

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Ensayos a flexión en laminados $[0/90_n]$ s en función del espesor de la lámina de 90° usando láminas ultradelgadas tras ensayos cíclicos

Autor: Julio Gil Jiménez

Tutores: Serafín Sánchez Carmona

Alberto Barroso Caro

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Ensayos a flexión en laminados [0/90_n]s en función del espesor de la lámina de 90° usando láminas ultradelgadas tras ensayos cíclicos

Autor:

Julio Gil Jiménez

Tutores:

Serafín Sánchez Carmona

Alberto Barroso Caro

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Grado: Ensayos a flexión en laminados [0/90_n]s en función del espesor de la lámina de 90°
usando láminas ultradelgadas tras ensayos cíclicos

Autor: Julio Gil Jiménez

Tutores: Serafín Sánchez Carmona
Alberto Barroso Caro

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis amigos

Agradecimientos

La entrega de este proyecto supone el final de una etapa muy importante de mi vida. Cuando entras en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla uno tiene la certeza de que convertirse en ingeniero consiste en adquirir muchos conceptos técnicos para poder aplicar en tu vida laboral. Sin embargo, cuando uno afronta la recta final de la carrera se da cuenta de que esto no es así ni mucho menos. Lo que realmente te aporta la Escuela son sus valores y el logro de haber superado una carrera llena de obstáculos.

Todo esto no hubiera sido posible realizarlo solo, y es por ello por lo que me gustaría agradecer:

A mis padres por haberme dado todos los recursos y la motivación necesaria para ser quien quiero ser.

A mis hermanos por haberme apoyado en todo momento incondicionalmente.

A mis abuelos, Gregorio, Lola, Julio y Marisol por las promesas que me hacen cumplir y por el cariño que siempre me han mostrado.

A todos y cada uno de mis amigos por soportarme y acompañarme a lo largo de esta etapa.

A todos los profesores que me han acompañado desde primaria.

Y por supuesto a Serafín y Alberto por la plena implicación que han mostrado, por haber estado ahí resolviendo todas mis dudas e intentando que este proyecto salga lo mejor posible.

Nada de esto hubiera sido posible sin vosotros.

Julio Gil Jiménez

Sevilla, 2022

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia que tienen sobre las propiedades mecánicas a flexión los distintos daños a fatiga en laminados cross-ply $[0_4|90|0_4]$ y $[0_4|90_3|0_4]$ compuestos de fibras de carbono y resina epoxi. El primer laminado está fabricado con láminas de 150g/m^2 en las capas de 0° y láminas ultradelgadas de 30g/m^2 en las de 90° , mientras que el segundo laminado tiene todas sus capas de 150g/m^2 .

Este Trabajo de Fin de Grado se ha dividido en tres etapas fundamentales. La primera de ellas consiste en el análisis microscópico del daño a fatiga ocasionado en probetas de dicho material, ensayadas a distintos números de ciclos y niveles de carga a tracción. El objetivo principal de análisis es la capa de 90° , capa más desfavorable ante ensayos cíclicos tracción-tracción en las que se contabiliza el daño a fatiga ocasionada con el fin de determinar un patrón de daño para cada caso de carga cíclica.

La segunda etapa consiste en el ensayo a flexión de los laminados en cuestión. Tras los ensayos a flexión de los laminados, se comparan los resultados de las probetas prístinas y las probetas con daño tras los ensayos cíclicos.

Finalmente, la última etapa consistirá en la elaboración de un modelo numérico en ANSYS de ambos laminados siguiendo los patrones de daño microscópico observado para cada caso con el fin de obtener una correlación de los resultados lo más certera posible.

ÍNDICE

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Gráficos	xv
Índice de Figuras	xvi
1 Introducción	1
1.1 <i>Definición de materiales compuestos</i>	1
1.2 <i>Uso de materiales compuestos</i>	2
1.3 <i>Fabricación de laminados</i>	3
1.4 <i>Motivación y objetivo del proyecto</i>	5
2 Análisis del daño a fatiga en laminados cross-ply	7
2.1 <i>Equipo utilizado.</i>	7
2.2 <i>Metodología de trabajo y resultados obtenidos.</i>	7
2.2.1 <i>Características de las probetas prístinas y ensayadas.</i>	7
2.2.2 <i>Tipología de daño.</i>	8
2.2.3 <i>Conteo de daños tras ensayos a fatiga</i>	11
3 Ensayo a flexión	18
3.1 <i>Equipo y materiales utilizados</i>	18
3.2 <i>Preparación de las probetas</i>	18
3.3 <i>Preparación de útiles</i>	19
3.4 <i>Resultados obtenidos</i>	20
3.4.1 <i>Resultados del laminado CP450</i>	21
3.4.2 <i>Resultados del laminado CP30</i>	24
4 Modelo numérico	32
4.1 <i>Diseño de los modelos</i>	32
4.2 <i>Resultados de los ensayos</i>	41
5 Conclusiones y estudios futuros	46
5.1 <i>Comparación de resultados y conclusiones</i>	46
5.2 <i>Estudios futuros</i>	49
Referencias	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fuerza última a tracción.	8
Tabla 2: Probetas utilizadas en el TFG y los ensayos a fatigas sometidos.	8
Tabla 3: Valores de los útiles para los ensayos a flexión a 4 puntos.	19
Tabla 4: Resultados del ensayo a flexión de CP450 PP.	21
Tabla 5: Resultados del ensayo a flexión de CP450 PD1.	22
Tabla 6: Resumen de resultados del laminado CP450.	24
Tabla 7: Resultados del ensayo a flexión de CP30 PP.	24
Tabla 8: Resultados del ensayo a flexión CP30 PD1.	25
Tabla 9: Resultados del ensayo a flexión CP30 PD2.	27
Tabla 10: Resultados del ensayo a flexión CP30 PD3.	28
Tabla 11: Resumen de los resultados medios del laminado CP30.	30
Tabla 12: Comparación de los resultados del ensayo a flexión de los laminados CP450 y CP30.	47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Acumulación de daño en CP450 PD1.	12
Gráfico 2: Acumulación de daño en CP30 PD1.	13
Gráfico 3: Daño acumulado de CP30 PD2.	15
Gráfico 4: Comparativa del daño entre los bloques CP30 PD2 y CP30 PD3.	16
Gráfico 5: Daño acumulado en CP30 PD3.	17
Gráfico 6: Relación Fuerza – δ del bloque CP450 PP.	22
Gráfico 7: Relación Fuerza - δ del bloque CP450 PD1.	23
Gráfico 8: Comparación de resultados del laminado CP450.	23
Gráfico 9: Relación Fuerza - δ del bloque CP30 PP.	25
Gráfico 10: Relación Fuerza - δ del bloque CP30 PD1.	26
Gráfico 11: Relación Fuerza - δ en el bloque CP30 PD2.	27
Gráfico 12: Relación Fuerza - δ en el bloque CP30 PD3.	29
Gráfico 13: Comparación de resultados medios del laminado CP30.	30
Gráfico 14: Valor de K en función de la longitud de grieta para el laminado CP30.	41
Gráfico 15: Valor de K en función de la longitud de grieta para el laminado CP450.	41
Gráfico 16: Comparativa del daño medio de cada bloque del laminado CP30.	46
Gráfico 17: Comparación de las curvas F- δ de todas las probetas ensayadas.	47
Gráfico 18: Comparación de las curvas F- δ de las probetas ensayadas y los modelos del laminado CP450.	48
Gráfico 19: Comparación de las curvas F- δ de las probetas ensayadas y los modelos del laminado CP30.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los materiales compuestos según los refuerzos. [1]	2
Figura 2: Evolución del uso de materiales compuestos en la aviación [9].	3
Figura 3: Distintos sistemas de materiales compuestos. [10]	4
Figura 4: Composición de laminados. [10]	4
Figura 5: Isolated-Continued Debonds.	9
Figura 6: Generalised Transverse Damage.	9
Figura 7: Generalised Transverse Damage with Kinking.	9
Figura 8: Transverse crack.	10
Figura 9: Longitudinal Debond.	10
Figura 10: Delamination Trace.	11
Figura 11: Figura 11.	11
Figura 12: Fotocomposición de una réplica de la probeta CP450 PD1_2.	11
Figura 13: Daño en la capa de 0° de la probeta CP450 PD1_2.	12
Figura 14: Fotocomposición de la probeta CP30 PD1_3 con detalles de I-CD.	13
Figura 15: Daño presente en las capas de 0° del bloque CP30 PD1.	14
Figura 16: Fotocomposición de la probeta CP30 PD2_1.	14
Figura 17: Daño presente en las capas de 0° del bloque CP30 PD2.	15
Figura 18: Ejemplo de delaminación en la probeta CP30 PD3_3.	16
Figura 19: Fotocomposición de la probeta CP30 PD3_1.	16
Figura 20: Ejemplo de grieta horizontal en la que aparece un cambio de plano.	17
Figura 21: Daño presente en las capas de 0° del bloque CP30 PD3.	17
Figura 22: Esquema de Ensayo a flexión en cuatro puntos [2].	19
Figura 23: Útiles del ensayo a flexión con los datos especificados en la tabla [3].	20
Figura 24: Esquema del ensayo a flexión.	21
Figura 25: Probeta CP30 PD2_1 con fibras en la capa de 0° despegadas.	26
Figura 26: Probeta CP30 PD2_1 con fibras en la capa de 0° despegadas.	27
Figura 27: Modelo con grieta longitudinal.	33
Figura 28: Esquema del diseño del modelo.	33
Figura 29: Modelo previo a aplicación de las cargas.	36
Figura 30: Rodillo con grandes desplazamientos.	
Figura 31: Rodillo con pequeños desplazamientos.	40
Figura 32: Campo de desplazamientos verticales de la probeta deformada con una longitud de grieta de 70mm.	42
Figura 33: Campo de desplazamientos verticales de la probeta deformada con una longitud	

de grieta de 40mm.

43

Figura 34: Modelo con grieta longitudinal y transversales.

43

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se requieren elementos estructurales cada vez más avanzados y con mayores prestaciones para la industria. Este hecho supone un ambicioso reto para muchos ámbitos técnicos, en concreto para la investigación de nuevos materiales. Gracias a las posibilidades que brindan los materiales compuestos, un ingeniero debe poder diseñar un material adecuado para cada aplicación requerida, mediante la correcta elección y combinación de elementos. Esto requiere un largo y complejo proceso de diseño que exige contemplar multitud de cuestiones. Es por ello que la motivación de este TFG sea la de aportar nuevos avances en la investigación sobre materiales compuestos que aún no estén estudiados en su totalidad.

1.1 Definición de materiales compuestos

Debido a la constante aparición de nuevos materiales y a la evolución de estos, la definición de los materiales compuestos está en constante revisión. Tal y como se expresa en [1], se suele definir el material compuesto como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material.

La principal ventaja de los materiales compuestos es la posibilidad de obtener un conjunto de propiedades imposible de alcanzar con los elementos actuando de manera aislada. En este tipo de materiales distinguimos dos componentes fundamentales:

- **Matriz:** Este elemento es el encargado de unir todo el material y aparece en fase continua. Las materias primas más usadas para la matriz son las resinas epoxi y poliéster.
- **Refuerzo:** Este es el elemento encargado de transmitir cargas a la matriz, por lo que aporta gran parte de las propiedades mecánicas del material.

Debido a la enorme variedad de materiales compuestos es complicado hacer una clasificación completa de los mismos, sin embargo, una clasificación interesante es según el tipo de refuerzo, tal y como se muestra en la Figura 1.

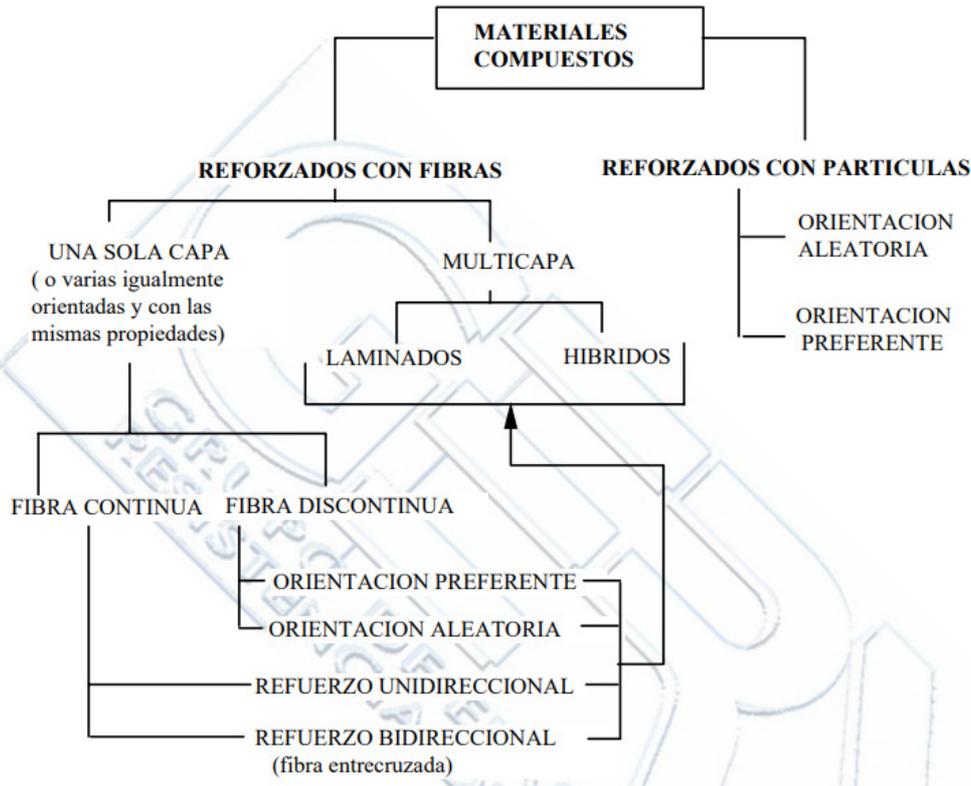


Figura 1: Clasificación de los materiales compuestos según los refuerzos. [1]

Las principales características que presentan los materiales compuestos son:

- Alta resistencia en relación con el peso.
- Baja densidad.
- Buen comportamiento a fatiga.
- Alta resistencia dieléctrica (buenos aislantes eléctricos).

1.2 Uso de materiales compuestos

Teniendo en cuenta las principales características de los materiales compuestos descritas anteriormente y la posibilidad de diseñar estos para conseguir propiedades específicas, resulta sencillo entender por qué su uso en industrias como la aeronáutica y aeroespacial está en auge. En estos sectores precisan de materiales con una relación resistencia/densidad muy alta, propiedad que poseen los materiales compuestos. Gracias a esto se consigue reducir de manera considerable el peso de los aviones, naves y diversas estructuras, lo que se traduce en una disminución de la potencia requerida y por lo tanto del consumo de combustible.

En la Figura 2 podemos ver reflejado la evolución del uso de materiales compuestos en la fabricación de vehículos aéreos en las últimas décadas, llegando a suponer más de un 50% del peso en aviones como el Airbus A350 y cerca del 90% en el helicóptero NH90 [9].

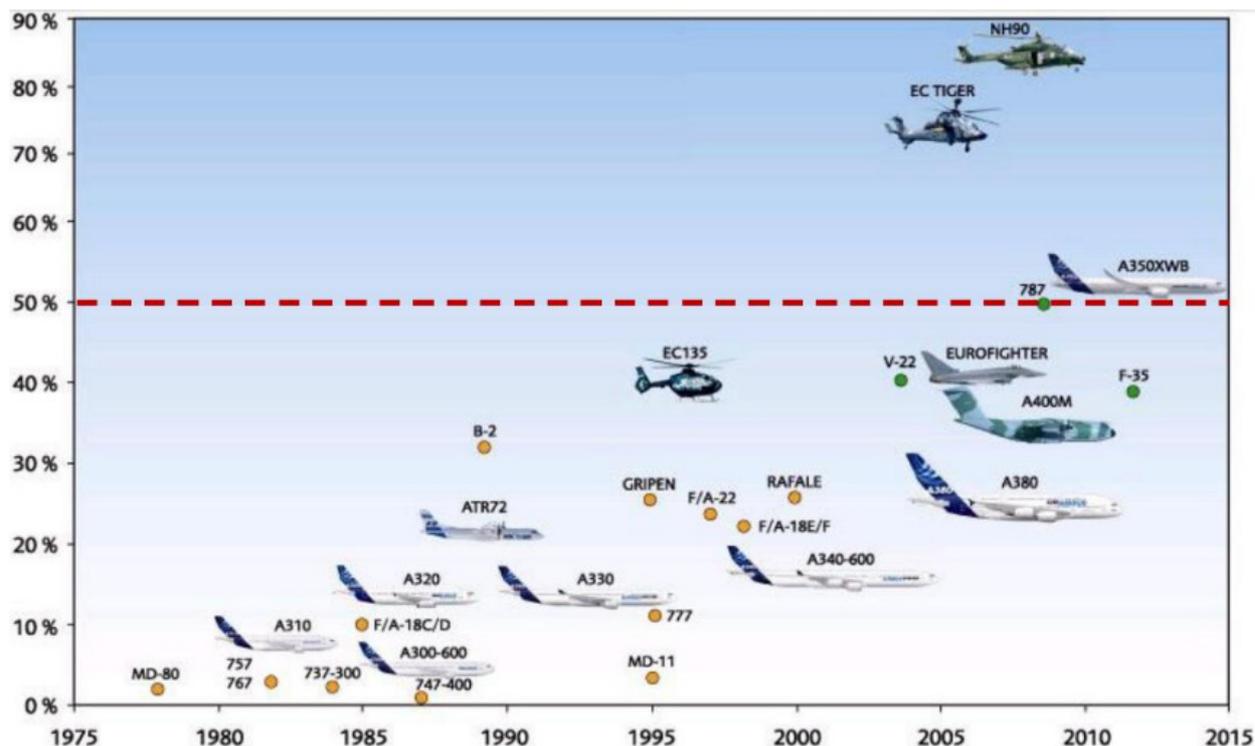


Figura 2: Evolución del uso de materiales compuestos en la aviación [9].

Además de la industria aeronáutica y la aeroespacial, existen infinidad de sectores donde se utilizan este tipo de materiales como las industrias automovilística, naval, química o deportiva.

Aunque los materiales compuestos tengan tantas ventajas, existe un inconveniente principal: su precio. El coste de estos materiales es bastante elevado debido a la complejidad y el tiempo empleado para su fabricación.

1.3 Fabricación de laminados

Para el interés de este trabajo nos centraremos en la fabricación de laminados, es decir, materiales compuestos por varias capas unidireccionales de fibras largas orientadas en varias direcciones llamadas láminas como observamos en la Figura 4. Dependiendo de las cargas a las que vaya a solicitarse un laminado, las capas que lo conformen se orientarán de la manera más idónea para conseguir unas propiedades mecánicas adecuadas. Se ha de recalcar que no es la única manera en la que podemos encontrar los materiales compuestos tal y como se muestra en la Figura 3.

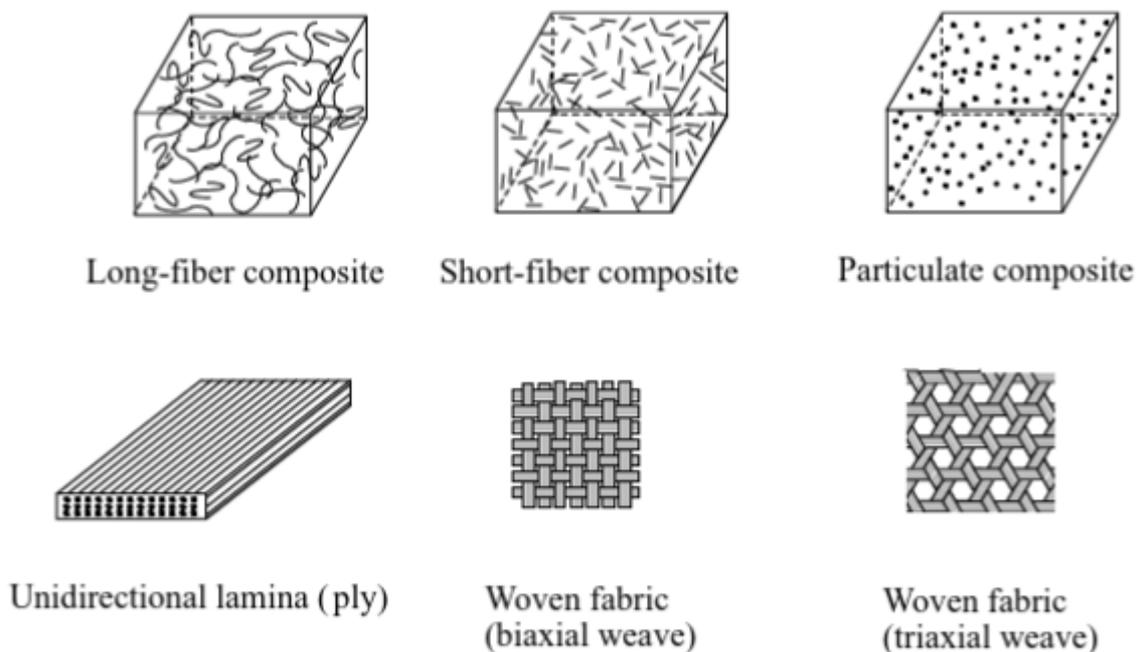


Figura 3: Distintos sistemas de materiales compuestos. [10]

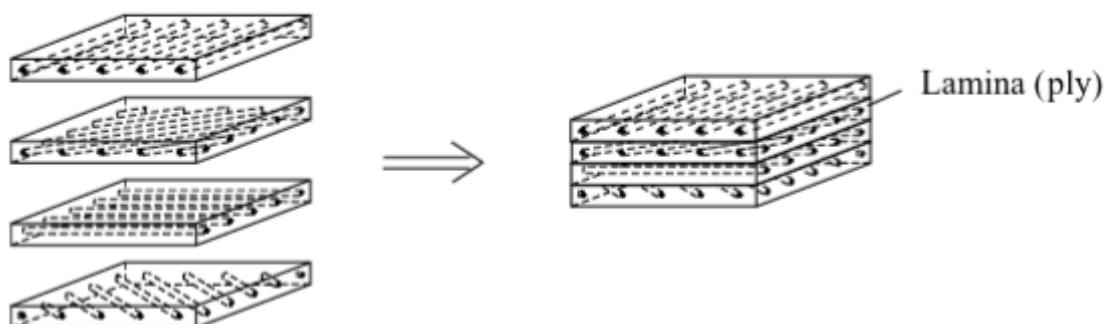


Figura 4: Composición de laminados. [10]

El proceso de fabricación al que han sido sometido las láminas utilizadas en este TFG se lleva a cabo mediante láminas ultradelgadas prefabricadas. Todo este proceso se ha de realizar en una sala limpia en la que se controle temperatura, humedad y presión de tal manera que el material compuesto no sufra deterioro ni contaminación.

