

Trabajo fin de
Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio del efecto de la técnica de resanado en
reparaciones de material compuesto

Autor: Carlos Martínez León

Tutor: Jesús Justo Estebaranz

Federico París Carballo

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



Sevilla, 2017



Trabajo de fin de Grado
Grado en Ingenierías en Tecnologías Industriales

Estudio del efecto de la técnica de resanado en reparaciones de material compuesto

Autor:

Carlos Martínez León

Tutor:

Jesús Justo Estebananz

Profesor titular

Federico París Carballo

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo de fin de Grado: Estudio del efecto de la técnica de resonado en reparaciones de material compuesto

Autor: Carlos Martínez León

Tutor: Jesús Justo Estebaranz y Federico París Carballo

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis compañeros

A mis tutores

Agradecimientos

Los estilos adoptados por nuestra Escuela y utilizada en este texto es una versión y adaptación a Word® del la versión L^AT_EX que el Prof. Payán realizó para un libro que desde hace tiempo viene escribiendo para su asignatura. Por ello, la Escuela le está agradecida. Por otro lado, la adaptación se hizo sobre un formato que el prof. Aguilera arregló, basándose en su tesis doctoral. Su aportación ha sido muy relevante para que este formato vea la luz. Esta adaptación la llevamos a cabo el alumno Silvio Fernández, becario del Centro de Cálculo, y yo mismo, sobre un trabajo preliminar del alumno Julián José Pérez Arias.

A esta hoja de estilos se le incluyó unos nuevos diseños de portada. El diseño gráfico de las portadas para proyectos fin de grado, carrera y máster, está basado en el que el prof. Fernando García García, de la Facultad de Bellas Artes de nuestra Universidad, hiciera para los libros, o tesis, de la sección de publicación de nuestra Escuela. Nuestra Escuela le agradece que pusiera su arte y su trabajo a nuestra disposición.

Juan José Murillo Fuentes

Subdirección de Comunicaciones y Recursos Comunes

Sevilla, 2013

Resumen

En nuestra Escuela se producen un número considerable de documentos, tantos docentes como investigadores. Nuestros alumnos también contribuyen a esta producción a través de sus trabajos de fin de grado, máster y tesis. El objetivo de este material es facilitar la edición de todos estos documentos y a la vez fomentar nuestra imagen corporativa, facilitando la visibilidad y el reconocimiento de nuestro Centro.

Por otro lado, los alumnos muestran en la mayoría de las ocasiones, un desconocimiento absoluto de los programas informáticos de edición de texto. Esto es, de los elementos de un texto y de las herramientas para editarlos.

El objetivo de este documento es doble. Por un lado establecer un formato uniforme, mediante la adaptación de este fichero en formato electrónico, y por otro iniciar al usuario en las herramientas de edición de Microsoft Word.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	11
1.1. Antecedentes	12
1.2. Objetivo del proyecto	18
1.3. Estructura del proyecto	18
2 Ensayos preliminares	19
2.1. Objetivo de los ensayos	19
2.2. Materiales empleados	19
2.3. Instrumentación	19
2.4. Fabricación	19
2.5. Preparación de bolsa de vacío	20
2.6. Ciclo de curado	21
2.7. Preparación de probetas	22
2.8. Ensayos	23
2.9. Conclusiones	26
3 Resanado de defectos en materiales compuestos	31
3.1. Objetivo del estudio	31
3.2. Laminados empleados	31
3.3. Fresadora	32
3.4. Herramienta Dremel	42
3.5. Herramienta Air Sandre, amoladora neumática	46
3.6. Reparaciones	50
3.7. Curvatura del laminado	53
3.8. Micrografías del parche	55
3.9. Preparación de probetas	56
3.10. Ensayos	56
3.11. Resultados	58
4 Conclusiones y desarrollo futuro	63
Referencias	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Niveles de daño.	12
Tabla 1.2 – Tipología de los métodos de inspección.	13
Tabla 1.3 – Factores de influencia en las reparaciones.	15
Tabla 1.4 – Ventajas y desventajas de las reparaciones adhesivas.	17
Tabla 2.1 – Resultados de los ensayos.	23
Tabla 3.1 – Dimensiones de los laminados.	31
Tabla 3.2 – Distribución de escalones.	34
Tabla 3.3 – Datos de las probetas de ensayo.	58
Tabla 3.4 – Resultado de los ensayos parche cóncavo.	59
Tabla 3.5 – Resultado de los ensayos parche convexo.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Demanda mundial de CRP en toneladas por año.	11
Figura 1.2 - Daños comunes.	14
Figura 1.3 - Tipos de reparaciones adhesivas.	16
Figura 2.1 - Esquema del laminado.	20
Figura 2.2 - Esquema de la bolsa de vacío.	21
Figura 2.3 - Ciclo de curado.	22
Figura 2.4 - Probeta sobre máquina de tracción.	23
Figura 2.5 - Probeta 1.	24
Figura 2.6 - Probeta 2.	24
Figura 2.7 - Probeta 3.	25
Figura 2.8 - Probeta 4.	25
Figura 2.9 - Comparativa de valores de tensión de rotura.	26
Figura 2.10 - Rotura esperada.	27
Figura 2.11 - Rotura obtenida.	27
Figura 2.12 - Rotura probeta 1.	28
Figura 2.13 - Rotura probeta 2.	28
Figura 2.14 - Rotura probeta 3.	29
Figura 2.15 - Rotura probeta 4.	29
Figura 3.1 - Esquema laminado 1.	32
Figura 3.2 - Esquema laminado 2.	32
Figura 3.3 - Esquema laminado 3.	33
Figura 3.4 - Fresadora.	34
Figura 3.5 - Esquema de fresado.	35
Figura 3.6 - Resanado primer escalón completo.	36
Figura 3.7 - Acabado del panel 1.	36
Figura 3.8 - Grieta trasera.	37
Figura 3.9 -Equipo de ultrasonidos.	37
Figura 3.10 - Escalones del panel 2.	38
Figura 3.11 - Grieta cara posterior.	38
Figura 3.12 - Acabado panel 2.	39
Figura 3.13 - Acabado panel 3.	40
Figura 3.14 - Marcas de la fresadora.	40
Figura 3.15 - Acabado panel 4.	41
Figura 3.16 - Bordos de escalón.	41
Figura 3.17 - Aspecto del laminado 2.	42

Figura 3.18 - Daño sobre laminados.	43
Figura 3.19 - Herramienta Dremel y útil.	44
Figura 3.20 - Cabezales.	44
Figura 3.21 - Acabado con Dremel y esquema de orientaciones.	45
Figura 3.22 - Amoladora neumática.	46
Figura 3.23 - Esquema de ultrasonidos.	47
Figura 3.24 - Esquema del defecto en el laminado.	47
Figura 3.25 - Detalle del aspecto del defecto durante el lijado.	48
Figura 3.26 - Detalle de las diferentes capas.	49
Figura 3.27 - Patrón de capa a 90°.	51
Figura 3.28 - Patrón de capa a -45°.	51
Figura 3.29 - Patrón de capa a 45°.	51
Figura 3.30 - Patrón de capa a 0°.	52
Figura 3.31 - Patrón de capa de solape.	52
Figura 3.32 - Aspecto del parche pre-curado.	53
Figura 3.33 - Curvatura sin parche.	54
Figura 3.34 - Curvatura con parche pre-curado.	54
Figura 3.35 - Curvatura con parche curado.	54
Figura 3.36 - Detalle de la reparación.	55
Figura 3.37 - Solape de capas.	55
Figura 3.38 - Grietas en el laminado base.	56
Figura 3.39 - Primera prueba del ensayo.	57
Figura 3.40 - Esquema de la segunda configuración.	57
Figura 3.41 - Parada de ensayo.	57
Figura 3.42 - Comparación de resultados parche cóncavo.	59
Figura 3.43 - Comparación de resultados parche convexo.	60
Figura 3.44 - Detalle de rotura.	61
Figura 3.45 - Rotura probeta 3.	61
Figura 3.46 - Zona estimada de rotura.	62
Figura 3.47 - Detalle del adhesivo.	62

INTRODUCCIÓN

Por todos es conocido el impacto que supuso en todo tipo de industrias la aparición de los compuestos reforzados con fibra de carbono (CRP) a lo largo de la década de los 60. En la actualidad, se encuentran en medios de transporte, estructuras, materiales deportivos y, de hecho, la mayoría de ellos no serían totalmente diferentes sin este tipo de materiales.

Es por ello que el consumo de materiales reforzados con fibras, y en especial aquellos reforzados con fibra de carbono se haya disparado con el cambio de milenio. Según un estudio realizado por la asociación *Carbon Composites* en el año 2012, la situación actual no es más que el comienzo. (Figura 1.1). [1]

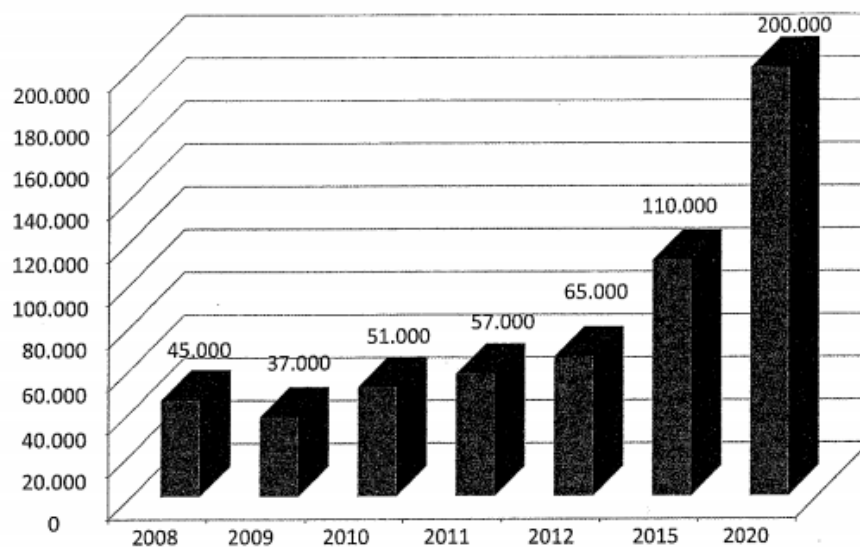


Figura 1.1. Demanda mundial de CRP en toneladas por año

Debido a este fenómeno, no es de extrañar que las empresas de los sectores implicados en el uso de los productos elaborados mediante CRP hayan empezado a preocuparse por el reciclaje y reparación de aquellos elementos que hayan sido dañados durante su uso o simplemente tengan un defecto de fabricación. Cabe recordar el comportamiento termoestable que experimentan las resinas epoxy que normalmente funcionan como matriz, con lo cual no es posible la “refundición” el elemento en cuestión.

1.1 Antecedentes

Como ha sido comentado anteriormente, el campo de aplicación de los materiales compuestos se ha aumentado en gran medida desde mediados de siglo pasado. En los últimos tiempos, se han llevado a cabo numerosas investigaciones en el campo de las reparaciones de los mismo, buscando técnicas más rápidas, más accesibles y sobre todo, menos costosas.

En gran medida, los procesos de reparación están definidos por los operadores, puesto que no se encuentran estandarizados o recogidos en una normativa. Precisan, por tanto, de un proceso de inspección no destructiva, quedando la elección sobre la reparación en manos del inspector.

Técnicas de reparación

El objetivo buscado mediante la reparación es devolver a una pieza dañana los niveles mínimos de sus propiedades mecánicas, como la rigidez y la dureza, así como su buen comportamiento en servicio, intentando buscar ante todo el comportamiento que se tendría si la pieza no hubiese sido dañada.

Tras la fabricación de una pieza de CRP, es obligatoria una inspección mediante ultrasonidos mediante la cual es posible detectar si la fabricación se ha realizado correctamente. Si se decide que una pieza debe ser reparada, es necesario seleccionar el criterio de reparación, elegir adecuadamente los materiales que se van a utilizar y los procesos que se llevarán a cabo.

Una vez realizada la reparación, se realiza una segunda inspección mediante ensayos no destructivos para evaluar la calidad de la reparación realizada.

Tipología de daños

Cuando se habla de daño en laminados de material compuesto, éstos pueden llegar a ser desde pequeñas incrustaciones interlaminares que provocan una mala adhesión de las láminas, hasta colapsos del núcleo de un panel sandwich, de varios centímetros de espesor. En la Tabla 1.1 se recogen los diferentes grados de daños:

Tabla 1.1. Niveles de daño

<i>Designación</i>	<i>Descripción</i>	<i>Reparación</i>
<i>Nivel 0</i>	Delaminación o descolado de elementos rigidizadores	Tornillo pasador de retención o reparación or inyección de resina
<i>Nivel 1</i>	Daño crítico a un element structural (piel o refuerzo)	Sejcción mecánica o parce / empalme enclado.
<i>Nivel 2 (o superior)</i>	Múltiples casos de nivel 1 de daño	Igual que en nivel 1

Tipología de inspecciones

Aunque los métodos más comunes en la realización de las inspecciones, existen métodos basados en ensayos no destructivos (END) que permiten la evaluación del estado de una pieza más allá de lo que se puede apreciar a simple vista. En la Tabla 1.2 se recogen diferentes tipos de inspecciones.

Tabla 1.2 – Tipología de los métodos de inspección.

<i>Método</i>	<i>Tipo de estructura</i>	<i>Daño detectado</i>	<i>Fiabilidad</i>
<i>Visual</i>	Todas	Daño superficial	Buena
<i>Tap test</i>	Laminados finos	Delaminaciones próximas a la superficie	Buena
		Defectos en la union	Buena
		Desencolado proximo a la superficie	Buena
		Huecos	Mala
		Nucle dañado	Mala
<i>Ultrasonidos</i>	Todas	Delaminaciones	Buena
		Defectos en la union	Buena
		Agua en núcleo	Mala
		Daño en núcle	Mala
<i>Rayos X</i>	Todas	Desencolados/Delaminados	Mala
		Delaminación de esquinas	Buena
<i>Shearografía</i>	Todas	Desencolados/Delaminados	Buena
<i>Termografía infrarroja</i>	Todas	Desencolados/Delaminados	Buena

Una vez realizada la inspección, será necesario establecer un patrón de reparación, que debe ser consecuente con el tipo de daño y la tipología de la reparación que se quiere llevar a cabo.

Evaluación de daños

Una vez se ha identificado la existencia de un daño, es necesario recopilar la siguiente información para evaluar el proceso de reparación:

1. Caracterización del daño:
 - a. Geometría, tipología y dimensiones.
 - b. Ubicación dentro de la pieza
2. Capacidad de reparación

Defectología

En la figura 1.2 se presentan diferentes tipos de los daños más comunes:

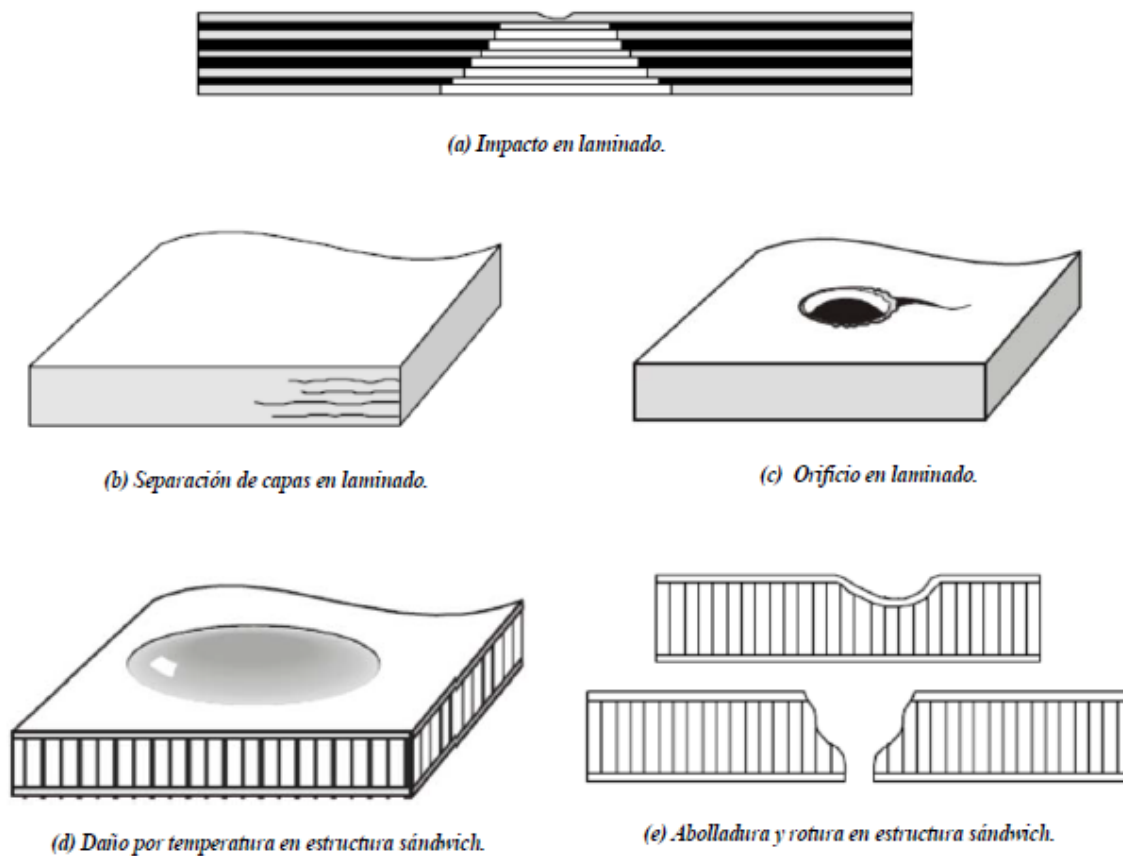


Figura 1.2 - Daños comunes

Tipos de reparación

La elección del tipo de reparación se lleva a cabo una vez la pieza ha sido inspeccionada, y evaluado el nivel de daño que tiene. Se pueden diferenciar los siguientes tipos de reparación:

- Cosmética: se realiza cuando se ha determinado que la integridad estructural de la pieza no ha sido dañada, sino que el daño es meramente superficial. El fin de esta reparación es proteger y decorar la superficie.
- Temporal: una vez detectado el daño, se estima que la integridad estructural de la pieza no está afectada, pero si no se actúa sobre ella y se mantiene en servicio, puede verse afectada por fenómenos de fatiga o humedad. Se emplean parches temporales.
- Estructurales: el daño es lo suficientemente severo como para haber dañado la continuidad de las fibras o haber colapsado el núcleo de un panel sandwich. Es necesario reemplazar los componentes dañados con el fin de lograr las propiedades mecánicas iniciales.

Técnica de reparación

Normalmente, las piezas que van a ser reparadas, están sometidas a diferentes tipos de carga. La existencia de un defecto en ellas provocará que esa zona sea más débil a la hora de resistir tales cargas. Por tanto, las reparaciones, tanto adhesivas como abulonadas, se llevan a cabo con el fin de añadir material a la zona debilitada, es decir, añadir material para devolver en la medida de lo posible las propiedades mecánicas.

La realización de una reparación abulonada o adhesiva estará determinada tanto por los equipos con los que se cuenta para realizar la reparación como por las características geométricas de la zona a reparar. En la Tabla 1.3 se reflejan algunas de estos factores.

Tabla 1.3 – Factores de influencia en las reparaciones

<i>Condicion</i>	<i>Abulonada</i>	<i>Adhesiva</i>
<i>Ligeramente cargada, delgada < 2.5 mm</i>		X
<i>Altamente cargada, gruesa > 2.5 mm</i>	X	
<i>Altas tensiones de pelado</i>	X	
<i>Exstructura panal de abeja</i>		X
<i>Superficies adherencia limpias y secas</i>	X	X
<i>Superficies adherencia sucias o contaminadas</i>	X	
<i>Requiere sellado</i>	X	X
<i>Requiere desmontaje</i>	X	
<i>Sin dejar marcas</i>		X

Reparaciones adhesivas

Una vez analizada la técnica, la reparación puede realizarse de diferentes modos. En la Figura 1.3 se reflejan las diferentes formas de realizar la reparación adhesiva (por adición de parche). Las ventajas y/o desventajas se enumeran en la Tabla 1.4.

