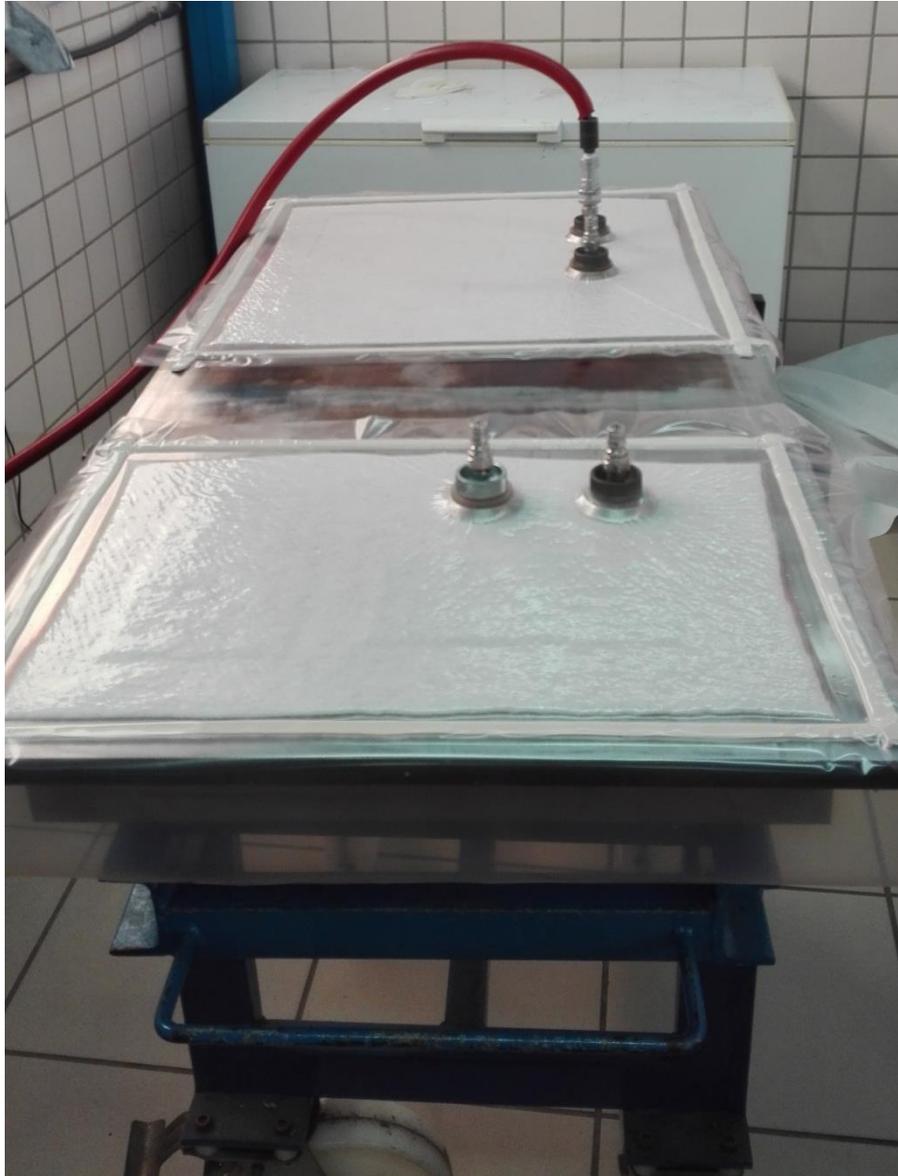


Figura 29 - Preparación bolsa de vacío sobre plancha para proceso de curado.

En las siguientes imágenes se puede observar cómo se continuó con el proceso de preparado de la bolsa de vacío.



**Figura 30 - Preparación de las dos bolsas de vacío para su procesamiento en autoclave.**

Se procede tras tener las dos bolsas de vacío a introducir la placa en la cámara del autoclave.



Figura 31 - Autoclave con la plancha preparada para comenzar el proceso de curado.

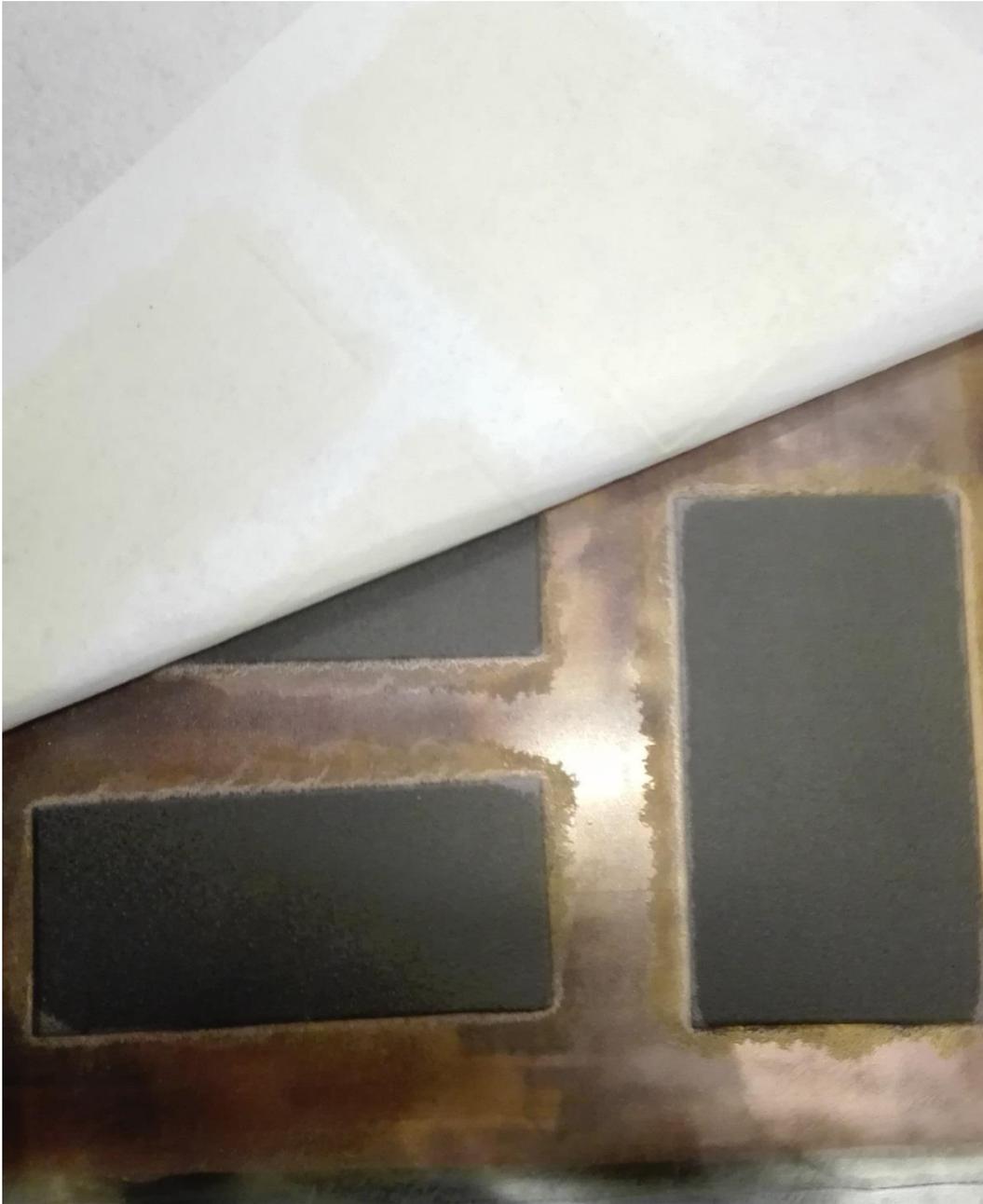
El ciclo de curado que se le va a aplicar a los paneles es el 112, que implica 2 horas a 180 grados, más dos horas de estabilización, a una presión de hasta 7 bares. Las condiciones son las siguientes:

#### Condiciones de curado en autoclave

<b>Presión de vacío aplicada en el interior de la bolsa</b>	0,65 – 0,75 bares
<b>Presión en el autoclave</b>	3,5 – 7,2 bares
<b>Rango de calentamiento</b>	0,2°C/min – 3,5°C/min
<b>Tiempo de curado y temperatura</b>	120-210 min (180±5°C) o 120-135 min (185±5°C)
<b>Rango de enfriamiento</b>	0,2 – 3,5 °C/min

Tabla 4 - Condiciones del proceso de curado en autoclave según el material AS4/8552

Una vez finaliza la etapa de curado en autoclave, se obtienen los paneles ya curados y listos para ser procesados y obtener las probetas. En la siguiente imagen se puede observar los paneles una vez sacados del autoclave.



**Figura 32 - Paneles con fibras orientadas 10, 15 y 20 grados tras su procesado en autoclave.**

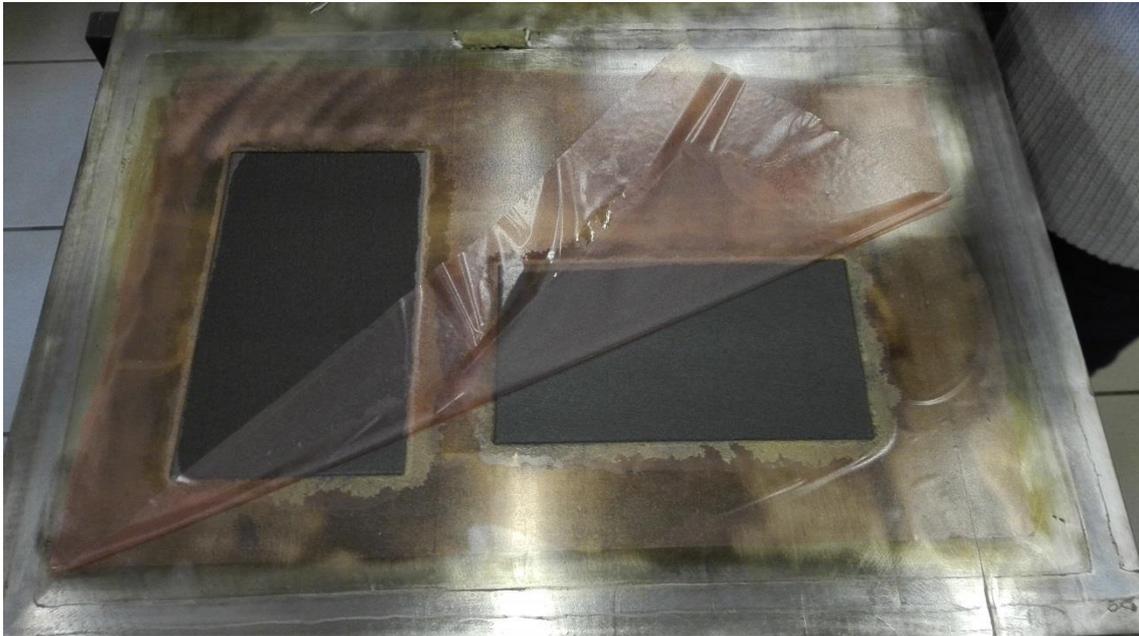


Figura 33 - Paneles con fibras orientadas 5 y 10 grados tras su curado en autoclave.

### 3.3 Preparación de probetas

#### 3.3.1 CORTE DE LAS PROBETAS

Una vez se sacan los paneles del autoclave, con ayuda de la máquina de corte de taller, se va a proceder a resanar los paneles, por lo que sus medidas van a variar. Resanar las probetas, consiste en eliminar los restos de resina desbordante que ha fluido por el borde de los paneles durante el proceso de curado en autoclave, así como cortar los bordes para trabajar con el cero original del panel y de ese asegurar que la fibra mantiene su orientación.

Es importante a la hora de resanar y empezar a cortar en el disco, que se mantenga el cero inicial y por tanto que los ángulos de 5, 10, 15 y 20, se mantengan en todo el proceso de cortado, para ello se dibuja la línea de cero grados en el panel, de este modo durante el proceso de corte y gracias al uso de escuadra y cartabón, se mantendrá la línea de corte paralela al cero inicial. Si no puede verse la dirección de la fibra a simple vista, con el siguiente procedimiento que puede visualizarse aplicado a estos paneles en la siguiente imagen, y consiste en, con sumo cuidado, partir un trozo de una de las esquinas de los paneles, de este modo nos aseguramos estamos obteniendo la dirección de la fibra y a partir de ella, obtener el cero.

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

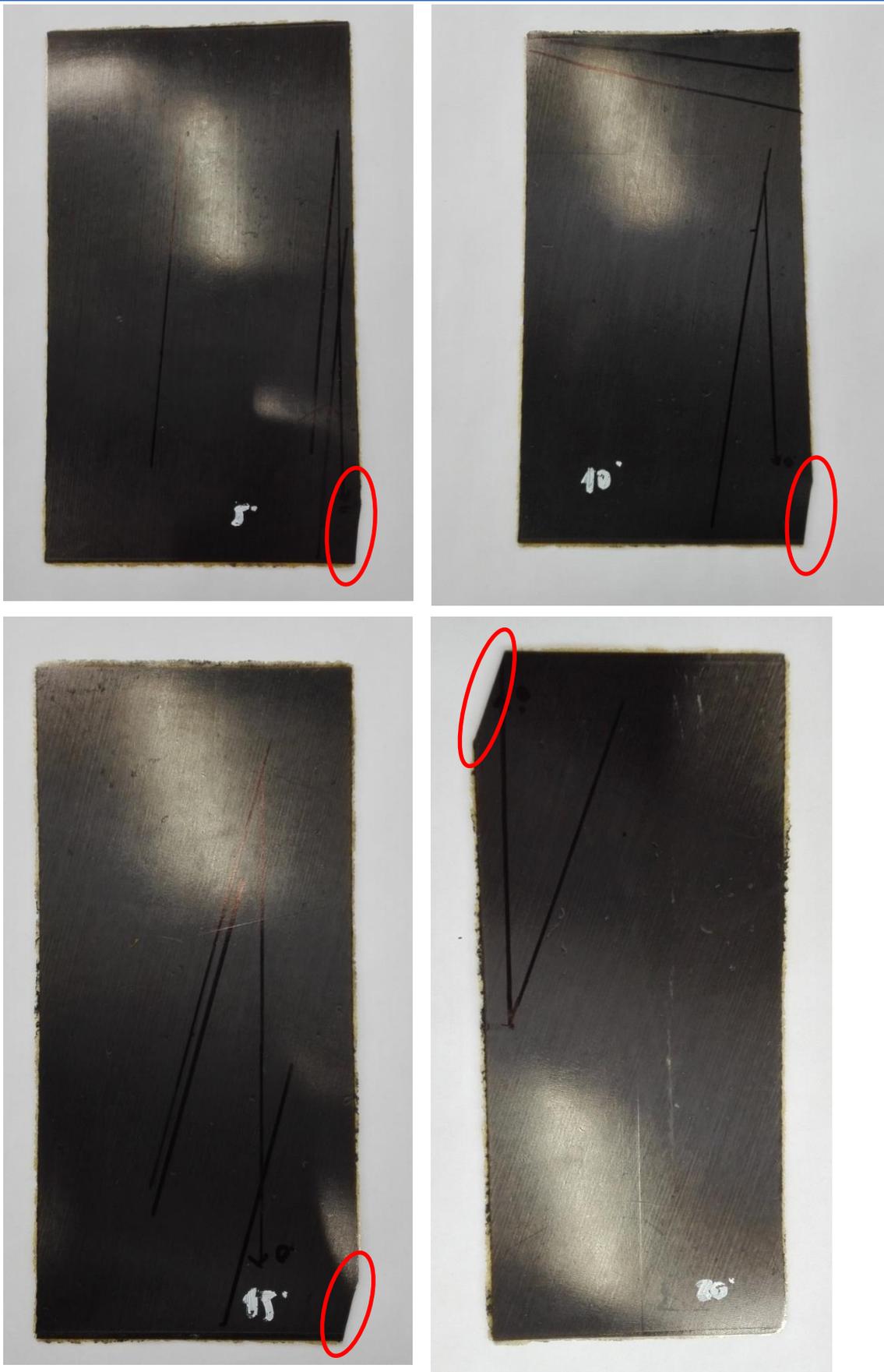


Figura 34 - Los 4 paneles con fibras orientadas 5, 10, 15 y 20 grados y el cero original para asegurar su orientación.

El proceso de corte debe ser preciso, lento y conciso, pues de ello dependerá que se mantenga el ángulo que se busca obtener en las fibras de carbono. Para ello fue necesario hacerse de una especie de taco de unas dimensiones de 30x30x2 mm que sujetaba el final de la probeta que se estaba cortando, así como de sujeciones con tacos pesados de metal (que ya se había usado durante el proceso de corte de pre impregnado en la Sala Limpia), para aguantar el panel mientras se realiza el corte y de este modo no vibre, provocando un corte no paralelo, delaminando las probetas o deshilachando las fibras.

Para realizar el corte de las probetas, se debe tener en cuenta que el panel es de espesor muy bajo pudiéndose deslizar por debajo del tope de la máquina de corte. Para evitar esto se usó un trozo de material compuesto, que se puso de canto, como tope entre el panel y el propio tope de la máquina, debiéndose tener en cuenta a la hora de establecer el ancho de corte que va a tener la probeta.

Para llevarlo a cabo, se mide el espesor de la plaquita que se está colocado y se suma al ancho que se está estableciendo en el calibre que tiene la máquina. De este modo se corta y se obtienen las siguientes probetas:

$\theta$ (°)	LONGITUD (mm), L	ANCHO (mm), h	L/2h > 10	Nº DE PROBETAS
5	214	10	10,70	9
10	205	10	10,25	8
15	204	10	10,20	6
20	199	10	9,95	6

Tabla 5 - Registro de medidas y cantidades de probetas obtenidas.

Se ha tomado como medida aproximada de todas las probetas un ancho de 10 mm, aunque las medidas exactas de cada probeta oscilan entre 9,5-10,2 mm de ancho.

Estas medidas de longitud no son la final, ya que se volvieron a resanar respecto a longitud debido a ciertas mellas producto del corte que tenían ciertas probetas, así como hubo que descartar un par de especímenes de las probetas de 5 y 10 grados debido a irregularidades en el corte.

DENOMINACIÓN PROBETA	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
Probeta I	200	9,9800000	0,8200000
Probeta II	200	10,1300000	0,8300000
Probeta III	200	10,2200000	0,8500000
Probeta IV	200	10,4800000	0,8200000
Probeta V	200	10,6500000	0,8600000
Probeta VI	200	10,1600000	0,8500000
Probeta VII	200	9,1900000	0,8500000
Probeta VIII	200	10,1500000	0,8300000
Probeta IX	200	10,0500000	0,8500000

Tabla 6 - Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 0 grados, una vez cortadas y resanadas.