En primer lugar, se ha de realizar el corte de las láminas prefabricadas del material compuesto con las medidas deseadas, para apilarlas y orientarlas de tal manera que se obtenga el laminado que se buscaba aplicando presión.

A continuación, se ha de tratar térmicamente el laminado en una máquina autoclave en la que se puede aplicar la presión y temperatura adecuada para curar los materiales.

Por último, se le pegan tacos en dos de los laterales de fibra de vidrio para proteger el laminado, tras lo cual se procede a cortar el laminado en las probetas con el tamaño deseado.

1.4 Motivación y objetivo del proyecto

Los materiales compuestos por resina epoxi y fibra de carbono han sido más que estudiados a lo largo de las últimas décadas, debido al uso exponencial que se le estaba dando para la fabricación de componentes estructurales dentro de la industria aeronáutica. Uno de los principales aspectos estudiados de este tipo de materiales ha sido la aparición y propagación de daño ante la aplicación de cargas estáticas y dinámicas.

Estas investigaciones se han llevado a cabo en laminados comúnmente utilizados dentro de la industria, compuestas de láminas de 120 μm o espesores mayores; sin embargo, existen otras láminas con una significativa reducción de espesor a las que se conocen como láminas ultradelgadas. Recientemente, la tecnología para la fabricación de estas ha mejorado significativamente y los estudios relacionados con su uso se han incrementado [3].

El Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) de la Universidad de Sevilla ha invertido multitud de recursos para ampliar el conocimiento sobre el fenómeno conocido como “scale effect” [3], el cual está relacionado con el uso de las láminas ultradelgadas. Dicho fenómeno implica un cambio en el mecanismo de aparición del daño en la capa más desfavorable de un laminado cross-ply, capa 90°. Estos estudios han sido realizados bajo el efecto de cargas estáticas y actualmente, se están realizando campañas experimentales para analizar el comportamiento de dichas láminas ultradelgadas ante carga cíclica con el fin de identificar si existe también un efecto escala.

Dentro de dicho ámbito, se enmarca este trabajo, el cual tiene como objetivo analizar el comportamiento a flexión de laminados cross-ply tras haber sido sometidos a fatiga, con el fin de identificar cómo afecta los daños acaecidos en estos laminados cuando son fabricados con láminas ultradelgadas.

Para lograr dicho objetivo, este proyecto se organiza en distintas etapas. En primer, lugar se lleva a cabo un exhaustivo análisis donde se caracteriza el daño a fatiga existente en la capa de 90° a distintos bloques de probetas cicladas a diversas cargas y número de ciclos. A continuación, dichas probetas se ensayan a flexión hasta la rotura, con el fin de relacionar el daño que presentan con las propiedades mecánicas fundamentales a flexión. Por último, se realizan los modelos numéricos en ANSYS de ambos laminados siguiendo los patrones de daño microscópico observados para cada caso.

2 ANÁLISIS DEL DAÑO A FATIGA EN LAMINADOS CROSS-PLY

En este capítulo se detallará el análisis del daño a fatiga en las probetas de laminados cross-ply previamente cicladas, prestando especial atención al daño producido en la capa de 90°. El contenido de este capítulo es altamente novedoso, ya que los estudios a fatiga en materiales compuestos por láminas ultradelgadas están desarrollándose actualmente, en los cuales el GERM está aportando información valiosa en cuanto a los mecanismos de daño se refiere.

El método de trabajo que se ha seguido para este apartado ha consistido en observar los daños en la capa de 90° de todas las probetas bajo el microscopio óptico, donde el tiempo de análisis por cada probeta ha sido de aproximadamente 2 horas. Durante estas observaciones también se ha analizado los daños existentes entre la capa de 0° y 90°, lo que se conoce como delaminaciones, y si existiese, la rotura de fibras en la capa de 0°.

En el apartado correspondiente se explicará en detalle cómo se ha realizado la observación de los daños localizados.

2.1 Equipo utilizado.

Para examinar el daño en el borde libre de cada probeta se utilizó un microscopio óptico binocular, modelo EPIPHOT 200, del fabricante *Nikon*TM junto a una cámara del fabricante *Lumenera Corporation*TM y un software llamado Perfect Image de *Clara Vision*TM.

Para conservar una imagen clara del daño en todas las probetas después de haberlas ensayado se utilizó el sistema de réplicas RepliSet del fabricante *Struers*TM.

2.2 Metodología de trabajo y resultados obtenidos.

Los estudios previos de este tipo de laminados ante carga cíclica están siendo realizados actualmente por el GERM, tal y como se recoge en [7].

En los siguientes subapartados se procederá a detallar las características de las probetas prístinas y ensayadas, especificando los ciclos de carga a los que han sido sometidas y los tipos de daño que se han localizado.

2.2.1 Características de las probetas prístinas y ensayadas.

Como hemos comentado previamente en este documento tenemos dos tipos de probetas bajo estudio. Por un lado, tenemos el laminado $[0_4|90_3|0_4]$ al que denominaremos CP450 y, por otro lado, el laminado $[0_4|90|0_4]$ al que denominaremos CP30. La nomenclatura de estos laminados se refiere a cross-ply (CP) y el número al gramaje de la capa de 90° (30 g/m² en el caso del laminado $[0_4|90|0_4]$ y 3x150 g/m² en el caso del laminado $[0_4|90_3|0_4]$).

La fabricación de las probetas no ha sido parte de este TFG, ya que estas son probetas obtenidas de laminados involucrados en proyectos de investigación que actualmente se están desarrollando en el GERM. Debido a ello, las probetas ya estaban fabricadas, lijadas y pulidas en un borde libre y ensayadas a fatiga bajo las condiciones de ensayo indicadas a continuación.

Debido a la gran cantidad de probetas que requerían ser ensayadas a un alto número de ciclos, el ciclado de estas probetas se encargó a la empresa *Element Materials Technology Seville, S.L.U.* Todas las probetas fueron sometidas a una carga sinusoidal de 5Hz con un ratio de carga de 0.1 (tracción-tracción). El nivel de carga y el número de ciclos aplicados a cada grupo de probetas se indicará posteriormente. La definición de los distintos niveles de carga se ha realizado en función de la fuerza última a tracción que ha resistido cada laminado

cross-ply, las cuales se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Fuerza última a tracción.

	CP450			CP30		
	Average	SD		Average	SD	
F_u (kN)	67.54	± 3.15	4.67 %	64.02	± 4.30	6.71 %

A continuación, en la Tabla 2 se listarán todas las probetas que se utilizan en este proyecto, mostrando sus dimensiones y las condiciones de ensayo a fatiga para cada caso de daño bajo estudio:

Tabla 2: Probetas utilizadas en el TFG y los ensayos a fatigas sometidos.

		Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Nivel de carga	Ciclos
CP450	PP_1	180	25.8	1.9	-	-
	PP_2	180	25.7	1.8		
	PP_3	180	25.4	1.9		
CP450	PD1_1	180	24.39	1.87	60% F_u	2.00E+04
	PD1_2	180	25.04	1.87		
	PD1_3	180	25.16	1.87		
CP30	PP_1	180	26.3	1.35	-	-
	PP_2	180	24.5	1.43		
	PP_3	180	25.1	1.33		
CP30	PD1_1	180	22.98	1.42	30% F_u	1.00E+06
	PD1_2	180	22.79	1.42		
	PD1_3	180	24.52	1.42		
CP30	PD2_1	180	23.16	1.42	60% F_u	1.00E+05
	PD2_2	180	24.04	1.42		
	PD2_3	180	24.37	1.42		
CP30	PD3_1	180	22.95	1.42	60% F_u	1.00E+06
	PD3_2	180	24.44	1.42		
	PD3_3	180	24.23	1.42		

La nomenclatura de las probetas PP hace referencia a “Probeta Prístina” y las probetas PD1, PD2 y PD3 hacen referencia a “Probeta con Daño 1, 2 y 3”

2.2.2 Tipología de daño.

A continuación, se presentarán los principales tipos de daño que podemos encontrar en estos laminados sometidos a fatiga con el fin de entender adecuadamente los resultados mostrados tras las distintas revisiones microscópicas de las probetas ensayadas. Esta clasificación de daños se recoge en [7].

- I-CD (Isolated-Continued Debonds): Despegues entre fibra y matriz que forman un camino, los cuales generalmente están aislados o se encuentran en fibras adyacentes, sin llegar a mostrar *kinking*, tal y como recoge la Figura 5.

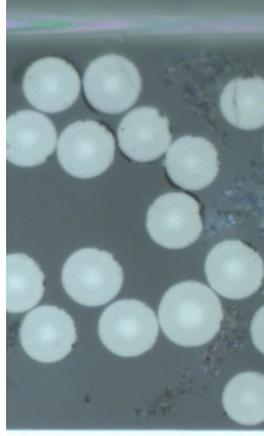


Figura 5: Isolated-Continued Debonds.

- GTD (Generalised Transverse Damage): Despegues fibra/matriz que siguen un camino entre ambas interfases 0/90 sin llegar a mostrar *kinking* tal y como se observa en la Figura 6.

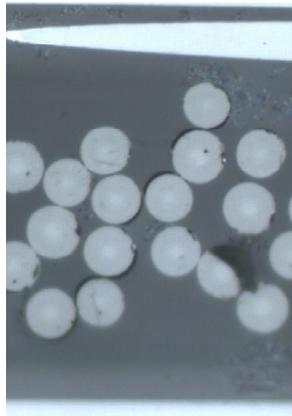


Figura 6: Generalised Transverse Damage.

- GTDk (Generalised Transverse Damage with Kinking): GTD cuyos despegues muestran *kinking* tal y como se muestra en la Figura 7.

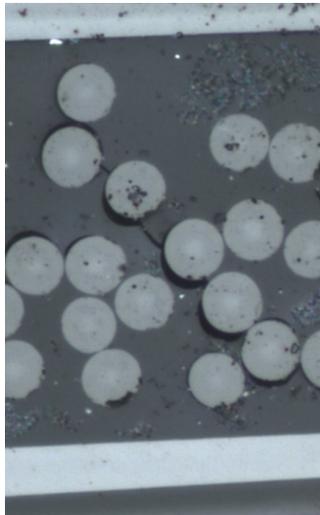


Figura 7: Generalised Transverse Damage with Kinking.

- TC (Transverse crack): Grieta que atraviesa de manera transversal la capa de 90° , las cuales han aparecido en CP450 al contar con una capa de 90° de espesor convencional, tal y como aparece en la Figura 8.

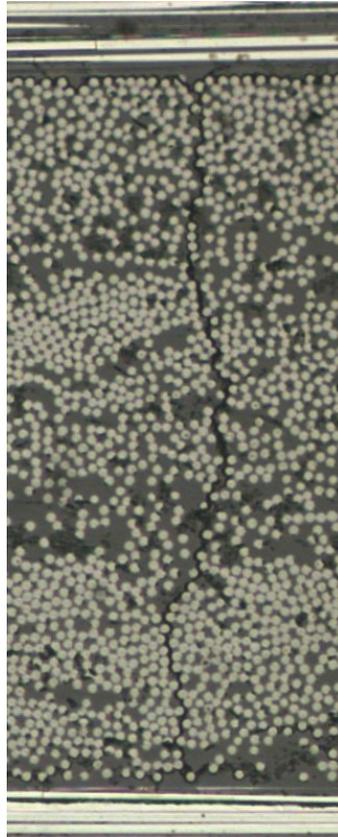


Figura 8: Transverse crack.

- LD (Longitudinal Debonds): Camino de despegues longitudinales a la aplicación de la carga que aparecen indistintamente en cualquier parte de la capa de 90° , tal y como se recoge en la Figura 9.

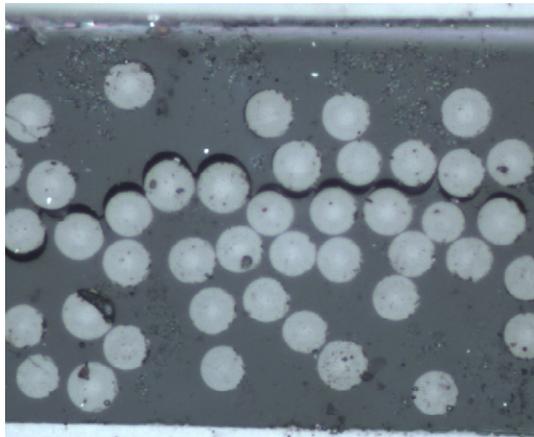


Figura 9: Longitudinal Debond.

- DT (Delamination Trace): Despegues fibra/matriz longitudinales inducidos por GTD o TC en una interfase $0/90$, tal y como aparece en la Figura 10.

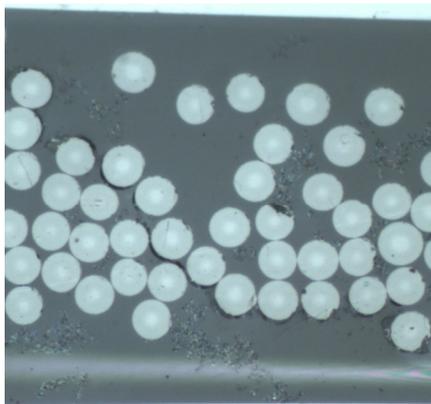


Figura 10: Delamination Trace.

- DL (Delamination): Separación de la interfase 0/90, tal y como se observa en la Figura 11.

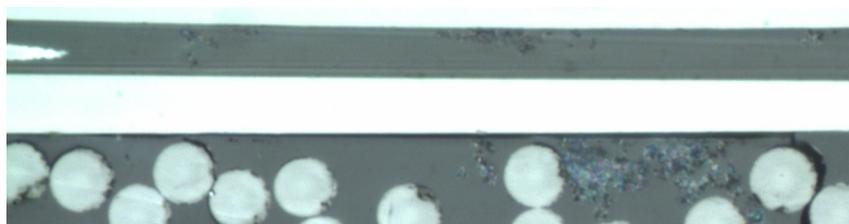


Figura 11: Figura 11.

2.2.3 Conteo de daños tras ensayos a fatiga

Los datos que se recogen de esta etapa del proyecto ayudan a dimensionar el patrón de daño que tienen las probetas de cada caso de estudio en función de las condiciones a fatiga a las que han sido sometidas. Esta etapa del proyecto es fundamental, ya que a partir de la definición de estos patrones de daño se podrá evaluar el comportamiento a flexión residual de cada caso de estudio.

La manera en la que se recogen los datos y se contabilizan es la siguiente: el perfil de todas las probetas se analiza individualmente en el microscopio óptico y se van contabilizando el número de grietas existentes de cada tipo en una hoja Excel.

2.2.3.1 Resultados de las probetas CP450

Para este tipo de laminado se ensayó un bloque de tres probetas (CP450 PD1) que se someten al 60% de F_u durante $2.00E+4$ ciclos. Este tipo de laminado no usa láminas ultradelgadas y están bastante más estudiados, por lo que había una base sobre la que trabajar y se podía prever los resultados obtenidos.

Este tipo de laminado, cuando son sometidos a este tipo de ensayos a fatiga, normalmente presentan un patrón de daño el cual se encuentra en las probetas analizadas bajo el microscopio. Este patrón consiste en multitud de grietas transversales (TC) que aparecen de manera secuencial, acompañadas de grandes delaminaciones (DL) y algunas grietas longitudinales (LD). Dicho patrón de daño puede ser observado en la Figura 12.

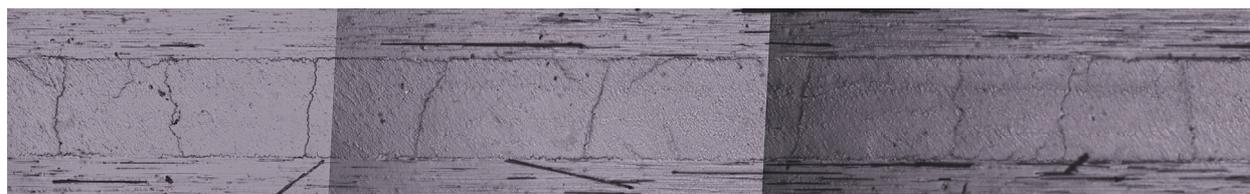


Figura 12: Fotocomposición de una réplica de la probeta CP450 PD1_2.

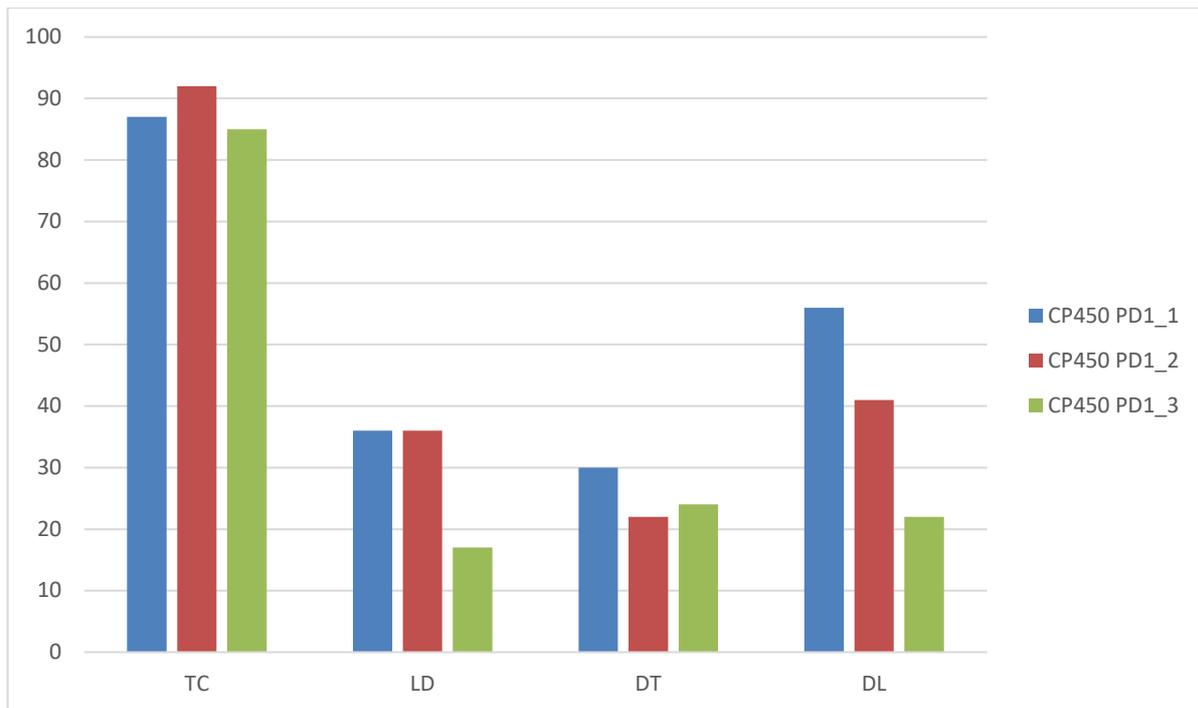


Gráfico 1: Acumulación de daño en CP450 PD1.

En el Gráfico 1 podemos ver en detalle una representación cuantitativa del daño que presenta cada una de las probetas de este bloque (CP450 PD1) tras sus correspondientes ensayos a fatiga en la capa de 90° y en las interfases.

Tras el análisis del daño existente en las capas de 0°, se determina que las fibras que componen dichas capas se encuentran ciertas roturas significativas como podemos apreciar en la Figura 13.

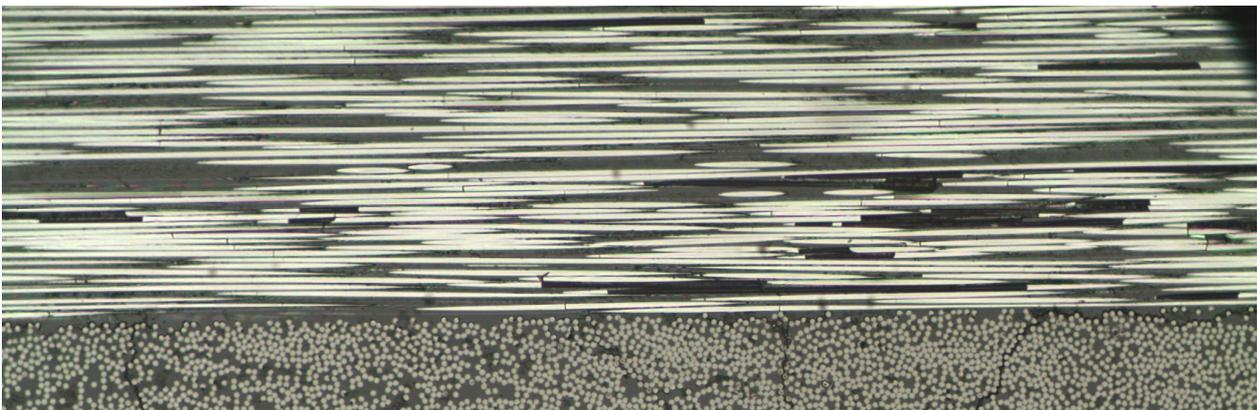


Figura 13: Daño en la capa de 0° de la probeta CP450 PD1_2.

