

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Estudio comparativo de métodos de reparación
con manta térmica en paneles de material
compuesto**

Autor: Julio Ballesteros Manzano

Tutor: Jesús Justo Estebaranz

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2019



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Estudio comparativo de métodos de reparación con manta térmica en paneles de material compuesto

Autor:

Julio Ballesteros Manzano

Tutor:

Jesús Justo Estebanz

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Estudio comparativo de métodos de reparación con manta térmica en paneles de material compuesto

Autor: Julio Ballesteros Manzano

Tutor: Jesús Justo Estebanz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

La realización de este proyecto ha sido posible gracias al enorme apoyo de mi familia y a la atención y colaboración de mi tutor, amigos y personal del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Es necesaria una mención especial para Miguel y Maxi, tanto por su atención a la hora de prestar ayuda en el manejo de máquinas y herramientas del laboratorio, como por el asesoramiento a la hora de orientar el proyecto.

Julio Ballesteros Manzano

Sevilla, 2019

El objetivo principal de este proyecto es determinar la eficacia de diferentes métodos de reparación con manta térmica en paneles de material compuesto. Para ello, se fabricarán y resanarán para eliminar los defectos. Posteriormente, se colocarán unos parches en cada uno de los paneles para completar la zona eliminada y se curarán en un instrumento de curado llamado Hotbonder. Por último, se ensayan las probetas a tracción hasta la rotura para determinar la resistencia que tienen los laminados y establecer si son lo suficientemente seguros para su uso.

Abstract

The main objective of this project is to determine the effectiveness of different methods of repair with thermal blanket in composite panels. For that purpose, the panels will be manufactured and repaired to eliminate defects. Later, patches will be placed to complete the eliminated area in each of the panels and these will be cured in a curing instrument called Hotbonder. Finally, the tensile test pieces are tested until breaking to determine the strength of the laminates and establish if they are safe enough for their use.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
1.1 Reparación en materiales compuestos	1
1.1.1 <i>Daños típicos</i>	3
1.1.2 <i>Opciones de reparación</i>	4
1.1.3 <i>Reparación en laminados y paneles sándwich</i>	4
1.2 Motivación y objetivos	7
1.3 Estructura del proyecto	7
2 Configuración de probetas	9
2.1 Tipos de probetas	10
2.1.1 <i>Tipo A</i>	10
2.1.2 <i>Tipo B</i>	10
2.1.3 <i>Tipo C</i>	10
2.1.4 <i>Tipo D</i>	10
2.1.5 <i>Tipo E</i>	11
2.1.6 <i>Tipo F</i>	11
2.1.7 <i>Tipo G</i>	11
3 Fabricación y resanado de paneles	13
3.1 Fabricación de paneles	13
3.1.1 <i>Curado en autoclave</i>	15
3.2.2 <i>Paneles curados</i>	17
3.2 Resanado de paneles	19
4 Unión del parche al panel	23
4.1 Unión del parche al panel G.	23
4.2 Unión del parche al panel C.	24
4.3 Unión del parche al panel D.	25