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

DENOMINACIÓN PROBETA	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
Probeta I	202	9,9000000	0,8500000
Probeta II	202	9,8200000	0,8200000
Probeta III	202	9,9400000	0,8500000
Probeta IV	202	10,2000000	0,8500000
Probeta V	202	9,9400000	0,8500000
Probeta VI	202	9,9400000	0,8500000
Probeta VII	202	9,9000000	0,8500000
Probeta VIII	202	10,5000000	0,8000000

Tabla 7 - Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 5 grados, una vez cortadas y resanadas.

DENOMINACIÓN PROBETA	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
Probeta I	200	9,8200000	0,8200000
Probeta II	200	9,7400000	0,8500000
Probeta III	200	9,9100000	0,8100000
Probeta IV	200	9,9700000	0,8200000
Probeta V	200	10,0300000	0,8200000
Probeta VI	200	10,0300000	0,8200000
Probeta VII	200	9,8600000	0,8200000

Tabla 8 - Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 10 grados, una vez cortadas y resanadas.

DENOMINACIÓN PROBETA	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
Probeta I	205	9,9900000	0,8200000
Probeta II	205	9,8600000	0,8200000
Probeta III	205	10,0500000	0,8200000
Probeta IV	205	10,0800000	0,8500000
Probeta V	205	10,1100000	0,8300000
Probeta VI	205	10,1100000	0,8300000

Tabla 9 - Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 15 grados, una vez cortadas y resanadas.

DENOMINACIÓN PROBETA	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
Probeta I	198	10,05	0,85000
Probeta II	198	10,0500000	0,8500000
Probeta III	198	10,0000000	0,8200000
Probeta IV	198	10,0200000	0,8200000
Probeta V	198	10,0200000	0,8200000
Probeta VI	198	10,0500000	0,8300000

Tabla 10 - Mediciones de las probetas cuyas fibras están orientadas 20 grados, una vez cortadas y resanadas.

### 3.3.2 FABRICACIÓN DE LOS TABS.

Buscando que a la hora del ensayo, las probetas presente la configuración más cercana a la ideal posible, se lleva a cabo unos cálculos, que ya se estudió en el capítulo 2, para obtener el ángulo que ha de presentar cada tab oblicuo para que el agarre que presente en la probeta permita obtener unos resultados los más exactos posibles, en cuanto a desplazamiento y deformación.

Se va a denominar  $\theta$  al ángulo con el que se define la orientación de las fibras respecto al eje X de cada panel, como ya se ha mencionado son: 0, 5, 10, 15 y 20 grados.

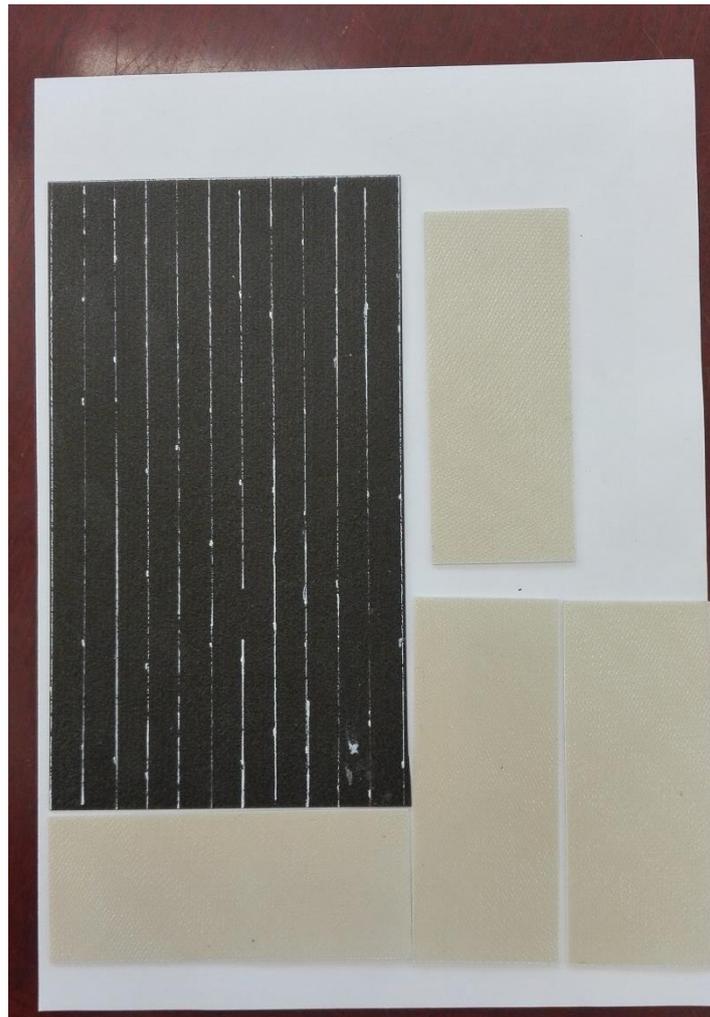
Y se usará  $\Phi$  para definir el ángulo de orientación de los tabs respecto del eje X los cuales son:

$\theta$ (°)	0	5	10	15	20
$\Phi$ (°)	90	28	22	24	27

Estos ángulos se han obtenido haciendo uso de la expresión (7) del capítulo 2.

Se debe tener especial cuidado tanto en la fabricación de los paneles como en la de los tacos, procurando que el ángulo que presenta la fibra, para los paneles, como para el ángulo que presenta el taco, sean de una precisión menor a 1 grado. Esto conlleva un especial cuidado y minuciosidad en el proceso de construcción, corte y pegado de dichos paneles y tacos.

Normalmente, las probetas no se cortan del panel principal hasta que hayan pegado los tacos. De hecho así se procedió en el caso de las probetas orientadas a cero grados, como se ve a continuación.



**Figura 35 - Configuración del panel a cero grados y sus tabs de configuración recta.**

Sin embargo en el caso del resto de probetas, se decidió que lo más eficaz y preciso para la fabricación de los tacos, sería cortar las probetas por un lado y los tacos posteriormente, para después pegarlos uno a uno, debido a que se tenía que mantener la configuración mostrada a continuación:

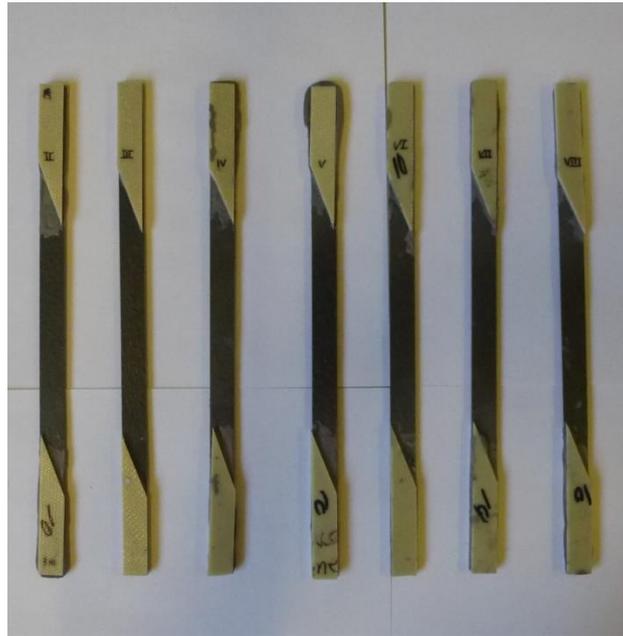


Figura 36 - Configuración tabs y probetas, caso concreto de probetas orientadas 10 grados y tabs a 22 grados

Este proceso, complicó un poco más la fabricación así como alargó el tiempo de realización pero el resultado es más preciso.

En un primer momento se cortaron rectángulos de fibra de vidrio del ancho de cada probeta, y de dicho rectángulo se obtendrían dos tacos. Como se puede ver en el diseño y posterior realización que se llevó a cabo en las imágenes:

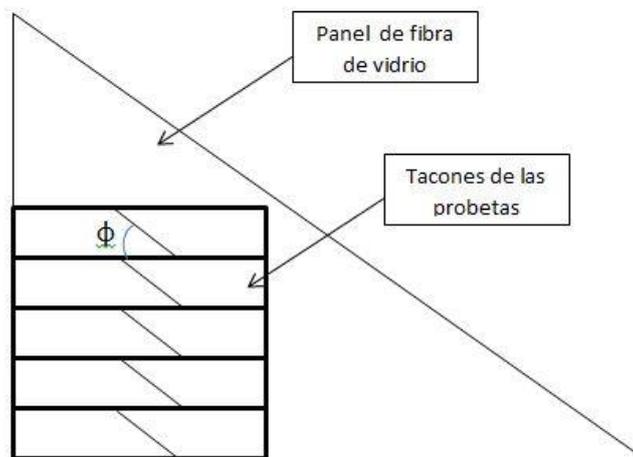


Figura 37 - Diseño previo al corte de los tabs.

Este diseño no tuvo un buen resultado debido a que se debe tener en cuenta el material que el disco elimina por el ancho que este presenta (más de dos milímetros) y afectaba al ángulo del taco que presentaba muchas variaciones.

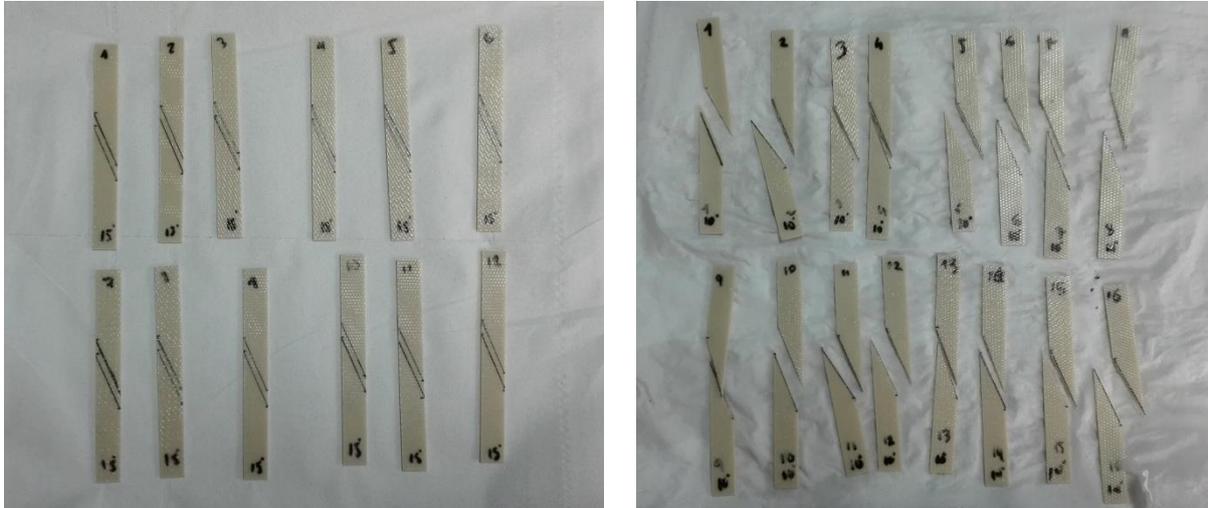


Figura 38 - Corte de los tacos no efectivo.

Por ello se llevó a cabo otro diseño basado en cortar un trozo de mayores dimensiones de la fibra de vidrio, con el ángulo  $\Phi$ , y de ese trozo cortar los tacos de ancho 10 mm. En vez del proceso que se había llevado con anterioridad de cortar los tacos de ancho 10 mm y posteriormente cortarlo oblicuamente con ángulo  $\Phi$ .

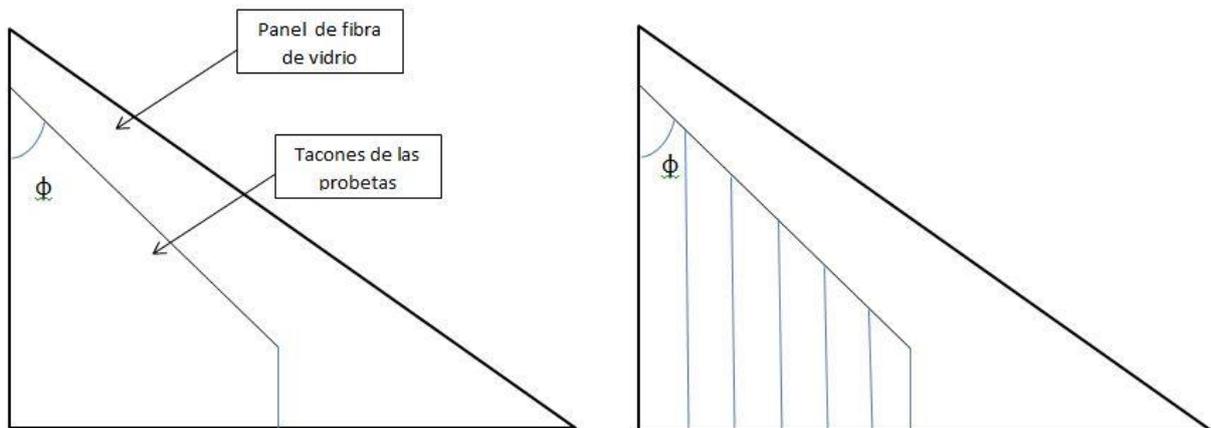


Figura 39 - Diseño del corte de los tacos de un trozo triangular de fibra de vidrio.

En las imágenes siguientes se puede apreciar los diferentes trozos de fibra de vidrio que se cortó con ángulos 28, 22, 24 y 27 grados:

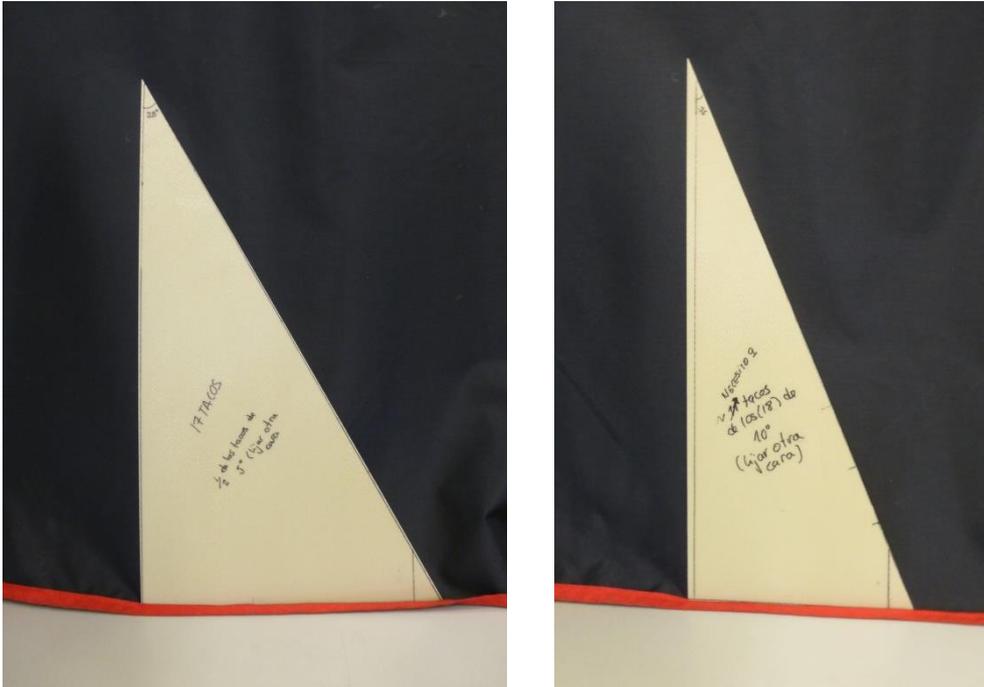


Figura 40 - Trozo de fibra de vidrio cortada con un ángulo de 28 y 22 grados para las probetas de 5 y 10 grados.

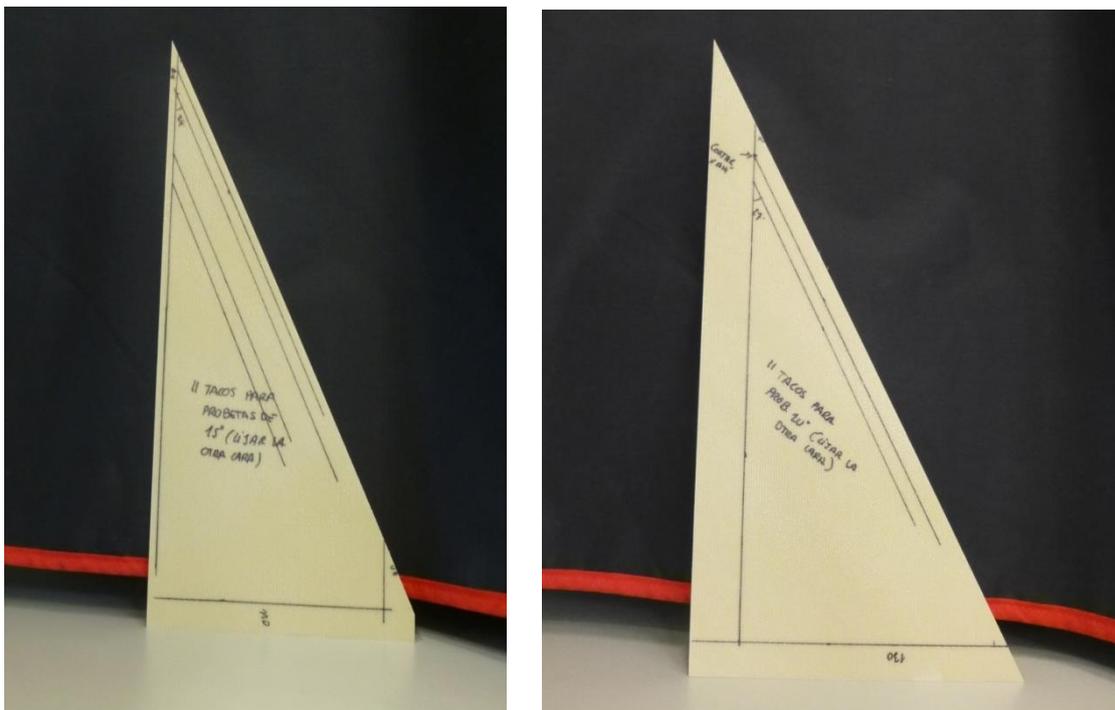


Figura 41 - Trozo de fibra de vidrio cortada con un ángulo de 28 y 22 grados para las probetas de 15 y 20 grados.