2.2.3.2 Resultados de las probetas CP30

Como ya se ha comentado anteriormente, este laminado usa para la capa de 90° una lámina ultradelgada de 30g/m² y hay muy poca experiencia previa en estudios con dichos laminados. Este laminado en concreto es el que le da sentido a este trabajo, cuyos resultados serán los que tienen verdadero valor a la hora de compararlos con el resto y con los resultados de los ensayos a flexión que se realizarán más adelante.

Para este laminado se ensayan 3 bloques de probetas (CP30 PD1, CP30 PD2, CP30 PD3) perteneciendo tres probetas a cada uno.

- Probetas sometidas a 30% de F_u a $1.00E+6$ ciclos (CP30 PD1):

Aunque se sometan a un número alto de ciclos, la carga media aplicada a este bloque de probetas es relativamente baja, por lo tanto, las observaciones microscópicas muestran un bajo nivel de daño. Bajo el microscopio se observa que prácticamente la totalidad del daño en esta probeta se encuentra en modo de despegues aislados (I-CD), tal y como se refleja en la Figura 14.

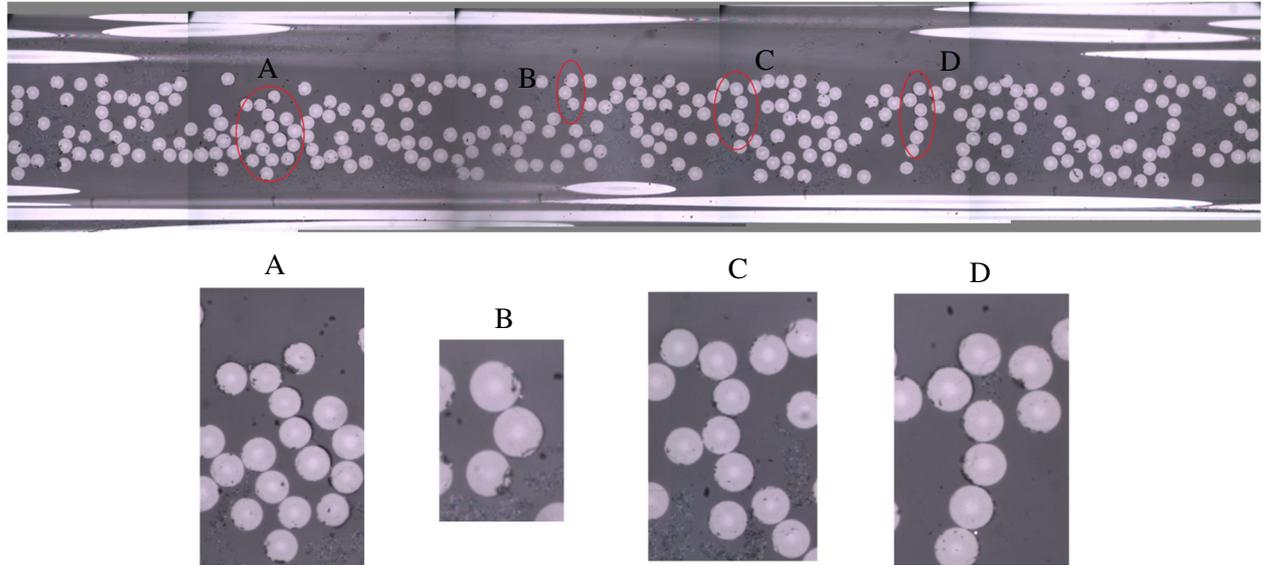


Figura 14: Fotocomposición de la probeta CP30 PD1_3 con detalles de I-CD.

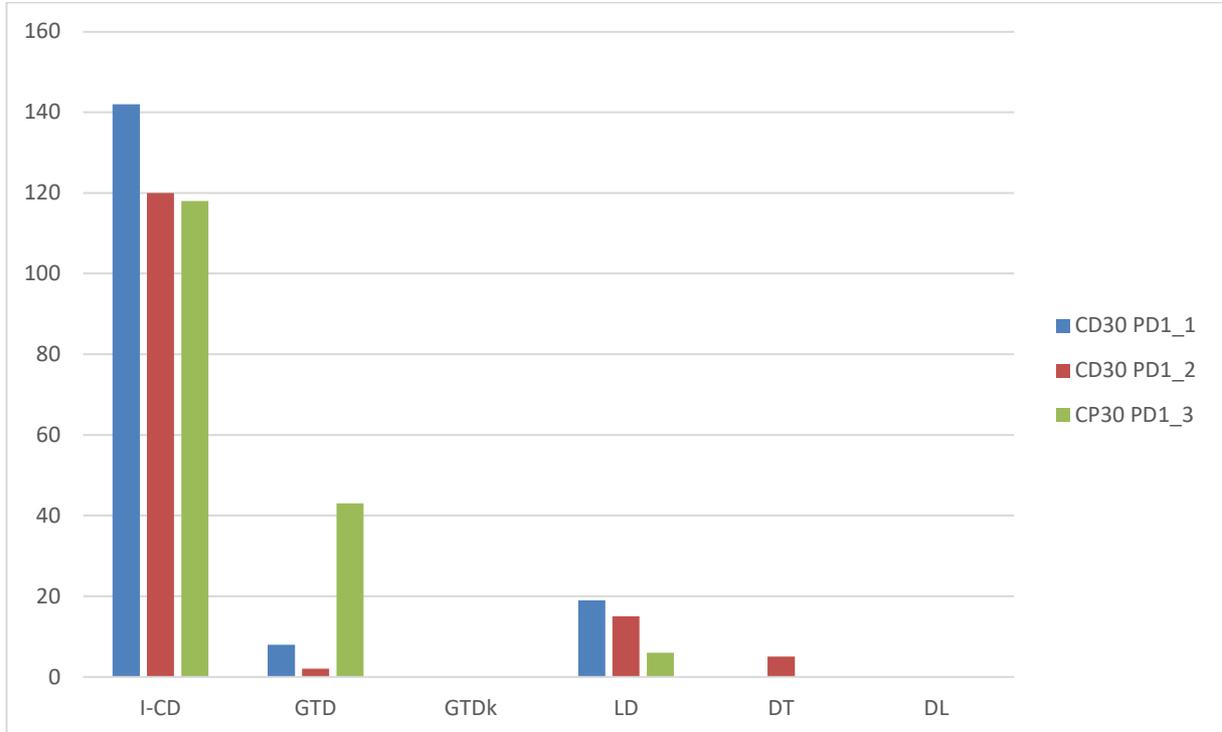


Gráfico 2: Acumulación de daño en CP30 PD1.

En el Gráfico 2 podemos ver en detalle una representación cuantitativa del daño que presentaba cada una de las probetas de este bloque CP30 PD1 con una cantidad prácticamente nula de todas las grietas excepto de las I-CD.

El daño que presentan las fibras pertenecientes a las capas de 0° de este bloque de probetas es casi inexistente, tal y como se puede apreciar en la Figura 15.

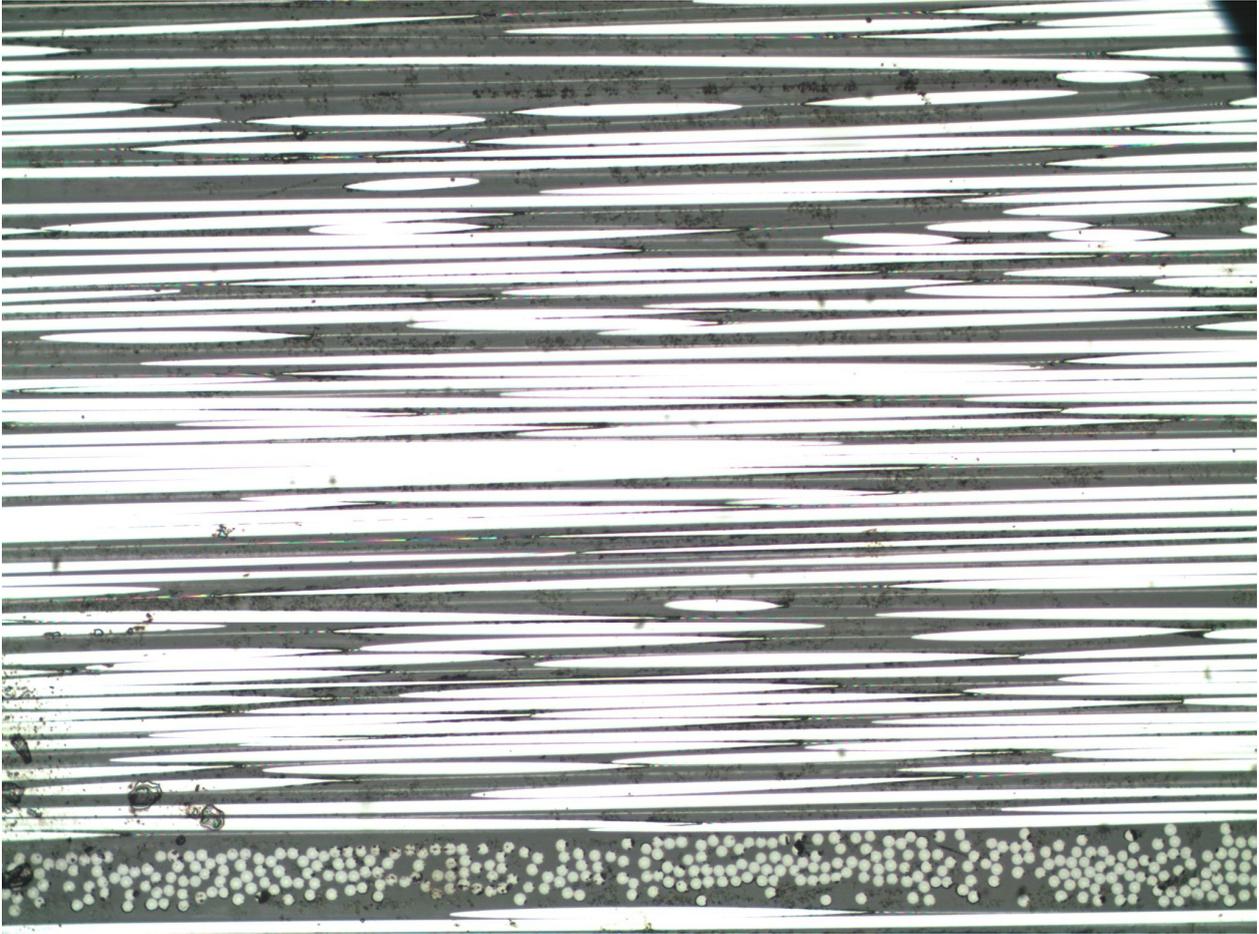


Figura 15: Daño presente en las capas de 0° del bloque CP30 PD1.

- Probetas sometidas a 60% de F_u a $1.00E+5$ ciclos (CP30 PD2):

En contraste con los resultados obtenidos en el conjunto de probetas anterior, estas están sometidas a una carga media considerablemente alta y a un número de ciclos elevado. Es por ello por lo que, aunque no se tenga mucha experiencia previa en estos laminados podemos, esperar densidades de daño mayores que en el apartado anterior.

Efectivamente, los resultados que se obtienen del análisis del daño en este bloque muestran un considerable aumento en todos los tipos de daño, en el que destacan la gran cantidad de GTD y LD y las pocas delaminaciones que aparecen.

Algo sorprendente es la aparición de una gran cantidad de LD con una extensión considerable y con bastante apertura que en un alto porcentaje acaban o empiezan con un GTD o GTDk.

En la Figura 16 podemos observar el patrón de daño de este bloque de probetas ensayadas, en el cual se desarrollan una gran cantidad de grietas longitudinales (LD), algunas de ellas de gran tamaño, a lo largo de toda la probeta y una gran cantidad de los GTD y GTDk de las que parten.

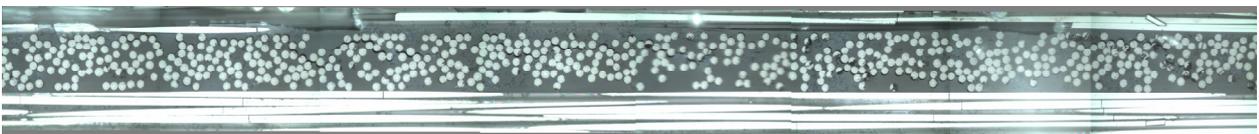


Figura 16: Fotocomposición de la probeta CP30 PD2_1.

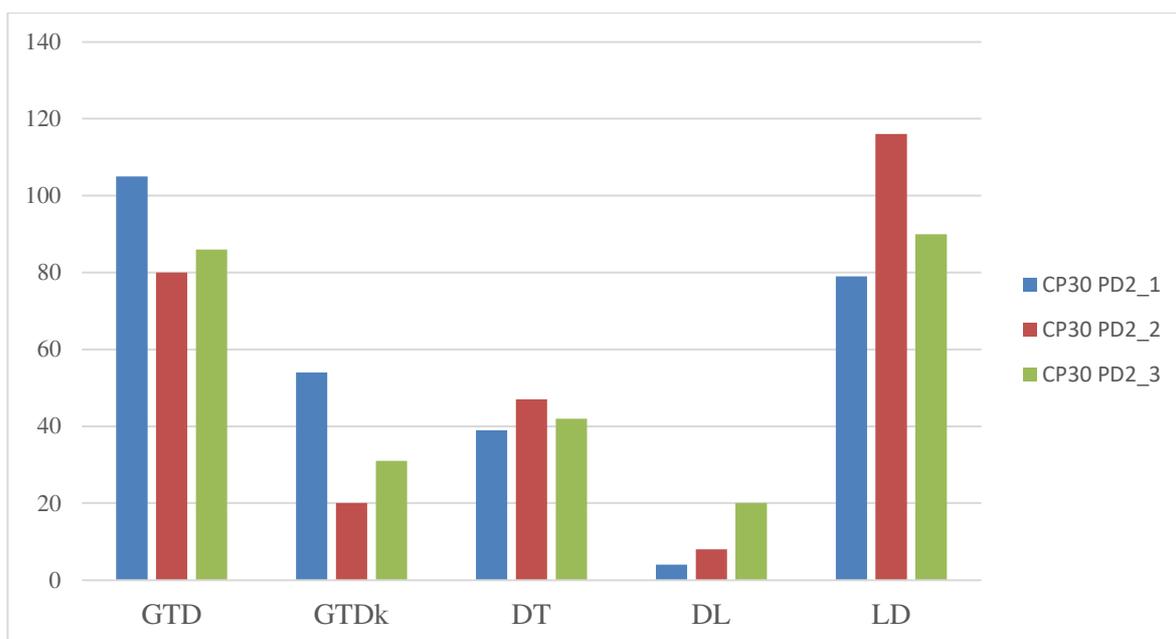


Gráfico 3: Daño acumulado de CP30 PD2.

El daño que presenta cada una de las probetas de este bloque queda representado de manera cuantitativa en el Gráfico 3.

La cantidad de fibras pertenecientes a las capas de 0° de este bloque aumenta considerablemente respecto al bloque CP30 PD1, tal y como observamos en la Figura 17.



Figura 17: Daño presente en las capas de 0° del bloque CP30 PD2.

- Probetas sometidas a 60% de F_u a $1.00E+6$ ciclos (CP30 PD3):

Este bloque de probetas está ensayado a la misma carga media que el bloque anterior, sin embargo, está sometido a un número de ciclos superior, por lo que se espera encontrar unas acumulaciones de daño superior al resto de bloques analizados hasta el momento.

A la hora de analizar las probetas en el microscopio se observa a simple vista que el patrón de daño es muy similar al bloque anterior de 60% de F_u a $1.00E+5$ ciclos (CP30 PD2) y esto está respaldado por la similitud en las cantidades de cada tipo de daño transversal. Sin embargo, se pueden apreciar tres detalles que confirman que el daño acumulado es mayor en este caso.

En primer lugar, se destaca la aparición de delaminaciones, como en la Figura 18, que en el bloque anterior eran casi inexistentes. El siguiente aspecto diferenciador es que el despegue de la mayoría de las grietas es muy superior al bloque anterior, lo que puede implicar una mayor evolución del daño. En último lugar, se puede apreciar como aparecen cambios de plano en muchas de estas caminos de despegues longitudinales, LD, como se puede apreciar en la Figura 20 donde apreciamos el cambio de plano que provoca los desenfoques y en la Figura 19. La comparativa de este bloque de probetas con el anterior la podemos encontrar en el Gráfico 4 para poder estudiar la manera en la que se ha desarrollado el daño.

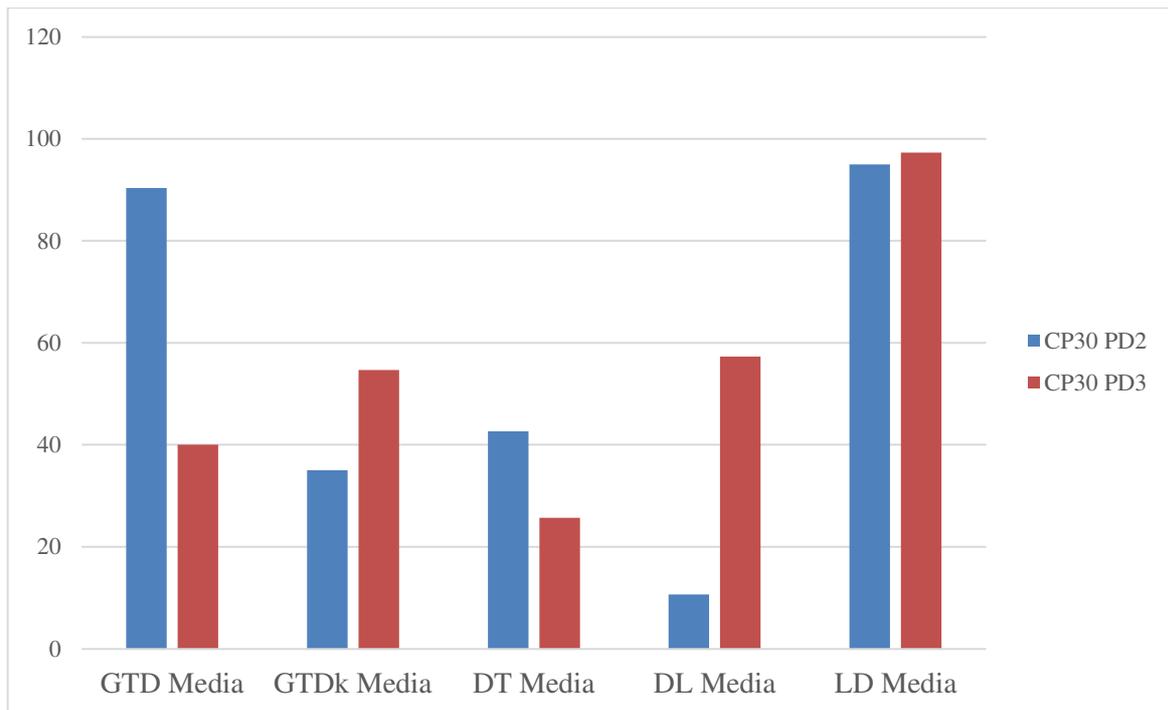


Gráfico 4: Comparativa del daño entre los bloques CP30 PD2 y CP30 PD3.

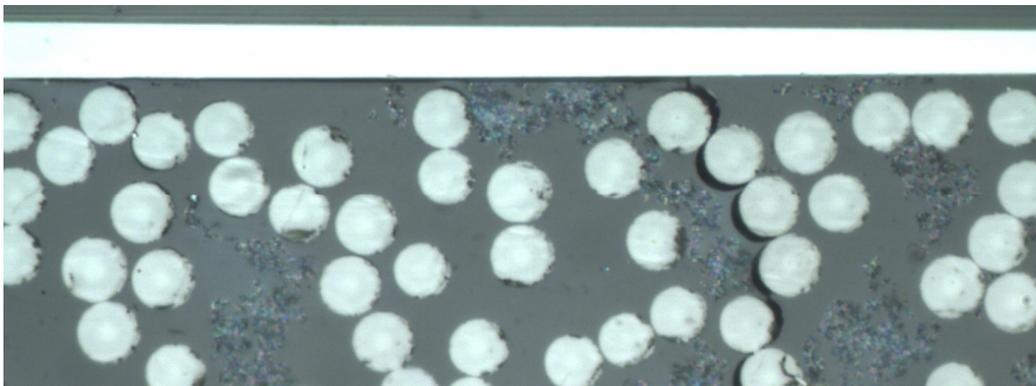


Figura 18: Ejemplo de delaminación en la probeta CP30 PD3_3.

Esto hace llegar a la conclusión, que, llegado a ciertos ciclos, no se sigue iniciando nuevos daños, sino que los existentes evolucionan separando más los LD, lo cual lleva a pensar que se ha propagado haciendo que aparezcan cambios de planos entre las 2 partes separadas de la capa de 90° por los LD existentes.