- Adición superficial (Patch repair): consiste en añadir sobre la superficie sin resanar tantas capas como láminas hayan sido dañadas, añadiendo una capa adicional externa que cubra toda la superficie renovada.
- Resanado cónico (Scarf patch repair): mediante el uso de una herramienta de cabezal cónico, se consigue resanar la zona dañada, retirando las láminas que han quedado dañadas. El acabado del resanado es una superficie cónica o troncocónica. Una vez retirada la zona dañada, se añade una capa de adhesivo, sobre la cual se colocan tantas capas de material nuevo como láminas se hayan retirado. Esta adición no se realiza con forma cónica, sino escalonada.

Esta reparación ofrece una mayor adherencia que la anterior, aunque pueden introducirse problemas al tener una zona lisa adherida a una zona escalonada.

- Resanado escalonado (Stepped repair): más simple que la operación anterior, con el uso de herramientas de cabezales planos se realiza un resanado perimetral escalonado, dejando la zona afectada en el centro de la reparación. Mediante el uso de patrones, se añaden tantas capas de material renovado como láminas que han quedado dañadas, como en el procedimiento anterior, pero esta vez gracias al uso de los patrones se puede asegurar que las capas que se añaden se adaptan fielmente a la forma del resanado escalonado.

Esta reparación es la que arroja mejores resultados en cuanto adherencia

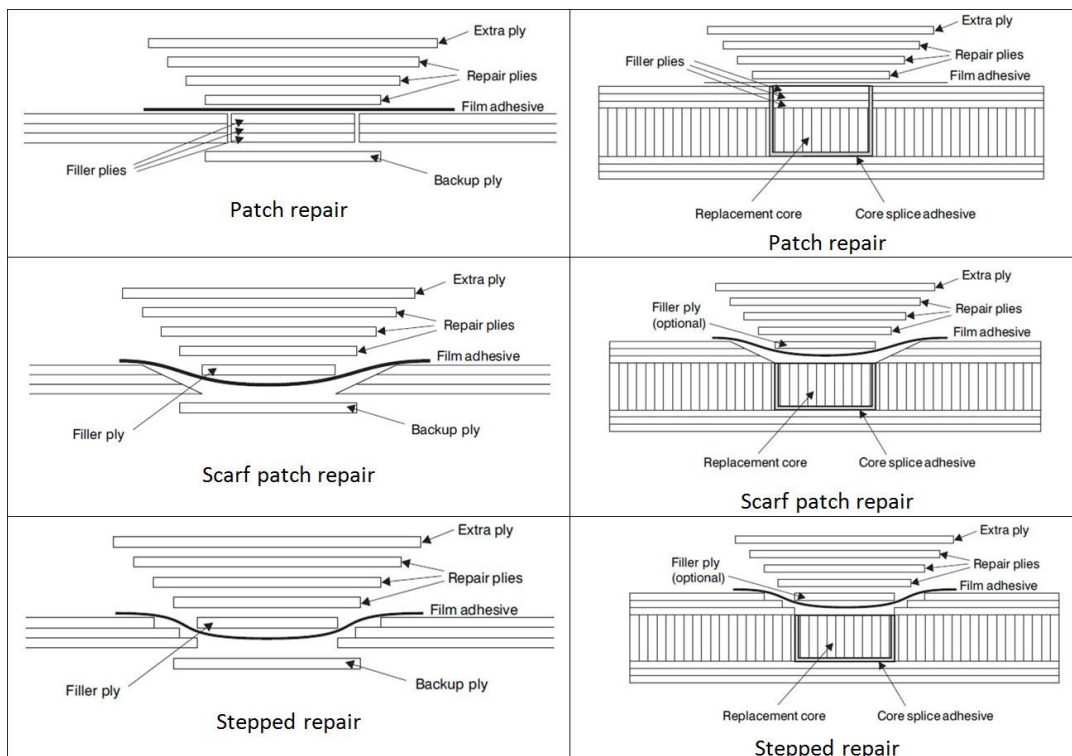


Figura 1.3 – Tipos de reparaciones adhesivas

Tabla 1.4 – Ventajas y desventajas de reparaciones adhesivas

<i>Tipo de reparación adhesiva</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<i>Superficial</i>	Fácil realización	Aumento de peso
	Mínima preparación	Espesor mayor
<i>Cónico</i>	Espesor similar al original	Dificultad de realización
	Buena adhesión entre capas superpuestas	
<i>Escalonado</i>	Espesor similar al original	
	Buena adhesión entre capas y con el laminado original	

Elección de materiales de reparación

Es necesario que la elección de los materiales que se van a utilizar para llevar a cabo la reparación sea consecuente con los materiales utilizados en la fabricación del laminado base y con el adhesivo, además de tener en cuenta los posteriores procesos de curado.

Los parches pueden realizarse tanto en material metálico como en material compuesto. Éstos, estarán compuestos por capas unidireccionales escalonadas, cuyas orientaciones coincidirán con las del laminado base.

En cuanto a los adhesivos, podrán encontrarse de dos tipos:

- Líquidos, que aseguran una buena uniformidad de la capa adherente gracias a la formación de una película sobre la misma, aunque como contrapartida requieren de un equipo de refrigeración especial.
- Pastosos, más fácilmente aplicables a zonas de difícil acceso para los adhesivos líquidos.

Los adhesivos que forman una película son empleados cuando se realizan los parches mediante preimpregnados, ya que se necesitan mayores temperaturas y presiones de curado.

1.2 Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es evaluar los diferentes procesos de realización del resanado sobre laminados con diferentes tipos de orientaciones, así como evaluar el comportamiento de tales reparaciones ante ensayos de flexión en tres puntos.

Para ello, se realizarán pruebas de resanado sobre diferentes paneles con distintas máquinas de taller, para poder evaluar cuál ofrece mejores acabados.

El procedimiento que se va a seguir es:

1. Elaboración de los paneles. Algunos paneles se elaborarán con un defecto inducido y otros no. Los primeros serán para su posterior ensayo y los segundos para realización de las pruebas de las herramientas.
2. Resanado con diferentes herramientas.
3. Trazado de patrones para los parches.
4. Elaboración y pegado de los parches.
5. Corte y ensayo de las probetas.
6. Estudio de los datos obtenidos.

1.3 Estructura del proyecto

Este trabajo ha sido estructurado en cuatro bloques principales, donde se tratarán los siguientes aspectos:

En el bloque primer, *Introducción*, se han planteado los antecedentes sobre las reparaciones en laminados de material compuesto, así como los tipos de resanado y reparaciones. También se incluyen los objetivos del proyecto y la estructura del mismo.

En el segundo bloque, *Ensayos preliminares*, se van a presentar resultados relacionados con ensayos realizados a una batería de probetas realizadas con láminas unidireccionales a 0° , a las cuales se les han inducido un defecto. Los ensayos se realizarán a tracción y el objetivo de esta batería de ensayo es determinar cómo afectan los defectos en los laminados, y comprobar si realmente fuese necesaria la reparación.

En el tercer bloque, *Resanado de defectos en materiales compuestos*, se pondrán en práctica los aspectos teóricos comentados en el bloque primero sobre el resanado y las reparaciones. Posteriormente, se ensayarán las probetas reparadas para comprobar si se ha mejorado en el procedimiento de reparación.

El cuarto y último bloque, *Conclusiones y desarrollo futuro*, se hará un resumen de todo lo expuesto en este trabajo, así como aspectos interesantes que no haya sido posible estudiar en el desarrollo del mismo.

ENSAYOS PRELIMINARES

En este bloque se presentarán los resultados obtenidos al ensayar a tracción probetas de laminados de fibra de carbono, a las cuales se les ha inducido un defecto central.

2.1 Objetivo de los ensayos

La razón de la inclusión de estos ensayos previos es la falta de datos que se tienen sobre el comportamiento de los laminados defectuosos no reparados ante ensayos de tracción. Con este estudio se planteará el comportamiento de tales laminados, y el efecto que ejerce la existencia del defecto tanto en la carga de rotura como en su morfología.

2.2 Materiales empleados

El material empleado en la fabricación del laminado ha sido preimpregnado de fibra de carbono M21-E 34%.

Para la simulación del defecto se tenía dos posibilidades. Por un lado era posible simularlo mediante la colocación de una pieza de teflón entre las capas. Por otro lado, se puede dejar el plástico protector del rollo de preimpregnado entre una de las capas. Como es frecuente olvidar retirar este plástico protector, se ha decidido elegir esta opción.

Una vez se tengan listas las probetas, se le añadirán tacos de fibra de vidrio a los extremos de las mismas para asegurar el agarre a la máquina de tracción, y asegurar que la rotura de la probeta no se produzca por las zonas de las mordazas.

2.3 Instrumentación

El equipo empleado para los ensayos ha sido una máquina Instron 4482. Para poder registrar la deformación de las probetas, se hará uso de un extensómetro.

2.4 Fabricación

El panel que va a fabricarse consistirá en 8 láminas de 100x300 mm, cuya orientación será de todas las láminas a 0°. Una vez apiladas cuatro láminas, se llevará el laminado a una bolsa de precompactación donde se le aplicará vacío durante 5 minutos.

Una vez se haya terminado este proceso, se realizará la misma operación con las cuatro siguientes láminas. Hay que recordar que entre la lamina 4 y la lamina 5 es necesario dejar parte del plástico protector. No se puede dejar el plástico en su totalidad, puesto que la idea del plástico es interrumpir la interacción entre las laminas. Si se dejase un plástico protector de 300x300 entre la lamina 4 y 5, lo único que se conseguiría serían dos laminados de 4 capas.

Con el fin de tener localizado el defecto, se marcará sobre el plástico protector de la lámina 5 el punto medio, y se realizará una banda de 50 mm a lo largo de la misma, quedando un defecto central de 50x300. En la Figura 2.1 se recoge un esquema del mismo.

Una vez asegurada la existencia del defecto, se completará la construcción del panel y se procederá a una

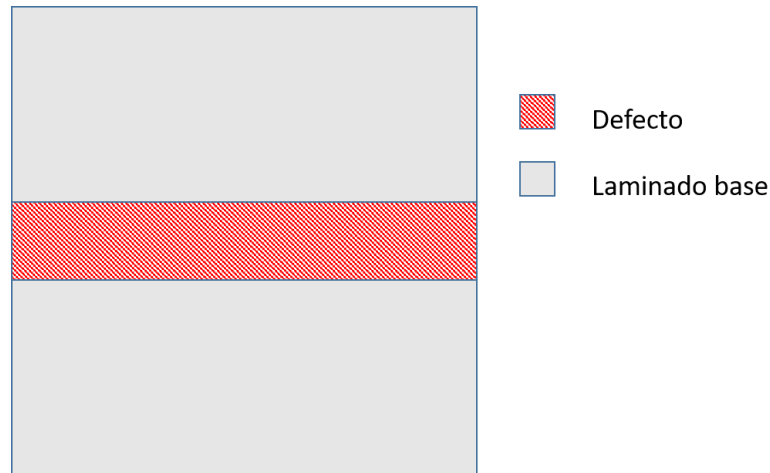


Figura 2.1 Esquema del laminado

2.5 Preparación de la bolsa de vacío

2.5.1 Materiales necesarios

Para la preparación de la bolsa de curado serán necesarios los siguientes materiales:

- Plancha metálica
- Teflón
- Cinta de corcho
- Airweave
- Cinta de cromato
- Bolsa de compactación
- Tomas de vacío

Adicionalmente puede llegarse a necesitar papel y acetona.

2.5.2 Montaje de la bolsa de vacío

Para el montaje de la bolsa de curado se seguirán los siguientes pasos. Un esquema final de la bolsa de curado se puede apreciar en la Figura 2.2.

En primer lugar es necesario asegurar que la plancha metálica está completamente limpia. Si ese no fuese en caso, se limpiará la superficie con un trozo de papel y acetona. Una vez limpia, se coloca un recorte de teflón lo suficientemente grande como para cubrir el tamaño del panel (en nuestro caso de 100x300).

Sobre el teflón se coloca el panel que se va a curar en el autoclave, y se rodean sus bordes con cinta de corcho para evitar el sangrado de la resina.

Una vez se haya dispuesto el corcho, se vuelve a cubrir todo con un recorte de teflón. Tanto el teflón inferior como el superior ayudarán en el desmoldeo de la pieza tras el curado. El inferior evitará que ésta se pegue a la plancha metálica. El superior evitará que los hilos del airweave se incrusten en el laminado cuando la resina se caliente.

Tras el segundo recorte de teflón se colocará el airweave, y sobre este se dispondrán las tomas de vacío, lo suficientemente alejadas de la pieza.

Cuando este conjunto esté terminado, sobre la plancha metálica y fuera de los bordes del teflón se hará un perímetro con la cinta de cromato para, posteriormente, pegar sobre él el plástico externo de la bolsa de compactación.

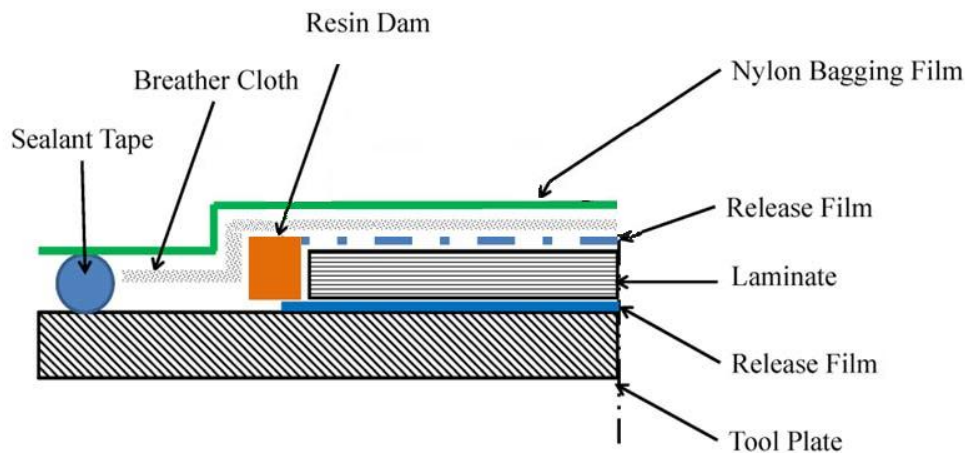


Figura 2.2 – Esquema de la bolsa de vacío.

2.6 Ciclo de curado

El curado de las piezas se realizará mediante el autoclave. El ciclo [1] que se va a llevar a cabo es es ciclo estándar de curado, el cual se ilustra en la figura 2.3, que consistirá en:

- 1] Se aplica vacío completo dentro de la bolsa.
- 2] Se aplica presión de 7-9 bares por fuera de la bolsa mediante el autoclave.
- 3] Se establece una temperatura máxima del autoclave de 180 ± 5 °C. La rampa de subida de tempera se programa en 1 - 2 °C/min.
- 4] Se mantiene a máxima temperatura durante 120 min.
- 5] La rampa de enfriamiento se realiza de 2 - 5 °C/min.
- 6] La presión se libera cuando se han alcanzado los 60 °C o menos.

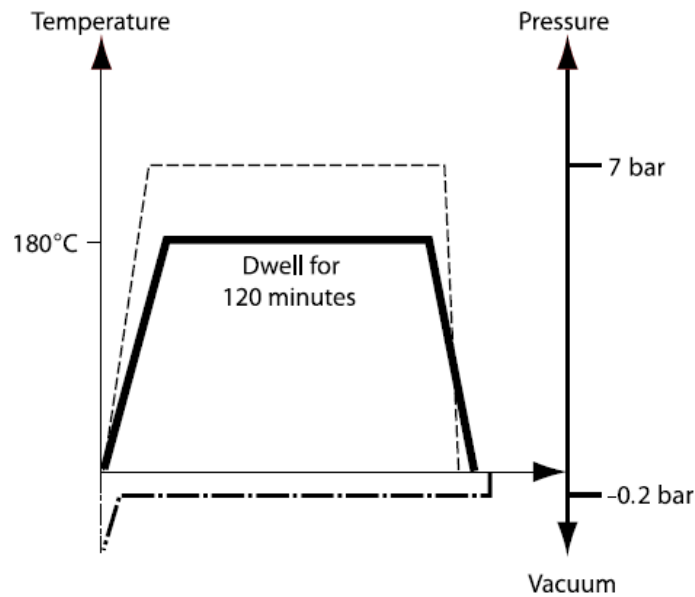


Figura 2.3 – Ciclo de curado.

2.7 Preparación de las probetas

Una vez se tiene el panel curado, es necesario que se prepare para poder ser ensayado. Para ello se le deben colocar unos tacones de fibra de vidrio por la zona donde va a actuar la mordaza. Una vez colocados estos tacones, se cortarán las diferentes probetas a ensayar.

Para la colocación de los tacones de fibra de vidrio se cortarán 4 láminas de 50x300 de tal material. Para asegurar la efectividad de la unión, se preparará la superficie tanto de los tacones como del panel. Para ello, se tratarán ambas superficies con una lija de desbaste.

El adhesivo que se usará para pegar las dos superficies será [_____]. El proceso de pegado de los tacones de fibra de vidrio requiere del uso del autoclave, puesto que el adhesivo trabaja como si se tratara de un preimpregnado, simplemente que el ciclo de curado es más sencillo.

█

█

Una vez los tacones de fibra de vidrio están adheridos al panel, se procede al corte de este a dimensiones asequibles para el ensayo. Se decide sacar 4 probetas de 20x300. Así nos aseguramos que se va a producir la rotura de las mismas con una célula de carga de 15000 kg.

2.8 Ensayos y resultados

2.8.1 Datos y resultados

Los datos de cada probeta se recogen en la tabla 2.1. Los espesores se han promediado tomando tres medidas de espesor en las zonas sin defecto, y otras tres medidas más en la zona con defecto (9 medidas en total). En la tabla antes mencionada se recogen también los valores obtenidos en el ensayo de tracción de las mismas, así como la resistencia a la tracción, obtenida mediante los valores de carga máxima y sección de las probetas.

En la figura 2.4 se muestra en montaje de las probetas en la máquina de tracción. Se omite en la figura 2.4 el uso del extensómetro, pues este se retira para evitar que reciba daños cuando se produce la rotura de la probeta.

En las figuras 2.5 a 2.8, se recogen los resultados de los ensayos de tracción correspondientes a las probetas de la 1 a la 4.

Tabla 2.1 – Resultado de los ensayos

<i>Pieza</i>	<i>Longitud, mm</i>	<i>Ancho, mm</i>	<i>Espesor, mm</i>	<i>Carga máxima, N</i>	<i>Resistencia tracción MPa</i>
<i>Probeta 1</i>	300	19.324	1.375	42251.67	1590.172
<i>Probeta 2</i>	300	18.836	1.372	35590.68	1307.760
<i>Probeta 3</i>	300	19.504	1.378	42094.71	1566.227
<i>Probeta 4</i>	300	19.455	1.375	39504.87	1476.783



Figura 2.4 - Probeta sobre máquina de tracción.