4.4	Unión del parche al panel E y F.	26
5	Curado de parches en el equipo Hotbonder	28
5.1	Curado 1: Probetas Tipo G	32
5.2	Curado 2: Probetas Tipo C	33
5.3	Curado 3: Probetas Tipo F	35
5.4	Curado 4: Probetas Tipo E	36
5.5	Curado 5: Probetas Tipo D	37
6	Acabado de las probetas	39
6.1	Pegado y curado de tacones	39
6.2	Corte de probetas	41
6.3	Comprobación de medidas	43
7	Ensayos	45
7.1	Ensayo de tracción	45
7.1.1	<i>Probetas Tipo A</i>	48
7.1.2	<i>Probetas Tipo B</i>	50
7.1.3	<i>Probetas Tipo C</i>	52
7.1.4	<i>Probetas Tipo D</i>	54
7.1.5	<i>Probetas Tipo E</i>	56
7.1.6	<i>Probetas Tipo F</i>	58
7.1.7	<i>Probetas Tipo G</i>	60
7.2	Examen macroscópico	62
7.2.1	<i>Probeta tipo D</i>	63
7.2.2	<i>Probeta tipo E</i>	64
7.2.3	<i>Probeta tipo F</i>	65
7.2.4	<i>Probeta tipo G</i>	66
8	Discusión de resultados	67
8.1	Carga y tensión de rotura	67
8.1.1	<i>Carga de rotura</i>	67
8.2.2	<i>Tensión de rotura</i>	69
8.2	Módulo de elasticidad	79
9	Conclusiones y desarrollos futuros	82
	Referencias	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Dimensiones de paneles.	13
Tabla 4-1. Dimensión y orientación de parches del panel G	24
Tabla 4-2. Dimensión y orientación de parches del panel C	24
Tabla 4-3. Dimensión y orientación de parches del panel D	25
Tabla 4-4. Dimensión y orientación de parches del panel E y F.	26
Tabla 6-1. Dimensiones de cada probeta	43
Tabla 7-1. Carga máxima probeta tipo A	48
Tabla 7-2. Carga máxima probetas tipo B.	50
Tabla 7-3. Carga máxima probetas tipo C.	52
Tabla 7-4. Carga máxima probetas tipo D.	54
Tabla 7-5. Carga máxima probetas tipo E.	56
Tabla 7-6. Carga máxima probetas tipo F.	58
Tabla 7-7. Carga máxima probetas tipo G.	60
Tabla 8-1. Carga máxima media y estadísticas de las probetas	68
Tabla 8-2. Comparación de carga máxima con probeta virgen (Tipo A)	68
Tabla 8-3. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo A	69
Tabla 8-4. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo B	70
Tabla 8-5. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo C	71
Tabla 8-6. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo D	72
Tabla 8-7. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo E	73
Tabla 8-8. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo F	74
Tabla 8-9. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo G	75
Tabla 8-10. Tensión media y estadísticas de las probetas	76
Tabla 8-11. Tensión media y estadísticas de las probetas	77
Tabla 8-12. Módulo de Elasticidad Medio de las probetas	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema de reparación [3]	2
Figura 1-2. Estructura tipo sándwich [3]	2
Figura 1-3. Estructura laminada [3]	3
Figura 1-4. Daños típicos [3]	3
Figura 1-5. Reparación de parches en laminados [3]	4
Figura 1-6. Reparación de parches en paneles sándwich (1) [3]	5
Figura 1-7. Reparación de parches en paneles sándwich (2) [3]	5
Figura 1-8. Reparación cónica en laminados [3]	5
Figura 1-9. Reparación cónica en paneles sándwich [3]	6
Figura 1-10. Reparación en escalón en laminados [3]	6
Figura 1-11. Reparación en escalón en paneles sándwich [3]	6
Figura 2-1. Capas y orientaciones del laminado	9
Figura 2-2. Dimensiones de la probeta en cm	9
Figura 2-3. Probeta tipo A	10
Figura 2-4. Probeta tipo B	10
Figura 2-5. Probeta tipo C	10
Figura 2-6. Probeta tipo D	10
Figura 2-7. Probeta tipo E	11
Figura 2-8. Probeta tipo G	11
Figura 3-1. Sala limpia del LERM	13
Figura 3-2. Paneles 3.1 y 3.2.	14
Figura 3-3. Arriba el Airweave, en el medio el teflón y abajo la bolsa de vacío.	14
Figura 3-4. Cromato. Cinta de alta temperatura	14
Figura 3-5. Esquema de bolsa de vacío [4]	15
Figura 3-6. Autoclave del LERM	15
Figura 3-7. Ciclo de curado en autoclave	16
Figura 3-8. Placas número 1, 2 y 3. Defecto en el panel 2.	17
Figura 3-9. Curado paneles 1, 2 y 3	17
Figura 3-10. Paneles 1, 2 y 3 curados	18
Figura 3-11. Equipo de ultrasonidos en una pieza sin defectos (a) y en otra con defectos (b) [7]	18
Figura 3-12. Curado del panel 4	19
Figura 3-13. Equipo de presión y lubricante. Herramienta neumática. Tipos de lijas.	19
Figura 3-14. Resanado hasta la última lámina.	20
Figura 3-15. Simulación y reparación real dejando 2 láminas sin resanar	20
Figura 3-16. Deformación placas E y F	21
Figura 3-17. Panel probetas tipo D antes y después del resanado.	21