Finalmente se cortaran con ancho de 10 mm, 4 tacos por cada probeta. Necesitando por tanto 32 tacos de 28 grados para las 8 probetas de 5 grados, 28 tacos de 22 grados para las 7 probetas de 10 grados, 24 tacos de 24 grados para las 6 probetas de 15 grados y otros 24 tacos de 27 grados para las probetas de 20 grados. Además de los 4 trozos rectangulares que se cortaron para el panel todavía entero de 0 grados, en el que se llevará a cabo un proceso al contrario que con estos tacos, se pegará al panel primero y se cortaran las probetas posteriormente.

### 3.3.3 PEGADO PROBETAS-TABS.

Una vez tenemos todas las probetas y tabs cortados en el caso de los especímenes con fibras orientadas 5, 10, 15 y 20 grados, procedemos al pegado de los tacos a las probetas con el adhesivo EA9394 Structil Part A mezclado con un endurecedor EA9394 Part B. Como se desarrolló anteriormente, consiste en mezclar por cada 100 gramos de Parte A, 17 gramos de parte B. Este adhesivo conocido por REDU nos dará la fijación que buscamos entre las probetas y los tacos.

Antes de realizar el pegado de tabs y probetas, se debe haber lijado los extremos de cada uno de los especímenes así como la cara de los tacos que vayan a ser adheridas a la probeta. Este proceso tiende a ser más cómodo cuando son tacos rectos, como en el caso de las probetas a cero grados, debido a que la superficie de lijado es mayor y permite realizar más fácilmente el trabajo. En el caso de los tener que lijar los tacos y probetas de manera individual una vez cortadas, fue un proceso que se realizó en los primeros tacos que finalmente fueron desechados. En el caso de los trozos de fibra de vidrio con el ángulo de los tabs, se lijó el trozo completo, siendo este procedimiento más cómodo y rápido. El proceso de lijado se llevó a cabo en las instalaciones de TEAMS en el polígono industrial Aerópolis, mediante lijado por chorro de arena (Corindon 620). Las probetas y tacos deben ser limpiados con agua tras el proceso de lijado para evitar que queden partículas y el pegado no sea correcto.

La longitud que se estableció para cada uno de los tacos fue cumplir la condición de longitud libre de la probeta siempre mayor o igual a 100. Por ello para las longitudes registradas en las tablas 7, 8, 9 y 10, donde la longitud más restrictiva es la de las probetas de 20 grados con una longitud de 198 mm. Por ello se hizo el siguiente análisis:



Figura 42 - Diseño de tabs

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

A continuación se puede ver todas las probetas y tacos, cortados y lijados listos para ser pegados.

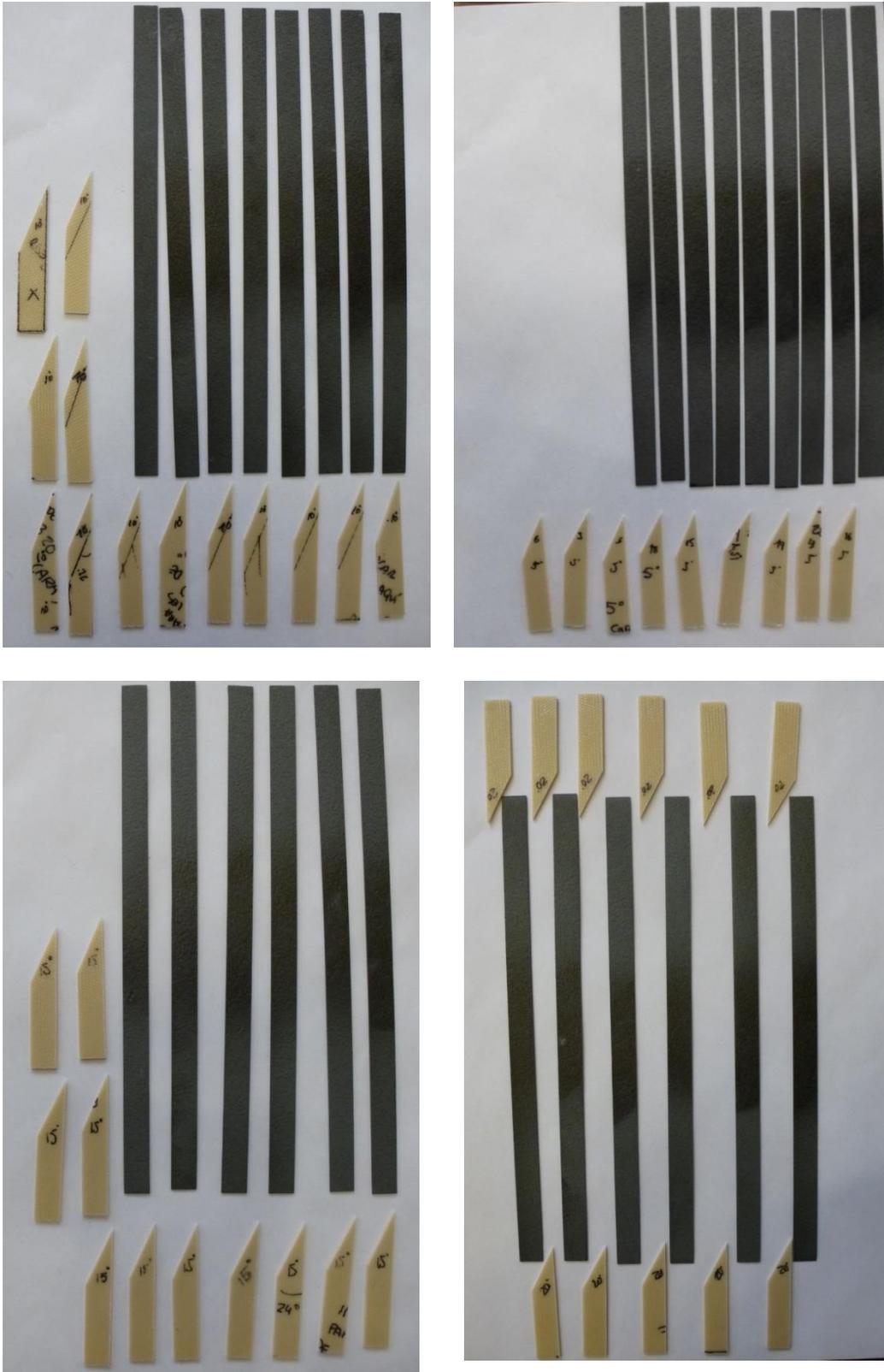


Figura 43 - Probetas de 5, 10, 15 y 20 grados con sus respectivos tabs, lijados y listos para el pegado.

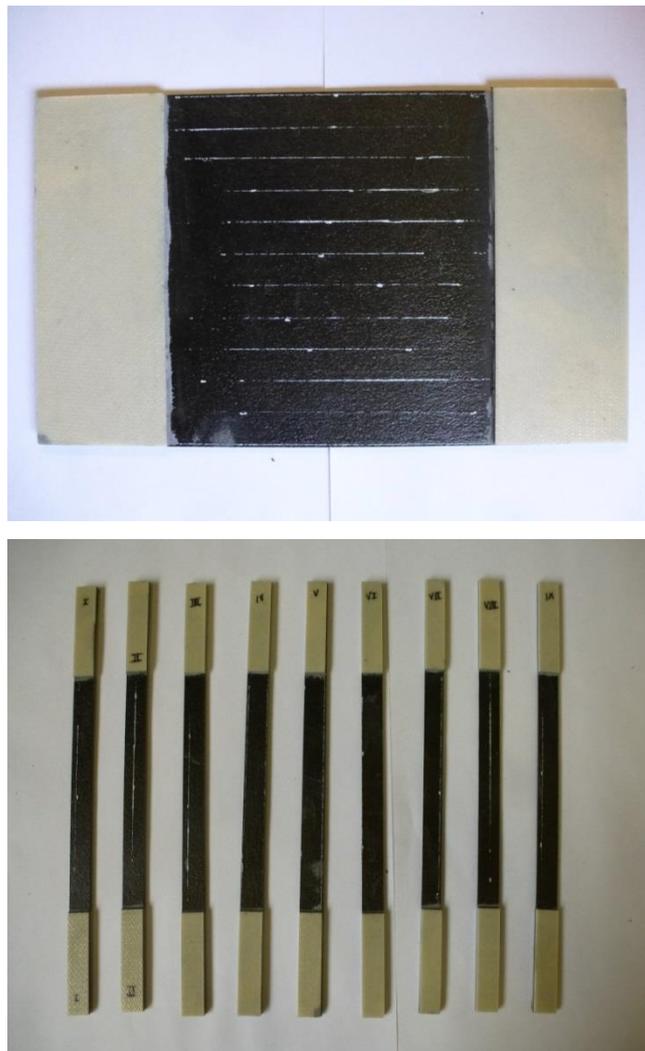
Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

Una vez se tienen listas las probetas y tacos, y el adhesivo mezclado y preparado, se procede a untar una capa no excesiva de adhesivo en los extremos de las probetas, por ambas caras y a colocar el taco, en la posición correcta. Es importante recordar que la orientación de las fibras y del ángulo del taco va en el mismo sentido, si no el ensayo no sería válido.

Tras colocar los cuatro tacos correspondientes a cada probeta, se dejan reposando las probetas, se envuelven en teflón y se le aplica presión con tacones de metal o cualquier elemento de superficie regular y pesada que aplique presión por igual a los tacos, otra opción sería introducirlos en la prensa. Y se deja entre 30 y 45 minutos. Posteriormente se retiran los elementos de presión, se limpia con acetona el adhesivo rebosante y se vuelve a dejar con presión durante 24 horas.

Al día siguiente se procede a meter en el horno las probetas con sus tacos, durante unas 3 horas a una temperatura de  $60^\circ\text{C}$  para curar el adhesivo. Y finalmente se tendrán todas las probetas listas para ensayarlas.



**Figura 44 - Panel y probetas orientadas  $0^\circ$  grados con tacones rectos adheridos.**



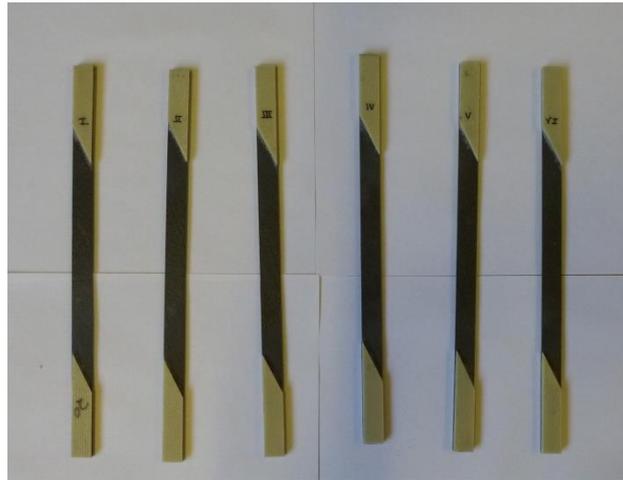
**Figura 45 - Probetas orientadas 5 grados con tacos de 28 grados pegados.**



**Figura 46 - Probetas orientadas 10 grados con tacos de 22 grados pegados.**



**Figura 47 - Probetas orientadas 15 grados con tacos de 24 grados pegados.**



**Figura 48 - Probetas orientadas 20 grados con tacos de 27 grados pegados.**

### **3.4 Ensayos de tracción fuera de ejes.**

Se procede a realizar el ensayo en la máquina de ensayos a tracción Instron 4483 con célula de carga de 15000 kg, donde se va seleccionar el programa que devuelva tras el ensayo: Tensión de Rotura  $\sigma_{rot}$ , deformación en rotura (haciendo uso de extensómetro)  $\varepsilon_{rot}$  y módulo de Young E.

Una vez calibrada la máquina y seleccionado el programa deseado, se coloca entre las mordazas la probeta a ensayar, de manera que esté bien sujeta y correctamente situada la probeta, como se puede ver en la imagen a continuación.



**Figura 49 - Probeta colocado sobre el equipo de ensayo con extensómetro.**

Se introducen las condiciones iniciales en el Software y se procede a iniciar el ensayo.

Denominación de la probeta	Probeta I – 5 grados
Temperatura (°C)	22
Humedad (%HR)	50
Velocidad (mm/min)	1
Ancho (mm)	9,9
Espesor (mm)	0,85
Extensómetro (mm)	50

Tabla 11- Condiciones iniciales para el ensayo de tracción (off-axis)

### 3.4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 0 GRADOS.

Se ensayan las nueve probetas de 0 grados, que soportaran cargas de más de 15000 N y que se podría definir como roturas explosivas, como se ve a continuación.



Figura 50 - Nueve probetas de 0 grados ensayadas a tracción.

Los resultados obtenidos del ensayo a nivel de carga, tensión y deformación:

Designación probeta	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Deformación máxima (%)
Probeta I	14479,56	1769,338677	1,377200
Probeta II	14401,08	1759,748766	1,099400
Probeta III	14754,24	1701,757785	1,342200
Probeta IV	15028,92	1687,126179	1,303400
Probeta V	16049,16	1648,096118	1,434800
Probeta VI	15450,75	1689,714567	1,414800
Probeta VII	10123,92	1594,990763	1,033600
Probeta VIII	15195,69	1740,828274	1,412000
Probeta IX	15342,84	1778,715018	1,390600

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

Presentando la siguiente evolución de  $\sigma$  frente a  $\varepsilon$ :

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

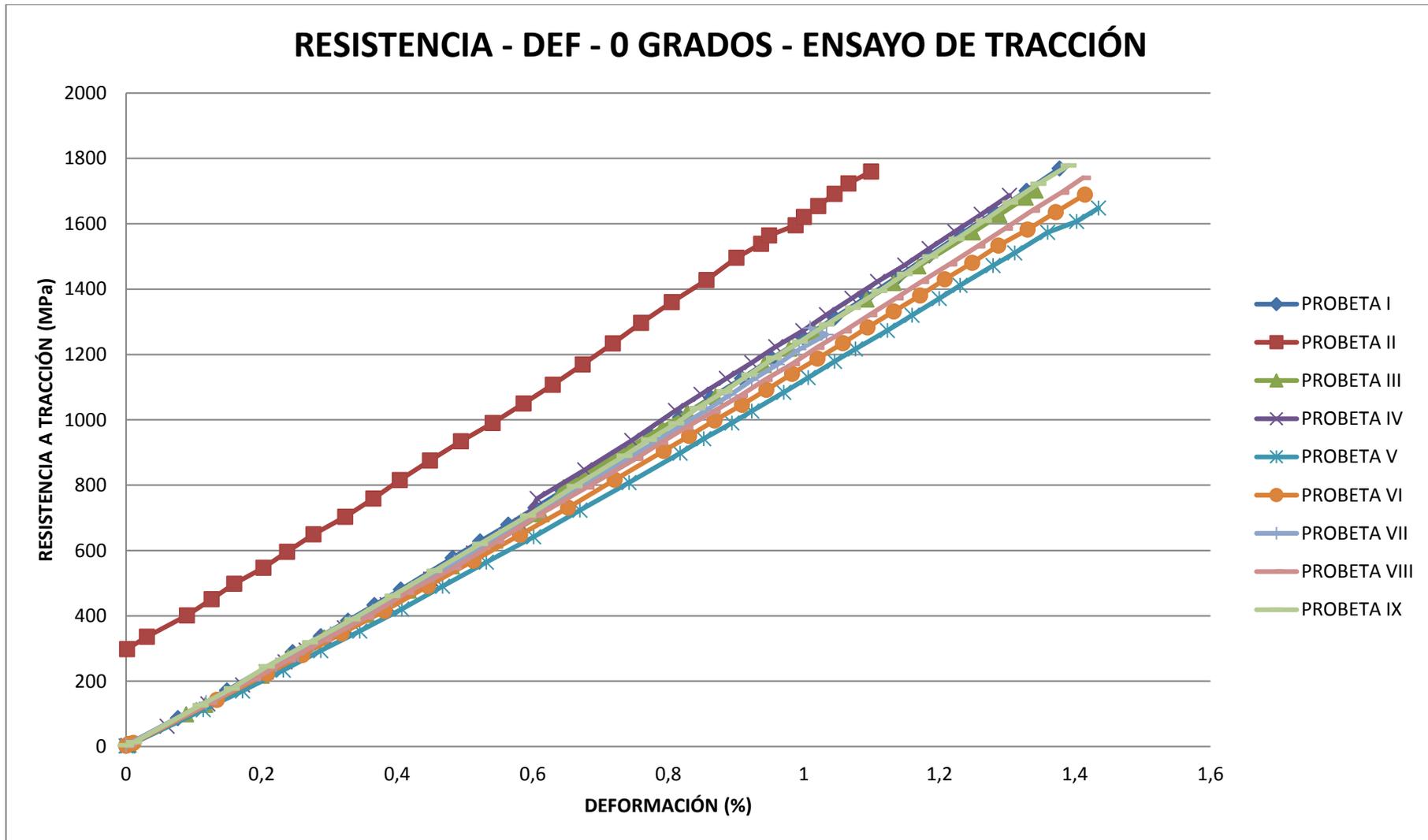


Gráfico 1 - Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 0 grados

### 3.4.2 ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 5 GRADOS.

En el caso de las probetas de fibras orientadas 5 grados al ensayarlas, van a soportar cargas de unos 6000 N, presentando roturas en la dirección de la fibra que es lo esperado, partiendo de extremo a extremo debido al acusado ángulo de orientación de las fibras como se puede observar en la imagen.



Figura 51 - Ocho probetas de 5 grados ensayadas a tracción.