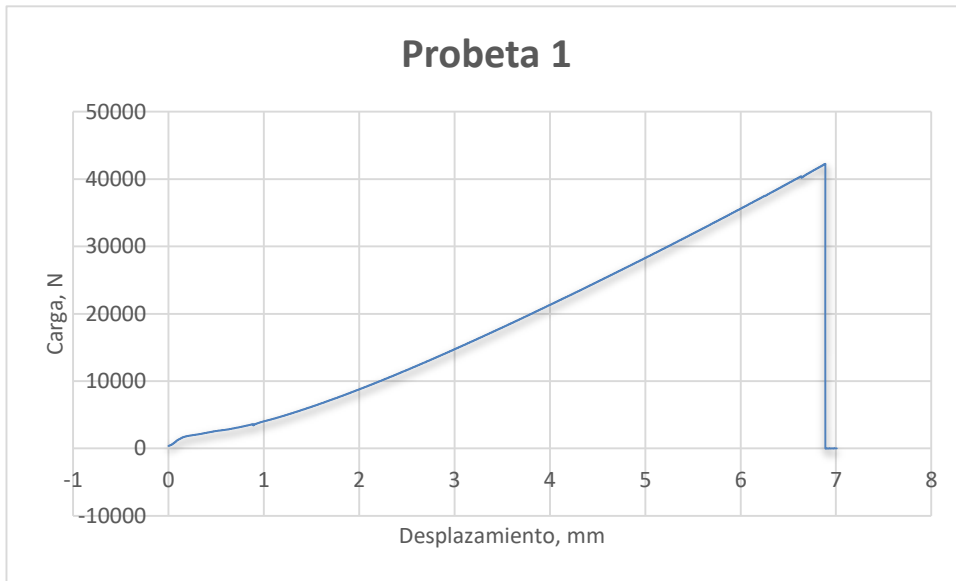


Figura 2.5 – Probeta 1.

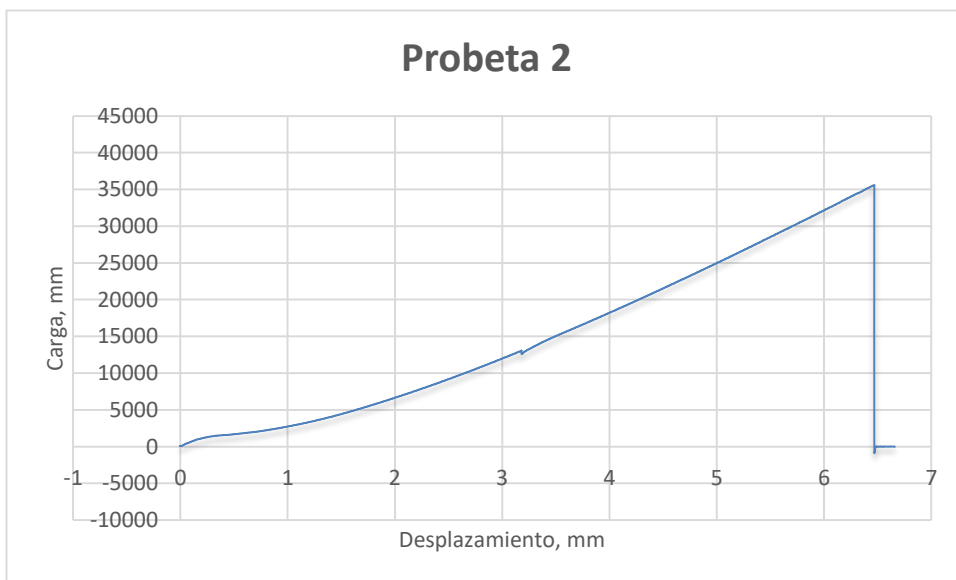


Figura 2.6 – Probeta 2.

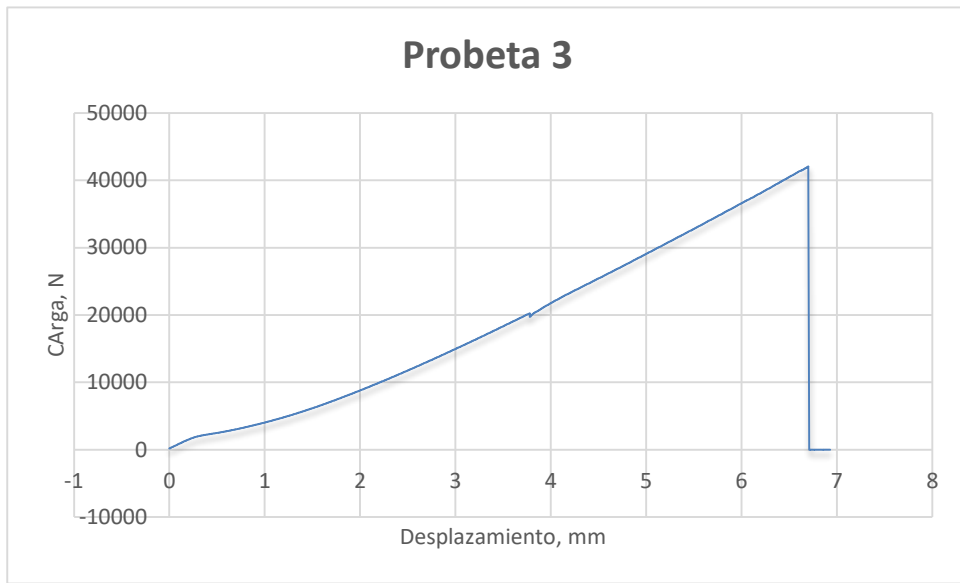


Figura 2.7 – Probeta 3.



Figura 2.8 – Probeta 4.

Por ultimo, en la figura 2.9 se recoge la comparativa de las gráficas Tensión – Desplazamiento de las cuatro probetas. Dado los resultados bastante similares, se puede asumir que se ha realizado con éxito el ensayo.

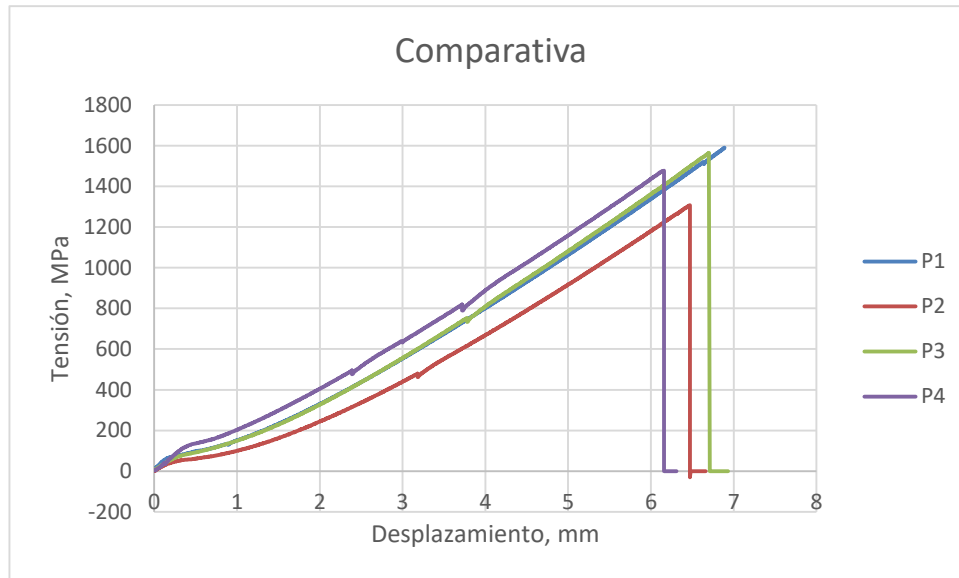


Figura 2.9 – Comparativa de valores de tensión de rotura.

2.9 Conclusiones

Realizados los ensayos es necesario aportar una serie de conclusiones sobre los datos obtenidos. Se abordarán dos criterios para las mismas, uno numérico, referido a los resultados que se derivan del ensayo, y otro visual, referido al modo de rotura de las probetas.

1.11.1 Valores de rotura

Si se toma la media de los valores obtenidos de resistencia a la tracción de las cuatro probetas, se obtiene un valor de 1485.246 MPa. Según la hoja de propiedades del material, la resistencia a la tracción de este tipo de preimpregnado es de 2860 MPa.

Como es lógico, se puede concluir que el defecto si tiene un efecto nocivo sobre las propiedades del laminado cuando éste trabaja a tracción.

Se puede argumentar que está disminución de la resistencia a la tracción esté asociada a que el defecto, al estar impidiendo la correcta adhesión de las láminas, pueda estar funcionando como un concentrador de tensiones.

1.11.2 Morfología de la rotura

Normalmente, un laminado de fibra de carbono con todas sus láminas orientadas a 0° experimenta una rotura explosiva cuando se ensaya a tracción (figura 2.10).

Sin embargo, la morfología de la rotura que han experimentado las probetas con el defecto ha sido un tanto diferente. En la figura 2.11 aparece la probeta colocada aún en la máquina de tracción. En ella se puede apreciar que, aunque hay láminas que han experimentado una rotura explosiva, existen otras zonas donde se ha producido una rotura limpia a 90°.

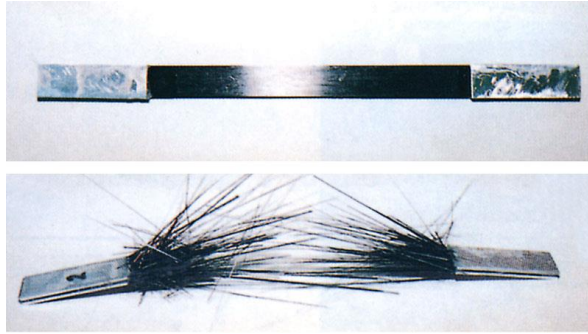


Figura 2.10 – Rotura esperada



Figura 2.11 – Rotura obtenida.

En la Figura 2.12 a 2.15 se pueden apreciar en detalle las diferentes probetas y sus morfologías de rotura.

Es necesario destacar que las zonas a de rotura limpia coincide con las zonas donde acaba y termina el defecto inducido. Es lógico pensar pues que la existencia de un defecto afecta indudablemente a la morfología de la rotura.

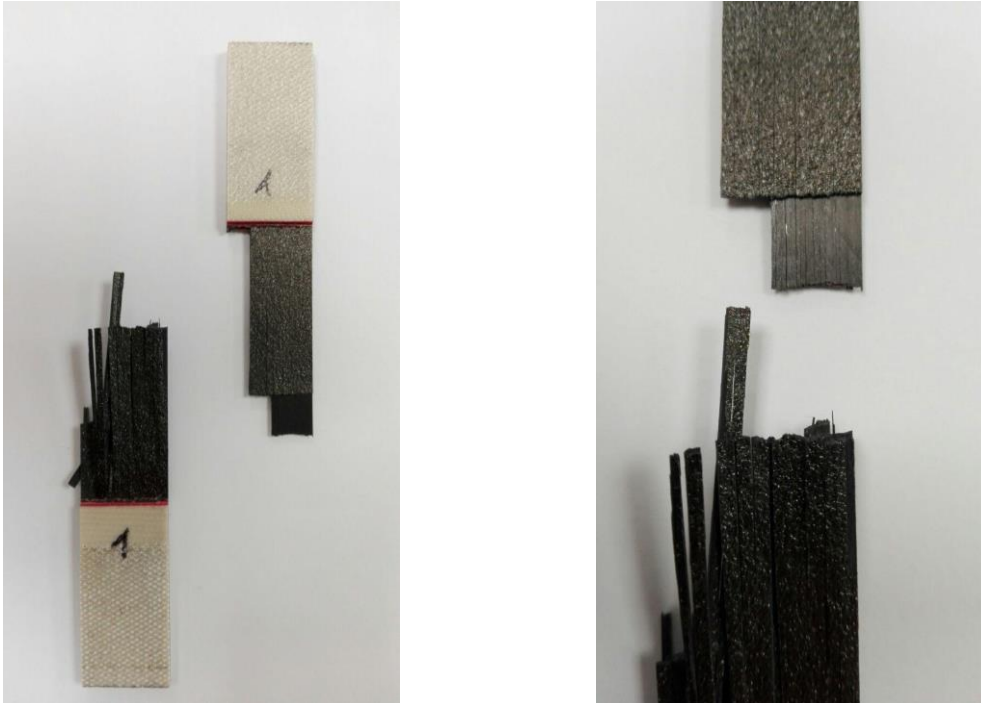


Figura 2.12 – Rotura probeta 1.

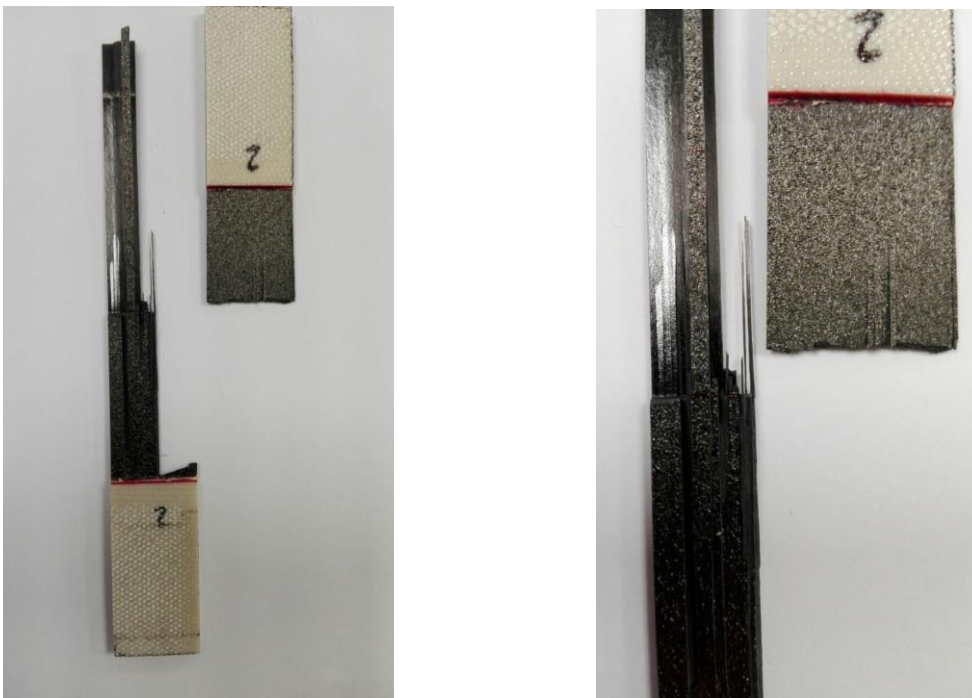


Figura 2.13 – Rotura probeta 2.



Figura 2.14 – Rotura probeta 3.



Figura 2.15 – Rotura probeta 4.

RESANADO DE DEFECTOS EN MATERIALES COMPUESTOS

El tercer bloque de este trabajo está dedicado a la experimentación mediante procesos manuales de diferentes técnicas de reparación de laminados. En primer lugar, se expondrán diferentes procedimientos y herramientas empleadas. Posteriormente, se realizará el resanado y reparación, y se ensayarán los paneles reparados.

3.1 Objetivos del estudio

El planteamiento de los diferentes procedimientos de resanado y reparación se fundamenta en la búsqueda de un mejor acabado superficial tras la realización del resanado. Este acabado superficial influirá en una mejor adhesión del parche de reparación a la pieza original y, por tanto, a conseguir unas mejores propiedades mecánicas.

El objetivo de este bloque es plantear los procedimientos de resanado y reparación, para posteriormente poder establecer ventajas e inconvenientes de los mismos. Una vez realizadas las reparaciones, se pasará a una batería de ensayos para comprobar si los resultados que se obtienen de tales reparaciones son lo suficientemente representativos.

3.2 Laminados empleados

Las pruebas de resanado se realizarán en tres tipos de laminados diferentes. Por un lado se tendrá un laminado compuesto por 9 capas, todas con orientación a 0° (a partir de ahora, laminado 1). El segundo laminado será de 8 capas también orientadas a 0° y finalmente un laminado de 8 capas con la secuencia de orientación $[0\ 45\ -45\ 90]_s$ (laminado 3).

El material empleado será el mismo que el comentado en el bloque anterior, M21 – E 34%. Los laminados tendrán defectos inducidos cuyas dimensiones, así como las de los laminados, se incluyen en la Tabla 3.1. Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 recogen la disposición de los defectos en los laminados.

Tabla 3.1 – Dimensiones.

<i>Laminado</i>	<i>Largo, mm</i>	<i>Ancho, mm</i>	<i>Defecto</i>	<i>Largo, mm</i>	<i>Ancho, mm</i>
<i>Laminado 1</i>	300	300	Regular	50	50
<i>Laminado 2</i>	250	250	Regular	70	50
<i>Laminado 3</i>	300	300	Irregular	-	-

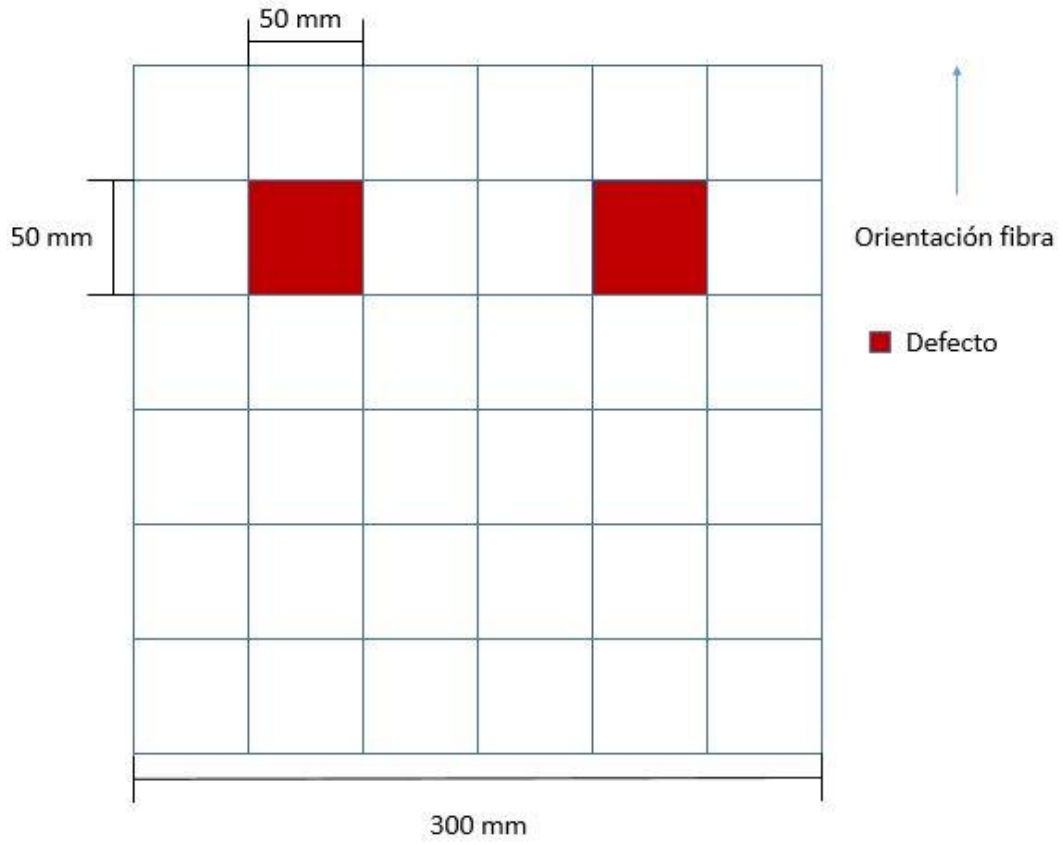


Figura 3.1 – Esquema laminado 1.