Figura 4-1. Recreación virtual de la unión del parche al panel G	23
Figura 4-2. Panel G con parche sin curar	23
Figura 4-3. Recreación virtual de la unión del parche al panel C.	24
Figura 4-4. Unión del parche al panel C.	24
Figura 4-5. Recreación virtual de la unión del parche al panel D.	25
Figura 4-6. Unión del parche al panel D.	25
Figura 4.7. Recreación virtual de la unión del parche al panel E y F.	26
Figura 4.8. Unión del parche al panel F	26
Figura 5-1. Hotbonder [3]	28
Figura 5-2. Termopar y Manta Térmica	29
Figura 5-3. Panel sin curar. Termopar por detrás de la placa de aluminio. Colocación de la manta térmica. Bolsa de vacío acabada.	29
Figura 5-4. Corte transversal del montaje de la bolsa de vacío para Hotbonder	30
Figura 5-5. Panel de control de Hotbonder	30
Figura 5-6. Perfil de temperaturas.	31
Figura 5-7. Ciclo de curado del parche de probetas tipo G	32
Figura 5-8. Resultado del curado del parche de probetas tipo G.	32
Figura 5-9. Ciclo errado de curado del parche de probetas tipo C	33
Figura 5-10. Resultado errado del curado del parche de probetas tipo C.	33
Figura 5-11. Resanado del parche mal curado y embotamiento de lija	34
Figura 5-12. Ciclo de curado del parche de probetas tipo C	34
Figura 5-13. Resultado del curado del parche de probetas tipo C.	34
Figura 5-14. Ciclo de curado del parche de probetas tipo F	35
Figura 5-15. Resultado del curado del parche de probetas tipo F.	35
Figura 5-16. Ciclo de curado del parche de probetas tipo E	36
Figura 5-17. Resultado del curado del parche de probetas tipo E.	36
Figura 5-18. Ciclo de curado del parche de probetas tipo D	37
Figura 5-19. Resultado del curado del parche de probetas tipo D.	37
Figura 6-1. Plancha para tacones y trompo.	39
Figura 6-2. Pegado de tacones	39
Figura 6-3. Bolsa de vacío del panel de probetas tipo G. Bolsa de vacío de los paneles de probetas tipo A, B, C, D, E y F.	40
Figura 6-4. Ciclo de curado del adhesivo de los tacones	40
Figura 6-5. Paneles preparados para el corte.	41
Figura 6-6. Corte de paneles	41
Figura 6-7. Probetas	42
Figura 6-8. Buen ajuste y mal ajuste.	42
Figura 6-9. Comprobación de medidas con calibre.	44
Figura 7-1. Equipo de ensayo	45

Figura 7-2. Colocación de probeta en mordazas y extensómetro	46
Figura 7-3. Panel de control	46
Figura 7-4. Zonas 1, 2 y 3 del software	47
Figura 7-5. Laminado probeta tipo A.	48
Figura 7-6. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo A	48
Figura 7-7. Probetas tipo A antes y después del ensayo.	49
Figura 7-8. Laminado tipo B.	50
Figura 7-9. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo B	50
Figura 7-10. Probetas tipo B antes y después del ensayo.	51
Figura 7-11. Laminado probeta tipo C.	52
Figura 7-12. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo C	52
Figura 7-13. Probetas tipo C antes y después del ensayo.	53
Figura 7-14. Laminado probeta tipo D.	54
Figura 7-15. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo D	54
Figura 7-16. Probetas tipo D antes y después del ensayo.	55
Figura 7-17. Laminado probeta tipo E.	56
Figura 7-18. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo E	56
Figura 7-19. Probetas tipo E antes y después del ensayo.	57
Figura 7-20. Laminado probetas tipo F	58
Figura 7-21. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo F	58
Figura 7-22. Probetas tipo F antes y después del ensayo.	59
Figura 7-23. Laminado probeta tipo G	60
Figura 7-24. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo G	60
Figura 7-25. Probetas tipo G antes y después del ensayo.	61
Figura 7-26. Lupa con cámara	62
Figura 7-27. Esquema de partes de la probeta	62
Figura 7-28. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo D	63
Figura 7-29. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo E	64
Figura 7-30. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo F	65
Figura 7-31. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo G	66
Figura 8-1. Carga Máxima de todas las probetas	67
Figura 8-2. Carga Máxima Media de todas las probetas	68
Figura 8-3. Espesor original y reforzado de las probetas	69
Figura 8-4. Tensión – Deformación probetas tipo A	70
Figura 8-5. Tensión – Deformación probetas tipo B	70
Figura 8-6. Tensión – Deformación probetas tipo C (área original)	71
Figura 8-7. Tensión – Deformación probetas tipo C (área reforzada)	71
Figura 8-8. Tensión – Deformación probetas tipo D (área original)	72
Figura 8-9. Tensión – Deformación probetas tipo D (área reforzada)	72