Los resultados obtenidos del ensayo a nivel de carga, tensión y deformación:

Designación probeta	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Deformación máxima (%)
Probeta I	6443,2080000	765,6565657	1,4108
Probeta II	6636,4650000	824,1598778	1,016
Probeta III	6016,4730000	712,0929104	1,0094
Probeta IV	6948,4230000	731,2806228	0,9826
Probeta V	6537,3840000	773,7464789	1,0402
Probeta VI	5956,6320000	705,0102971	0,9826
Probeta VII	5605,4340000	705,0102971	0,8658
Probeta VIII	6143,0220000	666,1240642	0,757

Presentando la siguiente evolución de  $\sigma$  frente a  $\varepsilon$ :

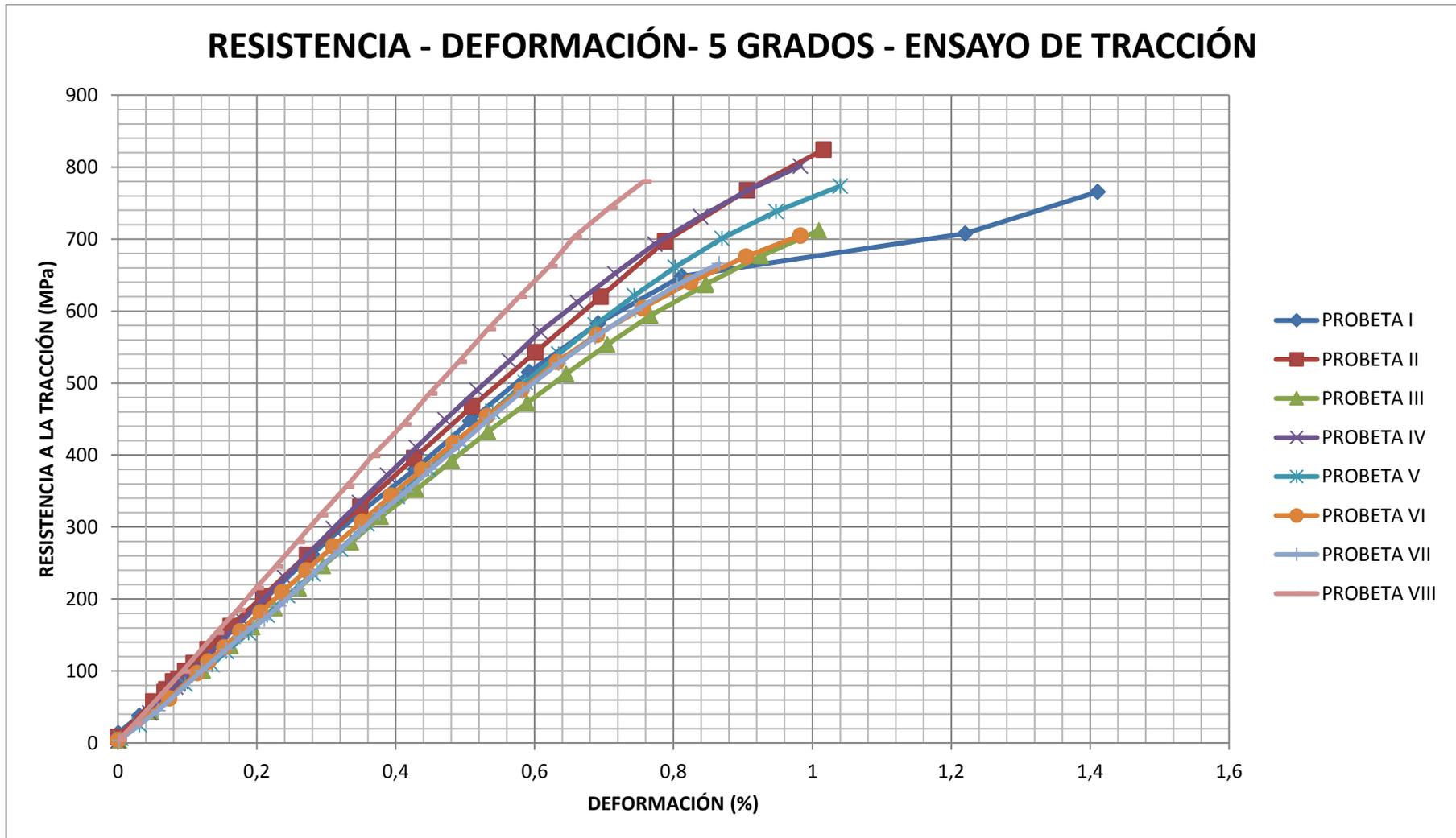


Gráfico 2 - Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 5 grados

### 3.4.3 ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 10 GRADOS.

En el ensayo de las probetas con fibras orientadas a 10 grados, se observa una rotura más localizada en la zona central, con ángulo de corte de 10 grados. A excepción de las tres probetas centrales (IV, V y VI) que presentan una rotura más desplazada hacia los extremos o rotura central-lateral. Estas probetas alcanzan cargas de unos 3000



Figura 52 - Siete probetas de 10 grados ensayadas a tracción.

N.

Los resultados obtenidos del ensayo a nivel de carga, tensión y deformación (la probeta I fue desechada en el proceso de fabricación):

Designación probeta	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Deformación máxima (%)
Probeta II	3239,2620000	402,2728630	0,8672000
Probeta III	3282,4260000	396,4761440	0,7906
Probeta IV	3566,9160000	444,3592330	1,2108
Probeta V	3294,1980000	402,9402840	0,9852
Probeta VI	3405,0510000	414,0080980	0,612
Probeta VII	3373,6590000	410,1912560	0,8296
Probeta VIII	3511,9800000	434,3714440	1,2496

Presentando la siguiente evolución de  $\sigma$  frente a  $\varepsilon$ :

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

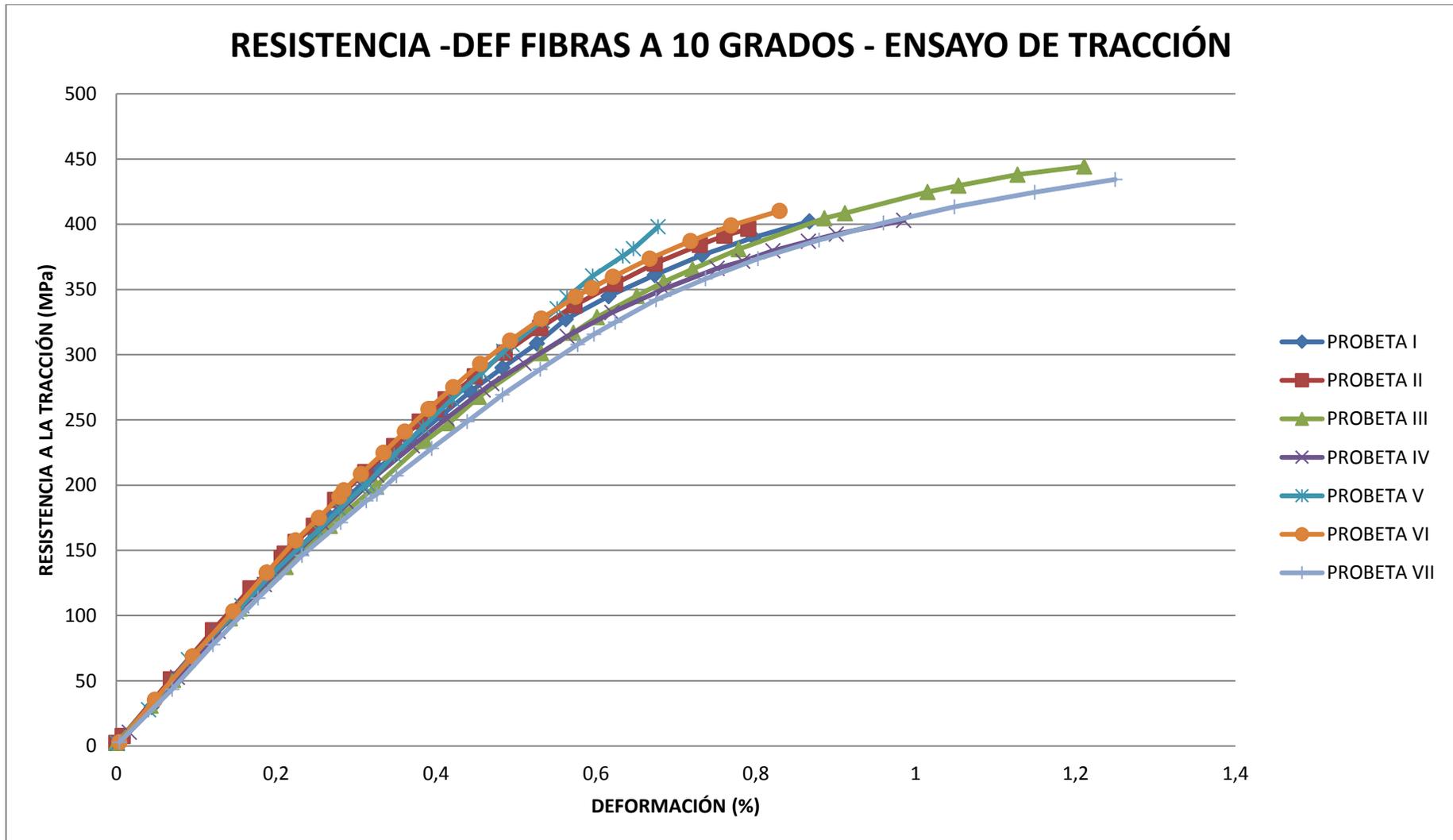


Gráfico 3 - Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 10 grados

### 3.4.4 ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 15 GRADOS.

En este caso se ensayan las probetas orientadas 15 grados que llegan a soportar hasta 2500 N de carga. Se puede observar cinco roturas laterales (Probetas I, II, III, IV y V) y una rotura central (Probeta VI).



Figura 53 - Seis probetas de 15 grados ensayadas a tracción.

Los resultados obtenidos del ensayo a nivel de carga, tensión y deformación:

Designación probeta	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Deformación máxima (%)
Probeta I	2543,7330000	310,5218630	1,004
Probeta II	2457,4050000	303,9386780	0,9436
Probeta III	2405,4120000	291,8835090	0,9436
Probeta IV	2469,1770000	288,1859240	1,667
Probeta V	2389,7160000	284,7849560	0,9772
Probeta VI	2531,9610000	301,7364410	1,3154

Dado que la probeta IV se sale de los valores esperados, en concreto de los valores de deformación, se descarta del estudio, presentando la siguiente evolución de  $\sigma$  frente a  $\epsilon$  del resto de probetas:

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

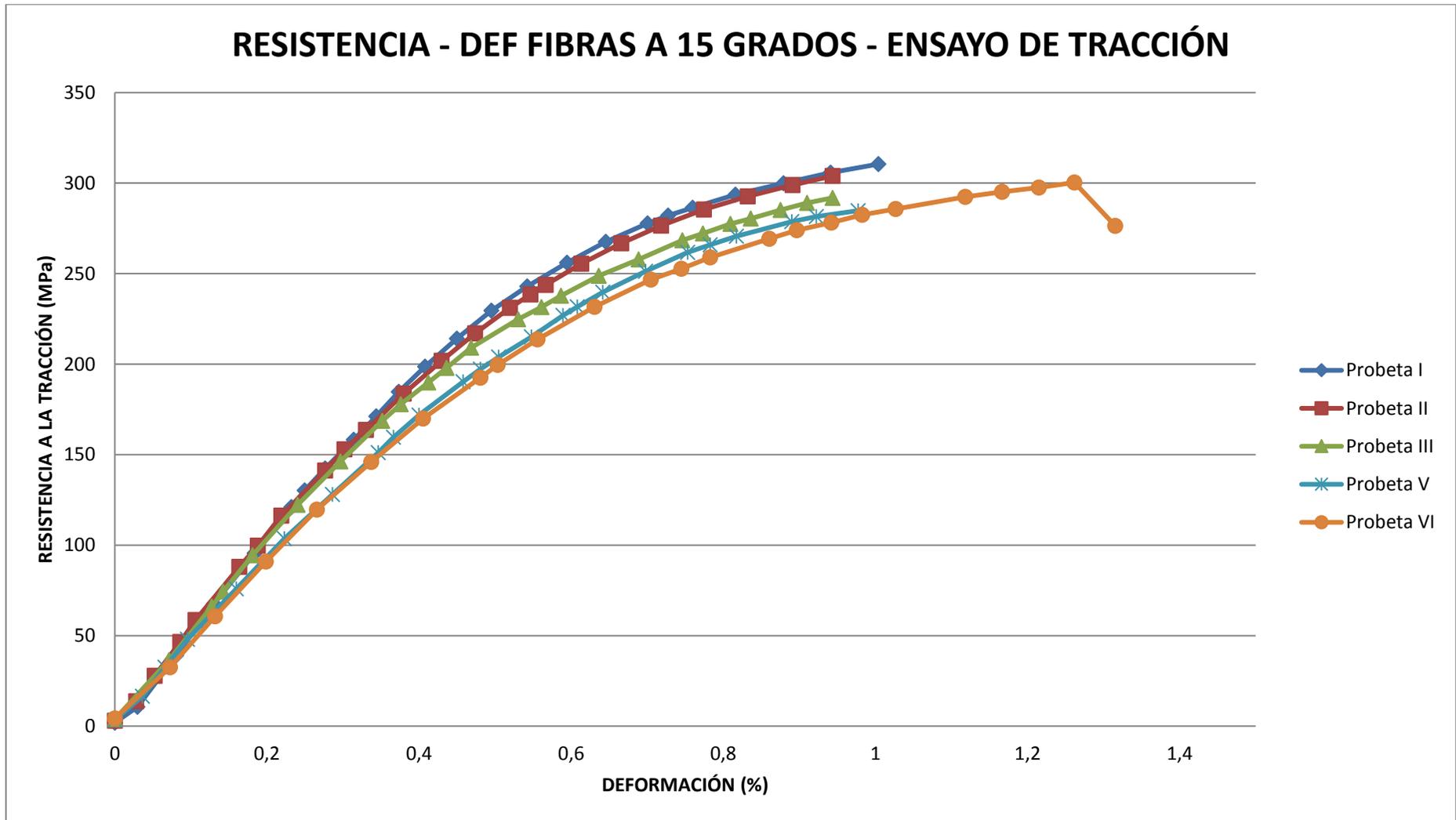


Gráfico 4 - Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 15 grados

### 3.4.5 ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 20 GRADOS.

Las seis probetas orientadas un ángulo de 20 grados, presentan una configuración de rotura parecida a las probetas de 15 grados, donde 5 de las seis probetas presentan roturas localizadas en los extremos (roturas laterales, las probetas I, II, III, IV y V) y una rotura central (probeta VI). Llegando a soportar cargas superiores a 1600 N.



Figura 54 - Seis probetas de 20 grados ensayadas a tracción.

Los resultados obtenidos del ensayo a nivel de carga, tensión y deformación:

Designación probeta	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Deformación máxima (%)
Probeta I	1674,5670000	196,0277440	1,0872
Probeta II	1512,7020000	177,0795430	0,7422
Probeta III	1710,8640000	208,6419510	1,31
Probeta IV	1722,6360000	209,6582440	1,2886
Probeta V	1674,5670000	203,8078720	1,055
Probeta VI	1738,3320000	208,3956120	1,3598

Presentando la siguiente evolución de  $\sigma$ , la tensión con  $\epsilon$ , deformación:

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

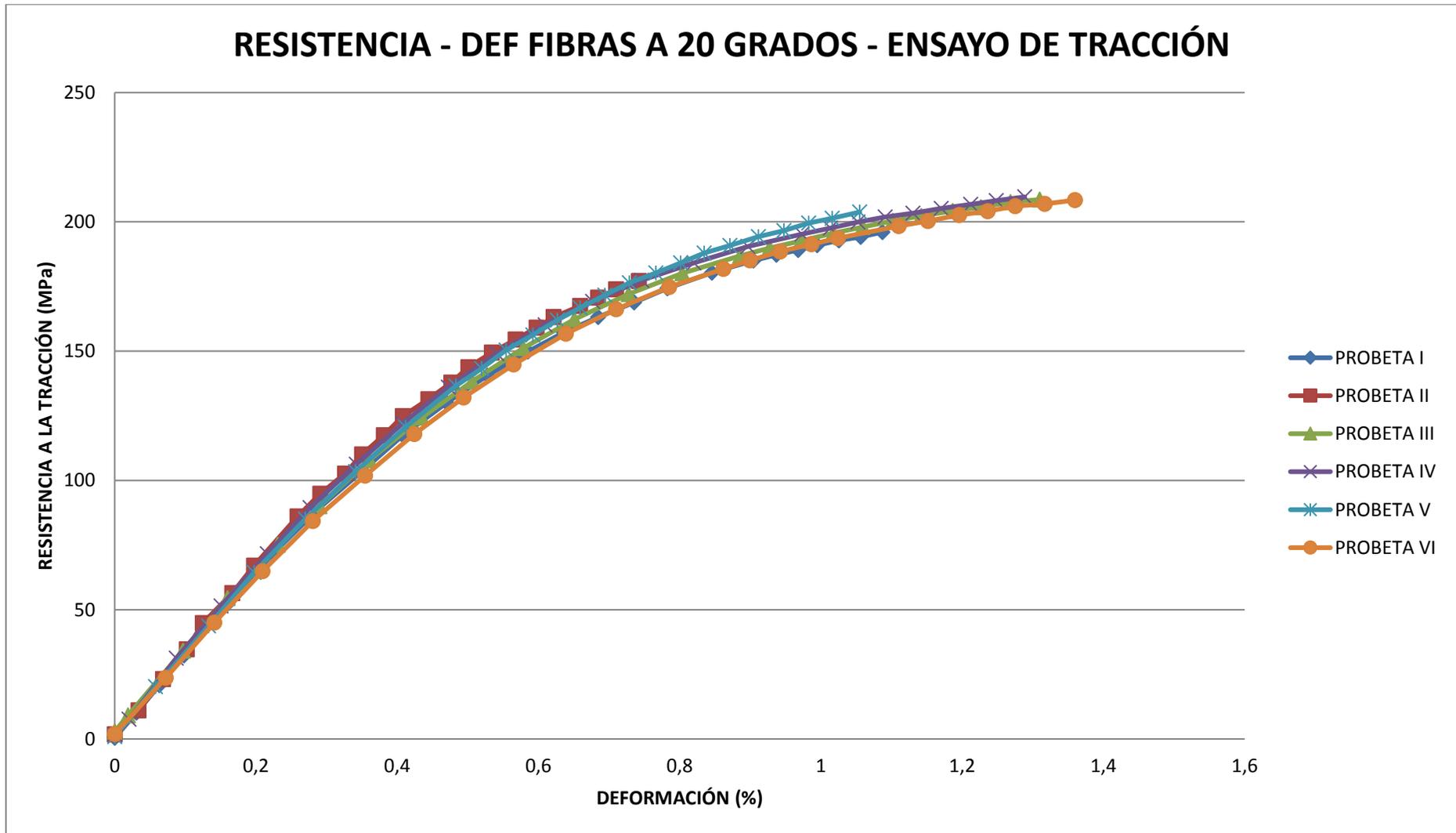


Gráfico 5 - Evolución deformación frente a tensión a lo largo del ensayo de tracción en probetas de fibras orientadas 20 grados

### 3.4.6 ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS ORIENTADAS 10 GRADOS CON MODIFICACIÓN EN LOS ÁNGULOS DE LOS TABS.

A modo de poder estudiar cómo le afecta al estudio la variación en el ángulo de los tabs, se ha realizado la modificación de los tabs en ocho probetas, en concreto en las probetas con fibras orientadas 10 grados. De este modo se podrá estudiar qué consecuencias presentaría si el error en la orientación de los tacos oblicuos fuera superior al deseado.