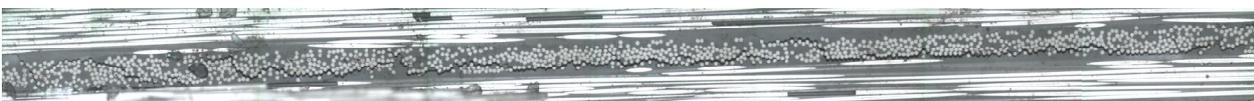


Figura 19: Fotocomposición de la probeta CP30 PD3_1.

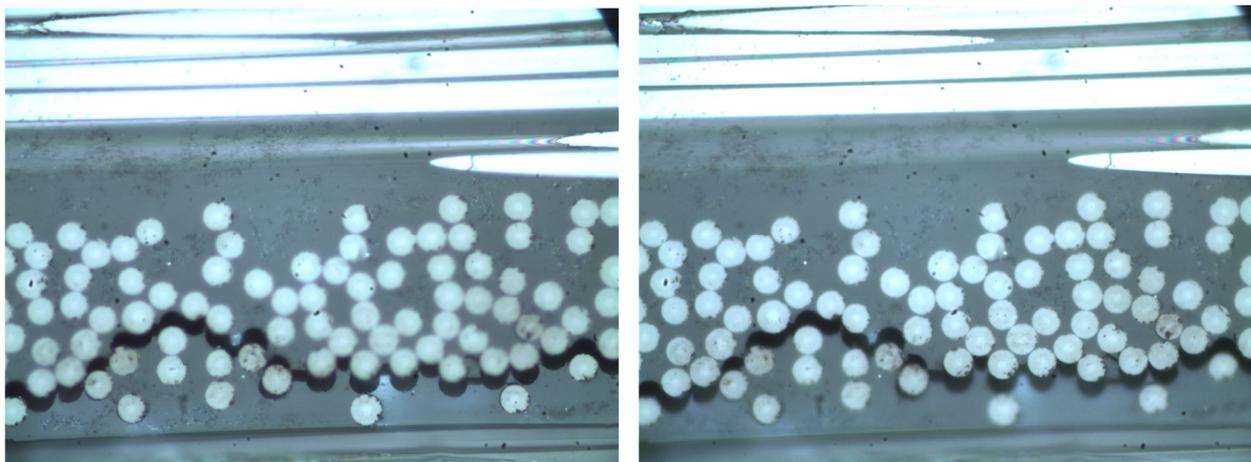


Figura 20: Ejemplo de grieta horizontal en la que aparece un cambio de plano.

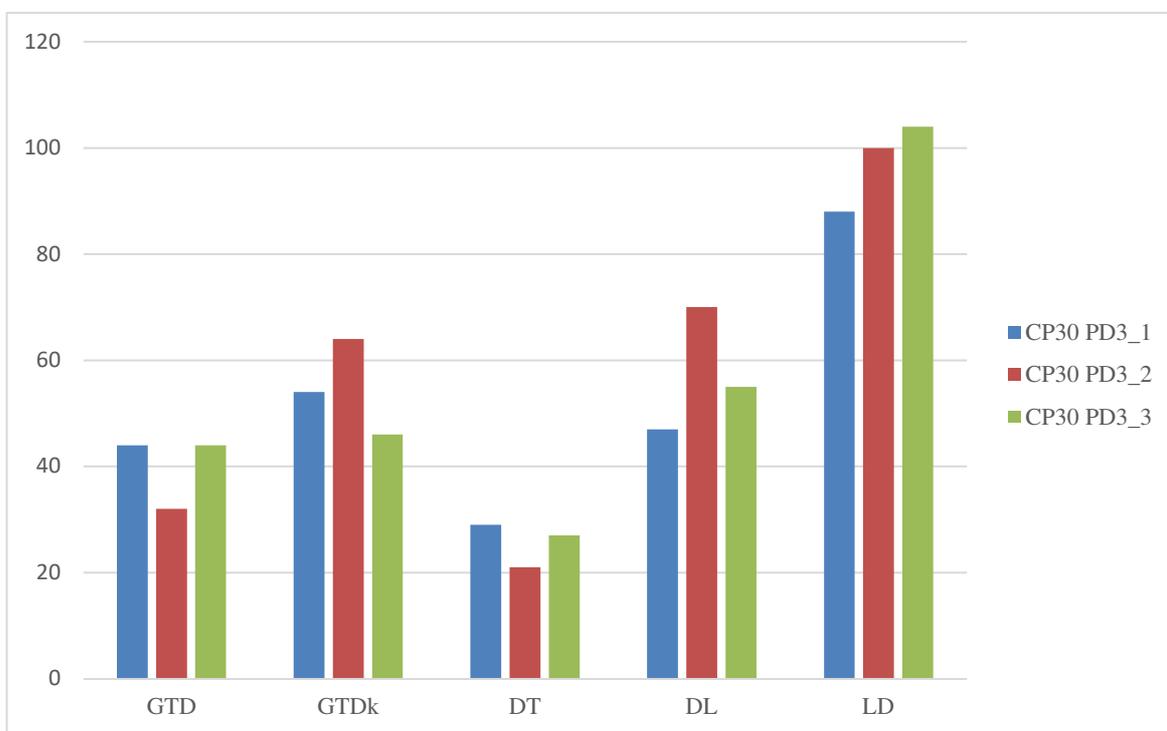


Gráfico 5: Daño acumulado en CP30 PD3.

En el Gráfico 5 se puede ver en detalle una representación cuantitativa del daño que presentan cada una de las probetas de este bloque CP30 PD3.

El número de fibras que se encuentran rotas dentro de las capas de 0° de este bloque es elevado, tal y como se aprecia en la Figura 21,



Figura 21: Daño presente en las capas de 0° del bloque CP30 PD3.

3 ENSAYO A FLEXIÓN

El objetivo de esta sección consiste en la obtención de la rigidez a flexión de todas las probetas ensayadas a fatiga con el fin de poder relacionar su comportamiento a flexión con el daño que presentan y así, corroborar la disminución residual de cada bloque de probetas ensayadas cíclicamente con probetas prístinas.

3.1 Equipo y materiales utilizados

Para llevar a cabo la preparación de las probetas previas al ensayo de flexión se han utilizado los siguientes materiales y herramientas:

- Pinzas
- Lija
- Cables
- Pines de conexión
- Adhesivo Z-70
- Iso-propanol
- Cinta adhesiva
- Estaño para soldar
- Soldador de estaño
- Galgas extensométricas
- Pie de rey
- Medidor de alturas
- Gramil
- Máquina de ensayos universal
- Útiles para flexión en cuatro puntos
- Juego de llaves Allen

3.2 Preparación de las probetas

Previo al ensayo a flexión, las probetas requieren de cierta preparación para poder obtener las deformaciones mediante una galga extensométrica colocada en la superficie lateral a tracción de la probeta.

Para ello, en primer lugar, la cara en la que vaya a ser pegada la galga extensométrica requiere un minucioso lijado. A continuación, se procede a marcar la probeta con el fin de adherir la galga lo más centrada posible y en la dirección longitudinal.

Tras una previa limpieza de la zona de trabajo y de las probetas con iso-propanol, llega el paso más delicado de este proceso, en el que empezamos a manipular la galga ya que la mínima contaminación bastaría para que esta no adhiriera de la forma correcta a la probeta. Centramos la galga con la ayuda de unas pinzas en las marcas realizadas en el paso anterior y la fijaremos a la probeta de forma provisional con cinta adhesiva para facilitar el pegado de la galga a la probeta. Este pegado se llevará a cabo con el adhesivo Z-70 y aplicando presión sobre

esta durante un minuto tras el cual se podrá retirar la cinta adhesiva.

Una vez está la galga adherida a la probeta se preparan los cables, que son estañados y soldados a los pines de las galgas.

Tras todo este proceso se comprueba mediante un voltímetro que las conexiones están correctas.

3.3 Preparación de útiles

El objetivo de este ensayo consiste en someter a flexión en cuatro puntos todas las probetas hasta su fractura, siguiendo la norma a flexión UNE 14125 – 1999 [2].

Esta norma especifica de manera clara las posiciones de los cuatro rodillos (dos de apoyo y dos de aplicación de carga), el radio de cada rodillo y la velocidad de ensayo, que dependen del material a ensayar y de la geometría de la probeta, tal y como se especifica en la Figura 22, siendo los valores de ensayo finales los de la Tabla 3. Por ello, los útiles de ensayo se tienen que preparar para cada laminado debido a la diferencia de espesores que tienen tal y como observamos en la Figura 23.

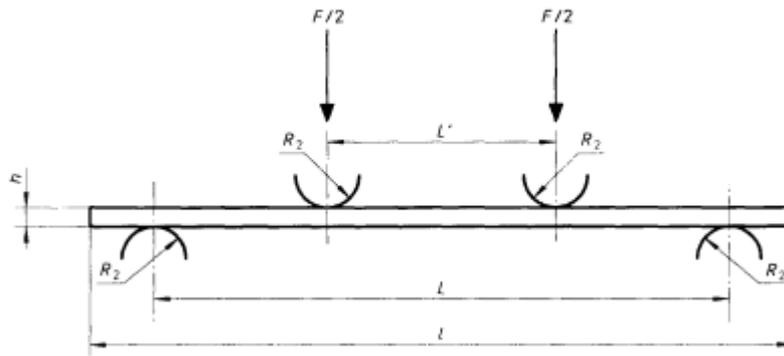


Figura 22: Esquema de Ensayo a flexión en cuatro puntos [2].

Tabla 3: Valores de los útiles para los ensayos a flexión a 4 puntos.

	L (mm)	L' (mm)	R ₂ (mm)
CP450	84.1	28.1	2
CP30	60.5	21.3	2



Figura 23: Útiles del ensayo a flexión con los datos especificados en la tabla [3].

3.4 Resultados obtenidos

Para cada ensayo se genera un archivo .txt en el que se registran la posición de los puntos de aplicación de carga, que es la misma que la de la mordaza superior, el sumatorio de fuerzas aplicadas en estos puntos y las deformaciones que sufre la galga extensométrica para cada instante de tiempo. Con estos tres datos, según la norma, podemos obtener las propiedades mecánicas necesarias que precisamos como la rigidez de la probeta a flexión y la tensión de rotura a flexión; sin embargo, esta norma [2] solamente aplica para materiales homogéneos equivalentes ortótropos en cuya sección únicamente exista una tipología de lámina. Las probetas utilizadas en este trabajo pertenecen a laminados cross-ply, lo que hace que las propiedades del material no sean constantes a lo largo de su sección y no podamos aplicar dicha norma.

Para salvar esta cuestión se decide evaluar una constante elástica K que representa la pendiente de la fuerza aplicada por la máquina (F) con respecto al desplazamiento vertical que esta sufre (δ) tal y como se refleja en la Figura 24.

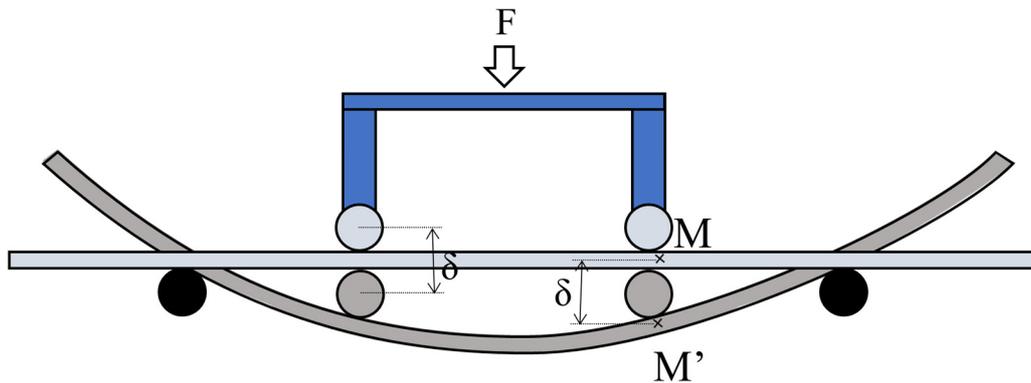


Figura 24: Esquema del ensayo a flexión.

Tal como especifica la norma UNE 14125 – 1999 [2], la rigidez, E , se ha de calcular entre los valores de 0.0005 y 0.0025 deformaciones, por lo que se sigue el mismo criterio para calcular la constante K . El único inconveniente es que no hay ninguna metodología normalizada para realizar este cálculo, por lo que se decide calcular dicho valor mediante la pendiente de la línea de tendencia entre los valores de 0.0005 y 0.0025 deformaciones. Esta rigidez estructural (K) es, de forma indirecta, una medida del daño interno del material. A mayor daño, menos rigidez se observará, y se pretende analizar si el daño que se introduce en la probeta se materializa macroscópicamente es un comportamiento más flexible del material.

Por último, únicamente por interés académico, se obtienen y comparan la rigidez y tensión a flexión de todas las probetas siguiendo la norma UNE 14125 – 1999 [2], con total conciencia de que esto no es un fiel reflejo de la realidad.

3.4.1 Resultados del laminado CP450

Dentro de las probetas fabricadas con el laminado CP450 se han ensayado dos bloques de probetas:

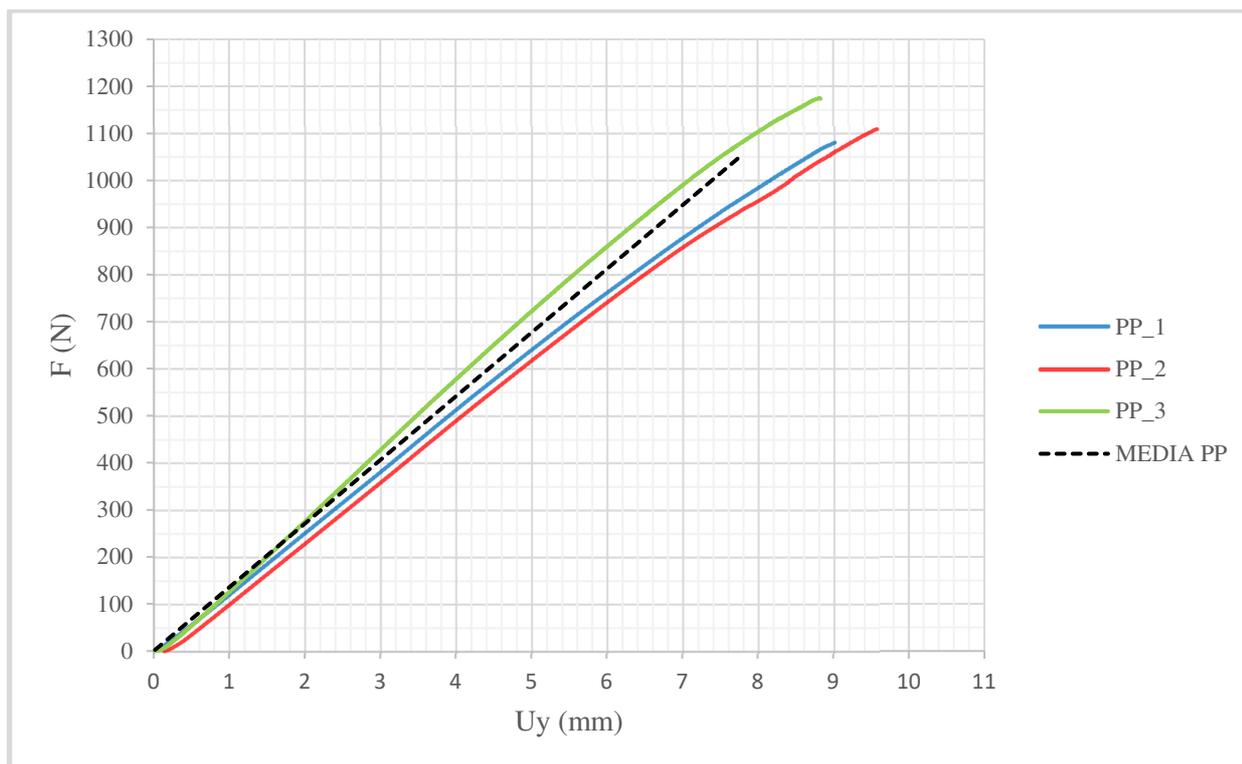
- Probetas CP450 PP: Probetas de laminado [0₄|90₃|0₄] prístinas.
- Probetas CP450 PD1: Probetas de laminado [0₄|90₃|0₄] ensayadas al 60% de F_u a 2.00+E6 ciclos.

3.4.1.1 Probetas CP450 PP

En este bloque de probetas se han ensayado tres probetas prístinas, CP450 PP_1, CP450 PP_2 y CP450 PP_3. Los resultados de este ensayo, que se muestran en la Tabla 4 y en el Gráfico 6, servirán como referencia para comparar con el bloque de probetas cicladas a fatiga.

Tabla 4: Resultados del ensayo a flexión de CP450 PP.

		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP450 - PP	PP_1	88.761	975.851	129.261
	PP_2	88.584	1015.728	128.888
	PP_3	99.584	1107.722	147.702
	Valores medios	92.310	1033.100	135.28
	Desviación	6.3	67.63	10.756
	Dispersión	6.83%	6.55%	7.95%

Gráfico 6: Relación Fuerza – δ del bloque CP450 PP.

3.4.1.2 Probetas CP450 PD1

Este bloque de ensayos está compuesto por tres probetas ensayadas al 60% de F_u a $2.00+E6$ ciclos (CP450 PD1_1, CP450 PD1_2, CP450 PD1_3). Los resultados de este bloque de ensayos se pueden observar en la Tabla 5 y en el Gráfico 7.

Tabla 5: Resultados del ensayo a flexión de CP450 PD1.

		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP450 – PD1	PD1_1	88.982	1024.033	116.381
	PD1_2	89.501	1039.875	118.658
	PD1_3	84.912	998.323	111.699
	Valores medios	87.798	1020.743	115.579
	Desviación	2.51	20.97	3.55
	Dispersión	2.86%	2.05%	3.07%

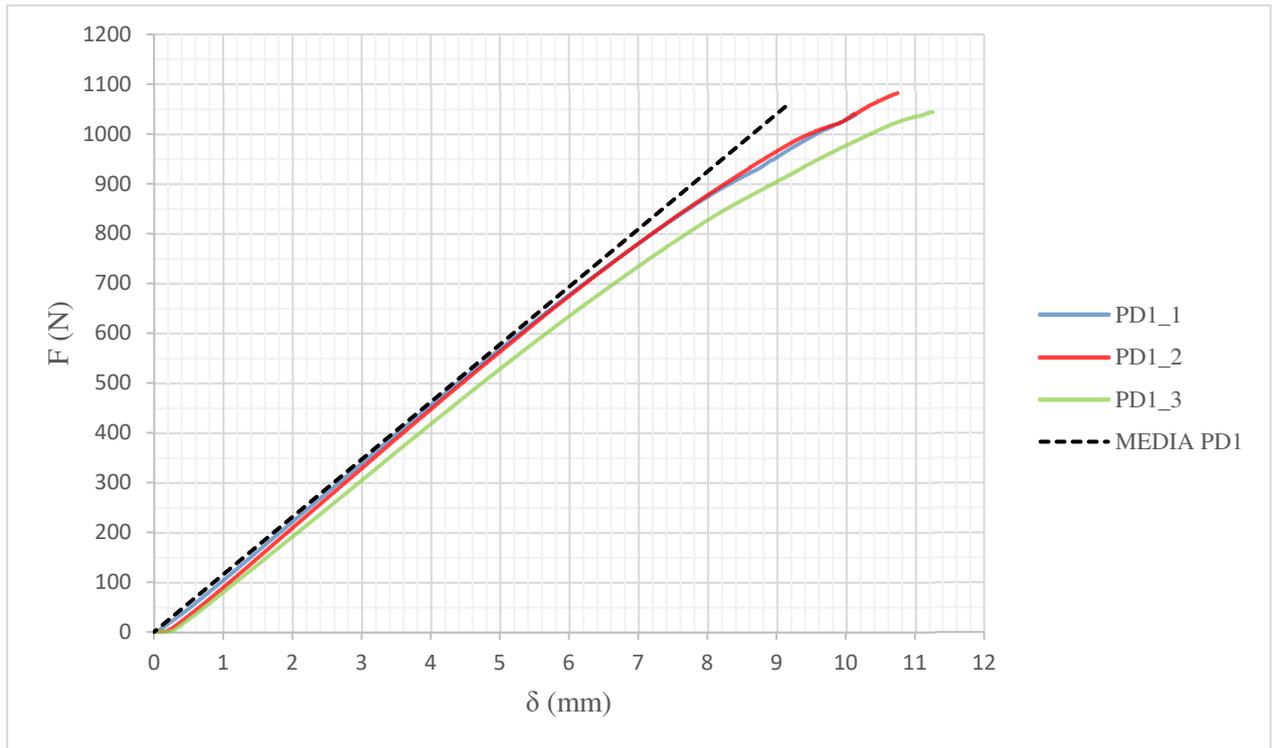


Gráfico 7: Relación Fuerza - δ del bloque CP450 PD1.

3.4.1.3 Comparación del laminado CP450

Los resultados que han sido obtenidos en los dos bloques anteriores por separado no aportan información relevante hasta que no las comparamos entre sí.