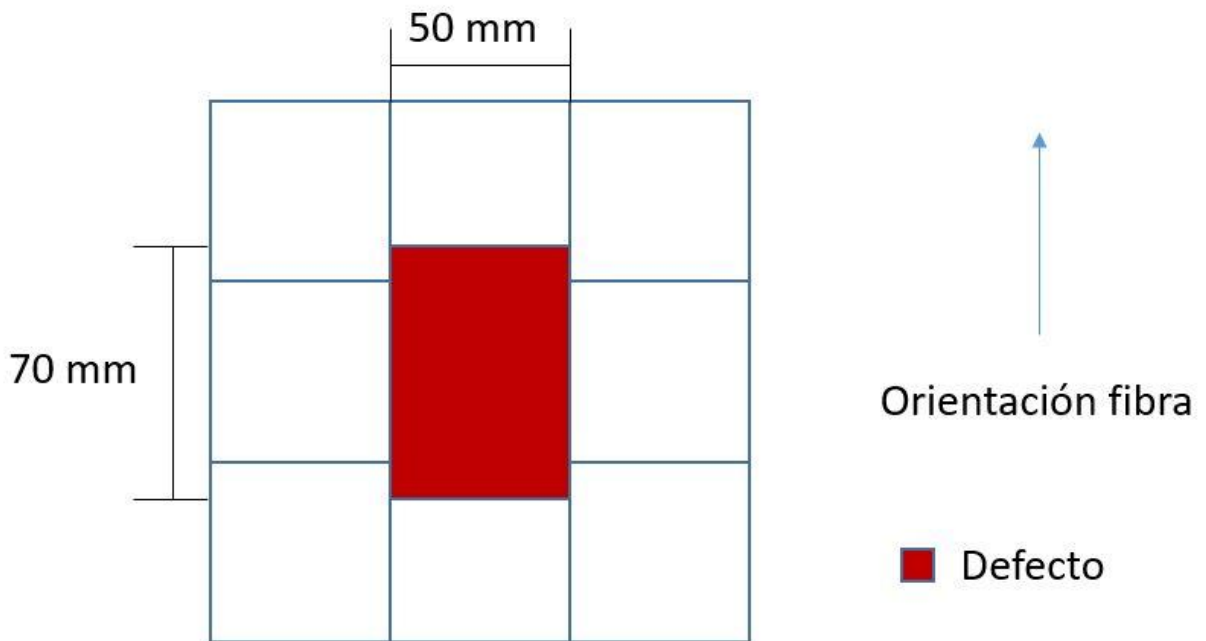


Figura 3.2 – Esquema laminado 2.

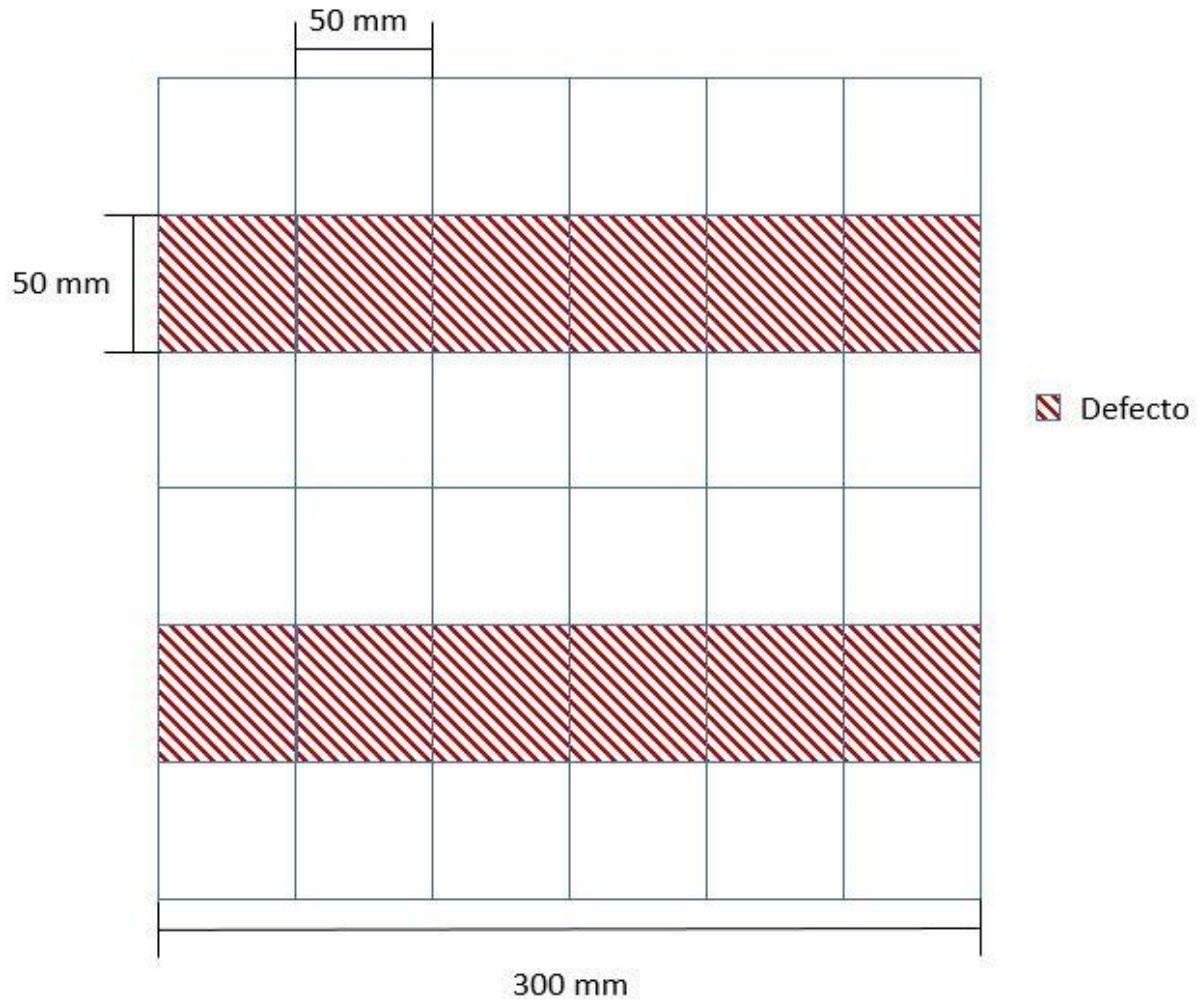


Figura 3.3 – Esquema laminado 3.

Mediante la zona rallada de la figura 3.3 se ha representado el defecto de morfología irregular. Mientras que el defecto del laminado 1 se ha conseguido como se expuso en el bloque anterior, mediante el uso de los plásticos protectores de los rollos de preimpregnado, en los laminados 2 y 3 se ha empleado un trozo de teflón recortado, según las dimensiones en el primer caso, e irregularmente en el segundo. Las medidas del segundo son orientativas, abarcando con total seguridad el ancho del laminado.

El laminado 1 se dividirá en 4 secciones, todas de tamaños similares. Se tendrán por tanto 2 piezas con defecto y 2 piezas sin él. Esto permitirá evaluar el acabado superficial del resanado

Además, dadas las dimensiones de los defectos del laminado 3, se realizará un corte por la mitad del mismo, y así poder trabajar con dos muestras distintas.

Se tendrán, entonces, cuatro paneles del laminado 1, un panel del laminado 2, y dos paneles del laminado 3.

3.3 Fresadora

Los cuatro paneles del laminado 1 se trabajarán con una fresadora manual, como la que aparece en la figura 3.4. El principio de funcionamiento de la fresadora manual es el desbaste mediante una fresa cilíndrica montada sobre broca.



Figura 3.4 – Fresadora.

El proceso de trabajo será:

1. Identificar el defecto, caso de que lo hubiere.
2. Establecer el número de escalones que se van a realizar.
3. Establecer la profundidad de cada escalón.
4. Iniciar el resanado desde una esquina.

En la tabla 3.2 se enumera la distribución de los escalones.

Un detalle que se va a tener también en cuenta es la posibilidad de realizar el resanado por la parte lisa o la parte rugosa del laminado, y así se evaluará si hay alguna diferencia en la técnica.

Tabla 3.2 – Distribución de escalones.

LAMINADO 1	DEFECTO	ESCALONES	REALIZADOS
PANEL 1	No	3	2
PANEL 2	Si	4	4
PANEL 3	No	4	4
PANEL 4	Si	3	3

Un detalle que se va a tener también en cuenta es la posibilidad de realizar el resanado por la parte lisa o la parte rugosa del laminado, y así se evaluará si hay alguna diferencia en la técnica.

3.3.1 Laminado 1

Panel 1

Como se ha comentado anteriormente, el panel 1.1 es un panel sin defecto inducido. El procedimiento de fresado que se va a llevar a cabo será descendente, desde fuera hacia dentro.

Aunque el panel no tiene defecto real, se establecerá un perímetro central alrededor del cuál se marcarán los diferentes escalones. Éstos serán tres, cada uno de 15mm. Se intentará, en la medida de lo posible que cada escalón tenga la profundidad de las capas de preimpregnado, 0.2 mm. La herramienta fresadora no tiene un control numérico sobre la profundidad de fresado, por lo que hay que ajustar manualmente la profundidad que se busca.

Como el fresado se va a realizar de fuera hacia dentro, se elige la esquina inferior derecha para iniciar el proceso. Con la fresadora calibrada para profundizar 0.2mm, se realiza el fresado de entrada en el panel. Es importante mantener clara y sin borrar las guías marcadas de los escalones, intentando así que el resanado quede lo más recto posible.

Una vez iniciado el fresado, se desplazará manualmente la fresadora hacia la esquina superior. No se puede realizar la operación a una velocidad elevada. Es necesario asegurarse que la fresadora engrasa totalmente la zona resanada, que no haya grandes desniveles en los escalones.

Cuando se ha realizado el primer camino de subida, existen dos posibilidades:

1. Realizar un camino de bajada, desplazando la fresadora una distancia equivalente al diámetro de la broca, figura 3.5 (a)
2. Realizar un camino de bajada, desplazando la fresadora una distancia equivalente a la mitad del diámetro de la broca, figura 3.5 (b)

Ambos procedimientos son aceptables, la diferencia está en el tiempo de realización del resanado y en el acabado superficial. Como es obvio, el procedimiento esquematizado en (1) emplea la mitad de las pasadas que el procedimiento (2). Sin embargo, el procedimiento 2 asegura un mejor acabado superficial, eliminando los rebordes y filos en los escalones.

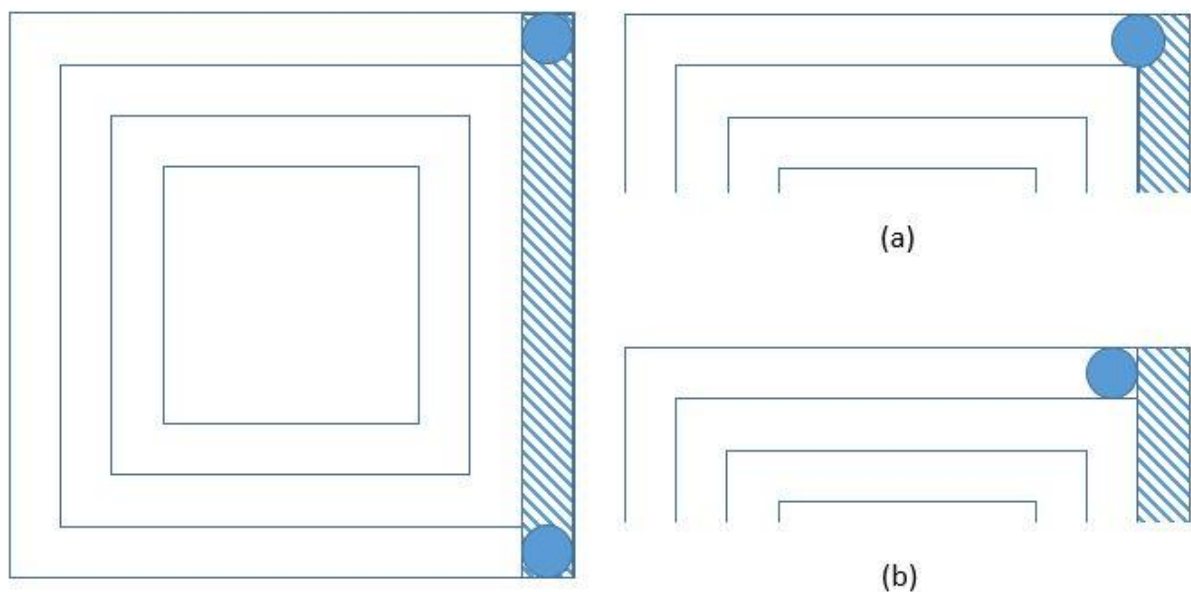


Figura 3.5 – Esquema de fresado.

Una vez resanado la primera se procede a realizar la misma operación sobre el segundo escalón. Como se aprecia en la figura 3.6, se van trabajando los escalones desde el exterior al interior. Esto puede tener sus dificultades, puesto que las guías que se tenían sobre la superficie han desaparecido. Será necesario volverlas a marcar sobre

la superficie resanada, o emplear los restos de las guías exteriores al resanado. Además, al trabajar sobre la zona resanada, el apoyo no es lo suficientemente bueno. Estos aspectos se comentarán posteriormente en el bloque de conclusiones.

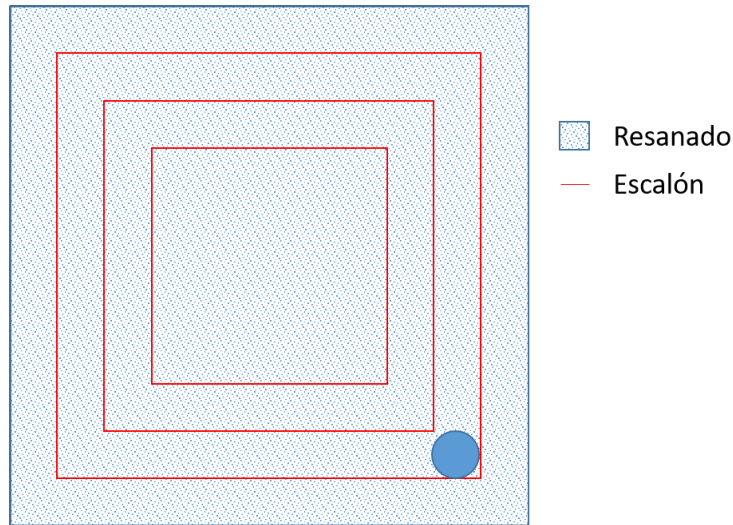


Figura 3.6 – Resanado primer escalón completo.

El aspecto final de la pieza resanada es el que se muestra en la figura 3.7. En este primer resanado no se han efectuado los tres escalones planificados por problemas durante la ejecución del resanado. En la figura 3.8 se aprecia que ha aparecido una grieta en la parte posterior del laminado, zona sobre la que no se había trabajado. Este hecho lleva a pensar que hay que tener mucho cuidado en cuanto a la superficie donde se trabaja, que debe encontrarse lo más lisa posible, así como controlar la presión que se realiza sobre el panel con la herramienta.

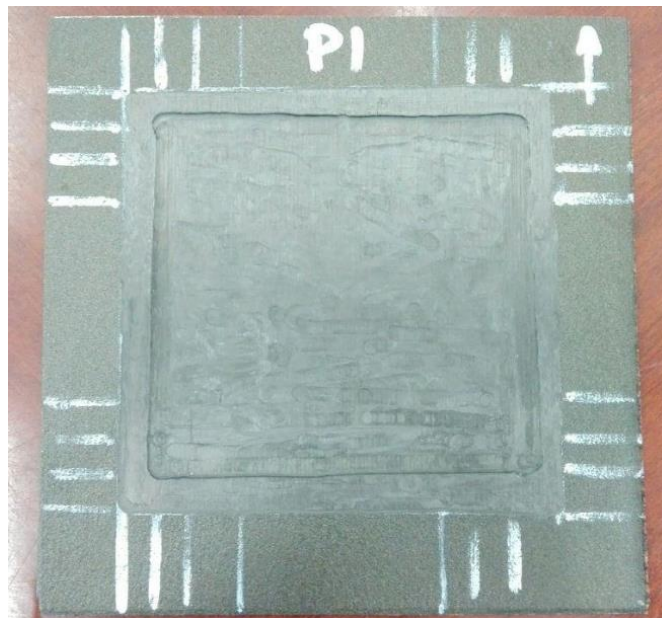


Figura 3.7 – Acabado del panel 1.



Figura 3.8 – Grieta trasera.

Panel 2

Como ha reflejado anteriormente, el panel 2 tiene un defecto central de 50x50 mm. Para este trabajo los defectos se han inducido manualmente, por lo que se conoce exactamente dónde están situados. Sin embargo, para asegurar su posición o para identificarlo en el caso que se desconozca su posición, se emplea un equipo de inspección por ultrasonidos como el de la figura 3.9. Este equipo permite identificar tanto la posición como la profundidad del defecto.



Figura 3.9 – Equipo de ultrasonidos.

Una vez localizado el defecto, se trazan las guías de los escalones. En este caso se han previsto 4 escalones de 15 mm de ancho. Como el defecto está localizado entre la capa 4 y 5, sabemos que cada escalón debe tener una profundidad de 0.2 mm para conseguir llegar a él en el cuarto escalón. En la figura 3.10 se esquematizan tales escalones.

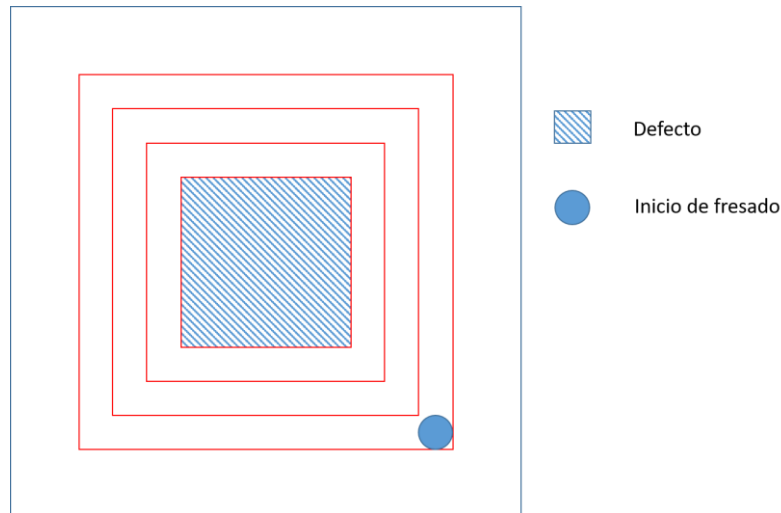


Figura 3.10 – Escalones del panel 2.

El procedimiento es el mismo comentado para el panel 1. Se elige la esquina inferior derecha, y se va fresando hacia el interior. Una vez se ha eliminado el primer escalón completo, se repite la operación con el segundo, tercero y cuarto.

El acabado que se ha conseguido en este panel ha sido bastante mejor que en el panel anterior, aunque ha ocurrido lo mismo en la cara posterior, figura 3.11.

En la figura 3.12 se aprecia que el borde de los escalones es excesivamente abrupto aun cuando se han realizado diferentes pasadas para intentar suavizarlo.



Figura 3.11 – Grieta cara posterior.

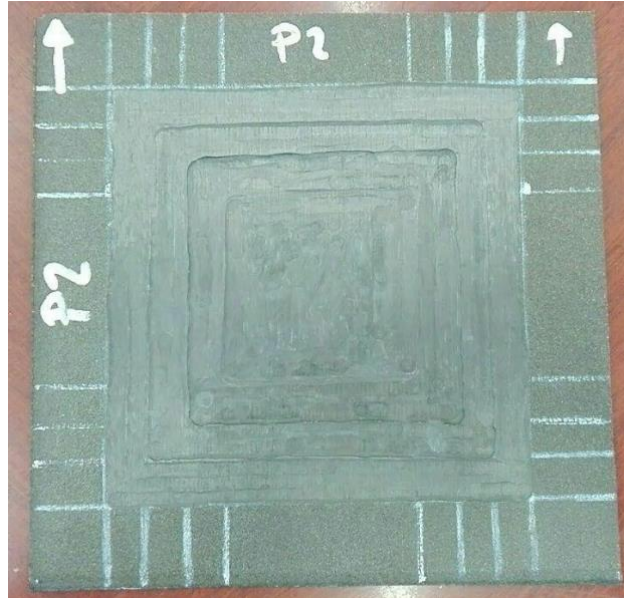


Figura 3.12 – Acabado panel 2.

Panel 3

Este panel carece de defecto inducido, por ello, se empleará para probar un proceso con algunas diferencias.

Como este panel no tiene defecto, se simula un defecto central, y se plantean 4 escalones alrededor del mismo. De nuevo, cada escalón se realiza con una profundidad de 0.2 mm sobre el anterior.