Por ello se harán dos configuraciones de modificación diferentes para ocho probetas de 10 grados:

- Primera modificación: 4 probetas con fibras orientadas 10 grados y tabs orientados un ángulo  $\phi_{10}^* = \phi_{10} + 3^\circ = 25^\circ$ .
- Segunda modificación: 4 probetas con fibras orientadas 10 grados y tabs orientados un ángulo  $\phi_{10}^{**} = \phi_{10} + 5^\circ = 29^\circ$ .

El proceso de fabricación y curado de las probetas es el mismo aplicado al resto de probetas y que se desarrolló extensamente en capítulos anteriores. Aplicándose esos procesos obtenemos los siguientes especímenes:



Figura 55 - Probetas con fibras orientadas 10° y tabs orientados 25° y 29°.

Finalmente se estudian solo tres probetas con tabs orientados 25 grados y tres de los orientados 29 grados debido a que los datos recogidos del ensayo de las probetas 4 de ambas modificaciones no se ajustan a los rangos buscados.

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

---

Como se puede observar en las imágenes las probetas presentan roturas laterales, de hecho prácticamente partiendo desde el taco.

Los datos recogidos del ensayo son los siguientes:

<b>Designación probetas con tabs a 25°</b>	<b>Carga máxima (N)</b>	<b>Resistencia a la tracción máxima (MPa)</b>	<b>Deformación máxima (%)</b>
<b>Probeta 1</b>	3934,791	458,3332557	1,011
<b>Probeta 2</b>	3919,095	456,5049505	0,953
<b>Probeta 3</b>	3847,482	444,7750393	1,0456

**Tabla 12 - Datos del ensayo de la modificación con tabs orientados 25°**

<b>Designación probetas con tabs a 29°</b>	<b>Carga máxima (N)</b>	<b>Resistencia a la tracción máxima (MPa)</b>	<b>Deformación máxima (%)</b>
<b>Probeta 1</b>	3934,791	475,1015455	0,757
<b>Probeta 2</b>	3752,325	453,0699106	0,9088
<b>Probeta 3</b>	4048,587	482,1583222	0,965

**Tabla 13 - Datos del ensayo de la modificación con tabs orientados 29°**

Se registra en estas tablas que las probetas llegan a soportar cargas de casi 4000 N en el caso de las probetas con tabs a 25 grados e incluso alcanzándolo para el caso de las probetas con tabs a 29 grados. En ambos casos supera a las cargas soportadas por las probetas originales de fibras orientadas 10°, que alcanzaban su máximo en 3511,98 N de carga.

## Capítulo 4. Valoración de resultados

---

### 4.1 Introducción.

En este capítulo se va a desarrollar todo el trabajo analítico y numérico que se ha realizado sobre el ensayo de las probetas, representando tanto la resistencia a la tracción que se registra para cada orientación de fibra que se estudia en este proyecto, como las diferentes deformaciones que presentan todas ellas. De manera que se pueda llegar a conclusiones a partir de este ensayo y de cómo varía el comportamiento de las diferentes probetas según sus orientaciones de fibras y los ángulos de sus tabs.

También se hará una comparación con predicciones analíticas y se calculará la resistencia a cizalladura intralaminar,  $S$  y el módulo de cortadura  $G_{12}$  que era una de los objetivos de este estudio.

### 4.2 Comparación de los gráficos $\sigma_x - \epsilon_x$ .

Como se puede observar en los gráficos representados de cada tanda de probetas desde 5 hasta 20 grados, que se han desarrollado y presentado en el capítulo 3, que son los ángulos críticos, ya que las probetas de 0 grados son probetas sobradamente estudiadas y que presentan el comportamiento esperado, se observa claramente como a mayor ángulo, las cargas soportadas van disminuyendo, y el comportamiento pasa de más lineal para ángulos de 5 grados a un comportamiento menos lineal como ha mostrado el gráfico de las probetas con fibra a 20 grados.

A modo de comparativa se pasa a representar el comportamiento registrado durante el ensayo en un solo gráfico de todas las probetas.

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

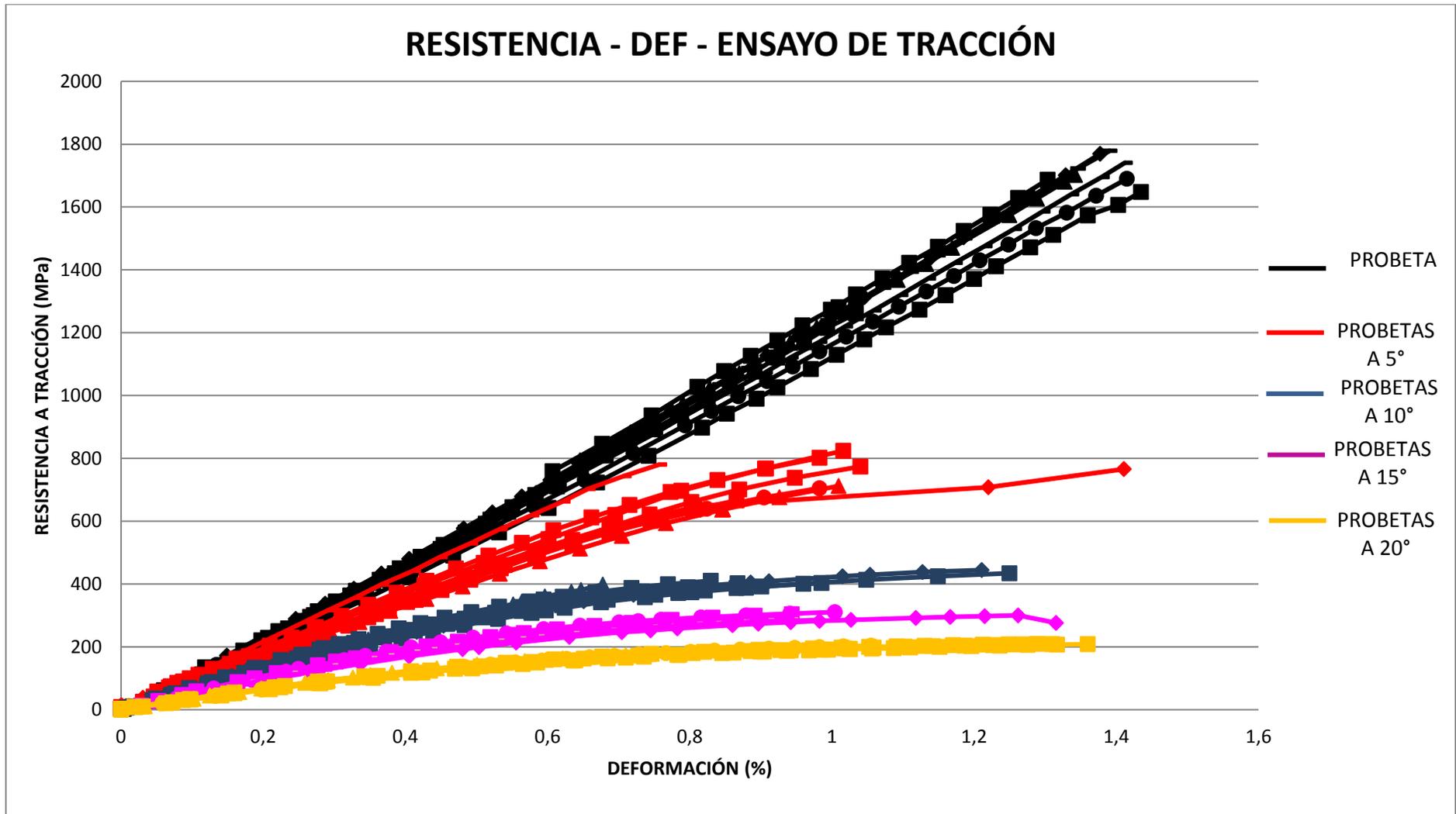


Gráfico 6 - Comparación de todas las probetas ensayadas a tracción

### 4.3 Comparación de los gráficos $\sigma_x - \epsilon_x$ de 10° ( $\Phi=22^\circ$ , $\Phi=25^\circ$ y $\Phi=29^\circ$ ).

La evolución de  $\sigma$  con  $\epsilon$  que presentan las modificaciones que se han realizado para las probetas de 10 grados se pueden apreciar en el siguiente gráfico. Donde se observa la evolución que presentaría errores de +3° y +7° a nivel de resistencia y deformación, observándose que aunque las probetas soporten mayores cargas, su comportamiento no es tan regular como el de las probetas de 10° ( $\Phi=22^\circ$ ).

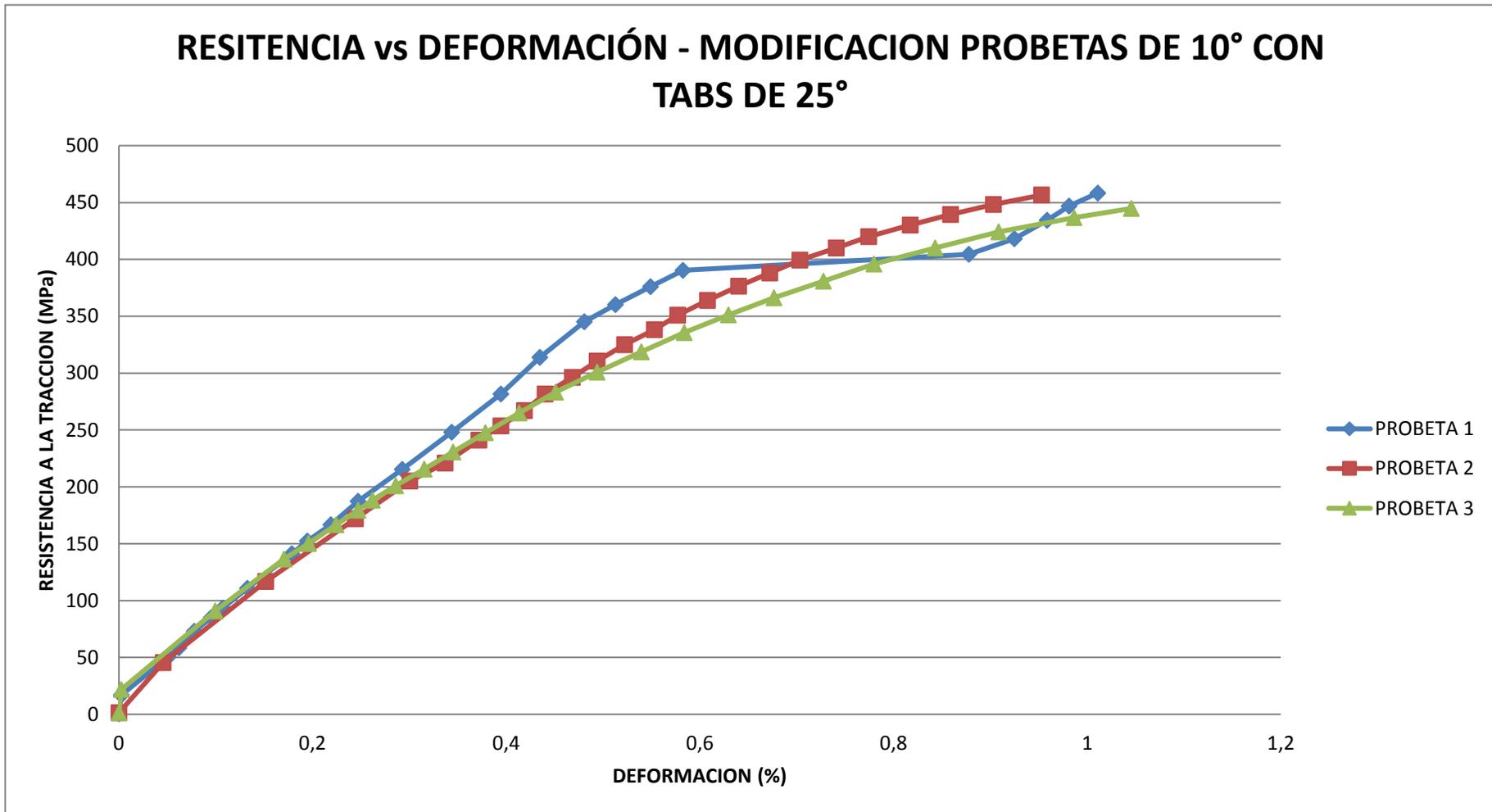


Gráfico 7 - Resistencia Vs Deformación para probetas orientadas 10° y tabs 25°

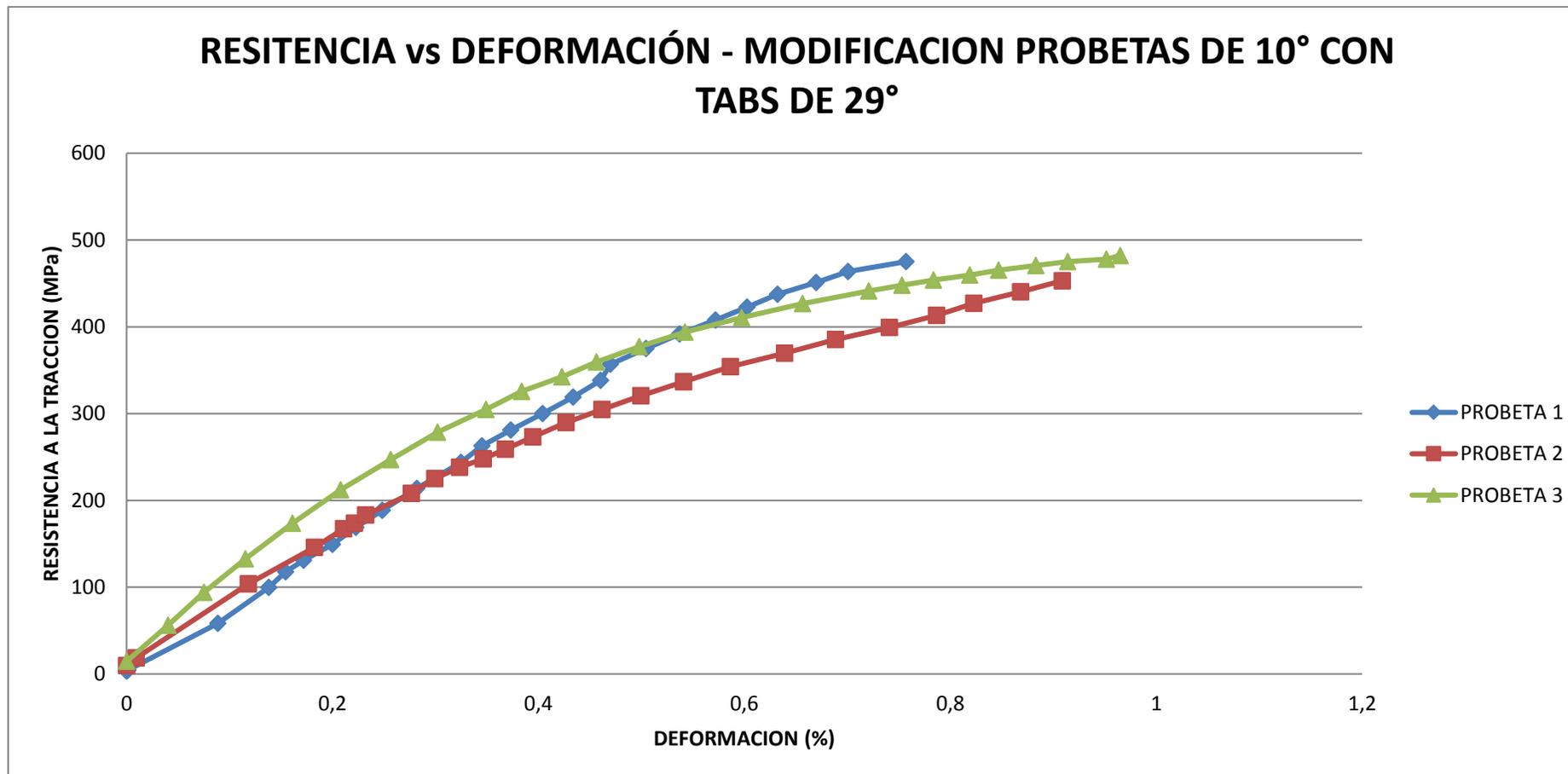


Gráfico 8 - Resistencia Vs Deformación para probetas orientadas  $10^\circ$  y tabs  $29^\circ$

#### 4.4 Gráficos Resistencia vs. Ángulo de orientación.

Para el estudio de la resistencia de tracción que presenta cada probeta en función del ángulo de orientación que presentan sus fibras, se tomará el valor medio de las resistencias de cada probeta, para cada orientación.

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	Resistencia media a la tracción (MPa)
0°	1721,915673
5°	735,3851392
10°	414,9456174
15°	298,5730894
20°	200,6018277

Tabla 14 - Datos de la resistencia en función del ángulo de orientación de las fibras

A continuación se representan los valores obtenidos:

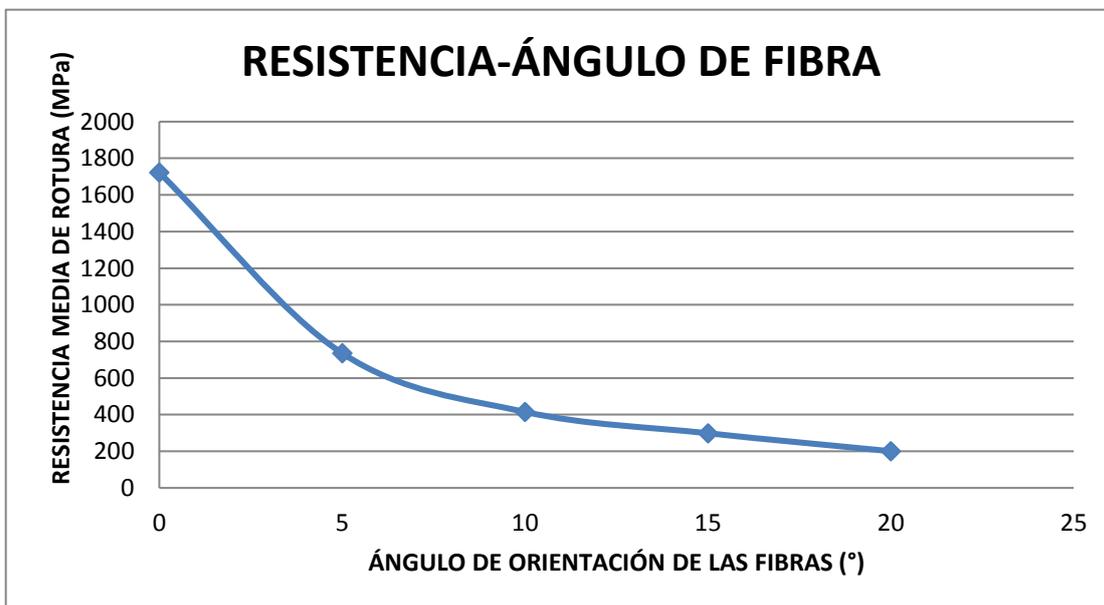


Gráfico 9 - Representación de la variación de la resistencia en función del ángulo de orientación de la fibra.