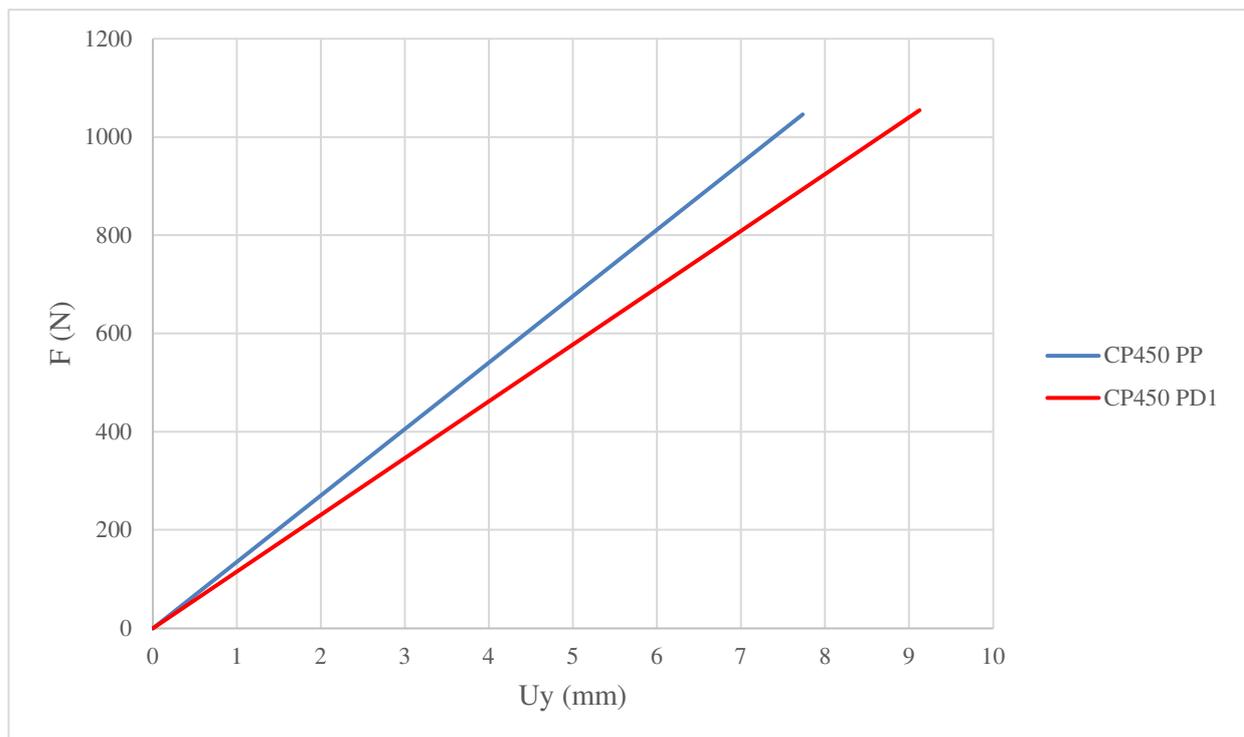


Gráfico 8: Comparación de resultados del laminado CP450.

Tabla 6: Resumen de resultados del laminado CP450.

	Media	E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP450	PP	92.31 ± 6.3	1033.1 ± 67.63	135.28 ± 10.8
	PD1	87.798 ± 2.5	1020.743 ± 21.0	115.579 ± 3.5

En el Gráfico 8 se representa la curva F- δ media de cada bloque, de tal modo que podamos comparar de manera clara ambos conjuntos de probetas.

Como podemos observar en la Tabla 6, la rigidez del sistema, K, es menor para el conjunto de probetas cicladas, lo cual implica que el laminado dañado presenta una pérdida de rigidez de aproximadamente un 14.5%.

Otro valor a tener en cuenta es la fuerza de rotura media de cada bloque, el cual no sigue la misma tendencia que la constante K, siendo el valor para las probetas cicladas ligeramente mayor (1054.575 N frente a 1046.2365 N), lo que supone un aumento del 0,8%.

Por último, la flecha máxima del bloque dañado es de 10.5 mm frente a los 9.5 mm del bloque sin daño alguno. Esta flecha es calculada mediante la norma a flexión [2], por lo que no es un valor totalmente cierto al igual que E_f y σ_f .

Aunque la rigidez y resistencia calculada no sean los valores reales de esta probeta, tal y como se ha explicado, se analiza como varían dichos valores. Para el caso de la E_f observamos una disminución de un 4.9% en las probetas dañadas y del 1.2% en la σ_f de las probetas dañadas.

3.4.2 Resultados del laminado CP30

Dentro de las probetas fabricadas con el laminado CP30 tenemos cuatro bloques de probetas ensayadas:

- Probetas CP30 PP: Probetas de laminado $[0_4|90|0_4]$ sin ningún tipo de daño previo.
- Probetas CP30 PD1: Probetas de laminado $[0_4|90|0_4]$ ensayadas al 30% de F_u a 1.00E+6 ciclos.
- Probetas CP30 PD2: Probetas de laminado $[0_4|90|0_4]$ ensayadas al 60% de F_u a 1.00E+5 ciclos.
- Probetas CP30 PD3: Probetas de laminado $[0_4|90|0_4]$ ensayadas al 60% de F_u a 1.00E+6 ciclos.

3.4.2.1 Probetas CP30 PP

Este bloque está compuesto por tres probetas sin daño alguno con el objetivo de poder tener una referencia con la que comparar el resto de bloques (CP30 PP_1, CP30 PP_2, CP30 PP_3). Los resultados obtenidos para este bloque de ensayo se pueden observar en la Tabla 7 y en el Gráfico 9.

Tabla 7: Resultados del ensayo a flexión de CP30 PP.

		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP30 – PP	PP_1	98.341	1219.904	149.374
	PP_2	94.008	1246.241	161.562
	PP_3	96.105	1210.018	137.845
	Valores medios	96.151	1225.388	149.593
	Desviación	2.17	18.72	11.86
	Dispersión	2.25%	1.53%	7.93%

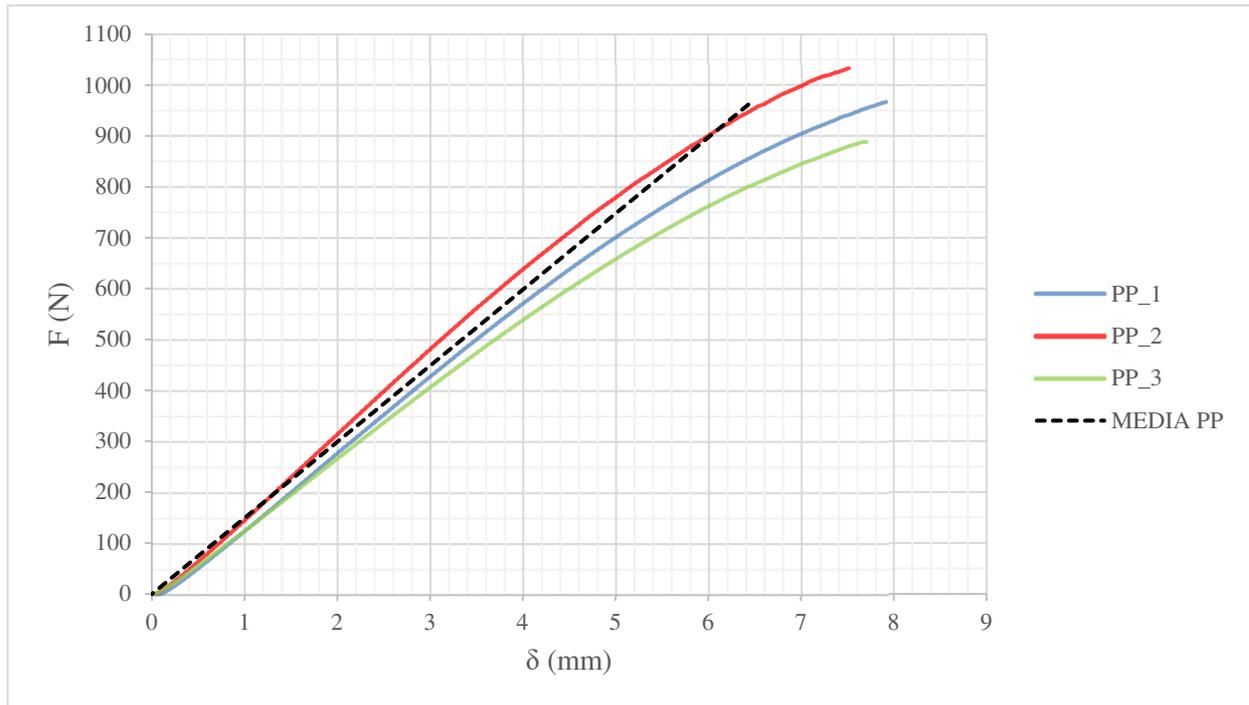


Gráfico 9: Relación F - δ del bloque CP30 PP.

En el Gráfico 9 se muestran representadas las curvas F- δ de las tres probetas ensayadas y una recta cuya pendiente es el valor medio de la K.

3.4.2.2 Probetas CP30 PD1

El bloque de ensayos CP30 PD1 se compone de tres probetas sometidas a 1.00E+6 ciclos al 30% de F_u . Los resultados de dichos ensayos se muestran en la Tabla 8 y en el Gráfico 10.

Tabla 8: Resultados del ensayo a flexión CP30 PD1.

		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP30 - PD1	PD1_1	76.797	942.192	100.345
	PD1_2	81.556	1028.055	105.682
	PD1_3	81.991	1052.514	117.293
	Valores medios	80.115	1007.587	107.773
	Desviación	2.88	57.94	8.67
	Dispersión	3.60%	5.75%	8.04%

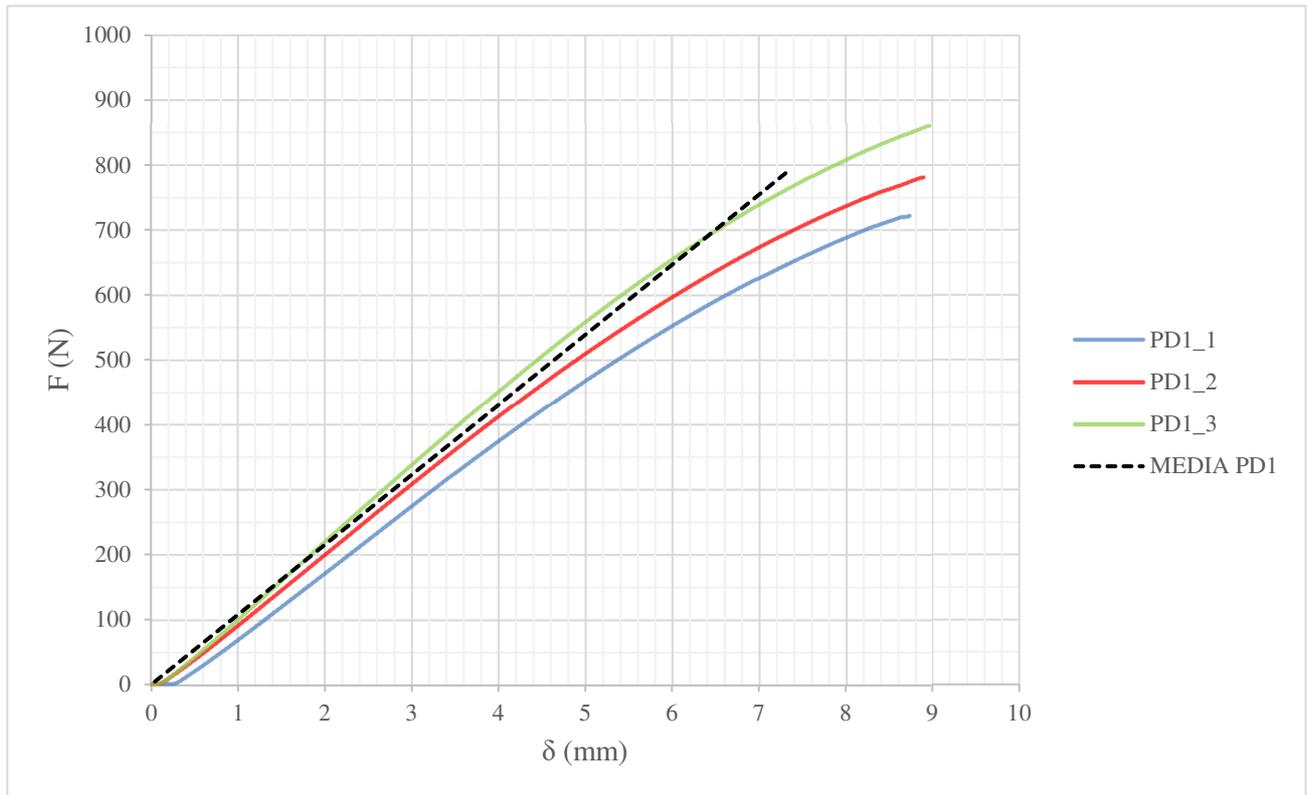


Gráfico 10: Relación Fuerza - δ del bloque CP30 PD1.

En el Gráfico 10 se muestran representadas las curvas F- δ de las tres probetas ensayadas y una recta cuya pendiente es el valor medio de la K de este bloque de ensayos.

3.4.2.3 Probetas CP30 PD2

Dentro de este bloque se encuentran las probetas (CP30 PD2_1, CP30 PD2_2, CP30 PD2_3) ensayadas al 60% de F_u a $1.00E+5$ ciclos. Sin embargo, la probeta CP30 PD2_1 presentaba una cantidad excesiva de fibras en las capas de 0° despegadas como podemos ver en las Figuras 25 y 26. Debido a este motivo no se pudo pegar galga en ninguna cara de esta probeta.

El hecho de ensayar estas probetas sin las galgas extensométricas implica que no obtenemos el valor de la deformación y por lo tanto no podemos obtener los valores de la rigidez o la σ_r , pero sí la K, el valor con más importancia para este proyecto.



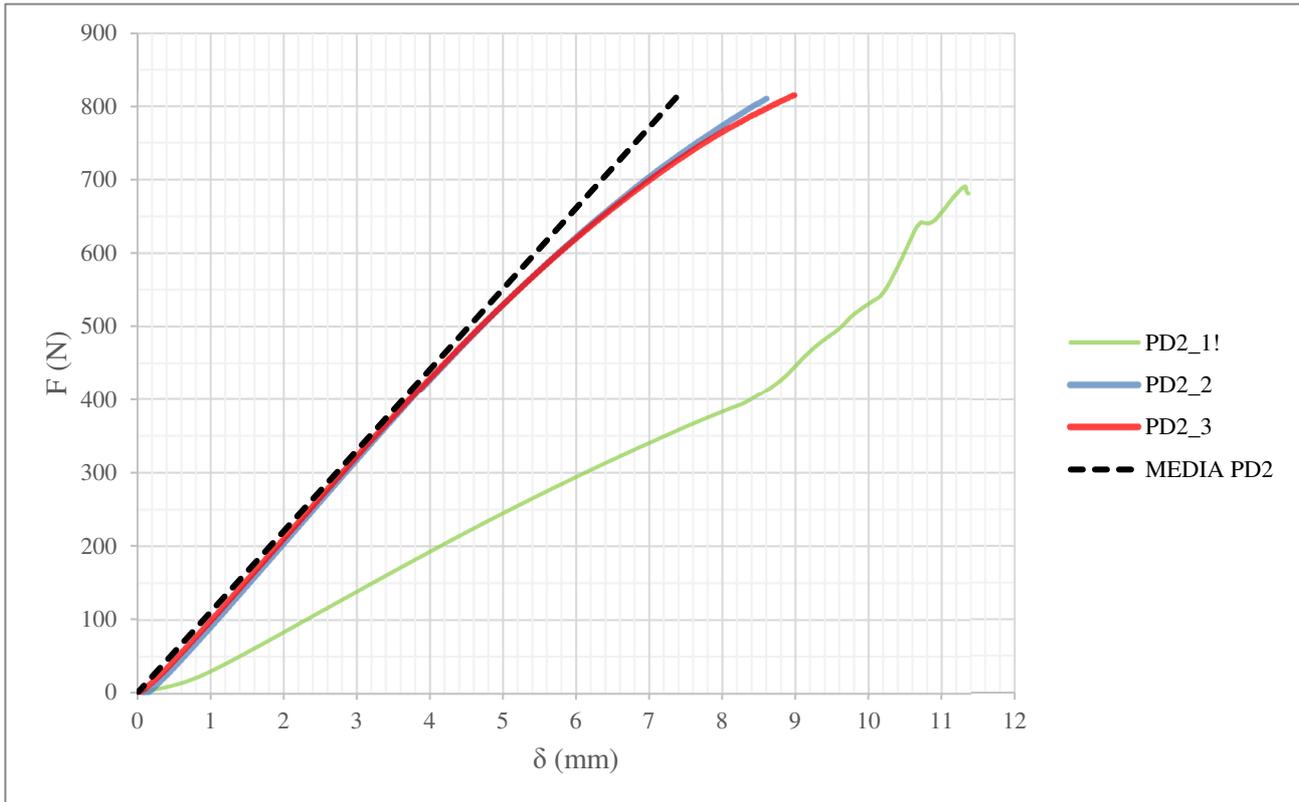
Figura 25: Probeta CP30 PD2_1 con fibras en la capa de 0° despegadas.



Figura 26: Probeta CP30 PD2_1 con fibras en la capa de 0° despegadas.

Tabla 9: Resultados del ensayo a flexión CP30 PD2.

		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP30 - PD2	PD2_1			44.654
	PD2_2	79.280	1010.719	111.194
	PD2_3	76.178	1002.830	109.261
	Valores medios	77.729	1006.774	110.228
	Desviación	2.19	5.58	1.37
	Dispersión	2.82%	0.55%	1.24%

Gráfico 11: Relación Fuerza - δ en el bloque CP30 PD2.

Cabe destacar en este bloque, la curva F - δ de la probeta CP30 PD2_1, que tiene una pendiente y una forma claramente distintas al resto. Esta probeta es la misma que acabamos de comentar, que presentaba fibras de la capa de 0° despegadas, este fenómeno está estudiado y se denomina “fiber-peeling”. Ocurre en algunas probetas cuando son ensayadas a fatiga bajo ciertas condiciones y como se explica en el artículo “Damage Behavior and Life Prediction in CFRP Cross-Ply Laminates under Fatigue Loading” [6] el “fiber-peeling” puede interferir en los ensayos de fallo por fatiga. Tras los resultados del ensayo a flexión podemos sospechar que la causa de una curva tan alejada del resto sea el “fiber-peeling”, motivo por el cual no se ha tenido en cuenta los resultados obtenidos de esa probeta en concreto para ningún cálculo o interpretación.

3.4.2.4 Probetas CP30 PD3

Este bloque se compone de tres probetas ensayadas a $1.00E+6$ ciclos al 60% de F_u . Al igual que en el bloque anterior, se aprecia en una de las probetas (CP30 PD3_3) excesivo “fiber-peeling” en las capas de 0° , hecho que impide la correcta adhesión de galgas, por lo que no se podrán calcular los valores de rigidez y σ_f .

Los resultados de este bloque de ensayos se aprecian en la Tabla 10 y en el Gráfico 12.

Tabla 10: Resultados del ensayo a flexión CP30 PD3.

		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP30 - PD3	PD3_1	89.614	1206.469	106.967
	PD3_2	70.648	879.042	94.184
	PD3_3			95.983
	Valores medios	80.131	1042.756	99.045
	Desviación	13.41	231.53	6.92
	Dispersión	16.74%	22.20%	6.99%

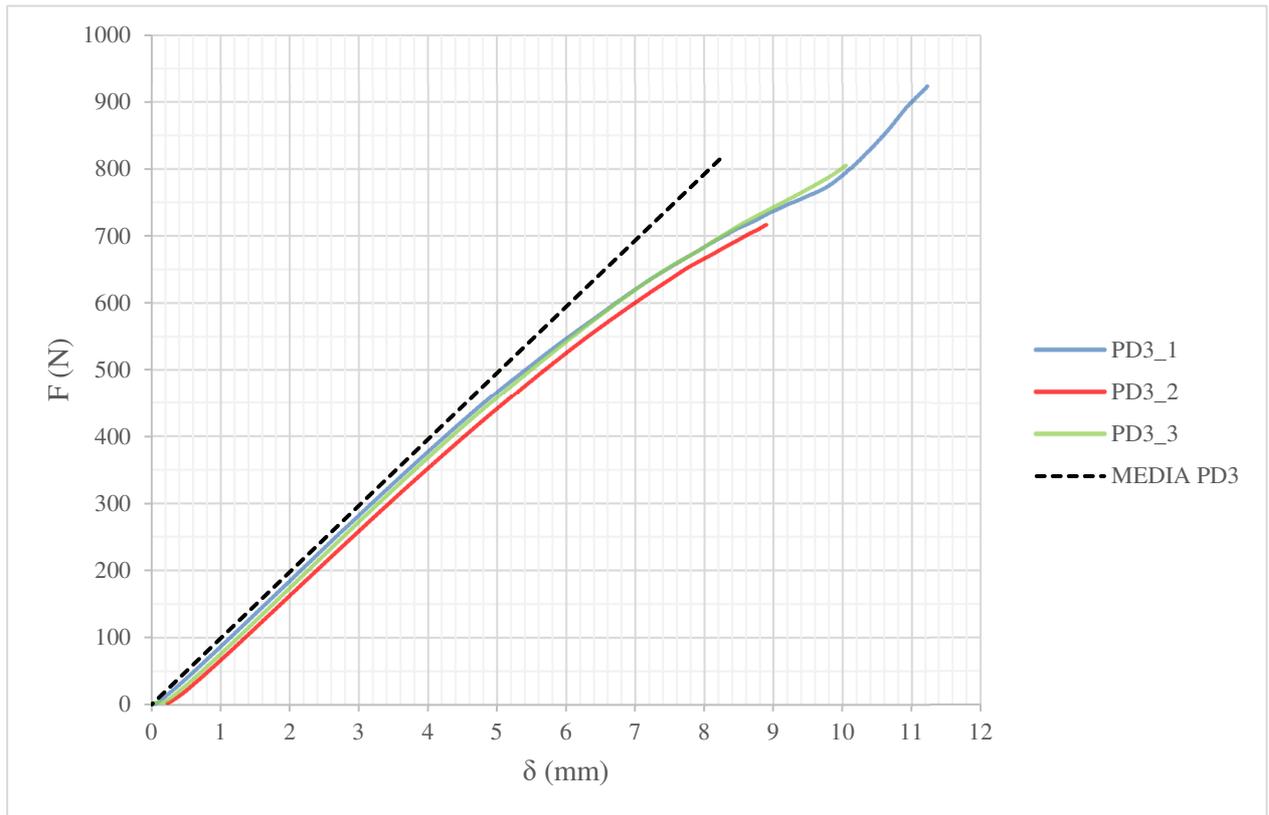


Gráfico 12: Relación Fuerza - δ en el bloque CP30 PD3.