Figura 8-10. Tensión – Deformación probetas tipo E (área original)	73
Figura 8-11. Tensión – Deformación probetas tipo E (área reforzada)	73
Figura 8-12. Tensión – Deformación probetas tipo F (área original)	74
Figura 8-13. Tensión – Deformación probetas tipo F (área reforzada)	74
Figura 8-14. Tensión – Deformación probetas tipo G (área original)	75
Figura 8-15. Tensión – Deformación probetas tipo G (área reforzada)	75
Figura 8-16. Tensión de rotura del área original	76
Figura 8-17. Tensión de rotura media del área original	76
Figura 8-18. Tensión de rotura del área reforzada	77
Figura 8-19. Tensión de rotura media del área reforzada	77
Figura 8-20. Diferencia de tensión según el área seleccionada	78
Figura 8-21. Representación de la rotura en la probeta Tipo C.	78
Figura 8-22. Módulo de Elasticidad referido al área original de todas las probetas.	79
Figura 8-23. Módulo de Elasticidad referido al área reforzada de todas las probetas.	79
Figura 8-24. Módulo de Elasticidad Medio de las probetas	80
Figura 9-1. Medida del escalón del panel.	83
Figura 9-2. Medida de espacio entre placas	83

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria en los últimos años se encuentra ligada al empleo de nuevos materiales. Durante los años 70 y 80, la industria de las aleaciones ligeras no tuvo en cuenta a los materiales compuestos como una alternativa real para la fabricación de alas y fuselaje. Por lo cual, la industria de los materiales compuestos invirtió un gran esfuerzo en I+D durante los últimos años resultando un gran desarrollo y un incremento constante en su condición productiva. Como consecuencia, ha sido la decadencia de la industria de las aleaciones de aluminio, pero no es el caso de las aleaciones de titanio.

Lo que se consigue con este tipo de material es fabricar piezas a medida y con unas propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de sus constituyentes actuando aisladamente. Algunas de estas mejoras de propiedades son en: peso, rigidez, comportamiento ante impacto, corrosión, abrasión, resistencia mecánica, aislamiento térmico y acústico, comportamiento a alta y baja temperatura, etc. Los materiales compuestos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones en el sector aeroespacial, automovilístico, marítimo y deportivo. [1]

1.1. Reparación en materiales compuestos

Los materiales compuestos son excelentes para adaptarse a necesidades muy específicas, por lo que hay pocos materiales y técnicas de reparación universales para lograr resultados exitosos. Los mejores métodos de reparación dependen de los detalles de cada estructura, por ello deben determinarse caso por caso.

Los fundamentos básicos de la reparación de compuestos incluyen los siguientes pasos:

- Inspeccionar para evaluar el daño (extensión y grado).
- Eliminar el material dañado.
- Tratar el material contaminado.
- Preparar la superficie de reparación.
- Reparación completa de compuestos.
- Inspeccionar la reparación para verificar la calidad.
- Restaurar el acabado de la superficie. [2]

La Figura 1-1 representa un diagrama de flujo que nos expone las decisiones a tomar sobre la evaluación del daño de un material. En primer lugar, si el daño es excesivo directamente se desecha, en caso contrario se repara. Existen tres tipos de reparación: simple, compleja y temporal. Las reparaciones simples son generalmente pequeñas y no afectan al rendimiento estructural de la pieza, en cambio las reparaciones complejas son realizadas cuando el daño es mayor y puede afectar a la integridad estructural del componente. Cuando se tiene un componente en servicio con un daño, se puede efectuar una reparación temporal, con el fin de que posteriormente se pueda llevar la pieza al taller para que se realice una correcta reparación. Estos tres tipos de reparación se detallan más adelante en el *Punto 1.1.2*. Finalmente, todas las reparaciones requieren una inspección de calidad mediante ensayos no destructivos para asegurar su buena integridad para devolverla al servicio.