Pudiéndose deducir perfectamente que la resistencia presenta una caída de resistencia para 5 grados y va disminuyendo de manera más gradual para 10, 15 y 20 grados.

## 4.5 Gráficos Deformación en rotura vs. Ángulo de orientación.

Del mismo modo que se ha estudiado para el caso de la resistencia, se obtiene la deformación máxima media de todas las probetas, según la orientación de sus fibras y se representa a continuación:

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	Deformación media (%)
0°	1721,915673
5°	735,3851392
10°	414,9456174
15°	298,5730894
20°	200,6018277

Tabla 15 - Datos de la deformación en función del ángulo de orientación de las fibras

A continuación se representan los valores obtenidos:

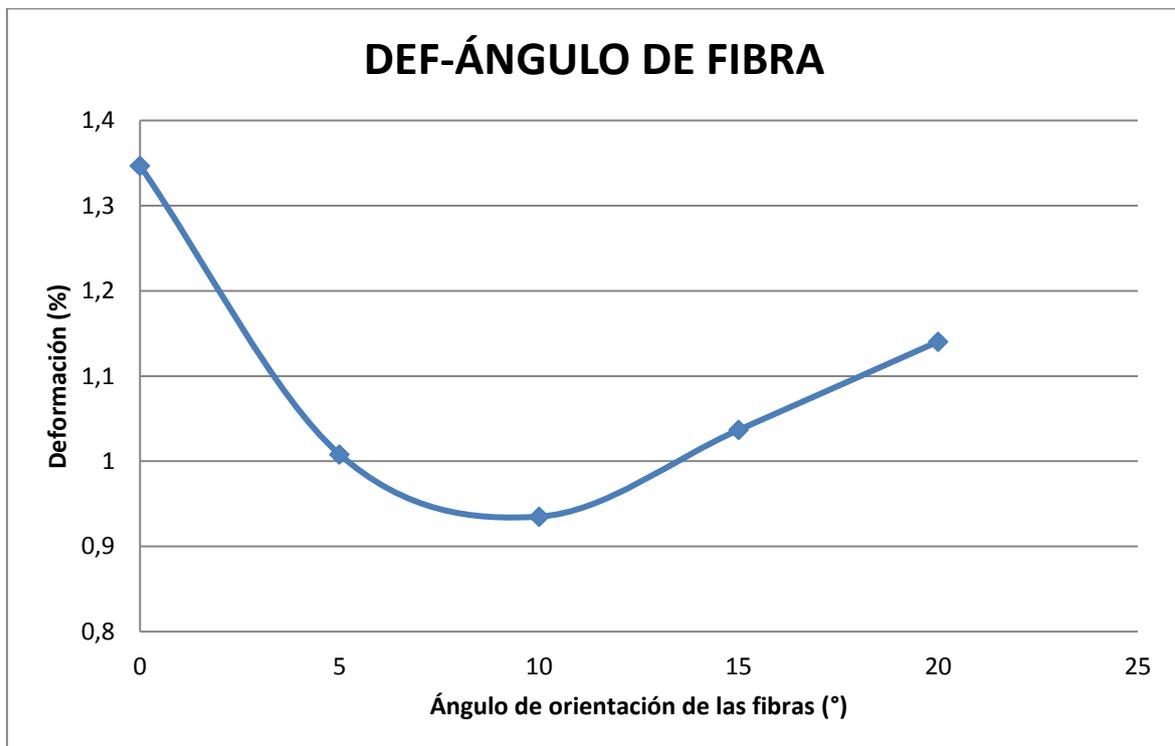


Gráfico 60 - Representación de la variación de la deformación en función del ángulo de orientación de la fibra.

Al igual que la resistencia presenta una caída de la deformación desde la orientación de 5 grados pero aparece una leve recuperación para 15 grados y algo mayor para 20 grados, presentando el menor dato de deformación para las probetas de 10 grados.

## 4.6 Comparación con predicciones analíticas.

Para poder obtener una conclusión respecto a los datos obtenidos se va a realizar una comparación con predicciones analíticas como son el Criterio de Máxima Tensión, el Criterio de Tsai-Wu, el Criterio de Tsai-Hill y el criterio de Puck.

Para estas comparaciones y estudios se va utilizar las siguientes expresiones de tensiones:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \theta \\ \sigma_{12} &= -\sigma_x \sin \theta \cos \theta\end{aligned}$$

Así como las siguientes propiedades del material:

Propiedades del material AS4/8552	$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$ (GPa)	$\nu_{12}$	S	$X_T$ (MPa)	$X_C$ (MPa)	$Y_T$ (MPa)	$Y_C$ (MPa)
Valor numérico	125,4	8,112	0,34	90	1746,5	1300	53,666	245

Tabla 16 - Datos de las propiedades del material compuesto AS4/8552

### 4.6.1 MÁXIMA TENSIÓN.

Para realizar la comparación partimos de las ecuaciones que se desarrollaron en el capítulo 2, en concreto en el apartado 2.4. Por tanto se obtiene la resistencia a la tracción para cada orientación de fibra, igualando cada expresión de  $\sigma$  a uno:

$$\left( \frac{\sigma_1}{X_T}, \frac{\sigma_2}{Y_T}, \frac{|\sigma_{12}|}{S} \right) \quad \frac{\sigma_1}{X_T}=1 \quad \frac{\sigma_2}{Y_T}=1 \quad \frac{|\sigma_{12}|}{S}=1$$

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	$\sigma_{x, \text{MáxTension}}$ (MPa)	$\sigma_{x, \text{Experimental}}$ (MPa)
5°	1036,57869	735,3851392

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

---

<b>10°</b>	526,284792	414,9456174
<b>15°</b>	360	298,5730894
<b>20°</b>	280,030289	200,6018277

**Tabla 17 - Datos obtenidos de la tensión según el Criterio de Máxima Tensión**

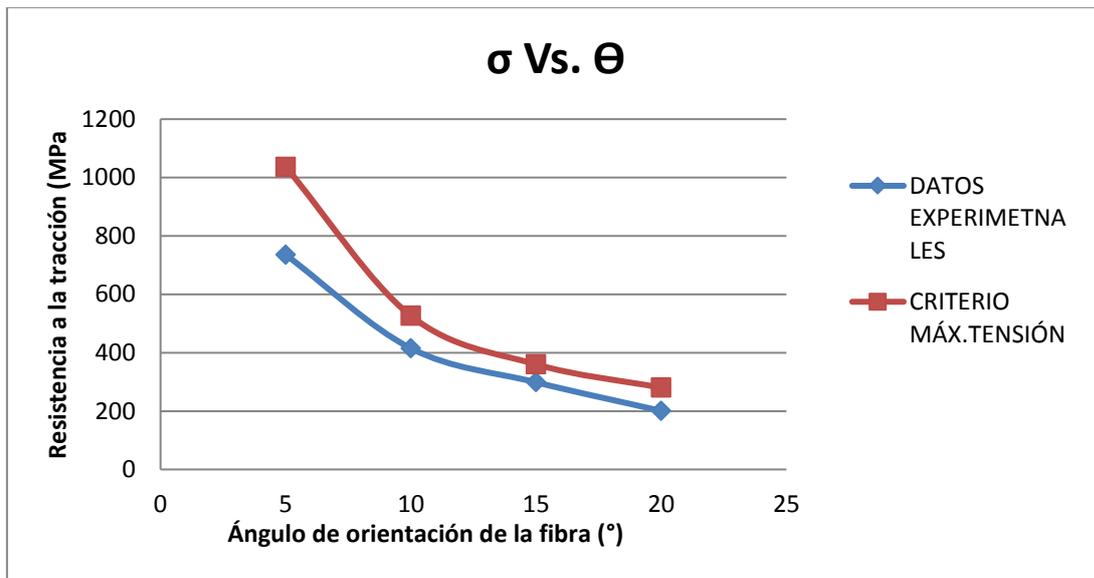


Gráfico 71 - Comparación de los datos experimentales frente al Criterio de Máx. Tensión

En el gráfico se representa el valor de  $\sigma_x$  obtenido de igualar en concreto  $\sigma_{12}$  a uno. Se puede ver que para valores de orientación de fibra pequeños la aproximación al Criterio de máxima tensión no es nada bueno mientras que se va acercando a medida que el ángulo de orientación incrementa, siendo más cercanos para 15/20 grados.

#### 4.6.2 CRITERIO DE TSAI-WU.

Al igual que para el criterio de Máxima Tensión, se igualan las expresiones del criterio a uno y se obtiene el valor de tensión que posteriormente se comparará en el gráfico con los valores obtenidos experimentalmente.

La expresión:

$$\frac{\sigma_1^2}{X_T X_C} + \frac{\sigma_2^2}{Y_T Y_C} + \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right)\sigma_2 - \frac{1}{\sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}}\sigma_1 \sigma_2 + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} = 1$$

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	$\sigma_{x,Tsai-Wu}$ (MPa)	$\sigma_{x,Experimental}$ (MPa)
5°	901,193065	735,3851392
10°	474,163753	414,9456174
15°	306,238488	298,5730894
20°	221,124048	200,6018277

Tabla 18- Datos obtenidos de la tensión según el Criterio de Tsai Wu

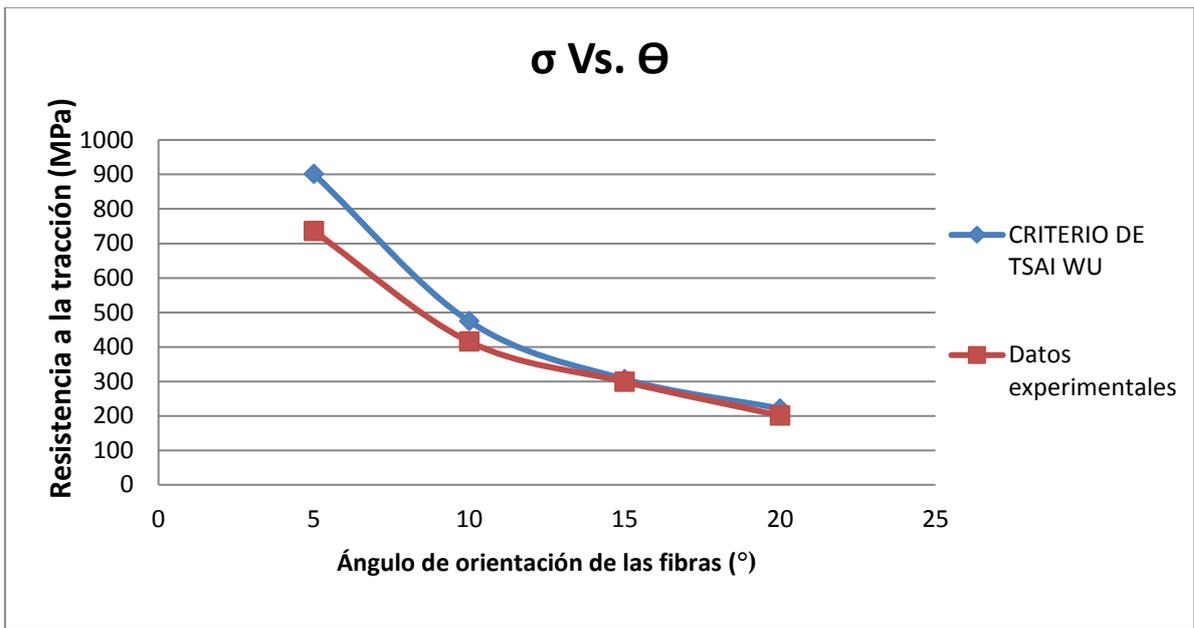


Gráfico 82 - Comparación de los datos experimentales frente al Criterio de Tsai-Wu

Como en el caso del Criterio de Máx. Tensión la aproximación mejora para ángulos mayores, aunque en este caso de por si la aproximación es más cercana para todas las configuraciones de ángulos.

#### 4.6.3 CRITERIO DE TSAI-HILL.

Como se ha descrito anteriormente se obtiene la resistencia a la tracción para cada orientación de fibra, igualando cada expresión de Tsai Hill a uno:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_T^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$$

En este caso se obtendrá los siguientes valores de tensión:

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	$\sigma_{x,Tsai-Hill}$ (MPa)	$\sigma_{x,Experimental}$ (MPa)
5°	886,9683532	735,3851392
10°	486,5093788	414,9456174
15°	323,7786352	298,5730894
20°	237,5212487	200,6018277

Tabla 19 - Datos obtenidos de la tensión según el Criterio de Tsai Hill

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

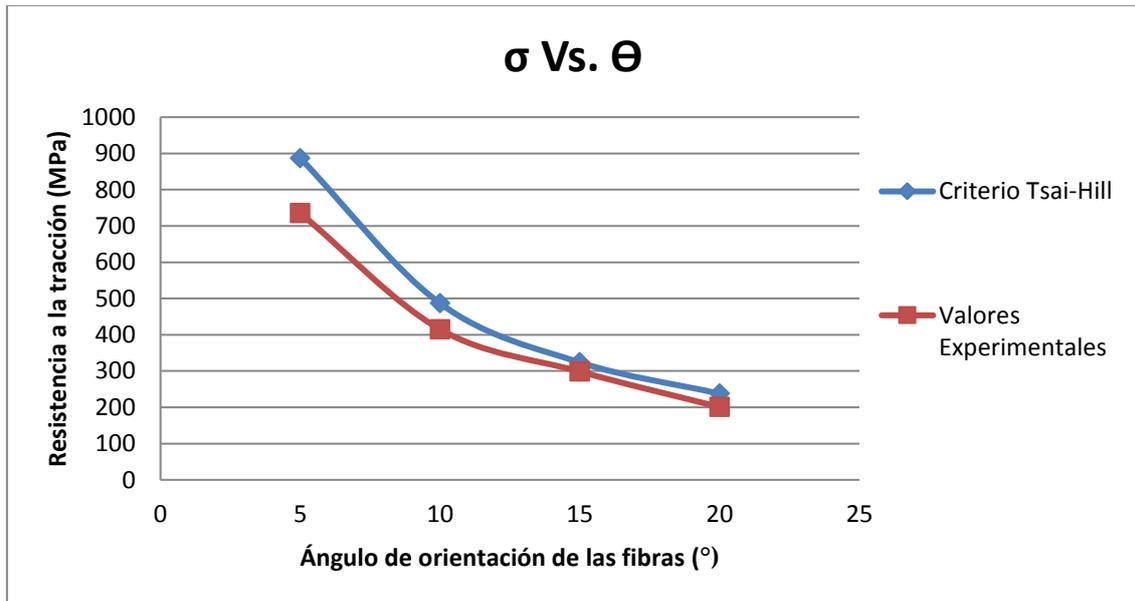


Gráfico 93 - Comparación de los datos experimentales frente al Criterio de Tsai-Hill

En este caso la aproximación no es tan cercana como para el criterio de Tsai-Wu pero la aproximación para valores más elevados del ángulo de la fibra las aproximaciones siguen siendo aceptables.

Si finalmente se comparan todas predicciones en un solo gráfico se puede observar cuál de ellas arroja los mejores resultados, o aquellos más cercanos a los experimentales con los que se trabaja.

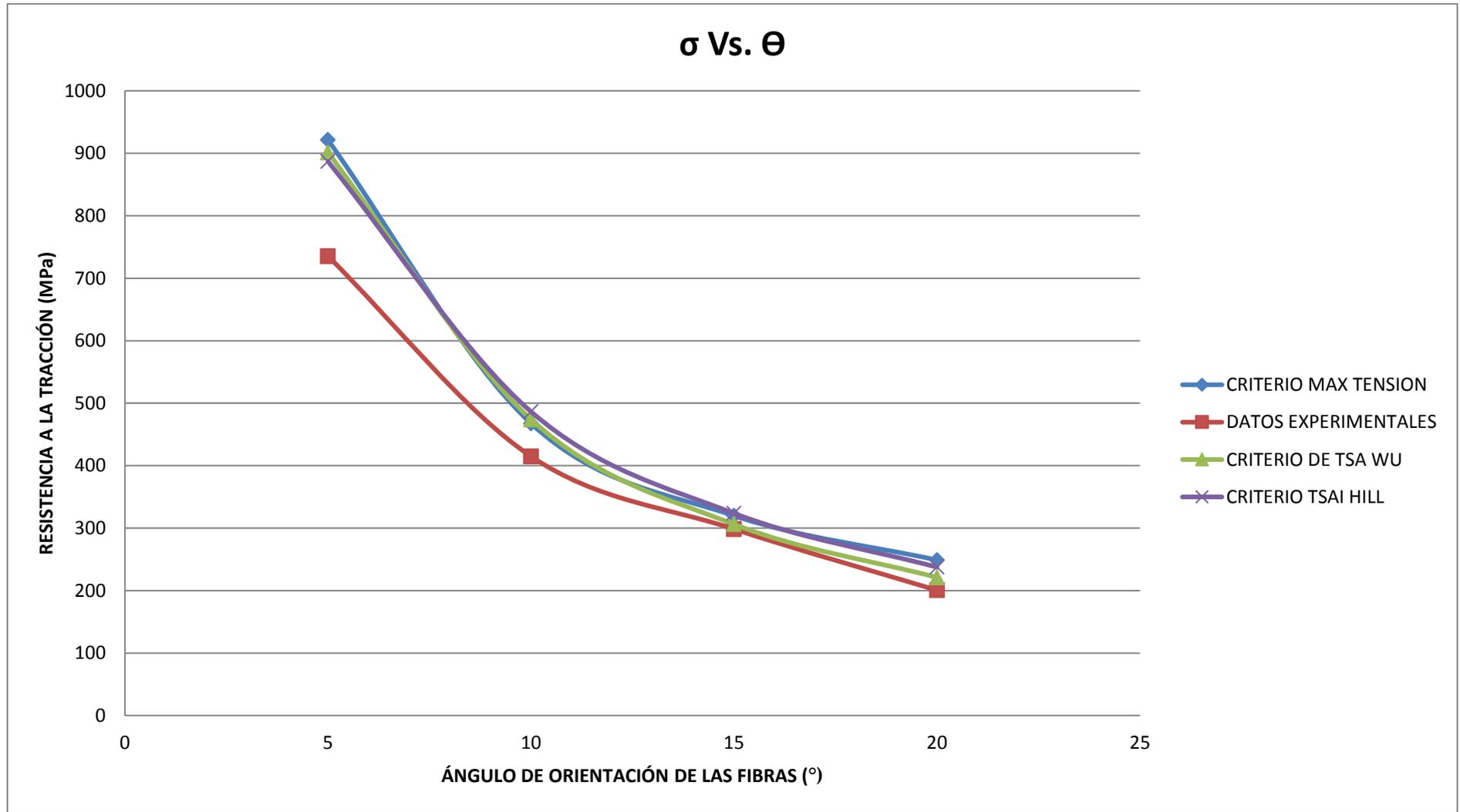


Gráfico 104 - Comparación de todos los criterios de predicción frente a los datos experimentales.