En el Gráfico 12 se muestran representadas las curvas F- δ de las tres probetas ensayadas y una recta cuya pendiente es el valor medio de la K de este bloque de ensayos.

3.4.2.5 Comparación del laminado CP30

Al igual que en el laminado CP450, los resultados obtenidos de los ensayos pertenecientes al laminado CP30 se comparan entre sí para poder observar la manera en la que influye el daño.

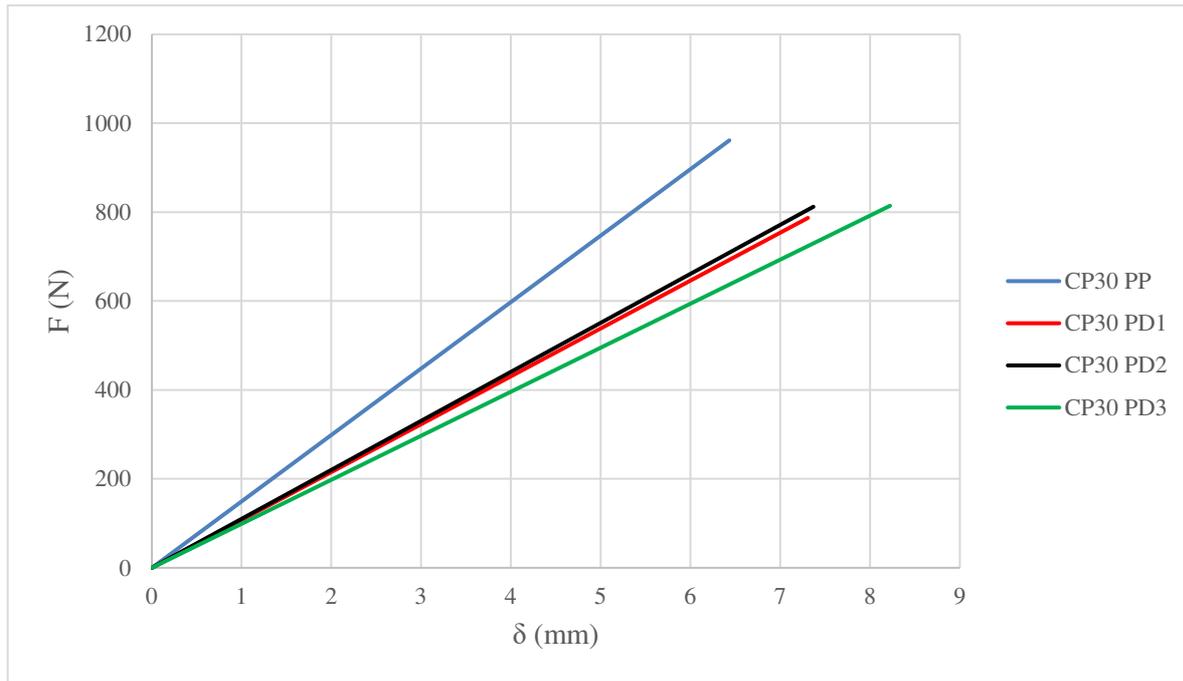


Gráfico 13: Comparación de resultados medios del laminado CP30.

Tabla 11: Resumen de los resultados medios del laminado CP30.

	Media	E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP30	PP	96.151 ± 2.2	1225.388 ± 18.7	149.593 ± 11.9
	PD1	80.115 ± 2.9	1007.587 ± 57.9	107.773 ± 9.7
	PD2	77.729 ± 2.2	1006.774 ± 5.6	110.228 ± 1.4
	PD3	80.131 ± 13.4	1042.756 ± 213.5	99.045 ± 6.9

El Gráfico 13 representan los valores de F respecto a los de δ medios para cada bloque de probetas del laminado CP30.

Tal y como observamos en la Tabla 11, el valor de la constante elástica K disminuye en las probetas dañadas respecto a la probeta prístina. Esta disminución respecto a la probeta CP30 PP es de un 27,9%, 26,3% y 33,8% para las probetas CP30 PD1, CP30 PD2 y CP30 PD3 respectivamente.

Analizando los valores de rigidez y σ_f , que conocemos que no son los valores reales de las probetas, se observa que ambos disminuyen en las probetas dañadas respecto a las prístinas. La disminución respecto a la probeta CP30 PP de la rigidez es de 16,7%, 19,2% y 16,7% para las probetas CP30 PD1, CP30 PD2 y CP30 PD3 respectivamente. La disminución de la σ_f respecto a la probeta CP30 PP es de 17,8%, 17,8% y 14,9% para las probetas CP30 PD1, CP30 PD2 y CP30 PD3 respectivamente.

4 MODELO NUMÉRICO

Esta parte del proyecto surge del interés por aprender más sobre Método de los Elementos Finitos (MEF) y por obtener resultados adicionales con los que poder comparar el resto de conclusiones recabadas a lo largo de este proyecto. Esta parte supone un reto por poder conseguir un modelo en un programa comercial que implementa el MEF (ANSYS) relativamente sencillo cuyos resultados se asemejen a los obtenidos en los ensayos del laboratorio.

Para realizar este apartado se modelan en ANSYS los laminados CP30 y CP450 a los que se le añade una grieta horizontal en la capa de 90° simulando el daño causado por fatiga y se procede a flectar dichos modelos imitando el ensayo realizado en el laboratorio.

4.1 Diseño de los modelos

Para este apartado se requiere modelar ambos laminados cross-ply (CP30 y CP450), que están compuestos por una capa de 90° situada entre dos capas de 0°. Para simplificar el diseño de dichos modelos, estos, se llevan a cabo en dos dimensiones de tal manera que el eje que queda sin representación es el ancho de las probetas. Debido a esta manera de trabajar, todos los resultados se han de multiplicar por el ancho de cada probeta para obtener las unidades correctas. Este es el motivo por el cual en el código fuente de ANSYS se define el tipo de elemento PLANE182 con el que se trabaja en todo el capítulo, tal y como observamos en el siguiente fragmento de código.

```
/PREP7  
ET, 1, PLANE182
```

A la hora de caracterizar los modelos, se opta por definir dos tipos de materiales homogéneos con las mismas propiedades (módulo elástico, módulo de cizalladura y coeficiente de Poisson) pero permutadas, de tal manera que un material quede girado 90° respecto al otro, consiguiendo así las propiedades de cada capa en función de su orientación, tal y como queda reflejado en el siguiente fragmento de código.

```

!Lámina de 90 (Fibra perpendicular a la pantalla)
! Material 1
MP,EX,1,7740
MP,EY,1,7740
MP,EZ,1,105700
MP,PRXY,1,0.4
MP,PRYZ,1,0.0219678
MP,PRXZ,1,0.0219678
MP,GXY,1,2350
MP,GYZ,1,3280
MP,GXZ,1,3280

!Lámina de 0 (Fibra paralela a la pantalla)
!Material 2
MP,EX,2,105700
MP,EY,2,7740
MP,EZ,2,7740
MP,PRXY,2,0.3
MP,PRYZ,2,0.4
MP,PRXZ,2,0.3
MP,GXY,2,3280
MP,GYZ,2,2350
MP,GXZ,2,3280
    
```

El principal modelo de estudio de este trabajo consiste en insertar una grieta horizontal interna en la capa de 90 tal y como aparece en la Figura 27. Para ello, el diseño de cada modelo se realiza mediante doce rectángulos, tal y como aparecen representados en la Figura 28. Esta manera de crear la geometría del modelo permite facilitar diversos aspectos del modelo. Por un lado, permite definir de manera sencilla qué material corresponde a cada área, siendo las áreas A4-A9 pertenecientes a la capa de 90° y el resto a las capas de 0°. Por otro lado, permite la creación de la grieta de forma directa, forzando la unión de todos los rectángulos con sus áreas colindantes exceptuando las áreas A5 y A8.



Figura 27: Modelo con grieta longitudinal.

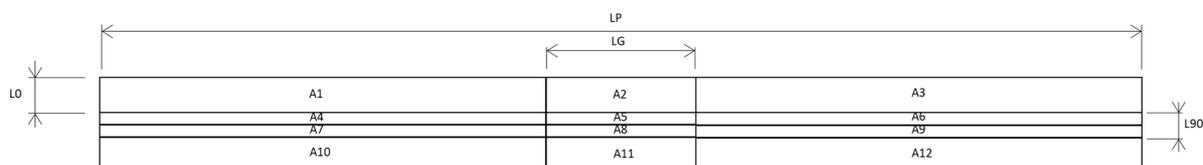


Figura 28: Esquema del diseño del modelo.

Las dimensiones que aparecen reflejadas en la Figura 27, como LG, LP, L0 y L90 son los parámetros utilizados para la creación de estos modelos, representando la longitud de la grieta, longitud de la probeta, espesor de la capa de 0° y espesor de la capa de 90° respectivamente. Estos parámetros se utilizan para poder cambiar las dimensiones del modelo de manera sencilla y así poder experimentar con ella.

En el siguiente fragmento del código fuente de ANSYS utilizado para este TFG se observan los aspectos mencionados anteriormente, como la definición de parámetros, la creación de los rectángulos y la unión de estos tras un mallado de la geometría definida.

```

LG=80
LP=180
L90=0.52
L0=0.68

!Rectángulos [0]
rectng, 0, (LP-LG)/2, 0, L0
rectng, (LP-LG)/2, LG+(LP-LG)/2, 0, L0
rectng, LG+(LP-LG)/2, LP, 0, L0
rectng, 0, (LP-LG)/2, (L0)+(2*L90), (2*L0)+(L90)
rectng, (LP-LG)/2, LG+(LP-LG)/2, (L0)+(2*L90), (2*L0)+(L90)
rectng, LG+(LP-LG)/2, LP, (L0)+(2*L90), (2*L0)+(L90)

!Rectángulos [90]
rectng, 0, (LP-LG)/2, L0, L0+(L90/2)
rectng, (LP-LG)/2, LG+(LP-LG)/2, L0, L0+(L90/2)
rectng, LG+(LP-LG)/2, LP, L0, L0+(L90/2)
rectng, 0, (LP-LG)/2, L0+(L90/2), (L0)+(L90)
rectng, (LP-LG)/2, LG+(LP-LG)/2, L0+(L90/2), (L0)+(L90)
rectng, LG+(LP-LG)/2, LP, L0+(L90/2), (L0)+(L90)

AGLUE, 1, 2, 3
AGLUE, 4, 5, 6
AGLUE, 7, 8, 9
AGLUE, 10, 11, 12

SELTOL, 0.01      !Definimos una tolerancia de 0.01
ESIZE, 0.1        !Definimos un tamaño de mallado de 0.1

```

```
mat,1          !Mallamos el material 1
AMESH,10
AMESH,8
AMESH,9
AMESH,7
AMESH,5
AMESH,6

mat,2          !Mallamos el material 2
AMESH,1
AMESH,13
AMESH,14
AMESH,4
AMESH,2
AMESH,3

NSEL,S,LOC,X,0,(LP-LG)/2
NSEL,R,LOC,Y,L0
NUMMERGE,NODE

NSEL,S,LOC,X,0,(LP-LG)/2
NSEL,R,LOC,Y,(L0)+(L90/2)
NUMMERGE,NODE

NSEL,S,LOC,X,0,(LP-LG)/2
NSEL,R,LOC,Y,(L0)+(L90)
NUMMERGE,NODE

NSEL,S,LOC,X,LG+(LP-LG)/2,LP
NSEL,R,LOC,Y,L0
NUMMERGE,NODE

NSEL,S,LOC,X,LG+(LP-LG)/2,LP
NSEL,R,LOC,Y,(L0)+(L90/2)
NUMMERGE,NODE

NSEL,S,LOC,X,LG+(LP-LG)/2,LP
NSEL,R,LOC,Y,(L0)+(L90)
NUMMERGE,NODE

NSEL,S,LOC,X,(LP-LG)/2,LG+(LP-LG)/2
NSEL,R,LOC,Y,(L0)+(L90)
NUMMERGE,NODE

NSEL,S,LOC,X,(LP-LG)/2,LG+(LP-LG)/2
NSEL,R,LOC,Y,L0
NUMMERGE,NODE

ALLSEL,ALL
```

El objetivo principal de este apartado del trabajo es el simular un ensayo a flexión en cuatro puntos para los modelos de las probetas con una grieta en su interior y observar su comportamiento.

Una solución sencilla para esta simulación del ensayo a flexión en cuatro puntos hubiera sido aplicar dos cargas puntuales en la parte superior de las probetas e imponer un desplazamiento nulo en dos nodos de la parte inferior de la probeta. Sin embargo, se opta simular los rodillos que han sido utilizados en el ensayo a flexión experimental, para que la probeta pueda deslizarse sobre ellos y poder obtener unos resultados más cercanos a los

experimentales.

Para que esto se pueda llevar a cabo se definen dos círculos en la posición que dicta la norma UNE 14125 – 1999 [2] para cada probeta y posteriormente se procede a crear un contacto entre una superficie elástica (la probeta) y una rígida (los rodillos), quedando el modelo tal y como muestra la Figura 29. El modelado de esta condición de contacto, hace que la simulación sea más realista, dado que los grandes desplazamientos durante el ensayo, hace que la posición del contacto entre la probeta y los rodillos cambien de lugar, y la orientación de las reacciones en dichos rodillos cambie de orientación con la normal del contacto.

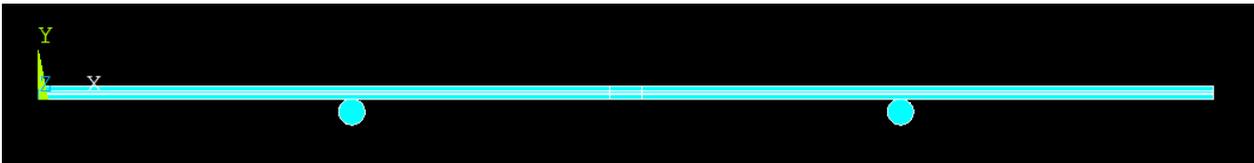


Figura 29: Modelo previo a aplicación de las cargas.

En el siguiente fragmento de código se muestra cómo se definen los círculos anteriormente mencionados, como se crea el contacto entre estos y la probeta y como se impone un desplazamiento vertical de 10 mm en los puntos de aplicación de carga que define la norma UNE 14125 – 1999 [2].

```

CYL4, 48, -2, 2           !Definición de círculos
CYL4, 132, -2, 2

NSEL, S, LOC, X, 90      !Impedimos desplazamientos ux
NSEL, R, LOC, Y, (2*L0) + (L90)
D, all, ux, 0
ALLSEL, ALL

D, ALL, UY, -10         !Imponemos uy -10mm
NSEL, S, LOC, X, 104
NSEL, R, LOC, Y, (2*L0) + (L90)
D, ALL, UY, -10
ALLSEL, ALL

!CONDICIÓN DE CONTACTO ENTRE MODELO Y RODILLOS

CM, _NODECM, NODE
CM, _ELEMCM, ELEM
CM, _KPCM, KP
CM, _LINECM, LINE
CM, _AREACM, AREA
CM, _VOLUCM, VOLU
MP, MU, 1, 0
MAT, 1
R, 4
REAL, 4
ET, 4, 169
ET, 5, 172
KEYOPT, 5, 9, 0
KEYOPT, 5, 10, 0
R, 4,
RMORE,
RMORE, , 0

```

```
RMORE,0
LSEL,S,,,29
LSEL,A,,,31
CM,_TARGET,LINE
TYPE,4
LATT,-1,4,4,-1
TYPE,4
LMESH,ALL
LSEL,S,,,1
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,5
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
*SET,_REALID,4
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
LSEL,S,REAL,,4
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
LSEL,S,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU MP,MU,1,0
MAT,1
R,5
REAL,5
ET,6,169
ET,7,172
KEYOPT,7,9,0
KEYOPT,7,10,0
R,5,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
LSEL,S,,,35
```

```

LSEL,A,,,36
CM,_TARGET,LINE
TYPE,6
LATT,-1,5,6,-1
TYPE,6
LMESH,ALL
LSEL,S,,,51
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,7
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
*SET,_REALID,5
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,5
LSEL,S,REAL,,5
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,5
LSEL,S,REAL,,5
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT

```

```
!FIN CONDICIÓN DE CONTACTO RODILLOS
```

Además de esta condición de contacto entre rodillos y probeta, el modelo requiere otra condición de contacto entre las áreas 5 y 8 de la Figura 28 de tal manera que no pueda penetrar una en la otra al imponerle los desplazamientos verticales. Ni esta condición de contacto ni la anterior tienen fricción incluidas, aunque no sería de gran complejidad introducirlas. Esta condición de contacto se puede observar en el siguiente fragmento de código.

!CONDICIÓN DE CONTACTO DE LA GRIETA INTERNA

```
CM, _NODECM, NODE
CM, _ELEMCM, ELEM
CM, _KPCM, KP
CM, _LINECM, LINE
CM, _AREACM, AREA
CM, _VOLUCM, VOLU
/GSAV, cwz, gsav, , temp
MP, MU, 1,
MAT, 1
MP, EMIS, 1, 7.88860905221e-031
R, 3
REAL, 3
ET, 2, 169
ET, 3, 172
R, 3, , , 1.0, 0.1, 0,
RMORE, , , 1.0E20, 0.0, 1.0,
RMORE, 0.0, 0, 1.0, , 1.0, 0.5
RMORE, 0, 1.0, 1.0, 0.0, , 1.0
RMORE, , , , , 1.0
KEYOPT, 3, 3, 0
KEYOPT, 3, 4, 0
KEYOPT, 3, 5, 0
KEYOPT, 3, 7, 0
KEYOPT, 3, 8, 0
KEYOPT, 3, 9, 1
KEYOPT, 3, 10, 0
KEYOPT, 3, 11, 0
KEYOPT, 3, 12, 0
KEYOPT, 3, 14, 0
KEYOPT, 3, 18, 0
KEYOPT, 3, 2, 0
LSEL, S, , , 20
CM, _TARGET, LINE
TYPE, 2
NSLL, S, 1
ESLN, S, 0
ESURF
CMSEL, S, _ELEMCM
LSEL, S, , , 12
CM, _CONTACT, LINE
TYPE, 3
NSLL, S, 1
ESLN, S, 0
ESURF
ALLSEL
ESEL, ALL
ESEL, S, TYPE, , 2
ESEL, A, TYPE, , 3
ESEL, R, REAL, , 3
/PSYMB, ESYS, 1
/PNUM, TYPE, 1
/NUM, 1
EPLOT
```

```

ESEL, ALL
ESEL, S, TYPE, , 2
ESEL, A, TYPE, , 3
ESEL, R, REAL, , 3
CMSEL, A, _NODECM
CMDEL, _NODECM
CMSEL, A, _ELEMCM
CMDEL, _ELEMCM
CMSEL, S, _KPCM
CMDEL, _KPCM
CMSEL, S, _LINECM
CMDEL, _LINECM
CMSEL, S, _AREACM
CMDEL, _AREACM
CMSEL, S, _VOLUCM
CMDEL, _VOLUCM
/GRES, cwz, gsav
CMDEL, _TARGET
CMDEL, _CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END

/MREP, EPLOT

!FIN DE CONDICIÓN DE CONTACTO EN LA GRIETA INTERNA

```

Un último aspecto que comentar sobre el diseño de los modelos de este proyecto es la importancia del cálculo en grandes desplazamientos. La diferencia entre usar esta teoría respecto a la suposición de pequeños desplazamientos se puede observar de manera clara en la comparación de las Figuras 30 y 31. Cuando suponemos pequeños desplazamientos, la probeta no actualiza la geometría del modelo y, a todos los efectos, la deformada muestra una pérdida aparente del contacto, como se observa en la Figura 31. Sin embargo, si suponemos grandes desplazamientos, la probeta siempre muestra el contacto real entre la probeta y el rodillo, tal y como muestra la Figura 30.

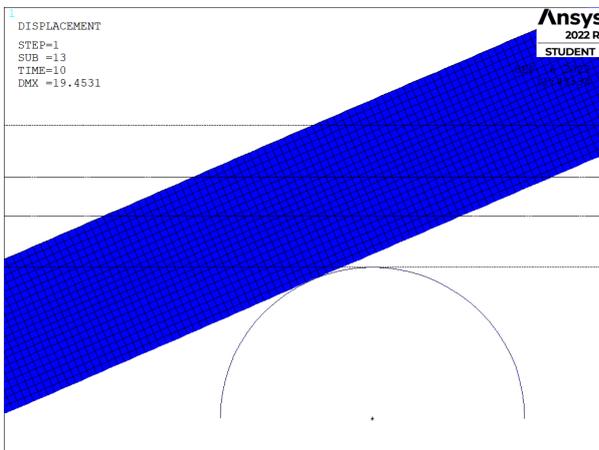


Figura 30: Rodillo con grandes desplazamientos.