Para comenzar, este resanado se realiza por la cara lisa del panel. En un principio parece más cómodo el tratamiento de esta cara, puesto que permite que se marquen más fácilmente las guías.

Por otro lado, el fresado que se va a realizar es al contrario, de dentro hacia fuera. Primero se resana el escalón más profundo, donde normalmente se encuentra el defecto. Una vez se ha completado, se pasa al escalón siguiente.

La distribución de escalones será la siguiente:

1. Escalón central de 50x50 mm, profundidad de 0.8 mm.
2. Escalón perimetral de 70x70 mm, profundidad de 0.6 mm.
3. Escalón perimetral de 90x90 mm, profundidad de 0.4 mm.
4. Escalón perimetral de 110x110 mm, profundidad de 0.2 mm.

El acabado del panel se presenta en la figura 3.13. Este resanado no ha provocado grietas en la parte trasera del laminado. Sin embargo, al inicio del resanado, la fresadora patina sobre la superficie lisa, por lo que es necesario presionar más fuertemente. Ello provoca las marcas en las esquinas de los escalones, que se muestran en la figura 3.14.

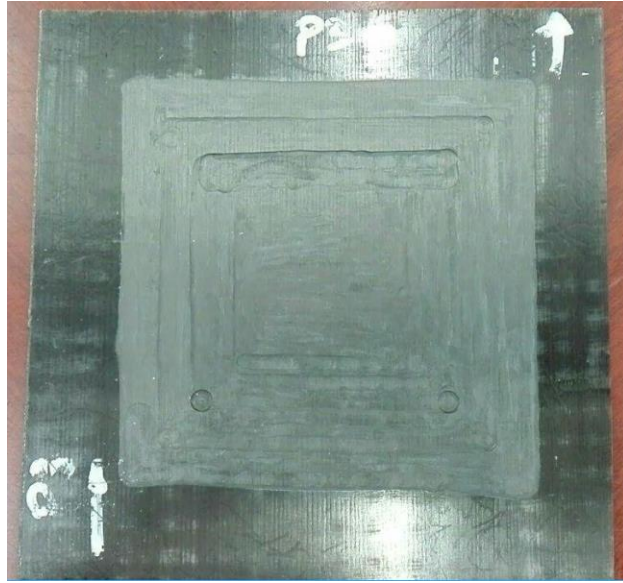


Figura 3.13 – Acabado panel 3.

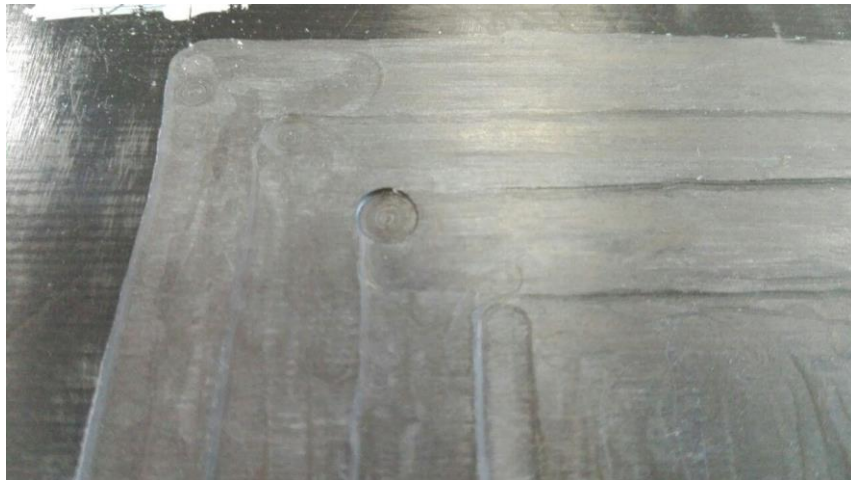


Figura 3.14 – Marcas de la fresadora.

Panel 4

Este panel contiene un defecto real de 50x50 mm ubicado en la zona central. Como se comentó anteriormente, se localiza exactamente el defecto mediante el uso de un dispositivo de ultrasonidos.

El proceso de resanado será como el del panel 3, primero se realizará un resanado del escalón central, y se irá disminuyendo la profundidad de los escalones. Para comprobar la diferencia entre un resanado de tres escalones y uno de cuatro, al panel 3 solo se le realizarán tres escalones.

Como en el panel 3, el resanado se realizará por la cara lisa del panel. Las profundidades de los escalones serán:

1. Escalón central de 50x50 mm, profundidad de 0.8 mm.
2. Escalón perimetral de 70x70 mm, profundidad de 0.4 mm.
3. Escalón perimetral de 90x90 mm, profundidad de 0.2 mm.

Como en el panel anterior, no se han producido grietas en la parte posterior. El acabado del resanado se refleja

en las figura 3.15. A pesar de presentar un acabado muy bueno sobre la cara posterior, se ha introducido un escalón correspondiente a dos capas del laminado base. Esto ha provocado que la separación entre el escalón central y su consecutivo sea demasiado abrupta, como se muestra en la figura 3.16.

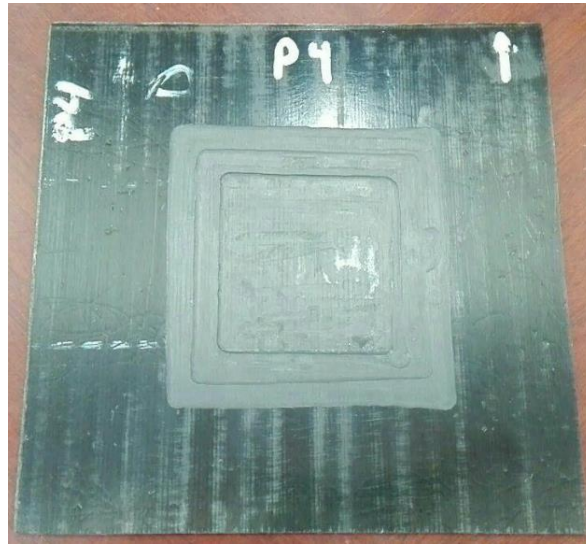


Figura 3.15 – Acabado panel 4.

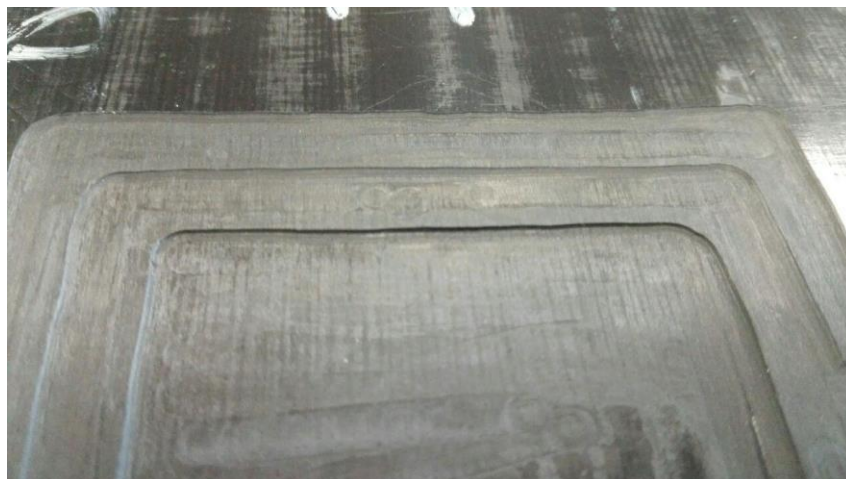


Figura 3.16 – Bordos de escalón.

3.3.2 Laminado 2

Como se ha comentado en apartados anteriores, el laminado 2 tiene unas dimensiones de 250x250 mm. Está compuesto por 8 capas de orientación 0°. Entre las capas 4 y 5 se ha introducido un defecto. En este caso, un recorte de teflón de 70x50 mm hará las veces de defecto.

Para retirar este defecto, se han planificado cuatro escalones de resanado, el cuál se empezará por el escalón más profundo, y se irá disminuyendo la profundidad de los escalones.

Como ha ocurrido anteriormente, el defecto inducido está perfectamente localizado sobre el laminado, tanto en posición como en profundidad. Si este no fuera el caso, se realizaría la inspección mediante ultrasonidos.

El resanado se realizará por la cara rugosa del laminado. Una vez se han analizado los problemas encontrados en el resanado de los paneles del laminado 1, se decide apoyar el laminado 2 sobre una plancha de fibra de

vidrio, para que los posibles desperfectos que pueda tener la mesa de trabajo no produzcan grietas en la parte trasera del laminado.

Las profundidades de los escalones serán:

1. Escalón central de 70x50 mm, profundidad de 0.8 mm.
2. Escalón perimetral de 90x70 mm, profundidad de 0.6 mm.
3. Escalón perimetral de 1200x90 mm, profundidad de 0.4 mm.
4. Escalón perimetral de 1200x90 mm, profundidad de 0.2 mm.

En la figura 3.17 se presenta el aspecto del laminado a la mitad del proceso. En el escalón central se aprecia la diferencia de aspecto entre el laminado original y el laminado que ha estado cubierto por el defecto.

Puesto que con la reparación se busca una recuperación de las propiedades en servicio de la pieza que se parezca lo más posible a las propiedades originales, no es suficiente con retirar la capa del defecto, sino que es necesario profundizar hasta la capa adyacente a él, y dejar tal superficie lo más lisa posible, para así poder asegurar el pegado del adhesivo.

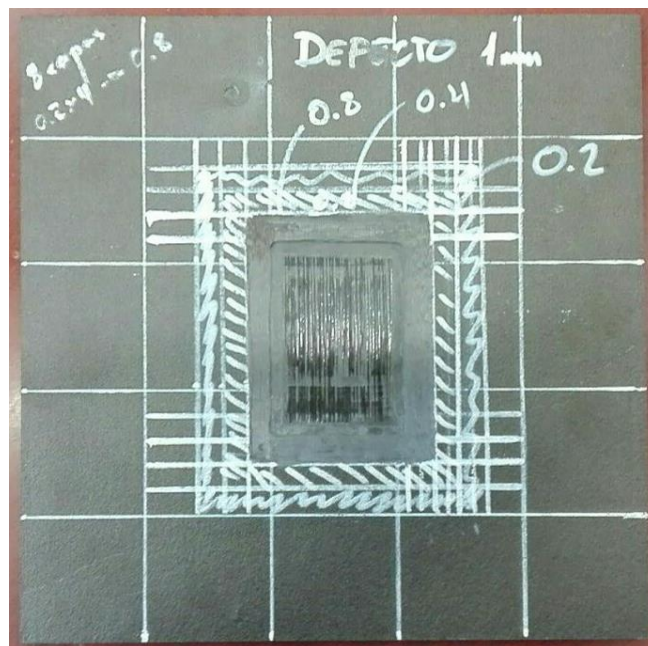


Figura 3.17 – Aspecto del laminado 2.

3.3.3 Conclusiones

Una vez realizados los resanados mediante la fresadora, se realizarán una serie de comentario sobre la técnica, su empleo y su acabado.

Un aspecto importante que no se ha comentado anteriormente es el tiempo de trabajo. Un resanado mediante el uso de la fresadora resulta ser lento y complicado.

En primer lugar, es necesario tener fijada la pieza a la mesa de trabajo, puesto que se necesitan ambas manos para el manejo de la fresadora, y no es posible realizar el resanado sin sujetar la pieza.

Por otro lado, se ha comprobado mediante las diferentes pruebas que la herramienta necesita de una velocidad de avance muy baja. La fresadora manual no monta un cabezal de corte estándar, sino una broca de esmerilado. Esto significa que la retirada de material que lleva a cabo la herramienta no se produce por el esfuerzo de

cortadura de un filo, sino por el desbaste del material. Este proceso de desbaste obliga a llevar una velocidad de avance pequeña, ya que velocidades más altas solo consiguen que la herramienta salga de la guía de corte. Además, no es posible sustituir la broca de esmerilado por una de corte, pues es necesario que además de retirar material, trabaje la superficie.

En este trabajo se han tenido en cuenta dos procesos diferentes. Uno ha sido la retirada total de las capas de laminado desde el escalón más exterior al interior (procedimiento A), y el otro lo contrario, empezar por el escalón más profundo e ir reduciendo la profundidad hacia el exterior (procedimiento B).

Analizando ambos procedimientos, se puede concluir que el procedimiento B ofrece mejores resultados, tanto en tiempo de ejecución como en acabado, que el procedimiento A. Esto se debe a los siguientes factores:

1. Menor superficie a fresar. Al iniciar el fresado por el escalón más profundo, en el procedimiento B se fresa la zona central, que abarca la superficie del defecto, y a ello se le suma la superficie que abarquen los escalones. En el procedimiento A, al realizar el fresado superficial completo, cubre para el primer escalón la misma superficie que el procedimiento B, a lo que hay que sumarle la superficie que cubren los sucesivos escalones.
2. Mayor estabilidad. El procedimiento B, al trabajar de dentro hacia fuera, mantiene en todo momento la herramienta apoyada sobre el laminado base, a diferencia del procedimiento A, donde al retirar las zonas externas primero, provoca que la herramienta pierda zonas de apoyo. Esto se traduce en la no uniformidad de la superficie fresada, detalle que puede afectar a la interacción del parche con el laminado base.

Un aspecto muy positivo que tiene el empleo de la fresadora es que ofrece la posibilidad de añadir a la herramienta una boca de aspiración. Este detalle puede llegar a ser bastante importante dado que tanto las fibras como el polvo de carbono son lo suficientemente pequeñas como para penetrar en los pulmones, y de ahí pasar al sistema circulatorio.

Sobre el entorno de trabajo, ha quedado comprobado que se obtienen mejores acabados cuando la pieza se trabaja en una zona de apoyo completamente lisa. Las grietas que han aparecido en los paneles del laminado 1 pueden haberse producido por motivos muy sencillos. Una vez se ha retirado el material del escalón más profundo, la sección que queda de laminado base tiene alrededor de 1 mm de espesor (5 capas de 0.2 mm). Cualquier imperfección de la mesa de trabajo, sumado a la presión que se realiza con la fresadora, puede provocar que se produzca la rotura del laminado.

Cuando se ha realizado la misma operación sobre el laminado 2, cuya sección tras el resanado es de 0.8 mm, no han aparecido tales grietas. El laminado 2 se ha trabajado sobre una lámina de varios milímetros de espesor de fibra de vidrio, como se representa en el esquema de la figura 3.18, que ha podido absorber el daño que se pudiera producir.

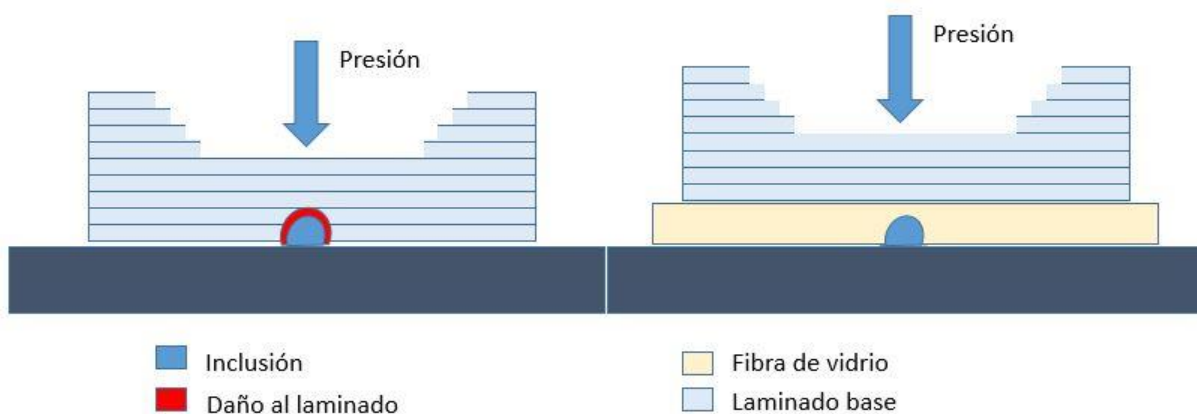


Figura 3.18 – Daño sobre laminados.

Un detalle importante que es necesario destacar es la imposibilidad de asegurar durante el procedimiento que se

esté retirando el material correspondiente al número de capas deseado. El laminado a con todas las capas orientadas de igual forma tiene un acabado uniforme, siendo imposible distinguir las capas que se han retirado o que se han mantenido. La reposición de dichas capas se hará pues de forma matemática, conociendo la profundidad que se ha fresado y el espesor de cada capa de preimpregnado.

3.4 Herramienta Dremel

La Dremel (figura 3.19) es una herramienta más manejable que la fresadora manual. Igualmente funciona mediante energía eléctrica, pero tiene un tamaño mucho más reducido. Además, incorpora un útil donde montar los cabezales con el tamaño de un lápiz.

La herramienta monta cabezales de esmerilado de diferentes formas y tamaños. Los que mejor se ajustan al método de trabajo serán los cónicos y los cilíndricos, los cuales se presentan en la figura 3.20.



Figura 3.19 – Herramienta Dremel y útil.



Figura 3.20 – Cabezales.

3.4.1 Paneles

Los paneles empleados en esta ocasión serán los correspondientes al laminado 3. Estos paneles tienen como característica diferenciadora que sus láminas no están todas orientadas a 0° , teniendo una secuencia de apilado $[0\ 45\ -45\ 90]_s$. Los dos paneles se han obtenido cortando el laminado 3 por su línea media.

Gracias a esta secuencia de apilado, se va a proceder al resanado con un control visual sobre la profundidad. A diferencia del procedimiento con la fresadora, en el cual se preestablecía la profundidad de los escalones, en este caso se marcarán los escalones y se procederá a retirar el material de la capa externa hasta que quede al descubierto la capa siguiente.

3.4.2 Prueba de resanado

Para comenzar las pruebas de resanado mediante la herramienta Dremel se escoge uno de los bordes largos de uno de los paneles. El procedimiento para esta prueba será sencillo, se procederá a aplicar la herramienta sobre el laminado, en un pequeño escalón de 20 mm para comprobar que retira de forma eficiente el material a resanar. El trabajo sobre este escalón se mantendrá hasta que se haya eliminado la capa de orientación de 0 , 45 y -45° , quedando al descubierto la capa de orientación de 90° .

Una vez acabado este escalón, se pasará al siguiente, hasta dejar al descubierto la capa de -45° . Igualmente, el procedimiento se repite hasta el 4º escalón, donde se aplica la herramienta de forma superficial, dejando lijada la superficie de la pieza.

En la figura 3.21 se presenta el acabado del resanado mediante este método, junto a un esquema comparativo de la orientación de las capas.

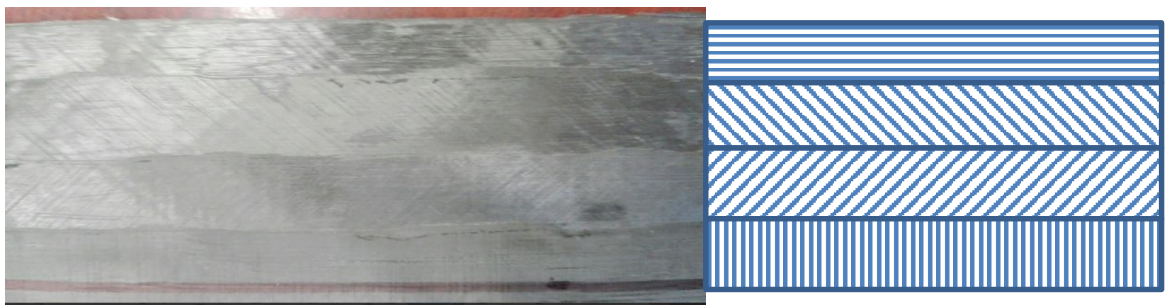


Figura 3.21 – Acabado con Dremel y esquema de orientaciones.

3.4.3 Conclusiones y abandono del método

Indudablemente, el método ofrece mejores acabados que los que se consiguen mediante el uso de la fresadora manual. El empleo de laminados con diferentes orientaciones en sus capas facilita la identificación de la profundidad a la que se está trabajando. A diferencia de lo que ocurría con los laminados de orientación a 0° , en este caso se sabe perfectamente cuántas capas de material se han retirado y por tanto cuántas serán necesario reponer.