Como ya se predecía el criterio de Tsai-Hill y en concreto el de Tsai-Wu se acerca más que el criterio de Máxima Tensión a los datos experimentales. Dado que las predicciones no son del todo buenas, se va a proceder a realizar un cálculo inverso para obtener S que venía establecida por el fabricante en 90 MPa.

## 4.7 Cálculo de resistencia a cizalladura intralaminar, S.

Partiendo de las diferentes predicciones que se han realizado, se va a llevar a cabo a partir de las expresiones de cada criterio un cálculo inverso con el que teniendo como datos de partida los datos experimentales, se obtendrá S.

### 4.7.1 CRITERIO DE MÁXIMA TENSIÓN.

Partiendo de la expresión de la resistencia y teniendo en cuenta el valor de  $\sigma_{12}$  en función de  $\sigma_x$

$$\frac{|\sigma_{12}|}{S} = 1 \rightarrow S$$

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	$\sigma_{x,Experimental}$ (MPa)	S (MPa)
5°	735,3851392	63,8491447
10°	414,9456174	70,9598798
15°	298,5730894	74,6432724
20°	200,6018277	64,4721847

Tabla 20 - Cálculo de S para el criterio de Máx. Tensión.

Como se veía en el gráfico el Criterio de Máxima Tensión no era una buena aproximación para los datos experimentales, por ello los valores obtenidos de S son muy lejanos al valor dado por el fabricante.

### 4.7.2 CRITERIO DE TSAI-WU.

Para el caso de Tsai-Wu, partimos de nuevo de la expresión de la resistencia y teniendo en cuenta el valor de  $\sigma_{1,2,12}$  en función de  $\sigma_x$ , se despeja S.

$$\frac{\sigma_1^2}{X_T X_C} + \frac{\sigma_2^2}{Y_T Y_C} + \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right)\sigma_2 - \frac{1}{\sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}}\sigma_1 \sigma_2 + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2}$$

Teniendo una ecuación de segundo grado tal que así:

$$ax^2 + bx + c = 0$$

Donde:

$$a = \frac{\cos^4}{X_T X_C} + \frac{\sin^4}{Y_T Y_C} - \frac{\cos^2 \sin^2}{\sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}} + \frac{\cos^2 \sin^2}{S^2}$$

$$b = \left( \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \right) \cos^2 + \left( \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \right) \sin^2$$

$$c = 1$$

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	$\sigma_{x,Experimental}$ (MPa)	S (MPa)
5°	735,3851392	69,3001763
10°	414,9456174	77,2871281
15°	298,5730894	87,28117
20°	200,6018277	79,2570009

Tabla 21 - Cálculo de S para el criterio de Tsai-Wu.

En este caso se ha observado que presenta una aproximación más certera que el criterio de Máxima Tensión en concreto para las configuraciones de probetas con fibras orientadas 15 y 20 grados, pudiendo obtener una S como valor medio de las obtenidas para estas configuraciones:

$$S_{media} = 83,26908542 \text{ MPa}$$

#### 4.7.3 CRITERIO DE TSAI-HILL.

Para el caso de Tsai-Hill, partimos de nuevo de la expresión de la resistencia y teniendo en cuenta el valor de  $\sigma_{1,2,12}$  en función de  $\sigma_x$ , se despeja S, de manera análoga a cómo se ha realizado en los anteriores criterios.

$$\sigma_x^2 \left( \frac{\cos^4 \theta}{X_T^2} + \frac{\sin^4 \theta}{Y_T^2} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{S^2} - \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{X_T^2} \right) = 1$$

Despejando S:

$$S = \frac{\sigma_x \cos \theta \sin \theta}{\sqrt{1 - \sigma_x^2 \left( \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{X_T^2} - \frac{\cos^4 \theta}{X_T^2} - \frac{\sin^4 \theta}{Y_T^2} \right)}}$$

Ángulo de orientación de las fibras ( $\theta$ )	$\sigma_{x, Experimental}$ (MPa)	S (MPa)
5°	735,3851392	58,6758482
10°	414,9456174	67,4798597
15°	298,5730894	69,2296775
20°	200,6018277	58,8518493

Tabla 22 - Cálculo de S para el criterio de Tsai-Hill.

En este caso se ha observado que la aproximación más acertada ocurre para las configuraciones de probetas con fibras orientadas 10 y 15 grados, pudiendo obtener una S como valor medio de las obtenidas para estas configuraciones:

$$S_{media} = 68,3547686 \text{ MPa}$$

De modo que la S que se obtendría como cálculo aproximado entre las predicciones más certeras, sería el valor medio de estas dos Smedia, obteniéndose un valor final de

$$\mathbf{S = 75,8118843 \text{ MPa}}$$

Si se tomase ese valor de S en vez del facilitado por el fabricante, estos serían las curvas de aproximación obtenidas:

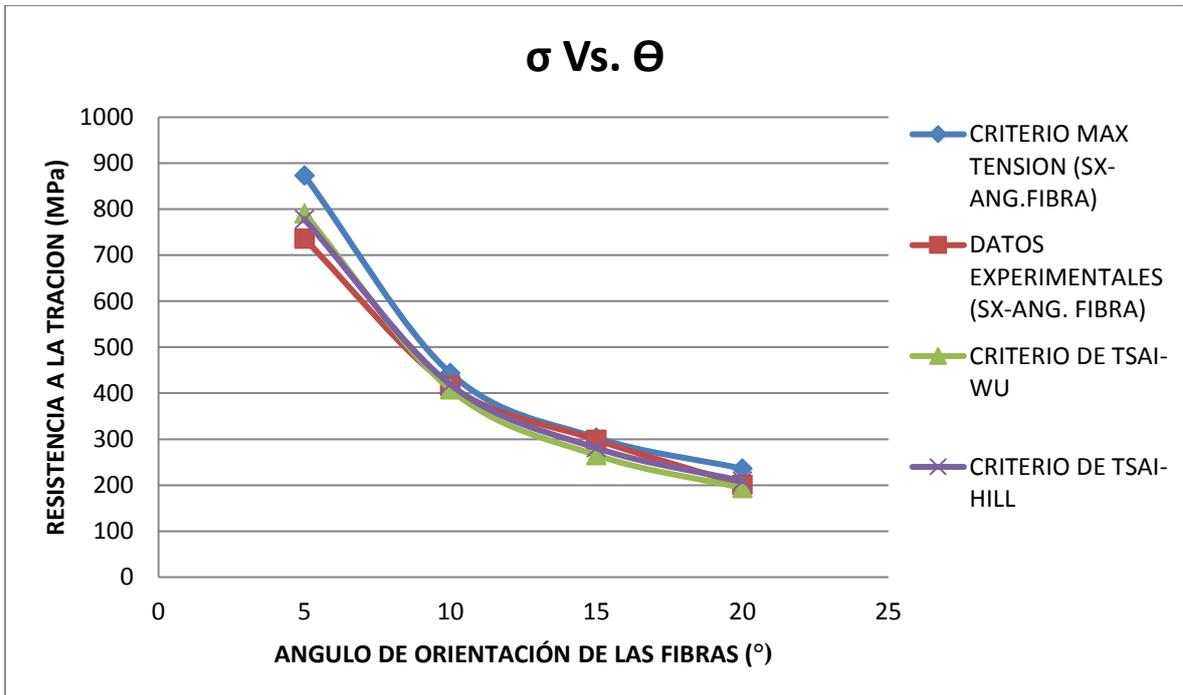


Gráfico 115 - Comparación de todos los criterios de predicción frente a los datos experimentales.

Donde efectivamente las aproximaciones serían más acertadas.

#### 4.8 Cálculo del módulo de cortadura, $G_{12}$ .

Uno de los objetivos de este estudio consistía en calcular el módulo de cortadura, a partir de los datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción. Para ello se define este módulo de cortadura como cociente de:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}$$

Siendo:

$$\tau_{12} = -\sigma_x \sin\theta \cos\theta$$

$$\gamma_{12} = -\frac{\varepsilon_x}{\sin\theta \cos\theta} + \sigma_x \left[ \frac{\cos^3\theta}{\sin\theta E_{11}} + \frac{\sin^3\theta}{\cos\theta E_{22}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \sin\theta \cos\theta \right]$$

De modo que se puede representar para cada configuración de probetas la evolución de  $\tau_{12}$  en función de  $\gamma_{12}$ . De manera análoga al estudio de la resistencia y la deformación, la representación de estos dos valores en un gráfico tendrá un crecimiento pero con una

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ )

---

tendencia a converger más las probetas de la misma configuración que lo obtenido en los gráficos  $\sigma - \varepsilon$ .

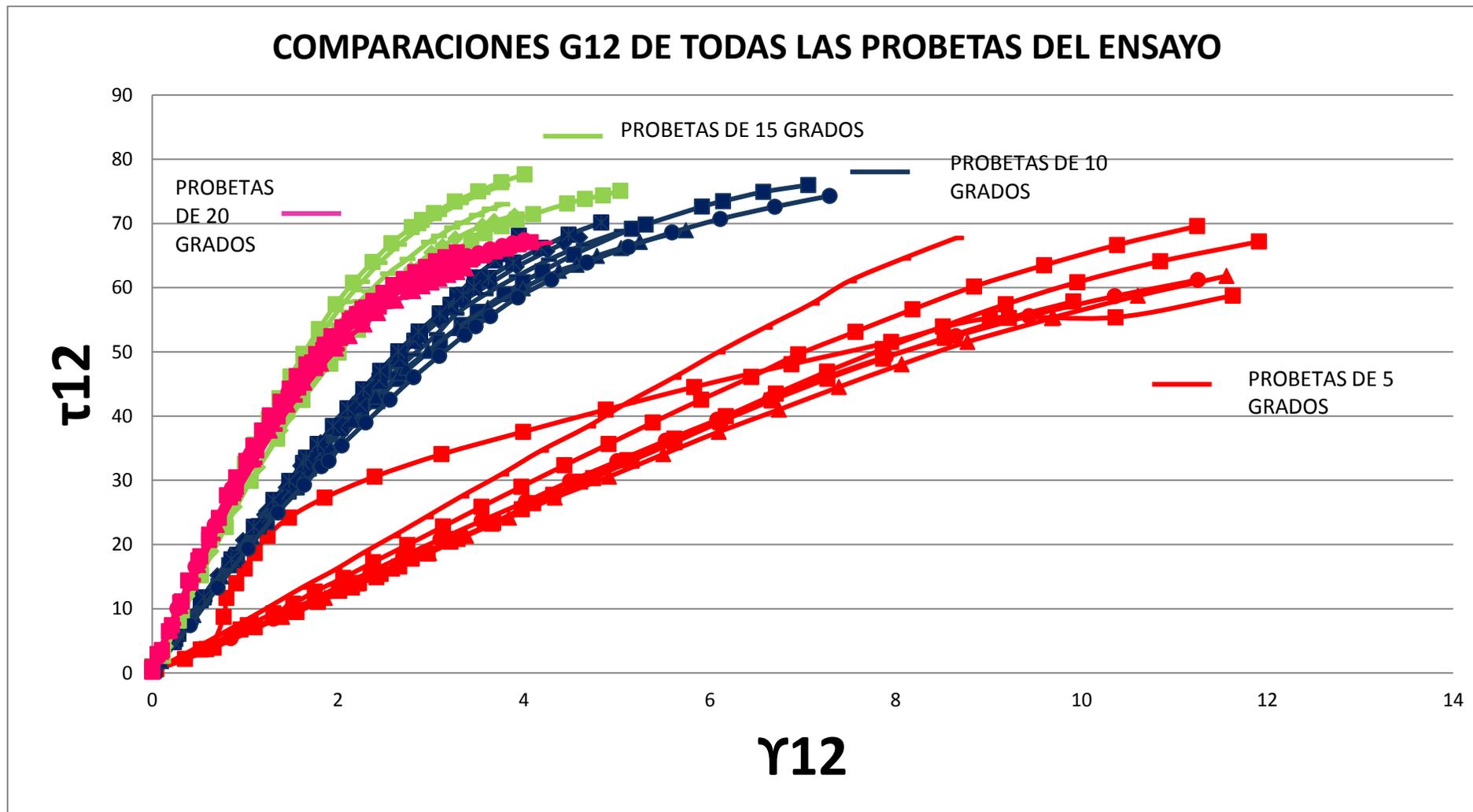


Gráfico 126 - Representación del cálculo del módulo de cortadura para todas las configuraciones de probetas (5, 10, 15 y 20 grados).

Si se estudia también para las modificaciones de configuración presentadas por las probetas de 10 grados. Se observa como en el estudio de las tensiones y deformaciones que, cuánto mayor desviación del ángulo de los tabs más se aleja de la configuración original de 10 grados en la fibra y 22 grados de los tabs.

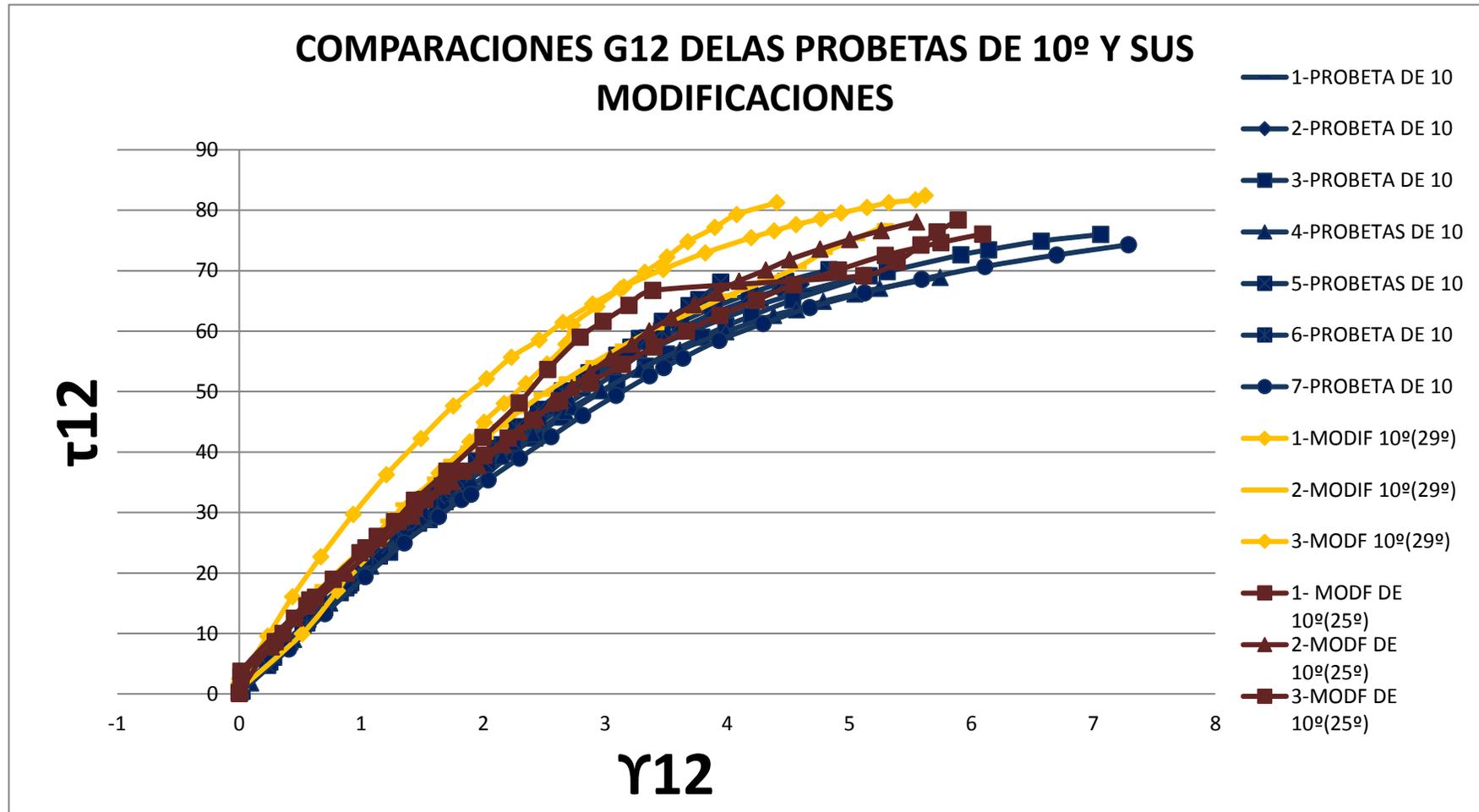


Gráfico 137 - Estudio del módulo de cortadura para las probetas de 10 grados y sus modificaciones.

Dado que el módulo de cortadura no es más que la pendiente que presentan las curvas anteriormente representadas, se puede obtener los valores del módulo de cortadura buscando la tendencia de las curvas representadas en los primeros valores, cuando aún conserva el crecimiento lineal.

Para ello se obtienen las curvas de crecimiento lineal entre los valores primeros de las curvas anteriormente descritas:

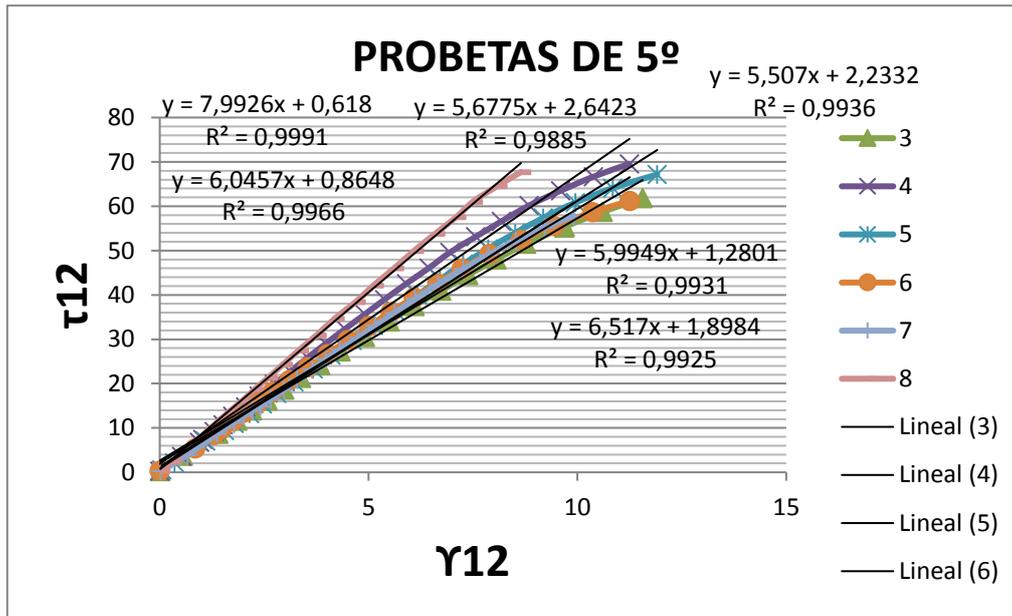


Gráfico 18 - Cálculo de G12 para probetas de fibras orientadas 5 grados

Obteniéndose valores de G12 muy pequeños (6,2887 MPa) por lo que para la configuración de 5 grados no se comporta de acuerdo a lo esperado.