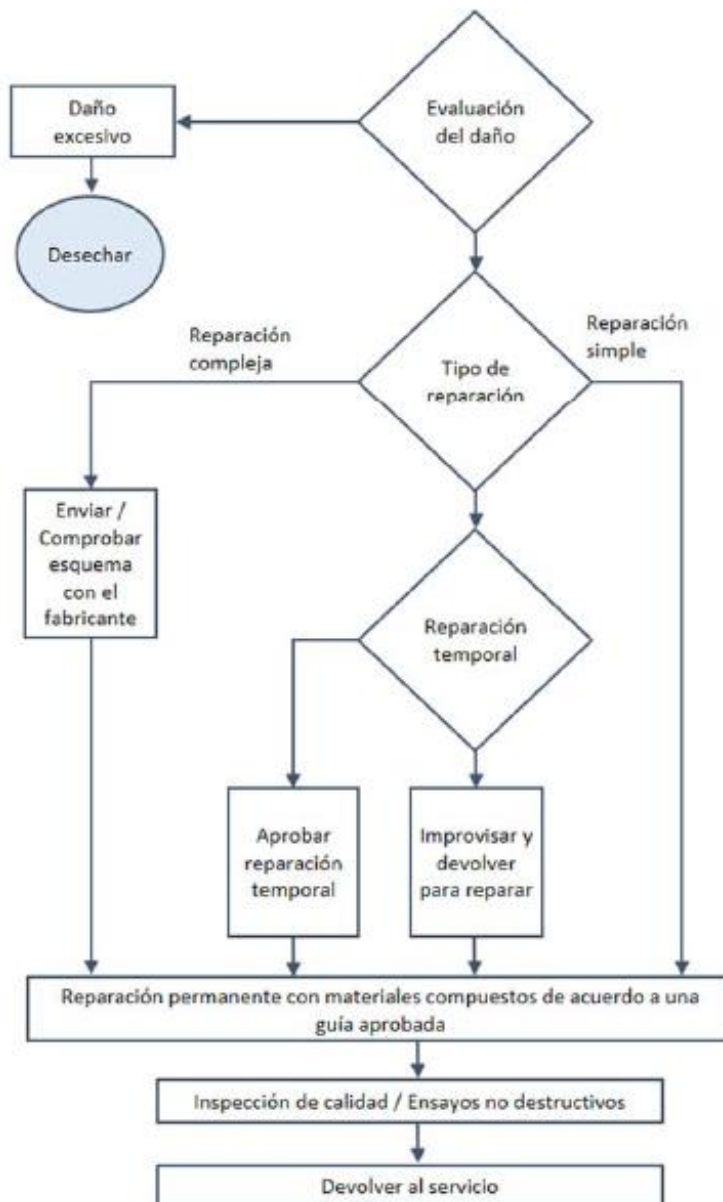


Figura 1-1. Esquema de reparación [3]

Hay varias formas de hallar áreas dañadas de manera rápida, por ejemplo, mediante la inspección visual, tocando la superficie o escuchando el sonido que desprende al manipularla. La inspección y el conocimiento de los daños de estos materiales deben incluirse en los programas de mantenimiento para este tipo de estructuras, prestando especial atención a las zonas que son más propensas a sufrir daños.

Para dar un enfoque general, nos centraremos en dos tipos de estructuras [3]:

- Estructuras Sándwich:

Las pieles finas y de alta resistencia están separadas y unidas por núcleos de panal de abeja que cuanto más grueso sea este núcleo, más rígido es el panel, pero con aumentos mínimos de peso (Figura 1-2).

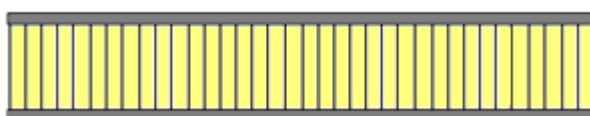


Figura 1-2. Estructura tipo sándwich [3]

- Estructuras laminadas:

Las estructuras laminadas se ensamblan de modo que la orientación de la fibra proporciona la mayoría de las propiedades mecánicas deseadas y la matriz determina en gran medida el desempeño ambiental (Figura 1-3).