Mediante este procedimiento no se han producido daños sobre la cara posterior de la pieza. La presión que es necesaria ejercer sobre el laminado es mucho menor que la que se necesitaba en el empleo de la fresadora. Además, no es necesario mantener la pieza anclada a la mesa de trabajo, gracias a que es posible manejar la herramienta con una sola mano.

Otro punto a favor de este procedimiento es la posibilidad de trabajar superficies no horizontales e incluso superficies curvadas, detalles que no son posibles mediante el empleo de la fresadora manual, debido a su tamaño.

Sin embargo, a pesar de todos los pros aportados por esta herramienta, el procedimiento de resanado mediante la Dremel se abandona por dos motivos principales:

1. Para que la herramienta pueda trabajar en zonas que no estén cerca de los bordes, es necesario que monte los cabezales cónicos. Los cabezales cilíndricos no permiten que se pueda profundizar en la pieza, puesto que su empleo requiere que la herramienta se mueva en el plano de la pieza, provocando que éstas choquen entre sí.
2. Durante la prueba, que se realizó con los cabezales cónicos, se rompieron por el desgaste tres de estos cabezales. Teniendo en cuenta que la zona de trabajo fue de 80x100 mm, y que los cabezales no tienen recambio posible, resulta un procedimiento altamente ineficiente. La rotura de los cabezales puede deberse a tanto a algún defecto en ellos, como a un incorrecto uso de los mismos, dado que no es una herramienta que esté diseñada para el trabajo en fibra de carbono.

3.5 Herramienta Air Sander, amoladora neumática

La tercera y última herramienta que va a probarse es una amoladora neumática como la de la figura 3.22. La amoladora neumática monta un cabezal rotativo orbital preparado para recambios autoadhesivos de carburo de silicio.

Esta herramienta aporta la facilidad en el manejo que aportaba la herramienta Dremel, pero a ello se le añade que su forma en L permite el ataque a zonas interiores de la pieza.

La posibilidad de intercambiar los autoadhesivos permite que se puedan establecer diferentes patrones de ataque. En este resanado, se empleará una lija de grano grueso para el desbaste de las capas y, una vez queden descubiertas, se aplicará la herramienta con una lija fina para mejorar el acabado superficial.



Figura 3.22 – Amoladora neumática.

3.5.1 Paneles

En este caso se empleará en primer lugar el resto de panel empleado en la prueba de la herramienta Dremel para

una familiarización de la herramienta (pruebas que no se incluyen en este documento), y el segundo panel correspondiente al laminado 3.

Cabe recordar que este panel contenía un defecto inducido, el cual tenía una forma irregular. Para identificar bien el defecto, será necesario el uso del equipo de ultrasonidos.

Detección por ultrasonidos.

El defecto en el material se detecta mediante el tiempo que una onda tarda en atravesar el laminado y volver hasta el palpador de medida. Este método se conoce como impulso-eco, y solo necesita de un palpador y de un osciloscopio. El osciloscopio será capaz de medir la profundidad a la que se encuentra el defecto.

El palpador emitirá un impulso ultrasónico que recorrerá la pieza. Si este impulso no “choca” contra ningún defecto, llegará hasta el otro extremo de la misma, donde rebotará hasta el palpador. Si el impulso ultrasónico encuentra un defecto en su camino, rebotará antes, marcando la distancia desde la superficie hasta el defecto. La figura 3.23 muestra un esquema del proceso.

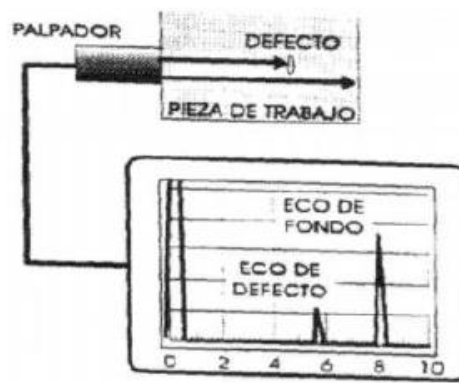


Figura 3.23 – Esquema de ultrasonidos.

Esquema del laminado

Una vez realizada la inspección por ultrasonidos, queda identificado el defecto. En la figura 3.24 se esquematiza la forma que se ha obtenido.

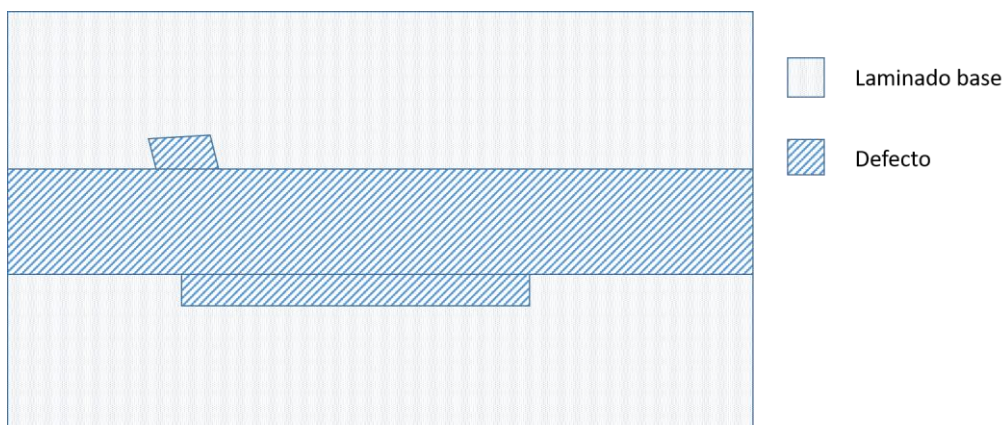


Figura 3.24 – Esquema del defecto en el laminado.

3.5.2 Lijas autoadhesivas

Como se ha comentado anteriormente, la herramienta monta unos discos de lija autoadhesivos mediante velcros,

de 50 mm de diámetro. Para la realización del resanado de este panel, se empleará una lija gruesa para el desbaste global, y una lija fina para el acabado superficial.

Los tamaños de granos de las lijas abrasivas representan el número de puntos de desbaste por pulgada cuadrada, es decir, una lija de grano 80 contiene 80 puntos de abrasivo por cada pulgada cuadrada. Cuanto más alto sea el valor de la lija, más puntos tendrá por pulgada cuadrada, y más fino será el acabado. Las lijas que se usarán serán de grano 80 para el desbaste grueso y 240 para el acabado superficial.

3.5.3 Procedimiento

Para la realización del resanado de este panel se seguirá el siguiente procedimiento:

1. En primer lugar, una vez localizado el defecto sobre el laminado, se procede a la definición de los escalones. Para este resanado, se planea realizar 4 escalones de 15 mm de espesor.
2. Para asegurar el ajuste lo máximo posible a los escalones, además de marcarse sobre el panel, cada escalón se separará del laminado base mediante cinta de carroceros.
3. Se comenzará el resanado por la zona central. El defecto tiene un ancho de 55 mm, dado que la lija tiene 50 mm, no existe ningún problema para entrar en esta zona del panel. Se profundizará hasta que el defecto sea visible. En la figura 3.25 se ilustra el aspecto que tiene el resanado al alcanzar la profundidad del defecto. Es necesario tener mucho cuidado cuando la amoladora elimina la capa justamente superior al defecto, puesto que las capas adyacentes a éste no están adheridas entre ellas, y la aplicación de la amoladora puede arrancar la capa en vez de lijarla.

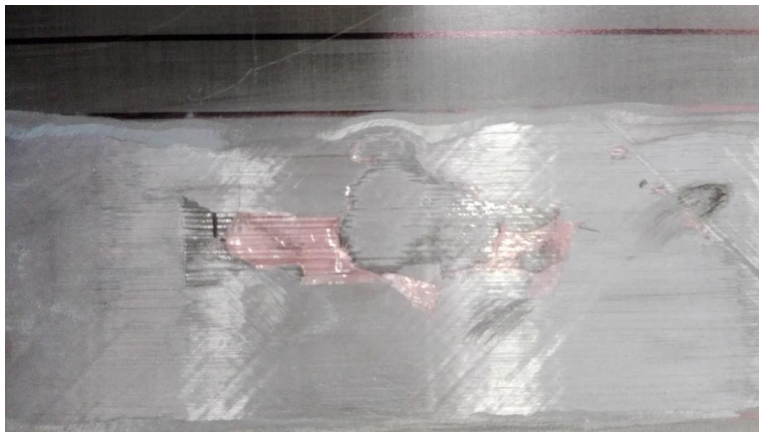


Figura 3.25 – Detalle del aspecto del defecto durante el lijado.

- Una vez se ha terminado el desbaste de la zona central, se comienzan a lijar los siguientes escalones. En la figura 3.26 se aprecia cómo se van quedando a la vista las diferentes capas con sus diferentes orientaciones. El proceso se repite hasta acabar con los cuatro escalones. El último escalón se trabajará de forma superficial, ya que no se busca profundizar en la capa, sino preparar la superficie para el adhesivo.

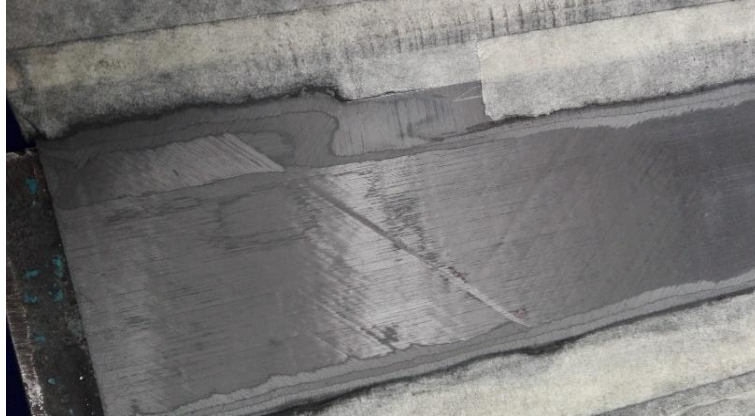


Figura 3.26 – Detalle de las diferentes capas.

- Una vez se ha completado el proceso, se le dará una última pasada con la lija de grano fino para mejorar el acabado superficial.

3.5.4 Conclusiones

El lijado mediante el empleo de la amoladora neumática es, sin duda, el que mejor resultados ofrece. A continuación se van a enumerar las diferentes ventajas que este proceso tiene sobre los anteriores, así como algunos inconvenientes que deben ser tomados en cuenta.

Ventajas:

- Comodidad. Esta herramienta es, indiscutiblemente, la más cómoda y manejable de las tres que se han empleado. Ofrece la potencia y la capacidad de resanado en superficies interiores de la pieza que ofrecía la fresadora manual, pero también aporta la maniobrabilidad y la versatilidad que aporta la Dremel, incluso es posible emplearla en superficies curvas.
- Tiempo de resanado. Queda de manifiesto que con esta herramienta se consigue realizar el resanado en el menor tiempo posible, aspecto importante si se pretende utilizar en la industria.
- Acabado superficial. Esta herramienta aporta un factor que la fresadora manual no era capaz de obtener. El acabado superficial que se consigue gracias al uso de las lijas de grano fino no es comparable al que se consigue con las brocas de esmerilado, pudiendo asegurar que la superficie queda perfectamente lisa y nivelada.
- Mayor visibilidad. Durante el proceso de resanado, visibilidad que se tiene sobre la pieza a resanar es mucho mayor que la que se tiene con la fresadora. Si además se combina con el uso de alguna fuente de luz (flexo, foco de luz blanca, tubo fluorescente), la visualización de las capas del laminado es perfecta.

Inconvenientes:

1. Aire comprimido. La herramienta funciona mediante un circuito cerrado de aire comprimido. Por ello, es necesario una instalación completa de aire y no podría emplearse como herramienta de reparación de campo, salvo que se dispusiese de una instalación portátil.
2. Herramienta orbital. La amoladora no es una herramienta circular. El cabezal que monta está dispuesto sobre una pequeña excéntrica, por lo que cuando la máquina trabaja no lo hace sobre la circunferencia del tamaño de la lija, sino sobre una de un tamaño un poco superior. En un principio puede parecer dificultoso su manejo, pero con la práctica es imperceptible. Además, la herramienta está preparada para, si detecta una presión excesiva sobre la zona de trabajo, dejar de rotar sobre su eje y comenzar a vibrar.
3. Embotamiento de lijas. El uso prolongado de la herramienta provoca un calentamiento excesivo de la lija. Esto lleva a que las pequeñas partículas de polvo de carbono se adhieran entre ellas y a la lija, disminuyendo la efectividad de la misma. Es un inconveniente puntual, puesto que las lijas son fácilmente reemplazables.

3.6 Reparaciones

Dado la mejora notable en el proceso de resanado que se ha obtenido gracias al empleo de la amoladora neumática, se ha optado por reparar y ensayar una serie de probetas provenientes del laminado 3.

Para ello, el primer paso será la fabricación de unos patrones para sacar las piezas de preimpregnado que conformarán el parche de reparación. Una vez se tengan los patrones listos y las piezas de preimpregnado, se colocará sobre el laminado base una capa de adhesivo de alta temperatura, sobre el cual se irán montando, secuencialmente, los recortes de carbono.

Cuando se tenga el laminado con el parche sin curar, se procederá a la fabricación de una bolsa de vacío para su curado en autoclave.

Una vez curado, se cortarán una serie de probetas y se ensayarán para comprobar si el parche de reparación aguanta ante esfuerzos flectores.

3.6.1 Patrones para parches.

Como se comentó anteriormente, el defecto del laminado 3 no tenía una forma regular. Por ello, no es posible, a priori, fabricar los parches mediante la toma de medidas.

Será necesario el empleo de una serie de patrones que se obtendrán directamente del laminado resanado. Para ello, se emplearán recortes de film transparente que se colocarán sobre el panel resanado, y se irán marcando *las* diferentes formas sobre él.

En la introducción de este trabajo se comentó que la idea principal de la reparación de laminados de material compuesto es eliminar un defecto localizado y, mediante la reposición de material, recuperar en la medida de *lo* posible las propiedades originales. Por ello, es necesario reponer exactamente las capas que han sido retiradas, tanto en espesor como en forma.

La idea del empleo de patrones es amoldar perfectamente el parche con el laminado. Con la colocación del film transparente sobre el panel resanado, se podrán marcar perfectamente las dimensiones que deberán tener los parches.

Por tanto, se fabricarán 5 patrones, uno para cada capa de laminado base resanado y una adicional que hará solape de 15 mm con el laminado. Las figuras 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31 recogen los diferentes patrones obtenidos, junto a ellas, recortes de preimpregnado.

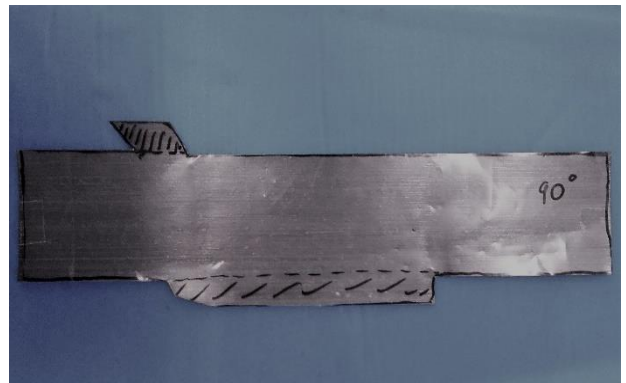
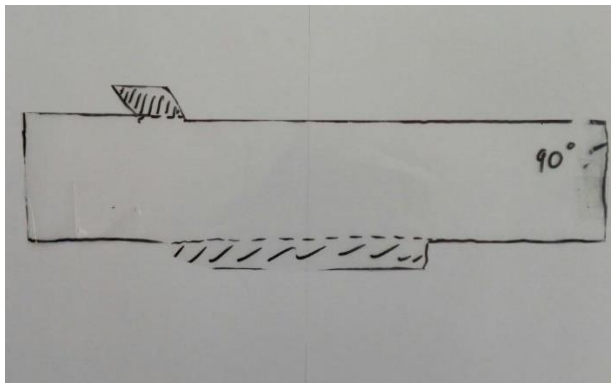


Figura 3.27 – Patrón de capa a 90°.

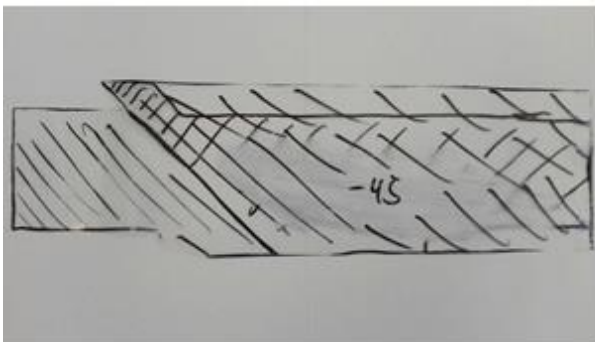


Figura 3.28 – Patrón de capa a -45°.

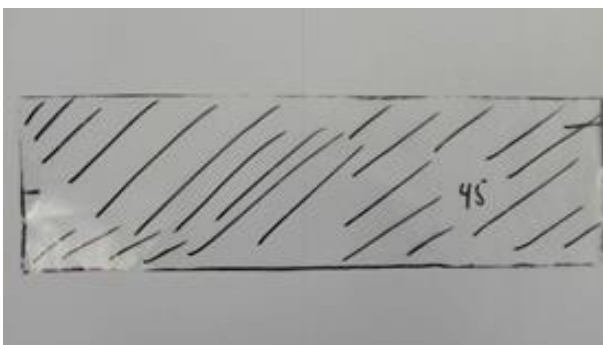


Figura 3.29 – Patrón de capa a 45°.

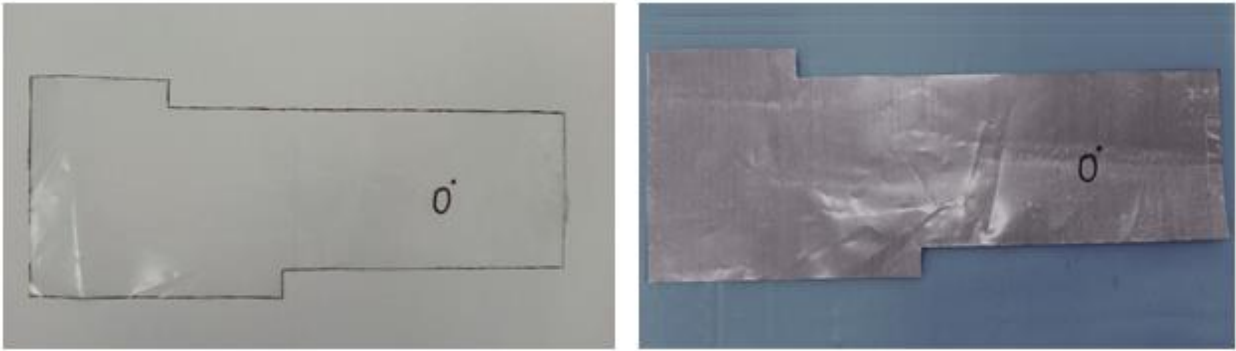


Figura 3.30 – Patrón de capa a 0°.