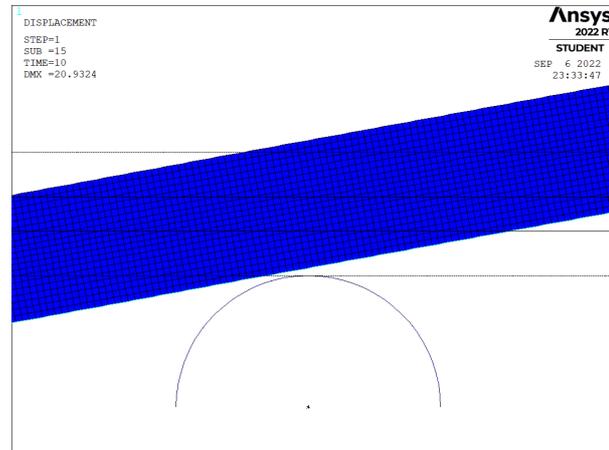


Figura 31: Rodillo con pequeños desplazamientos.

4.2 Resultados de los ensayos

Uno de los resultados que se obtiene de la simulación de los ensayos a flexión es el valor de la rigidez del sistema, K, en función de la longitud de la grieta y del ancho de esta, para los laminados CP30 y CP450, representados en los Gráficos 14 y 15.

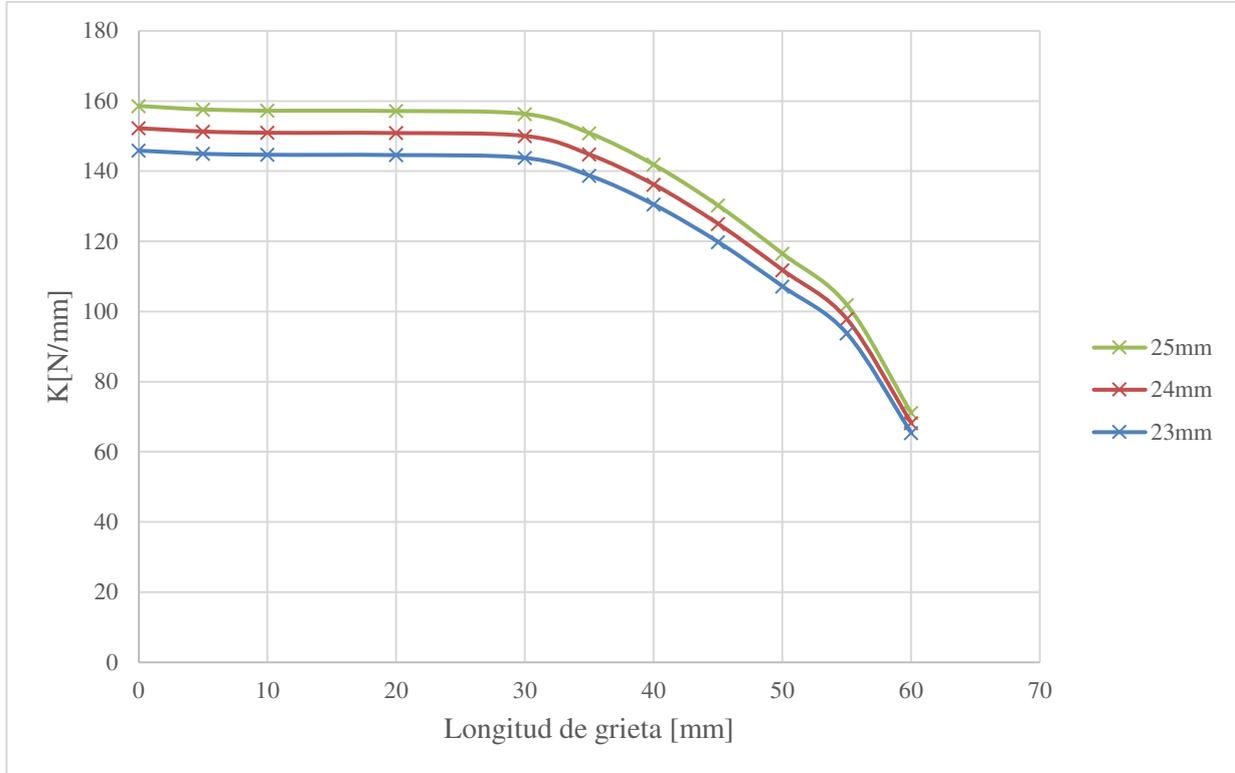


Gráfico 14: Valor de K en función de la longitud de grieta para el laminado CP30.

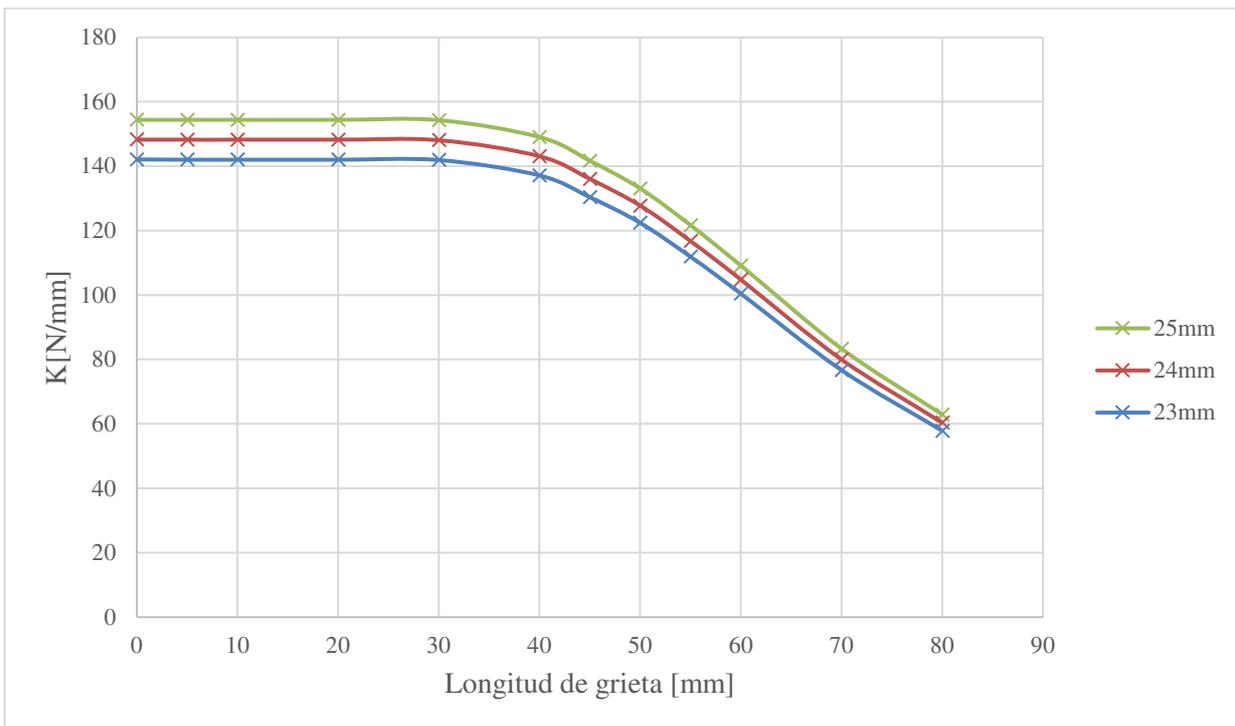


Gráfico 15: Valor de K en función de la longitud de grieta para el laminado CP450.

Se puede observar un patrón de comportamiento en los Gráficos 14 y 15 en el que el valor de K se mantiene constante hasta cierto valor crítico de longitud de grieta, que se encuentra cercano a los 30mm para ambos laminados. A partir de dicho valor crítico, la rigidez del sistema disminuye a medida que la longitud de la grieta aumenta.

Para ambos laminados se han modelado desde probetas sin daño alguno, hasta probetas con la mayor longitud de grieta posible. Cuando aplicamos una longitud de la grieta cercana a su máximo valor, (que es la longitud entre los rodillos) y aplicamos las cargas, la grieta adquiere una forma muy peculiar, estando cerrada en la parte central y abierta en las zonas cercanas a los rodillos, como se muestra en la Figura 32, para ambos laminados.

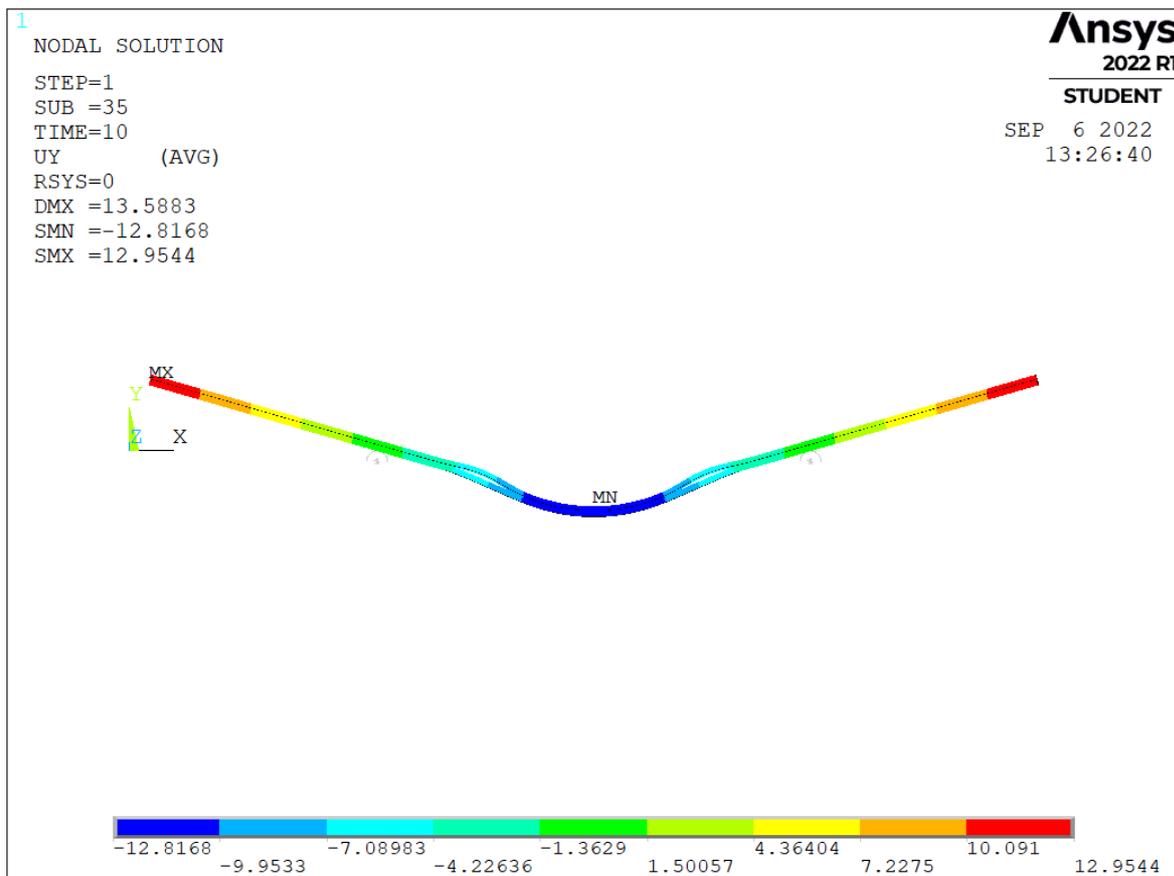


Figura 32: Campo de desplazamientos verticales de la probeta deformada con una longitud de grieta de 70mm.

Sin embargo, el resto de probetas con grietas que no llegan a tal dimensión, muestran una deformada como la de la Figura 33.

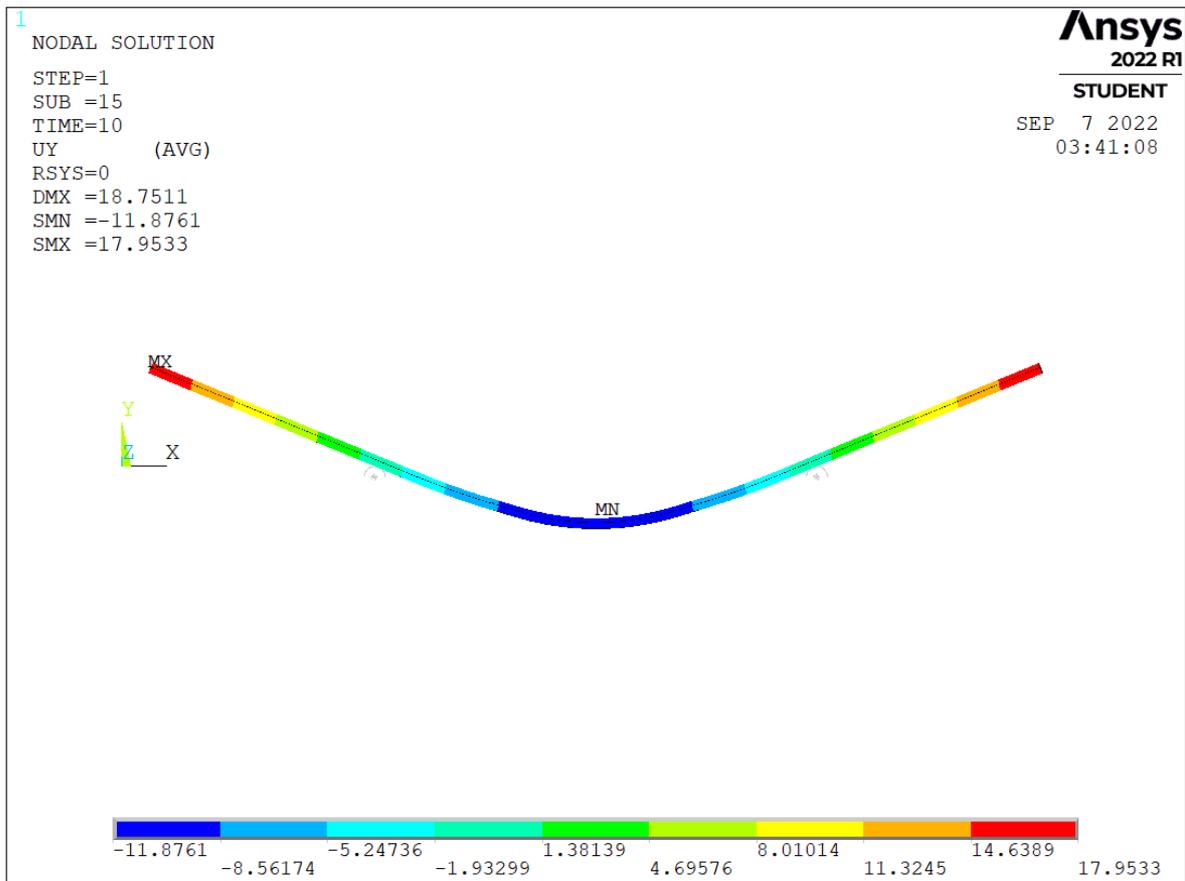


Figura 33: Campo de desplazamientos verticales de la probeta deformada con una longitud de grieta de 40mm.

Adicionalmente, con el fin de observar los cambios de comportamiento de las probetas, se realizan estos mismos ensayos para otros patrones de daño en el modelo, como los esquematizados en las Figuras 34, 35 y 36.



Figura 34: Modelo con grieta longitudinal y transversales.

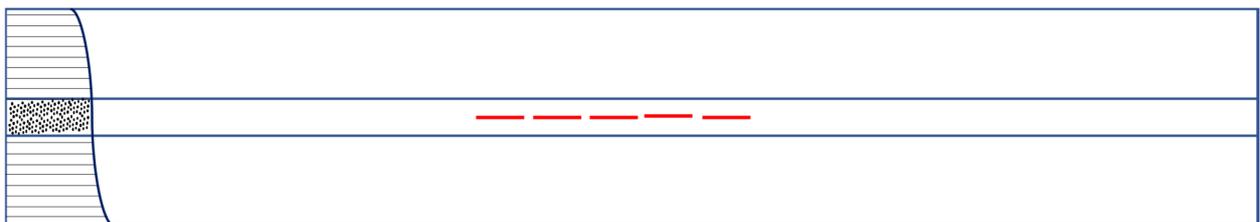


Figura 35: Modelo con múltiples grietas longitudinales.

Los resultados, representados en los Gráficos 16 y 17, de todos estos modelos adicionales muestran resultados que difieren muy poco del modelo principal de estudio con grieta longitudinal.

Esto nos lleva a la conclusión de que el verdadero daño aplicado al modelo depende de la longitud total de las grietas horizontales y no del patrón de daño.

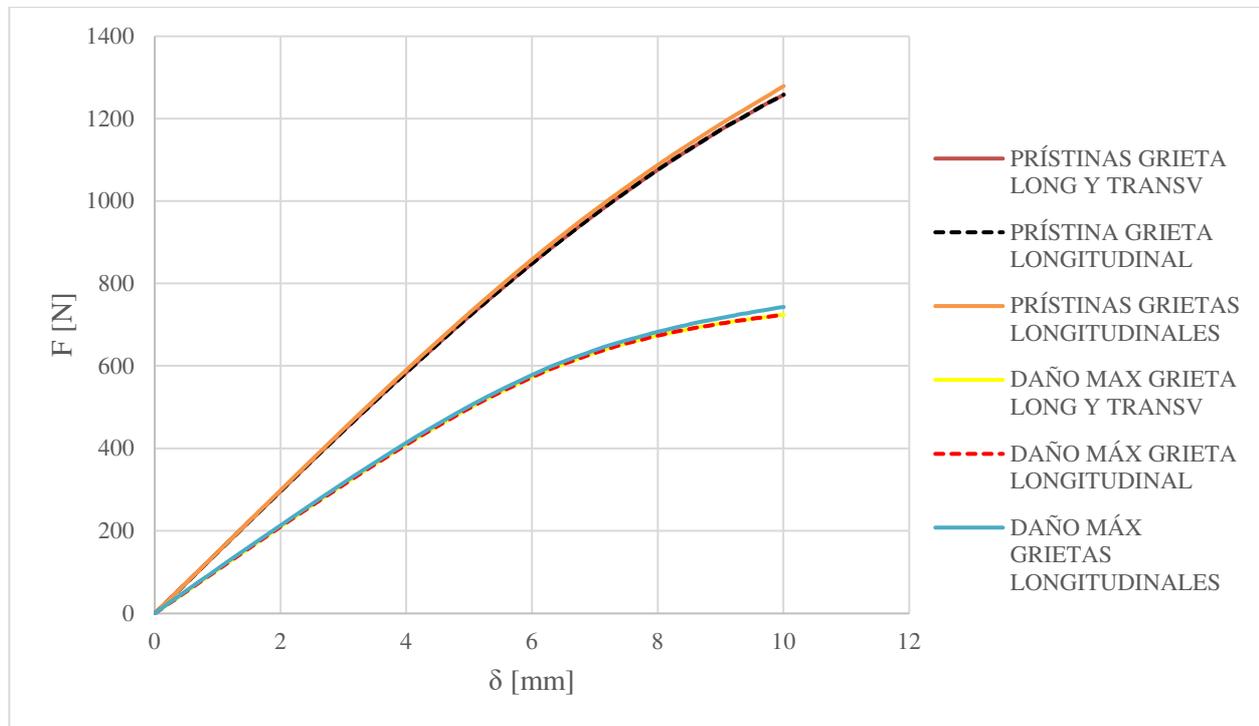


Gráfico 16: Comparación de modelos del laminado CP450.

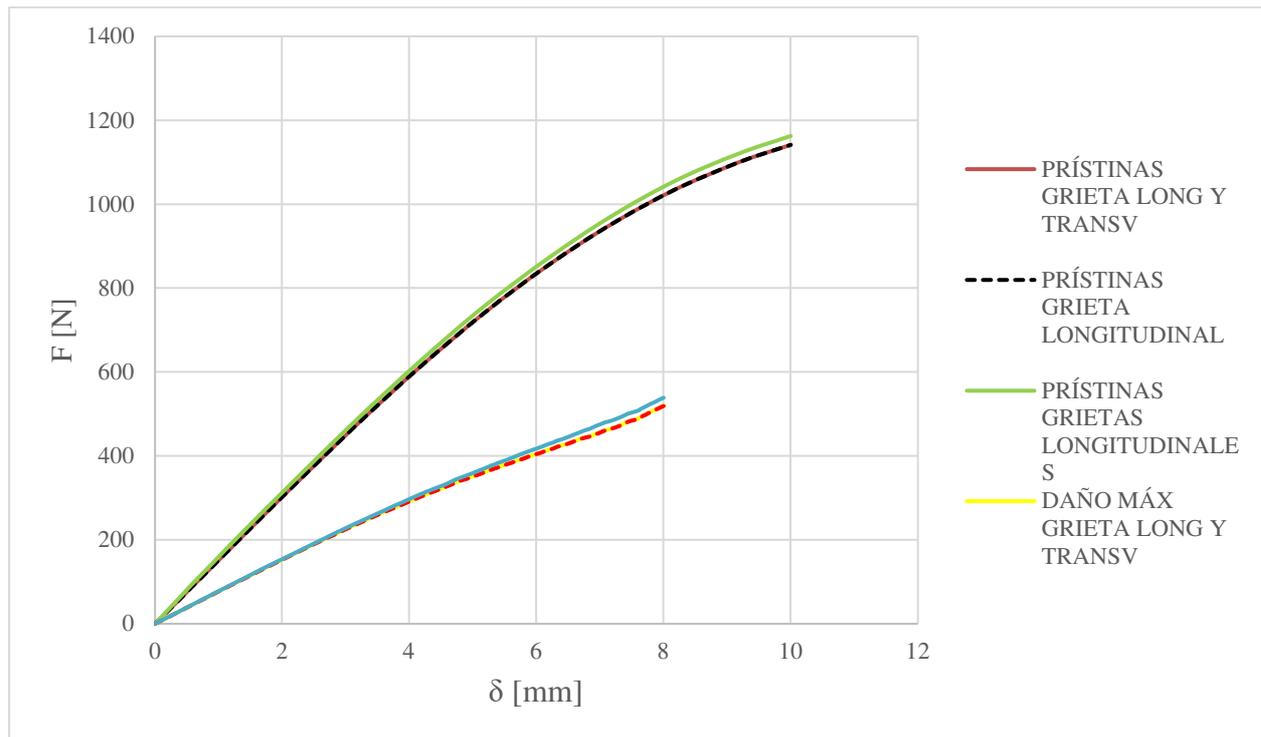


Gráfico 17: Comparación de modelos del laminado CP30.