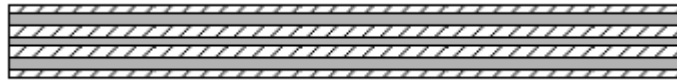


Figura 1-3. Estructura laminada [3]

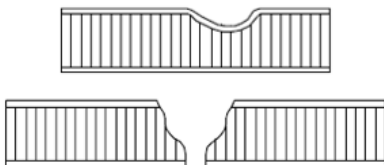
1.1.1. Daños típicos

En los metales, la energía se disipa a través de deformaciones elásticas y plásticas y aun así conservan una buena integridad estructural. En el caso del material reforzado con fibra, el daño suele ser más extenso.

Algunos ejemplos de estos daños son la delaminación, abolladuras, roturas, orificios, separación de capas y daño causado por calor. A continuación, en la Figura 1-4 se muestran unas imágenes de estos daños [3]:



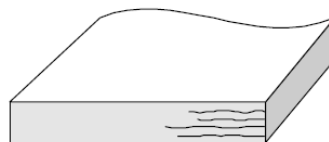
a) Delaminación posterior al impacto sobre un laminado monolítico



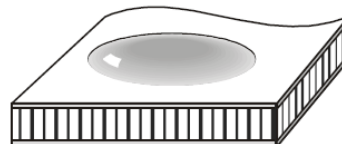
b) Abolladura y rotura en estructura sándwich.



c) Orificio en laminado



d) Separación de capas del laminado. Los efectos sobre el rendimiento mecánico dependen de la longitud de la división en relación con el espesor del componente.



e) Daño causado por calor. Su efecto sobre el rendimiento mecánico depende del grosor de la pieza.

Figura 1-4. Daños típicos [3]

1.1.2. Opciones de la reparación

Si una estructura compuesta sufre daños, se debe inspeccionar y posteriormente determinar uno de los tres niveles de reparación [2][3]:

- Reparación cosmética: La inspección determina que el daño no afecta la integridad estructural del componente. Este tipo de reparación no implica uso de materiales de refuerzo. Se realiza para proteger y decorar la superficie.
- Reparación temporal o provisional: Se emplea cuando se detectan pequeños daños que no amenazan la integridad estructural o las componentes mecánicas en su totalidad. Deben repararse, ya que si no se hace pueden conllevar una propagación de daños más rápida a través de fenómenos como la fatiga o la humedad. Se realizan reparaciones simples con parches (con poca preparación) para proteger la estructura hasta que se pueda sacar de servicio y poder reparar adecuadamente. Todas estas reparaciones deben tener una inspección regular para asegurar su buena integridad.
- Reparación estructural: El daño debilita la estructura por medio de, por ejemplo, la rotura de fibras o delaminación haciendo que la reparación sea el remplazo de fibras dañadas o del núcleo, en el caso de estructuras sándwich, para restaurar las propiedades mecánicas iniciales. Este tipo de reparación normalmente requiere que se proporcionen capas adicionales en la superficie de reparación. En el caso de que el área sea muy pequeña se puede cuestionar si es preferible realizar una reparación de este tipo o cosmética.

1.1.3. Reparación en laminados y paneles sándwich

El objetivo principal de la reparación estructural es soportar completamente (o en un rango aceptable) las cargas aplicadas y transmitir las tensiones a través de la superficie reparada. Los materiales de reparación como los parches y adhesivos deben superponerse y estar debidamente unidos a las láminas del panel original.

Si los componentes a reparar han estado en servicio deben ser secados para eliminar la humedad y alcanzar una mejor reparación. Las fibras y la resina curada absorberán la humedad del medio ambiente y los núcleos de paneles sándwich pueden contener grandes cantidades de fluido. Si se realiza una reparación de preimpregnado, debe eliminarse toda la humedad para evitar que el vapor se forme y disuelva la reparación. La técnica del secado se realiza generalmente con una manta térmica y una bolsa de vacío, utilizando calor para convertir la humedad en vapor y aspirar para extraerla. [2][3]

Son tres las formas de aplicar la reparación [3]:

1) Reparación de parches

Las ventajas de este tipo de reparación son que requieren una preparación mínima, es sencillo y rápido de realizar. Como desventajas se destaca que es más pesado y más grueso que el original. En las siguientes figuras se pueden observar las reparaciones de parches tanto en laminados como en paneles sándwich:

En el caso del laminado, tras eliminar el daño, el espesor está formado por capas de relleno y las demás láminas de reparación se unen a la superficie (Figura 1-5).