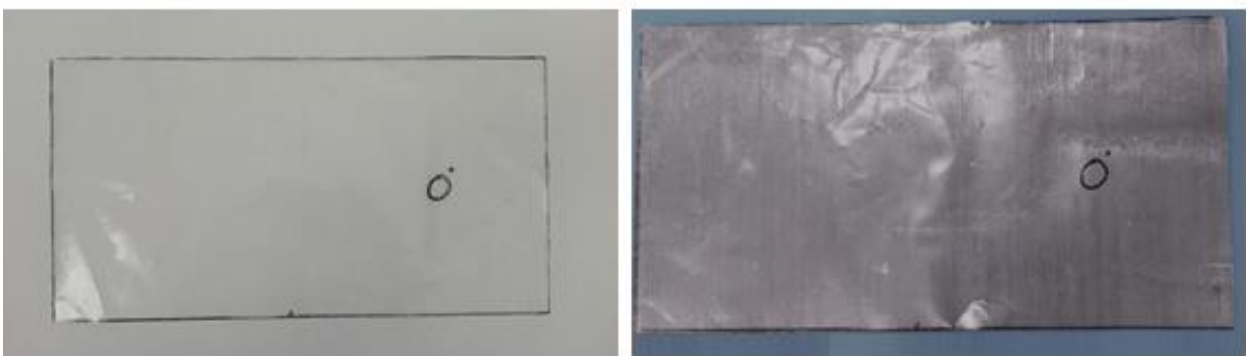


Figura 3.31 – Patrón de capa de solape.

3.6.2 Reposición y curado.

Cuando se tienen dispuestos las diferentes capas que conforman el parche, se realiza la operación de apilado.

Es muy importante asegurar que la superficie del panel resanado está lo más limpia posible. Por ello, se le aplica un lavado con acetona, que eliminará cualquier resto que pueda tener.

Una vez listo el laminado base, se coloca una capa de adhesivo de alta temperatura. Es necesario que este cubra totalmente la superficie resanada y además, sobresalga de la superficie de solape del parche, para así asegurar que no va a haber falta de pegado.

Al colocar la capa de adhesivo, se presiona suavemente con una espátula de teflón para asegurar que el adhesivo queda bien ajustado a los escalones del resanado. Una vez hecho esto, se despega el film protector del adhesivo y se apilan una a una las capas de preimpregnado.

En este momento, la operación es crucial. El la capa de adhesivo tiene un color verde opaco que cubre totalmente el laminado resanado, evitando que se tenga control sobre el lugar donde van a colocarse las capas de preimpregnado. Por ello es muy importante que se haya realizado la presión comentada anteriormente, ya que el relieve que forma el resanado sobre el adhesivo ayuda a la colocación de las capas. La figura 3.32 muestra el aspecto del parche sin curar sobre el laminado base.



Figura 3.32 – Aspecto del parche pre-curado.

Cuando se tiene el laminado con el parche colocado, se procede a la fabricación de una bolsa de vacío para su curado en autoclave. La bolsa se realiza exactamente igual que como se ha comentado anteriormente en este documento. El ciclo de curado de este conjunto es ligeramente diferente al descrito durante el proceso de fabricación.

[Capte la atención de los lectores mediante una cita importante extraída del documento o utilice este espacio para resaltar un punto clave. Para colocar el cuadro de texto en cualquier lugar de la página, solo tiene que arrastrarlo.]

3.7 Curvatura del laminado

Existe un aspecto importante que aún no se ha comentado. Como puede comprobarse siguiendo la Teoría del laminado, al realizar el resanado del panel, se produce una rotura de la simetría de la pieza. En los laminados con diferentes orientaciones de las capas, es la simetría de la construcción lo que permite que las piezas se mantengan planas.

Normalmente, al curar el preimpregnado, los esfuerzos internos que cada lámina induce en la pieza provocan que ésta se curve. Cuando se realiza una construcción simétrica como es el caso del laminado 3, cuya secuencia de apilado es $[0 -45 45 90]_s$, lo que se busca es que tales esfuerzos se contrarresten, manteniendo el laminado plano.

Al haber realizado el resanado, se rompe esta simetría. Eliminar las capas intermedias provoca la discontinuidad en la fibra que originalmente mantiene plano e indeformado al laminado, apareciendo una curvatura en la pieza.

En la figura 3.33 se presenta la curvatura que toma el panel después de retirar el material de las capas intermedias. En ella los ángulos α_1 y α_2 corresponden, respectivamente, al ángulo que forma el laminado por su borde izquierdo y derecho.

Asimismo, en la figura 3.34 se presenta la curvatura del panel después de la colocación del parche, pero antes de curar. Puede observarse que los ángulos α_3 y α_4 son mayores, lo que indica que el laminado ha disminuido su curvatura.

Finalmente, la figura 3.35 recoge la curvatura del laminado después del curado, donde se aprecia que el laminado ha recuperado casi la totalidad de la horizontalidad. Los ángulos α_5 y α_6 son prácticamente 180° .

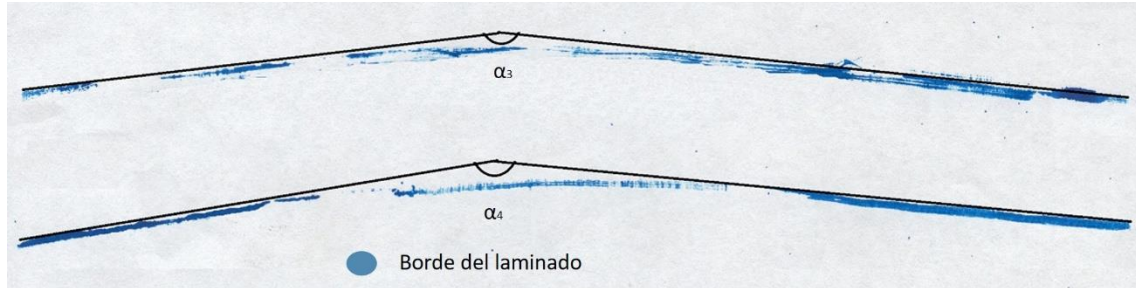


Figura 3.33 – Curvatura sin parche.

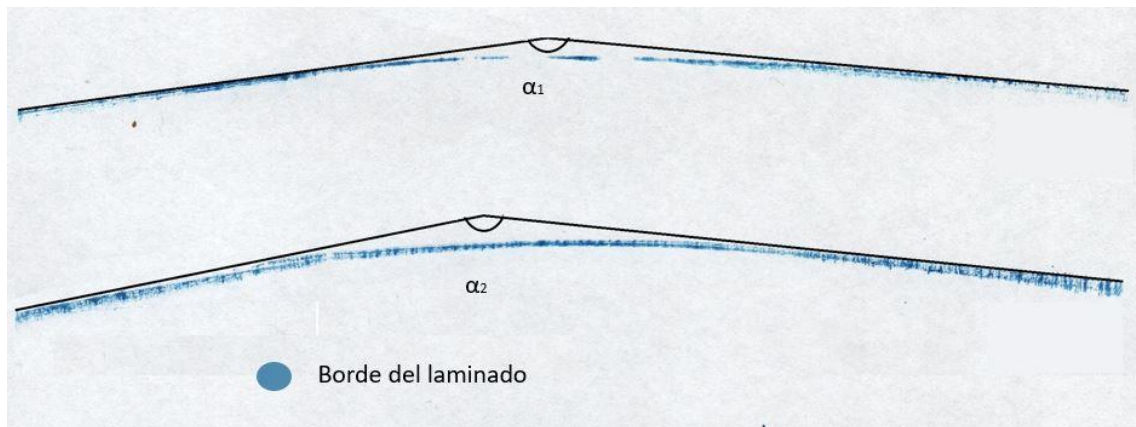


Figura 3.34 – Curvatura con parche pre-curado.

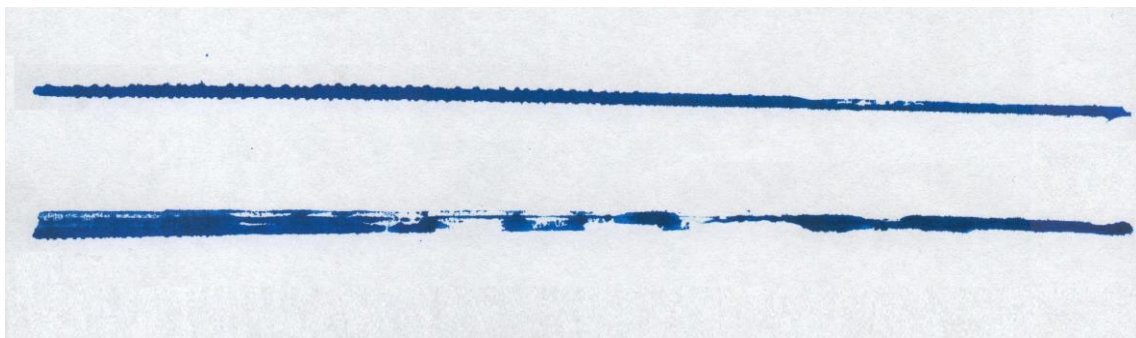


Figura 3.35 – Curvatura con parche curado.

3.8 Micrografías del parche

Para comprobar que existe una buena unión entre el parche y el laminado base, se decide realizar una micrografía de la zona de la unión. En la figura 3.36 se muestra una micrografía a 25 aumentos, donde se pueden distinguir perfectamente todas las capas tanto del laminado base como del parche.

La zona oscura que aparece separando ambas zonas, es el adhesivo empleado para la unión. Cabe destacar la diferencia entre la pendiente suave que se consigue en el laminado base gracias al empleo de la amoladora neumática, y el escalonamiento brusco que se produce en las capas del parche. La única forma de mejorar esta interacción sería conseguir, mediante la práctica prolongada con la amoladora, marcar los escalones de resanado, aunque este aspecto pueda influir negativamente en el comportamiento del laminado al introducir zonas de concentración de tensiones.

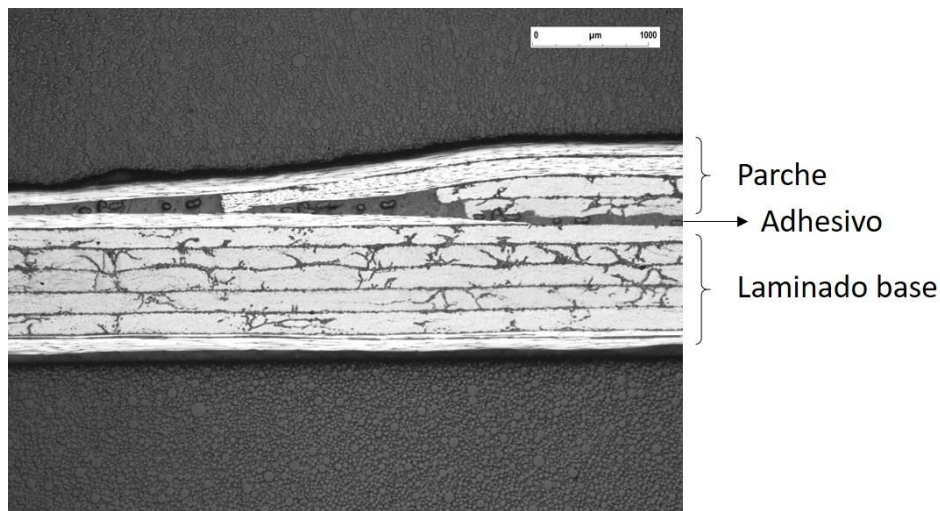


Figura 3.36 – Detalle de la reparación.

La figura 3.37 muestra una imagen tomada con el microscopio óptico a 50 aumentos de las capas 3 y 4 del parche. En esta ocasión se pone de manifiesto la idea de comentada durante el proceso de apilado. En esta zona del apilado, las capas 3 y cuatro deberían encajar con la capa del laminado base, pero debido a la falta de visión del apilado, se han desplazado ligeramente hacia la izquierda. Este problema podría solucionarse marcando mejor el adhesivo sobre el laminado base.

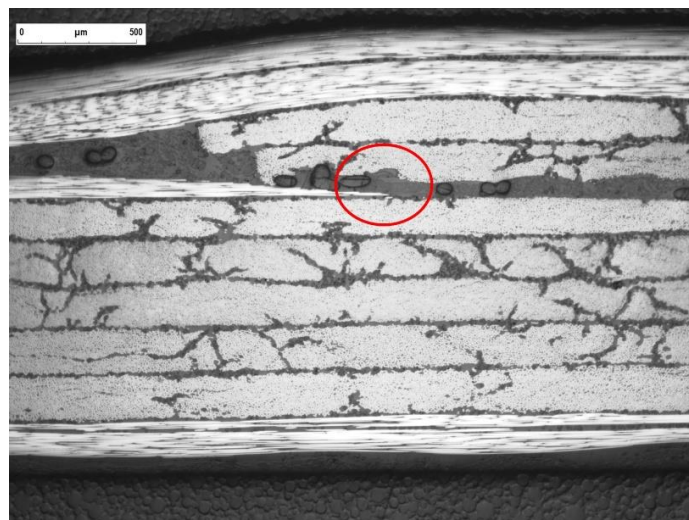


Figura 3.37 – Solape de capas.

Otro detalle importante es la aparición de una serie de grietas por el laminado, que deben estar provocadas por defectos en el material de fabricación, ya que no se ha realizado ningún tipo de prueba sobre el laminado. Dichas grietas, que aparecen en las capas 5 y 6 del laminado base, se muestran en la figura 3.38, fotografía tomada con el microscopio óptico con 100 aumentos.

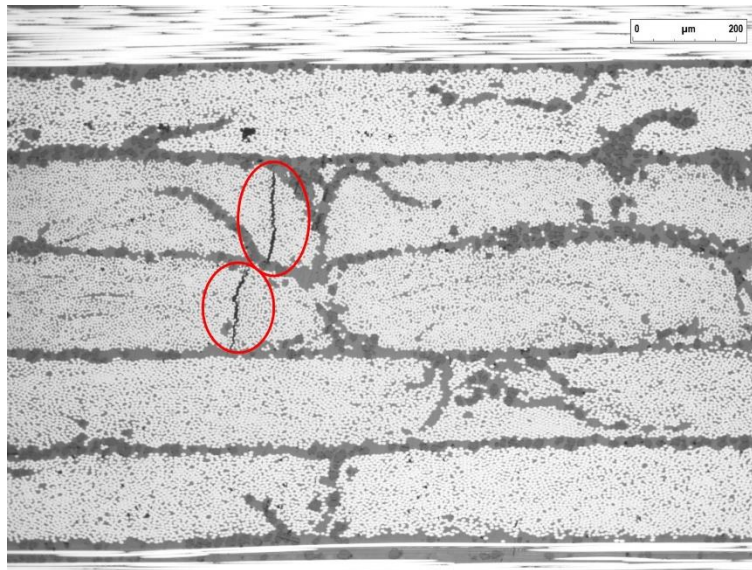


Figura 3.38 – Grietas en el laminado base.

3.9 Preparación de probetas

Los ensayos que van a realizarse para comprobar la efectividad de las reparaciones consistirán en ensayos de flexión en tres puntos. Por tanto, será necesario preparar el laminado para poder llevarlos a cabo.

De laminado 3 se sacarán probetas de 200x20. En total, se tendrán 12 probetas. Para comprobar la efectividad del parche, se realizarán ensayos de flexión en tres puntos, 6 de ellos dejarán el parche por la zona cóncava, y los otros 6 lo dejarán por la zona convexa.

En esta ocasión, a diferencia de lo que ocurría en el ensayo de tracción, no será necesario añadir tacones de fibra de vidrio, puesto que las probetas irán colocadas sobre el útil de flexión.

La máquina que en la que se realizarán los ensayos será la misma que en los ensayos de tracción, añadiendo una modificación en la configuración de las mordazas.

3.10 Ensayos

El ensayo se configurará tomando de referencia la normativa UNE-EN ISO 14125, sobre la determinación de las propiedades de flexión en compuestos plásticos reforzados con fibras. El empleo de esta norma será meramente orientativo, puesto que los requerimientos de longitud de solape de las probetas impiden que se pueda emplear la normativa de forma exhaustiva.

En un primer ensayo, se configurará para una distancia entre los apoyos de 110 mm. Al realizar un primer ensayo para comprobar el funcionamiento del equipo, se decide cambiar la configuración por problemas de geometría. La figura 3.39 muestra una imagen de este montaje. La incompatibilidad de la geometría se manifiesta en la incapacidad de la parte superior del útil de seguir avanzando una vez alcanza la parte inferior. Al llegar a este punto, aún no se ha producido ningún fallo en la probeta. Además, se quiere estudiar el comportamiento del parche cuando se trabaja a flexión, y esta configuración provoca que los apoyos inferiores ayuden a mantener el parche pegado.



Figura 3.39 – Primera prueba del ensayo.

La segunda disposición de las probetas en el ensayo se esquematiza en la figura 3.40. Se tomará como longitud de separación de los apoyos inferiores la longitud del parche, quedando la carga aplicada en el punto medio del mismo.

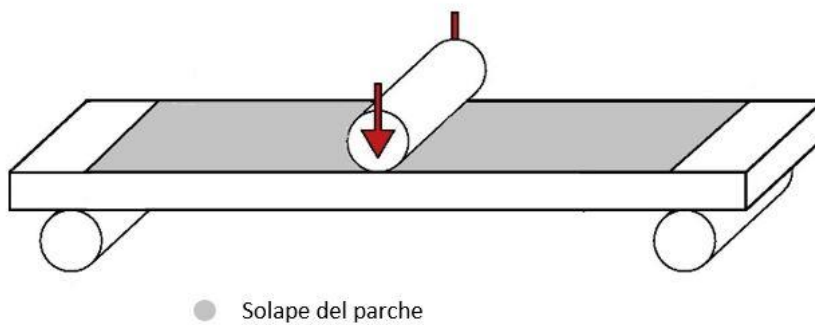


Figura 3.40 – Esquema de la segunda configuración.

El tamaño del parche provoca que se tenga una gran luz a salvar, quedando la distancia entre los apoyos inferiores en 155 mm. Es por ello que se decide detener el ensayo a la primera carga de fallo, donde la flecha de la probeta es muy alta y la reducción de carga soportada por la misma es bastante notable. En la figura 3.41 se muestra el momento en el que se decide parar el ensayo.

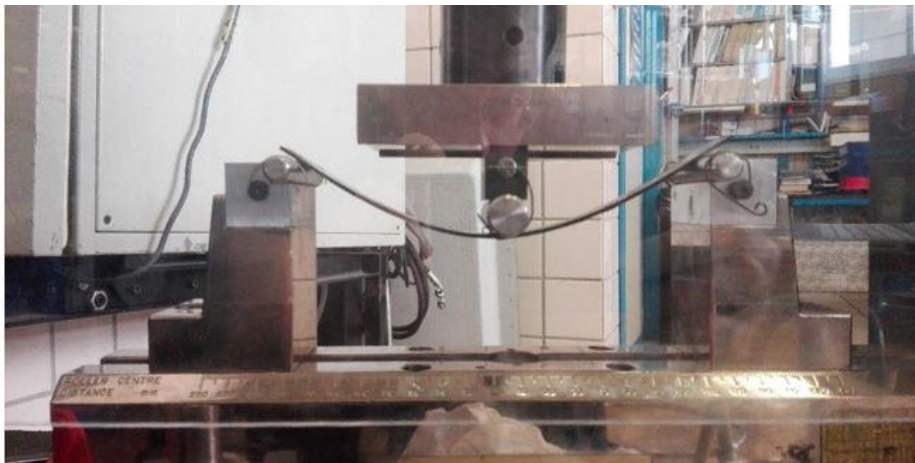


Figura 3.41 – Parada del ensayo.

3.11 Resultados

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos durante el ensayo de las doce probetas. En primer lugar se mostrará la organización de las probetas y dimensiones. Las probetas 1, 7, 9, 10, 11 y 12 se han ensayado dejando el parche por la zona cóncava. Las probetas 2, 3, 4, 5, 6 y 8 se han ensayado dejando el parche en la zona convexa. La tabla 3.3 recoge los datos sobre estas probetas.

Tabla 3.3 – Datos de las probetas de ensayo.

	<i>Número probeta</i>	<i>Espesor medio, mm</i>	<i>Ancho, mm</i>	<i>Área sección, mm²</i>
<i>Cóncavo</i>	1	1.64	20	32.8
	7	1.64	20	32.8
	9	1.59	20	31.8
	10	1.55	20	31
	11	1.59	20	31.8
	12	1.57	20	31.4
<i>Convexo</i>	2	1.64	20	32.8
	3	1.65	20	33
	4	1.61	20	32.2
	5	1.64	20	32.8
	6	1.63	20	32.6
	8	1.68	20	33.6

El espesor medio de la probeta se ha obtenido realizando 9 medidas: 3 en la zona central, correspondiente a la zona reparada, y 6 en los extremos, correspondientes al laminado base.