5 CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

A lo largo de este capítulo se hará un resumen de los resultados obtenidos durante el proyecto y se explicarán detalladamente las conclusiones a las que se han llegado con el objetivo de dar pie a desarrollar futuros nuevos estudios sobre este tipo de laminado ultra-thin.

5.1 Comparación de resultados y conclusiones

Para poder realizar un estudio del comportamiento a flexión de los laminados CP450 y CP30 en función del daño a fatiga que presentan, el primer paso a seguir es determinar el daño presente en cada probeta, principal objetivo del capítulo 2 de este proyecto. Tras su correspondiente análisis se determina que para el laminado CP450, las probetas PP presentan un daño nulo, mientras que las probetas PD1 presentan un daño considerable. En el caso del laminado CP30, las probetas PP presentan también un daño nulo, mientras que el resto de probetas no, siendo las PD1 las que presentan un menor daño aparente y las PD3 las que más daño aparente tienen, tal y como se puede observar en el Gráfico 18.

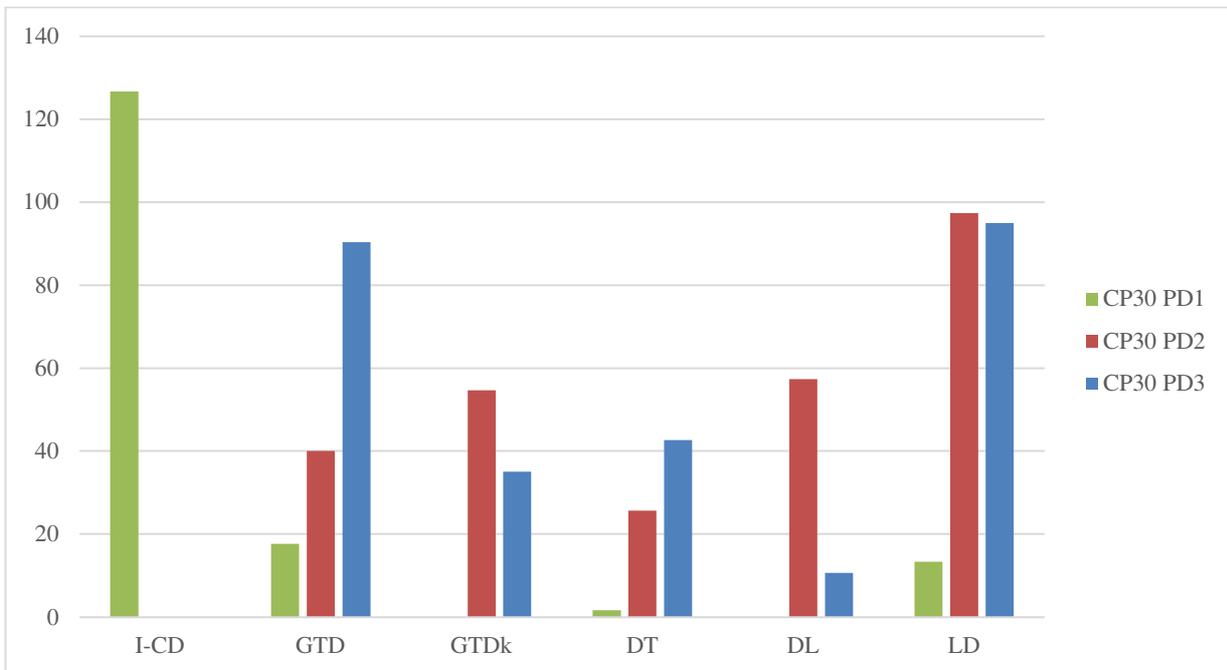


Gráfico 18: Comparativa del daño medio de cada bloque del laminado CP30.

Una vez se conoce el daño a fatiga que presenta cada uno de los bloques de probetas ensayados, se procede a comparar los resultados obtenidos de los ensayos a flexión del capítulo 3. Tal y como se puede observar en la Tabla 12, para el laminado CP450 los valores tanto de la K como de la E_f disminuyen un 5% y un 0.9% respectivamente en el caso de las probetas dañadas respecto a las prístinas, sin embargo, el valor nominal de la σ_f aumenta un 3.7%. Este fenómeno se opone a los resultados esperados, pudiendo tener una explicación en la desviación de cada dato, ya que existe un rango de valores para los que la σ_f de las probetas PP es mayor que las probetas PD1.

Los resultados esperados para las probetas del laminado CP30 consisten en una disminución de la K , E_f y σ_f a medida que el daño a fatiga aumenta. Tal y como se muestra en la Tabla 12, esta estimación se cumple para todos los valores nominales exceptuando la E_f de CP30 PD3, la σ_f de CP30 PD3 y K de CP30 PD2, que al igual que en el laminado anterior, debido a la desviación que presentan, existe un rango de valores para los que sí cumplen las expectativas.

Tabla 12: Comparación de los resultados del ensayo a flexión de los laminados CP450 y CP30.

	Media	E_f (GPa)	σ_f (MPa)	K (N/mm)
CP450	PP	92.31 ± 6.3	1033.1 ± 67.63	135.28 ± 10.8
	PD1	87.798 ± 2.5	1020.743 ± 21.0	115.579 ± 3.5
CP30	PP	96.151 ± 2.2	1225.388 ± 18.7	149.593 ± 11.9
	PD1	80.115 ± 2.9	1007.587 ± 57.9	107.773 ± 9.7
	PD2	77.729 ± 2.2	1006.774 ± 5.6	110.228 ± 1.4
	PD3	80.131 ± 13.4	1042.756 ± 213.5	99.045 ± 6.9

A la hora de comparar los resultados entre ambos laminados hemos de destacar en primer lugar la diferencia obtenida entre las probetas prístinas de ambos laminados, ya que tanto los valores de E, K y σ son un 4.1%, 10.6% y 18.6% superiores en el laminado CP30 respectivamente.

Por otro lado, el bloque de probetas CP450 PD1 que está ensayado a 2.00E+4 ciclos a un 60% de F_u es de gran interés compararlo con el bloque CP30 PD2 que está ensayado a 1.00E+5 ciclos a un 60% de F_u . Tal y como muestran las tablas 5 y 9 ambos bloques presentan probetas con valores de K, E y σ_f muy similares, sabiendo que el bloque CP30 PD2 está ensayado con un total de 5 veces más ciclos que el CP450 PD1.

En el Gráfico 19 podemos ver de manera representativa una comparación de la media de cada bloque de ensayo a flexión, en la que se observa con claridad como el bloque CP30 PP es con diferencia la que más K tiene, seguido de CP450 PP y CP450 PD1.

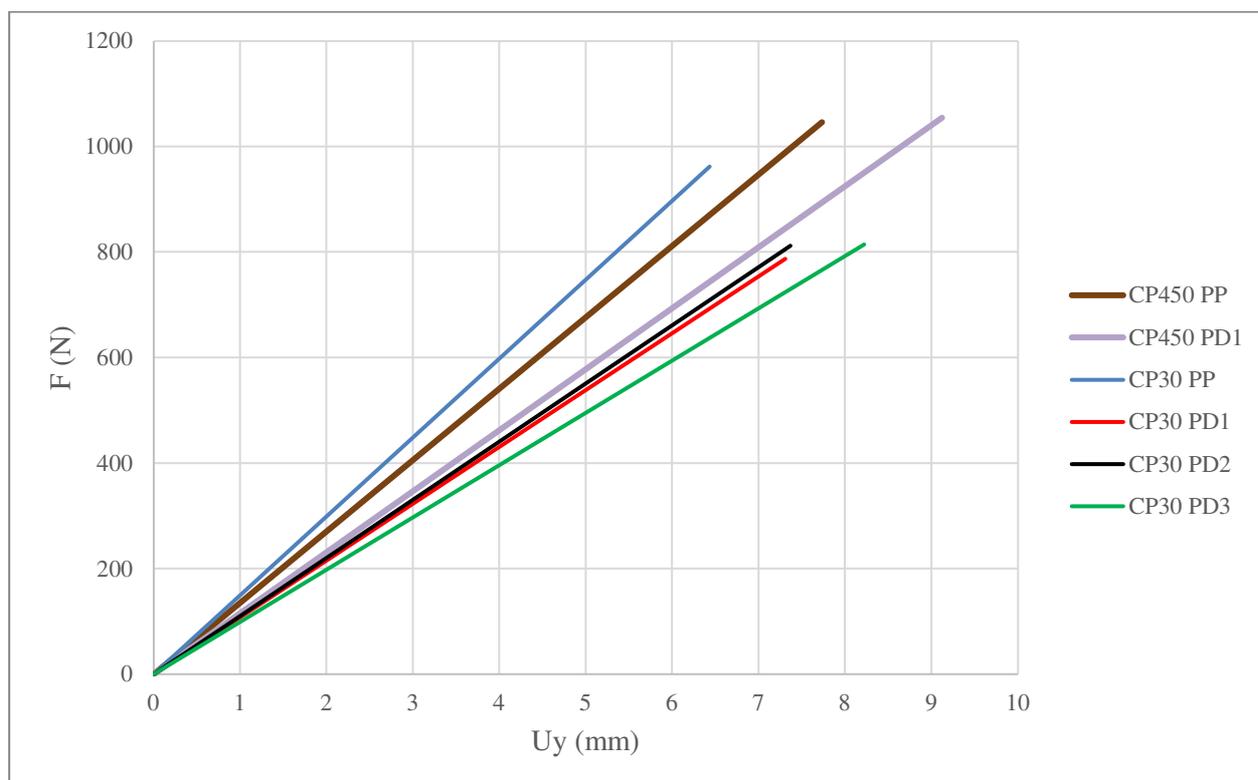


Gráfico 19: Comparación de las curvas F- δ de todas las probetas ensayadas.

Por último, una vez se conocen los resultados obtenidos de los ensayos a flexión, se procede a compararlos con los resultados sacados de los modelos numéricos.

En primer lugar, para el laminado CP450, tal y como muestra el Gráfico 20, las curvas F- δ de los modelos marcan los límites superior e inferior en los que podemos encontrar curvas experimentales. Estas curvas experimentales se encuentran más cerca de un límite u otro dependiendo del daño previo a fatiga que presente cada probeta, siendo las que tienen más pendiente (K) las que presentan menos daño.

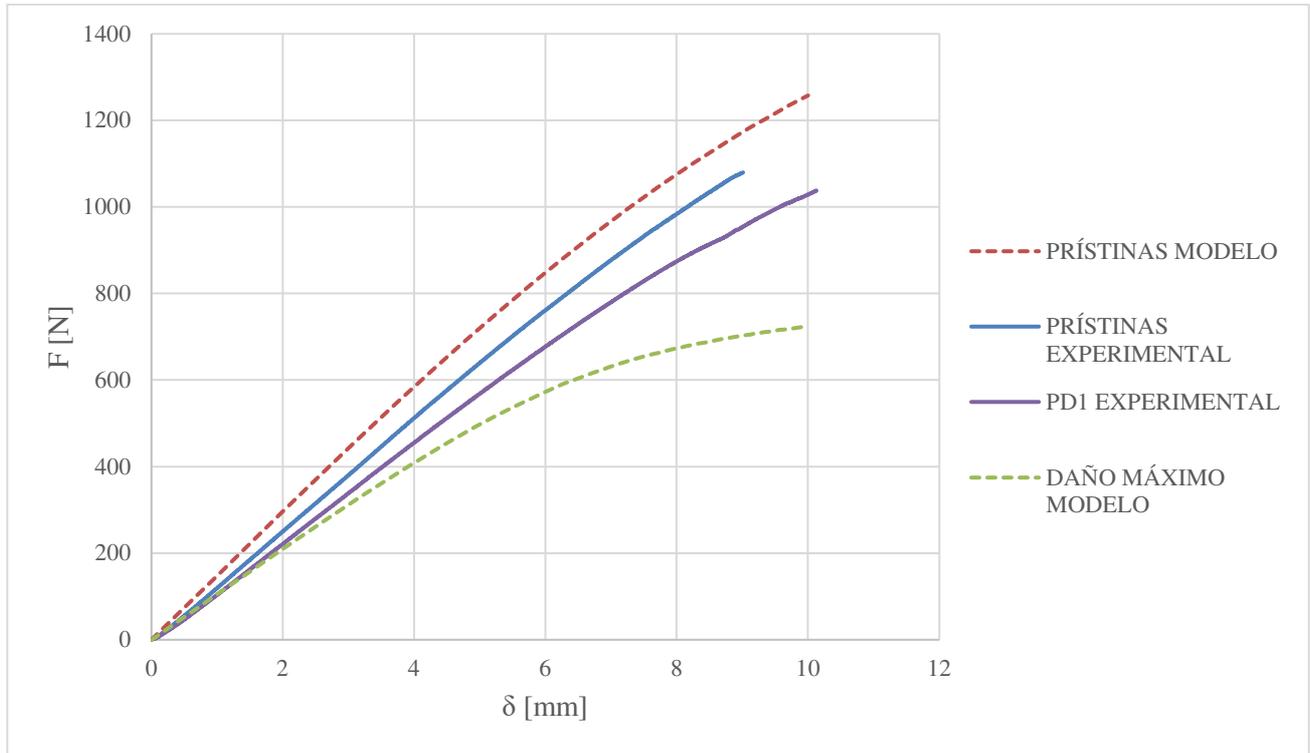


Gráfico 20: Comparación de las curvas F- δ de las probetas ensayadas y los modelos del laminado CP450.

Como se observa en el Gráfico 21, esto mismo también ocurre con las probetas pertenecientes al laminado CP30. Aquí podemos observar como las curvas de los modelos delimitan la zona en la que podemos encontrar curvas experimentales, que a medida que presentan más daño, pierden pendiente. Cabe destacar de este caso como las curvas de las probetas prístinas del caso experimental y del modelo son muy similares.

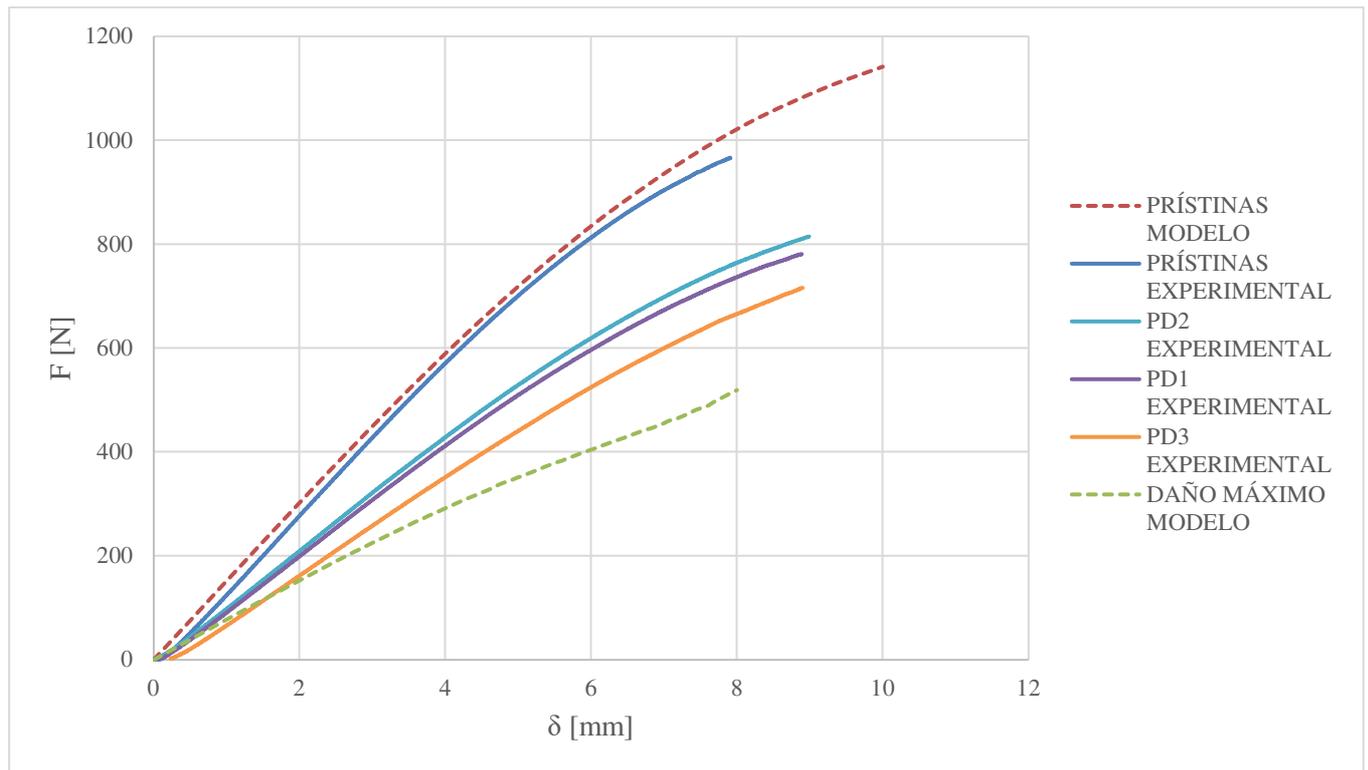


Gráfico 21: Comparación de las curvas F - δ de las probetas ensayadas y los modelos del laminado CP30.

A raíz de estos resultados, se llega a las siguientes conclusiones:

- En las probetas pertenecientes al laminado CP30, llegados a ciertos ciclos de fatiga, no se sigue iniciando nuevos daños, sino que los existentes evolucionan separando más los LD, lo cual lleva a pensar que se ha propagado haciendo que aparezcan cambios de plano entre las dos partes separadas de la capa de 90° por los LD existentes.
- Las probetas prístinas pertenecientes al laminado CP30 son más resistentes y rígidas a flexión que las pertenecientes al laminado CP450 pese a tener un espesor mucho menor.
- En lo referente a la comparación entre ambos laminados se puede afirmar que el daño a fatiga afecta menos en el laminado CP30 que en el CP450.

5.2 Estudios futuros

Aunque el análisis realizado en este TFG sea bastante concreto y cerrado siempre existen maneras de mejorar y ampliar estos estudios.

Una de las principales vías por las que se puede seguir desarrollando este trabajo es el estudio de laminados intermedios entre el CP30 y el CP450. En este proyecto se han analizado laminados muy extremos, por un lado, el CP450, que es un laminado convencional y relativamente grueso, y por otro, el CP30, que es un laminado con un espesor bastante pequeño. Es por esto por lo que sería de gran interés ver el comportamiento de laminados con espesores intermedios.

Otra de las líneas de estudio para ampliar el TFG, es el estudio mediante modelos numéricos en 3 dimensiones, con el fin de observar el comportamiento de las probetas en función de la profundidad de las grietas existentes.

En este trabajo solo se analiza el problema asumiendo que el daño existente en un extremo de la probeta ha progresado a todo el ancho de la misma y sería de enorme interés observar el comportamiento de estas probetas a flexión en función de la penetración de dichas grietas.

REFERENCIAS

- [1] F. París, J. Cañas, J.C. Marín y A. Barroso, "Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos," Sección de publicaciones de la Universidad de Sevilla. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.
- [2] Compuestos plásticos reforzados con fibras. Determinación de las propiedades de flexión, UNE-EN ISO 14125:1998, Septiembre 1999.
- [3] S. W. Tsai, "Thin Ply Composites", Standford University, Standford, 2005.
- [4] S. Sihm, R. Y. Kim, K. Kawabe y S. W. Tai, "Experimental studies of thin-ply laminated composites", University of Dayton, 2006.
- [5] B. Mohammadi, "Fatigue driven matrix crack propagation on laminated composites", Iran University of Science and Technology, Tehran, 2018.
- [6] K. Tohgo, S. NakagawaA and H. Araki, "Damage behavior and Life Prediction in CFRP Cross-Ply", Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University, Japan.
- [7] R. Prieto-García, S. Sánchez Carmona, E. Correa Montoto y F. París. "Tipología de daños observados ante carga cíclica en laminados cross-ply con lámina de 90° ultradelgada de 30g/m²", XIV Congreso Nacional de Materiales Compuestos- MATCOMP21, 21-23 junio 2022. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/361912606>
- [8] M. L. Velasco, "A fully physically based explanation of the scale effect in composites", Ph.D. Thesis, Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla, 2021.
- [9] E. J. Barbero, "Introduction to Composite Material Design", Segunda edición, Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis, 2011. ISBN: 978-1-4200-7915-9.
- [10] L. P. Kollar y G. S. Springer, "Mechanics of Composite Structures," Cambridge University Press, 2009.