Determinación experimental de la tensión y deformación en rotura de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (0° a 20°)

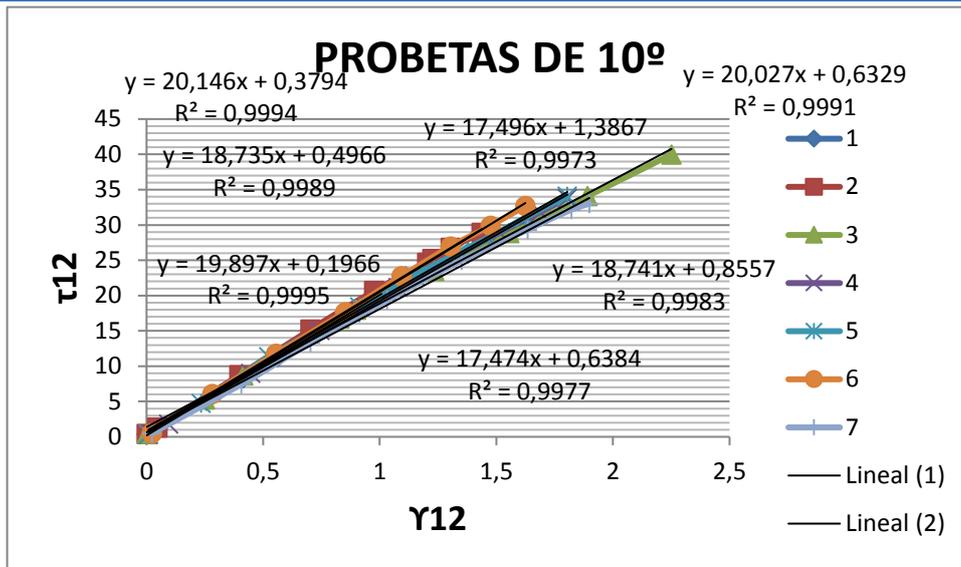


Gráfico 19 - Cálculo de G<sub>12</sub> para probetas de fibras orientadas 10 grados

Para las probetas de 10 en su configuración original, sin modificaciones, presenta valores de  $G_{12} = 18,9304286$  MPa

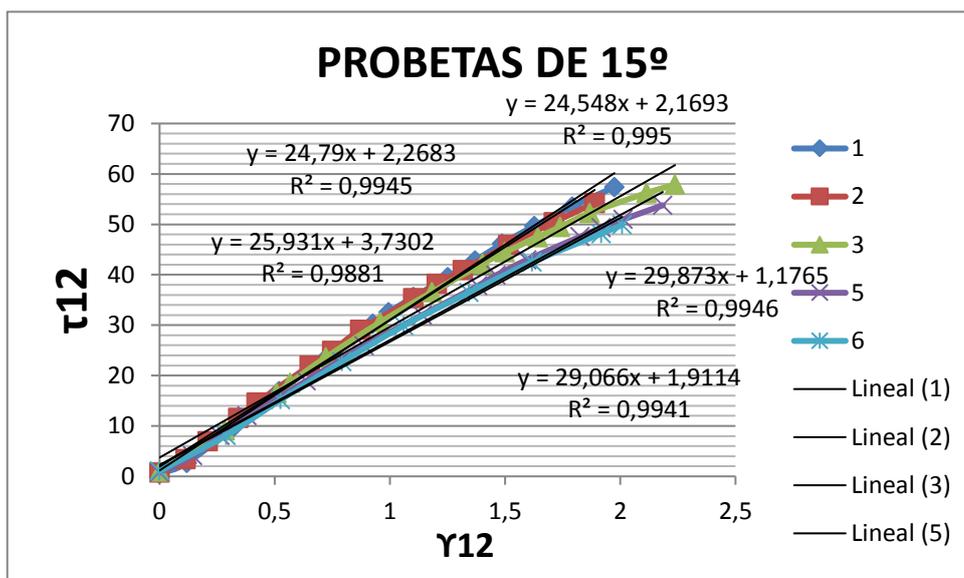


Gráfico 140 - Cálculo de G<sub>12</sub> para probetas de fibras orientadas 15 grados

Para las probetas de 15 grados, se obtiene una pendiente en la etapa lineal de la curva de,  $G_{12} = 26,8236$  MPa.

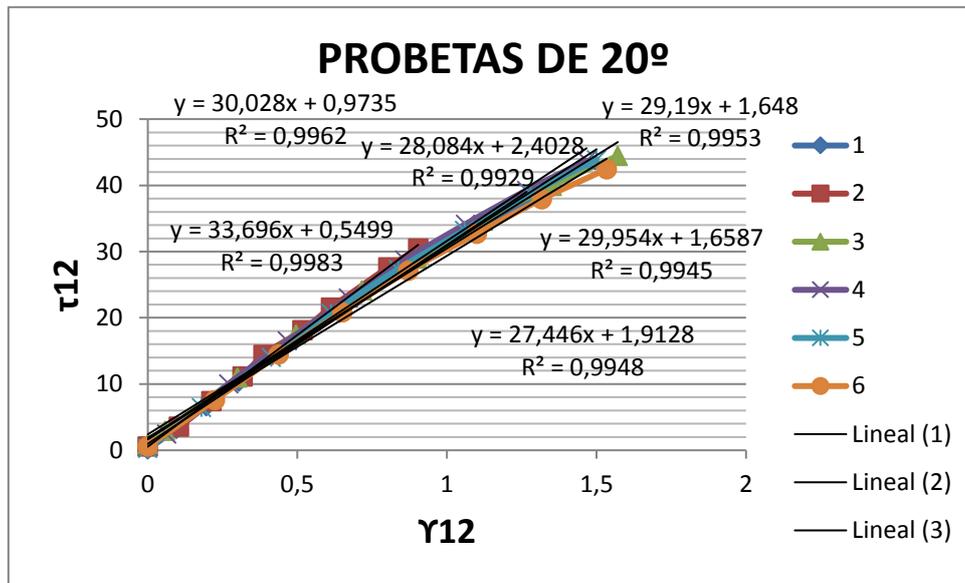


Gráfico 151 - Cálculo de  $G_{12}$  para probetas de fibras orientadas 20 grados

Para las probetas de 20 grados sin embargo, se obtiene una pendiente en la etapa lineal de la curva de,  $G_{12} = 29,733$  MPa

De manera que el valor medio, descartando el de 5 grados porque es demasiado pequeño, sería de:

$$G_{12} = 25,1623429$$

Si se tiene en cuenta las modificaciones de las probetas de 10 grados y como estas afectan al cálculo del módulo de cortadura.

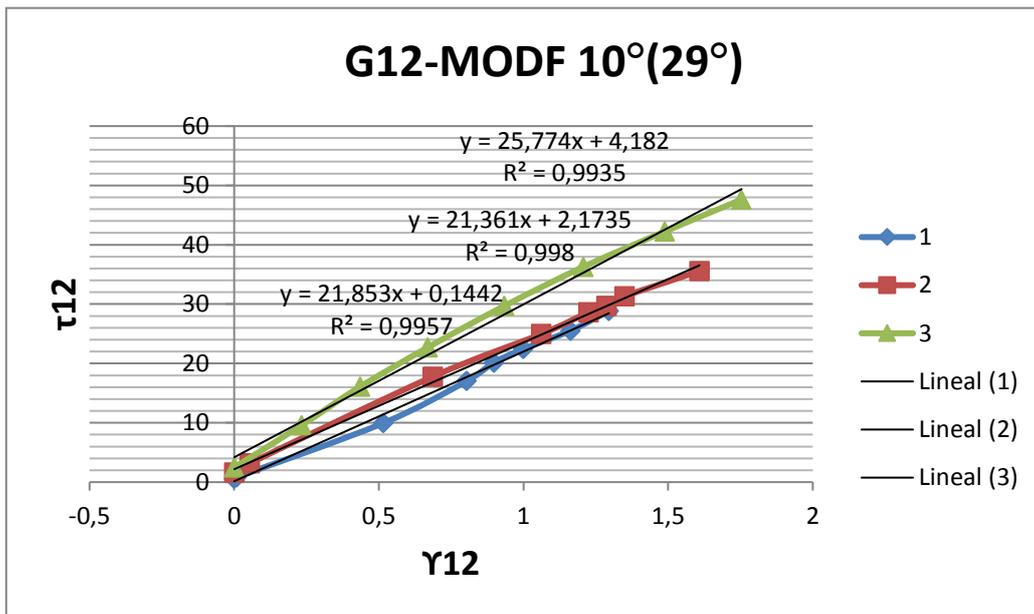


Gráfico 162 - Cálculo de G12 para probetas con tabs modificados (29°)

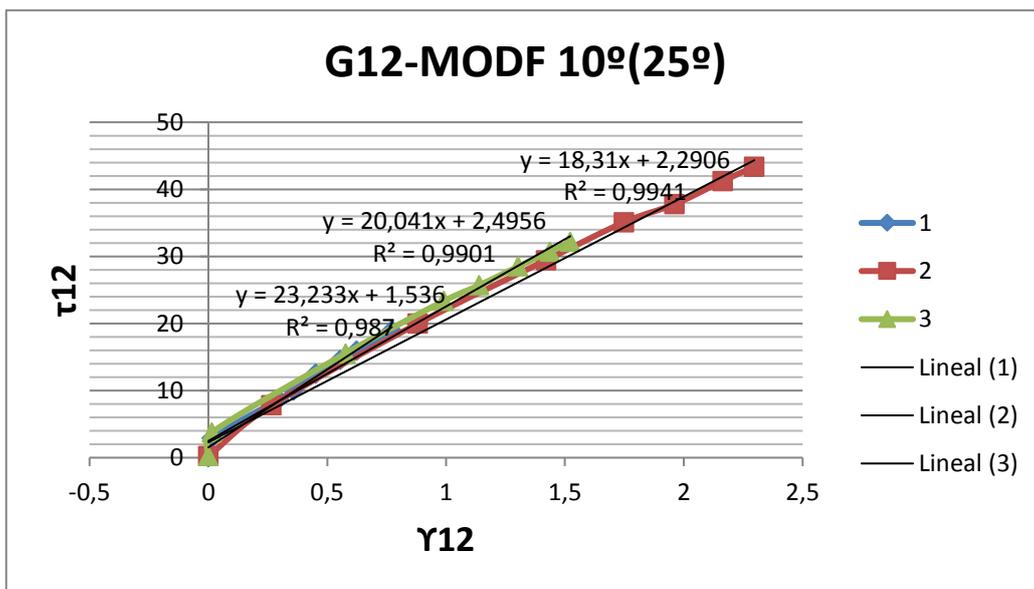


Gráfico 173 - Cálculo de G12 para probetas con tabs modificados (25°)

Donde haciendo una media de las pendientes obtenidas por las líneas de tendencia, se obtendría una  $G_{12} = 22,996$  MPa para la modificación de tabs a 29 grados y una  $G_{12} = 20,528$  MPa. Ambos valores por encima del obtenido de la configuración original.

## Capítulo 5. Conclusiones.

---

### 5.1 Conclusiones.

Las conclusiones principales que se pueden destacar de este estudio son las siguientes:

Se ha realizado una campaña de ensayos de tracción para orientaciones de 0° a 20° para probetas de un compuestos de grafito-epoxy (AS4/8552), obteniéndose la resistencia a la tracción y la deformación en rotura. La resistencia a la tracción disminuye con el aumento del ángulo de orientación. La deformación en rotura es máxima para 0°, disminuye hasta 10° (donde hay un mínimo para el rango 0-20), y después crece hasta 20°.

Los resultados directos de los ensayos, gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  (para orientaciones de 5° a 20°), muestran mayor dispersión con la disminución del ángulo, así como un comportamiento más lineal para ángulos pequeños (5 y 10) frente a un comportamiento no lineal para los ángulos mayores (15 y 20). Asimismo, se observa una mayor dispersión en los valores de deformación en rotura que en los valores de resistencia a tracción para todas las orientaciones (5° a 20°). Esto explica porque se usan mayoritariamente los valores resistentes como valores admisibles en los criterios de fallo.

Por otra parte, de la observación de las roturas de las probetas, cabe decir que la orientación de 10° es la que presenta un mayor porcentaje de roturas centrales, y por tanto bajo el estado tensional uniformizado de esta zona, que se puede aproximar por el estado de la configuración ideal. No obstante, es preciso puntualizar que esta orientación de 10° se muestra muy sensible a variaciones del ángulo de los tabs.

La comparación de los valores resistentes con las predicciones de los criterios (asumiendo como valor de S el proporcionado por el fabricante) muestran en general mayor ajuste con el aumento del ángulo de orientación. En particular, Máxima tensión conduce a mayores errores en la predicción, mientras que los otros criterios considerados presenta menores errores que el anterior.

La determinación de la Resistencia a cizalladura S mediante un cálculo inverso, parece indicar que los criterios utilizados no ofrecen una buena predicción del fallo para todo el rango de orientaciones considerado (5° a 20°), ya que un mismo criterio conduce a diferentes valores de S para cada orientación.

Los gráficos  $\tau_{12}$ - $\gamma_{12}$ , que se pueden obtener a partir de las medidas experimentales, muestran comportamientos distintos para las distintas orientaciones, aunque más similares para 10 15 y 20, que para 5°. Por lo que esta orientación no parece adecuada para la determinación del comportamiento a cizalladura. Las diferencias encontradas entre 10, 15 y 20 podrían estar relacionadas con la forma de evaluar

$\gamma_{12}$ , es decir a partir de la medida de  $\epsilon$  tomada con un extensómetro. Una medida más fiable se podría obtener midiendo  $\epsilon$  con una banda extensométrica, y aún mayor precisión evaluando  $\gamma_{12}$  a partir de las medidas de una roseta de 3 bandas extensométricas.

## 5.2 Desarrollos futuros.

Tras el estudio llevado a cabo a continuación se puede destacar una serie de acciones futuras que serían interesantes o posibles a tener en cuenta para estudios futuros.

Sería de interés estudiar desviaciones en los ángulos de los tabs para todas las probetas y ver cómo se desvía del comportamiento y que tendencia general comparten todas ellas.

De igual modo, se podría investigar métodos más efectivos que el simplemente manual para la fabricación de los paneles y establecer un trabajo más efectivo para la obtención exacta de los ángulos de orientación de las fibras, más allá del simplemente visual de la persona que está operando sobre los paneles.

Y sería interesante también un estudio donde se comparen estos resultados con los ensayos de tabs rectos.

## Capítulo 6. Bibliografía.

---

- 1.- R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, Mc Graw-Hill, 1975.
2. - F. Paris, "On failure criteria of fibrous composite materials", Report NASA.
3. - B. Accardi, Review of failure theories.
- 4.- S.W. Tsai , ref Tsai del libro de Jones.
- 5.- Marín J.C., Cañas J., París F., Morton J., "Determination of G12 by means of the off-axis tension test. Part I: Review of gripping systems and correction factors ", *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 33 (1), pp. 87-100, 2002.
6. - Pindera M-J. and Herakovich C.T., "Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test", *Experimental Mechanics*, Vol. 26, No. 1, 1986, pp. 103-112.
- 7.- Marín J.C., Cañas J., París F., Morton J., "Determination of G12 by means of the off-axis tension test. Part II: A self consistent approach to the application of correction factors", *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 33 (1), pp. 101-111, 2002.
8. - Sun C.T. and Chung I., "An Oblique End-Tab Design for Testing Off-Axis Composite Specimens", *Composites*, Vol. 24, No. 8, 1993, pp. 619-623.
- 9.- *Materiales polímeros y compuestos. Deformación elástica de los compuestos de fibra larga y de los laminados.*
- 10.- Cañas Delgado J., Marín J.C., París F., "Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos", GRUPO DE ELASTICIDAD Y RESISTENCIA DE MATERIALES, ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS, DEPARTAMENTO DE MECANICA DE MEDIOS CONTINUOS, TEORIA DE ESTRUCTURAS E INGENIERIA DEL TERRENO. Sevilla, 2006.
11. - Chamis C.C. and Sinclair J.H., "Ten-deg off-axis test for shear properties in fiber composites", *Experimental Mechanics*, Vol. 17 (9), pp. 339-346, 1977.
- 12.- Christos C. C. and Sinclair J.H., "10° Off-Axis tensile test for Intralaminar shear characterization of fiber composites", NASA Technical Note D-8215, Abril 1976.
13. - Sun CT, Berreth SP. "A new end tab design for off-axis tension test of composite materials". *J. Composite Materials* 1988; 22: 766-79.
14. - Kawai M, Morishita M, Satoh H, Tornura S, Kemmochi K. "Effects of end-tab shape on strain field of unidirectional carbon/epoxy composite specimens subjected to off-axis tension". *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing* 1997; 28(3):267-75.
- 15.- Pierron F, Alloba E, Surrel Y, Vautrin A. "Whole-field assessment of the effects of boundary conditions on the strain field in off-axis tensile testing of unidirectional composites". *Composites Science and Technology* 1998; 58(12):1939-47.
- 16.- Marín J.C., Cañas J., París F., "On the optimal choice of the fibre orientation angle in the offaxis tension test with oblique end-tabs", School of Engineering, Univ. of Seville.
- 17.- HASHIN, Z. "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites". *J. of Applied Mechanics*, 1980.
- 18.- A. Puck and H. Schürman, "Failure analysis of FPR laminates by means of physically based phenomenological models", *Composites Science and Technology*, nº58, pp.1045-1067, 1998.
- 19.- A. Puck, "Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion," *Composites Science and Technology* , pp. 371–378, 2002.