Primero se presentarán los resultados obtenidos del ensayo de las probetas cóncavas. En la tabla 3.4 se recogen los valores obtenidos de carga de rotura y flecha, mientras que la tensión de rotura se calcula mediante la expresión de resistencia de materiales dada por:

$$\sigma_R = \frac{3 \times P \times L}{4 \times \varpi \times t^2}$$

siendo P la carga aplicada, L la luz entre apoyos, ϖ el ancho y t el espesor.

La probeta 1 fue la ensayada con una luz de 110 mm. El resto de probetas fueron ensayadas con una luz de 157 mm.

Tabla 3.4 – Resultados de los ensayos parche cóncavo.

<i>Probeta</i>	<i>Carga máxima aplicada, N</i>	<i>Flecha, mm</i>	<i>Tensión de rotura, MPa</i>
1	355.3125	71.73	544.93
7	255.8448	26.68	560.04
9	253.5885	38.92	590.56
10	273.0123	33.93	669.04
11	263.1042	35.56	612.72
12	245.4462	33.24	586.26

Analizando los resultados obtenidos, se decide eliminar los datos del ensayo de la probeta 1 debido a que difieren excesivamente del resto de datos obtenidos. Esto está causado por ser la probeta empleada en la primera prueba de tracción. Se decidió incluirla en la batería de ensayos porque, a priori, no parecía estar dañada. Sin embargo, la diferencia de carga soportada es notable, y esto puede ser debido a que la probeta sufriese algún tipo de daño.

En la figura 3.42 se recoge una comparativa del resto de ensayos realizados a las probetas. En ella puede apreciarse, por un lado, que las probetas soportan de media 25 +/- 2 kg de carga, y por otro lado, por qué se decidió parar el ensayo después de la primera rotura, dado que la carga soportada cae en todos los casos por debajo de los 5 kg una vez se ha producido el primer fallo.

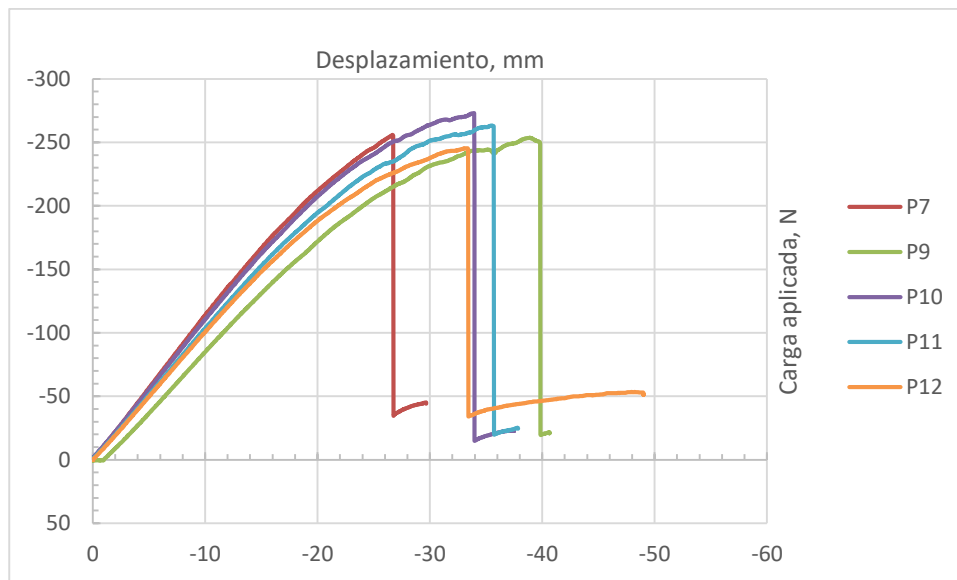


Figura 3.42 – Comparación de resultados parche cóncavo.

La tabla 3.5 recoge los datos obtenidos de los ensayos realizados a las probetas convexas. De nuevo, se eliminan los resultados de la probeta 2, por los mismos motivos que los comentados de la probeta 1. En la figura 3.43 se recoge la comparativa de los resultados de los ensayos sobre las probetas con parche convexo.

Tabla 3.5 - Resultados de los ensayos parche convexo.

<i>Probeta</i>	<i>Carga máxima aplicada, N</i>	<i>Flecha, mm</i>	<i>Tensión de rotura, MPa</i>
2	313.4295	14.09	480.7
3	220.8231	37.87	477.54
4	195.0228	21.38	442.96
5	199.5354	28.7	436.78
6	193.5513	27.56	428.90
12	202.8708	30.76	423.19

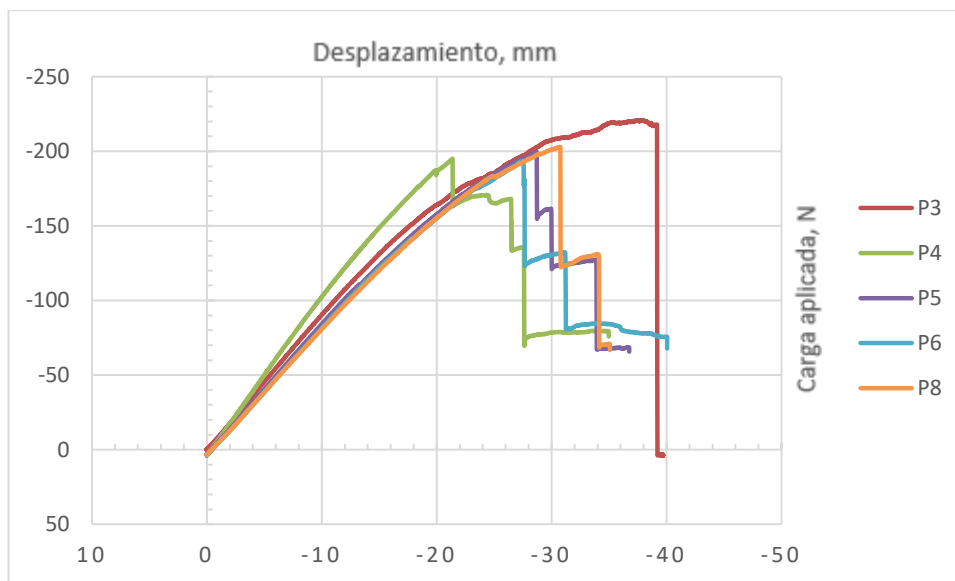


Figura 3.43 - Comparación de resultados parche convexo.

Todas las probetas ensayadas muestran el mismo tipo de rotura, salvo la probeta número 3. El fallo en las probetas se ha producido en la zona de mayor compresión, que coincide con la zona donde actúa el punto superior de la máquina de ensayo. La figura 3.44 muestra el aspecto de la rotura de la probeta. En este caso, la imagen se corresponde con la probeta 5, ensayada con el parche convexo. La rotura se ha producido en la capa más externa, y ha comenzado a propagarse, delaminando las capas intermedias sin llegar a la zona del adhesivo.

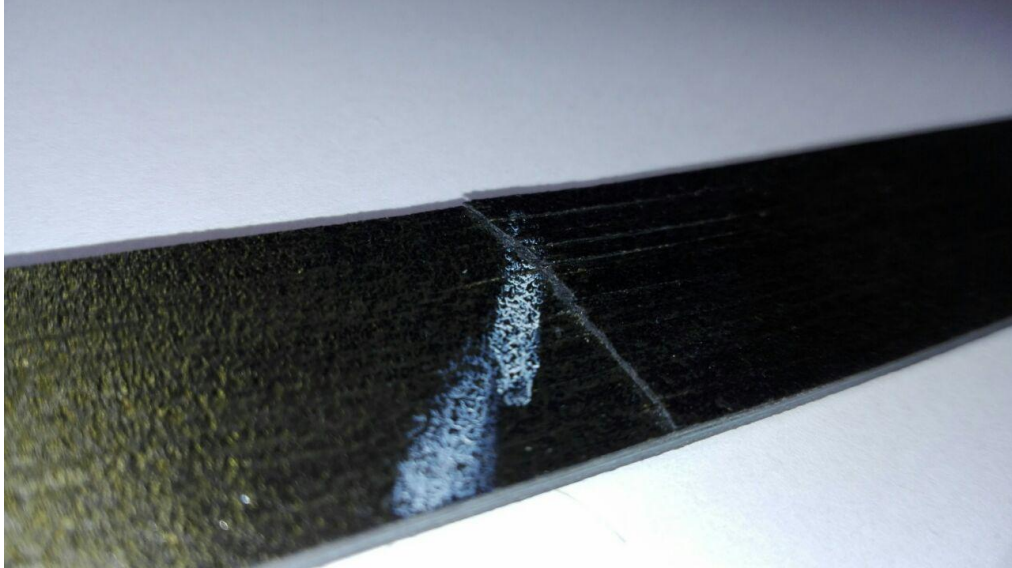


Figura 3.4 – Detalle de rotura.

Caso de la probeta 3

La probeta 3 ha fallado por despegue del parche. En la figura 3.45 se muestra que el parche ha fallado por una zona donde confluyen esquinas con diferentes orientaciones, lo cual conlleva una mayor concentración de tensiones.

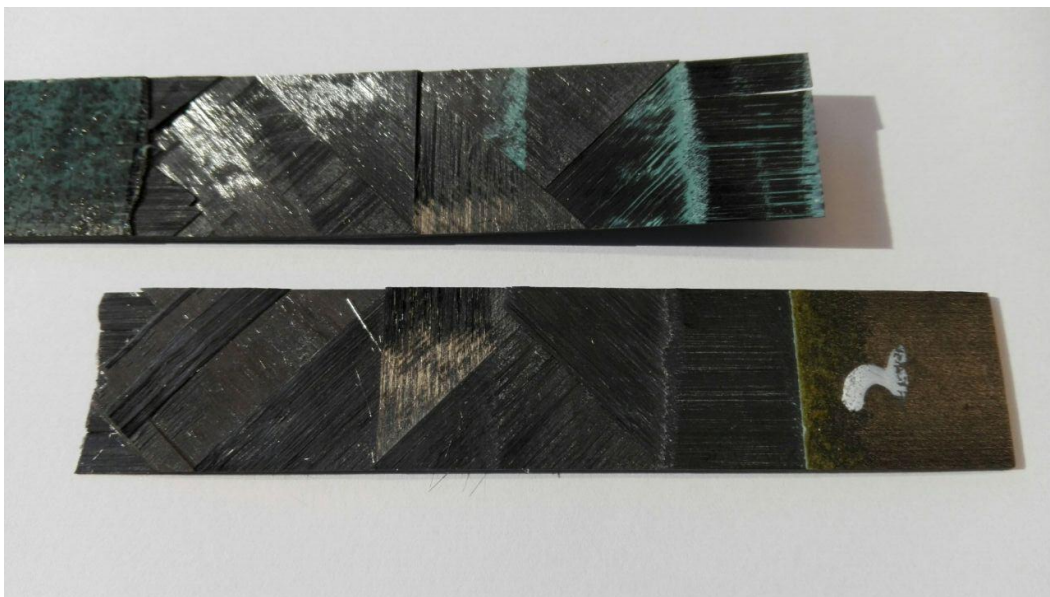


Figura 3.45 – Rotura de la probeta 3.

El método de fallo ha sido exactamente el mismo. La rotura ha comenzado por el punto de aplicación de la carga. Una ha colapsado la capa más externa, la rotura se ha propagado hacia el extremo de la probeta, lugar donde ha alcanzado la zona más irregular del resonado. Si se recuerda el aspecto que tenía en resonado, recogido en la figura 3.46, se observa que la rotura se ha producido en la parte más débil.

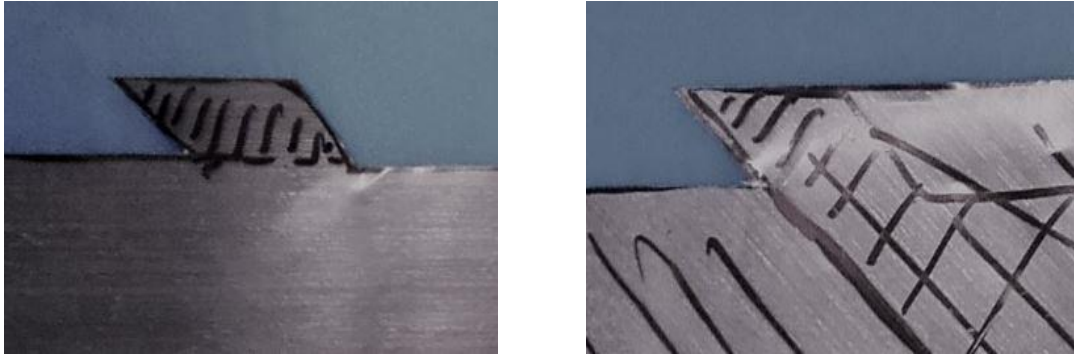


Figura 3.46 – Zona estimada de rotura.

En la figura 3.47 se observa que el adhesivo se ha mantenido intacto hasta el último tramo, donde se ha provocado el despegue. El adhesivo se corresponde con la delgada línea blanca que recorre la probeta, y en todo momento, existe una lámina de carbono sobre él, hasta el lugar de despegue.

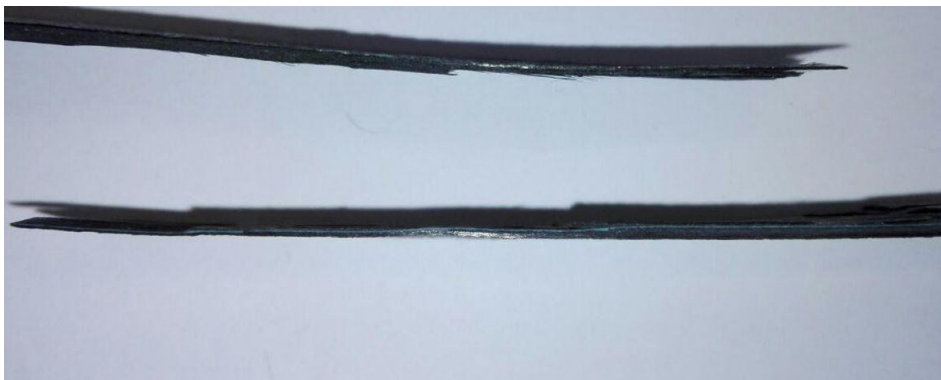


Figura 3.47 – Detalle del adhesivo.

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo era plantear y evaluar diferentes métodos de resanado y reparación sobre laminados de material que contuviesen algún tipo de defecto, así como la evaluación de la interacción del parche de reparación. Para la evaluación de tales aspecto, se ha fabricado diferentes laminados, tanto con defecto inducido como sin él.

En un primer estudio se han ensayado diferentes probetas con defecto, pero que no han sido reparadas. El objetivo de estos ensayos era comprobar el efecto del defecto en la probeta, y evaluar si éste afecta al comportamiento de la misma en la rotura. Los resultados obtenidos de tales ensayos han puesto de manifiesto que los defectos inducidos si tienen influencia sobre los métodos de rotura.

Los laminados que no contenían defecto se han empleado, principalmente, para la puesta a punto y familiarización de la técnica y las herramientas. Los laminados con defectos inducidos se han empleado para evaluar las ventajas e inconvenientes que cada procedimiento ofrece, para posteriormente ser reparados y ensayados.

La comprobación de la correcta interacción entre el laminado base y el parche de reparación se ha realizado mediante la visualización de diferentes micrografías, donde ha quedado demostrado que tanto laminado base, adhesivo y parche han quedado integrados correctamente en una pieza sólida.

Los ensayos realizados han consistido en una batería de ensayos de flexión en tres puntos, donde se ha buscado evaluar el correcto funcionamiento del parche. Tales ensayos han puesto de manifiesto el correcto funcionamiento del mismo, puesto que no se ha producido ningún despegue, produciéndose la rotura en el laminado base o en las láminas del parche.

Las probetas se han dividido en dos bloques. Unas han sido ensayadas con el parche hacia arriba (denominadas cóncavas), y otras con el parche hacia abajo (denominadas convexas). Todas las probetas (salvo una que ha sufrido despegue del parche) han roto por la parte sometida a compresión, debida a la curvatura de la probeta.

Las conclusiones que arroja este documento pueden resumirse en:

1. Los defectos tienen gran influencia en los modos de rotura de las probetas.
2. En cuanto a los procesos de resanado, la evidencia experimental es que las herramientas de lijado o amolado ofrecen un mejor acabado superficial, emplean menos tiempo y son más manejables que las herramientas de esmerilado.
3. Ha quedado patente la dificultad en el control de la profundidad de resanado en los laminados con una sola orientación. Ha sido clave el empleo de laminados con una secuencia de orientación diferente a 0° para asegurar la profundidad del resanado.
4. Los laminados con secuencia de apilado con diferente a 0° presentan una dificultad añadida tras el resanado, consistente en el efecto de las tensiones residuales que se acumulan en el proceso de curado. Una vez se retiran las capas del laminado base, la simetría del mismo se rompe, tendiendo éste a curvarse por el efecto de tales tensiones residuales. Afortunadamente, la aplicación del parche de reparación devuelve la simetría al conjunto, remitiendo los efectos sobre la curvatura.
5. Los procesos de amolado aseguran un acabado superficial más que aceptable para llevar a cabo una posterior reparación, gracias a que la profundidad de resanado se puede controlar de forma visual por diferenciación las de capas del laminado.
6. La interacción de los parches ha funcionado correctamente en los ensayos de flexión, produciéndose la mayoría de las roturas en los laminados (base o parche), manteniendo intacta la unión.

Desarrollo futuro

En este momento se plantean diferentes líneas de investigación, tanto experimentales como numéricas. A continuación se exponen diferentes aspectos de gran interés para su estudio, debido a que no ha sido posible tratarlos en el desarrollo de este trabajo.

1. **Empleo de otras herramientas.** Se ha presentado en este documento las mejoras aportadas por la amoladora neumática, así como los inconvenientes que plantea el empleo de abrasivos de carburo de silicio. Un aspecto importante en futuros estudios sería en empleo de una lijadora plana, que monte abrasivos de corindón o cerámicos, lo que repercutirá en un mejor acabado y mayores velocidades de operación.
2. **Estudio por métodos numéricos.** Tanto la morfología de la rotura en los ensayos de tracción, como la localización del fallo en los ensayos de flexión son aspectos importantes a tener en cuenta. Un estudio mediante el método de los elementos finitos puede aportar datos sumamente importantes sobre las causas de estas roturas.
3. **Técnicas de reparación.** En el desarrollo de este documento, las reparaciones se han llevado a cabo mediante el uso de autoclave. Esto conlleva la imposibilidad de usar estos estudios como referencia para reparaciones de campo. Un aspecto importante para un estudio futuro es comprobar si se obtienen resultados aceptables mediante el empleo de otras técnicas de curado, como el curado mediante mantas térmicas o mediante prensa de platos calientes.
4. **Ensayos dinámicos.** Un campo que no ha sido explorado es el de los ensayos a fatiga. Es interesante comprobar cuál es la respuesta que ofrece la reparación cuando el ensayo no se realiza a carga estática, dado que es posible que el adhesivo no soporte bien cargas menores cuando trabaje a fatiga.

REFERENCIAS

[1] HexPly M21, product data sheet

BIBLIOGRAFÍA

Cong N. Duong y Chun Hui Wang << Composite Repair, Theory and Design >>, 2007

Jesús Justo Estebaranz, Juan Carlos Marin Vallejo y José Cañas Delgado, << Prácticas de Materiales Compuestos >>, Junio 2014

ISO 14125, 1998/Cor. 1:2001

F. París, J. Cañas, J. Marín y A. Barroso, <<Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos >>, Sección de Publicaciones de ETSI de la Us, Sevilla 2006.