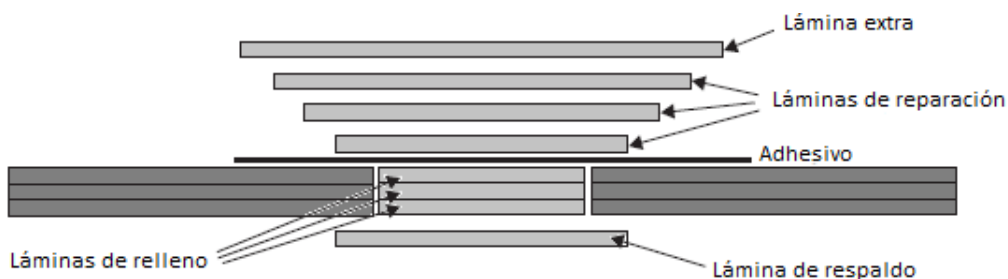


Figura 1-5. Reparación de parches en laminados [3]

En cuanto a los paneles sándwich, existen dos formas de reparación:

- Se sustituyen las láminas y el núcleo dañado por otros nuevos y se unen mediante un adhesivo. Posteriormente, se fijan a la superficie las láminas de reparación y extra (Figura 1-6).

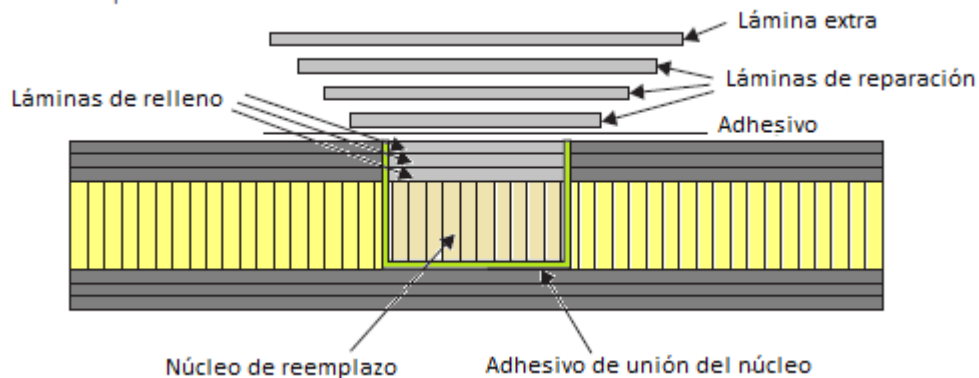


Figura 1-6. Reparación de parches en paneles sándwich (1) [3]

- Se sustituyen las láminas y el núcleo dañado por un núcleo que completa la zona y se une mediante un adhesivo. Posteriormente, se fijan a la superficie las láminas de reparación y extra (Figura 1-7).

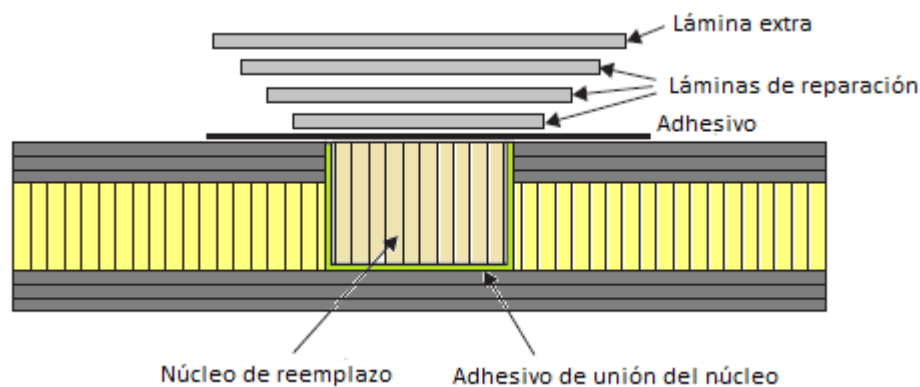


Figura 1-7. Reparación de parches en paneles sándwich (2) [3]

2) Reparación cónica lijada (Taper sanded or scarf repair)

Las ventajas de este tipo de reparación son que se proporciona una trayectoria de carga más recta y resistente porque cada capa de reparación se superpone (aunque no del todo) a la capa que se está reparando y es solo un poco más gruesa que el laminado original. Como desventaja se destaca que se necesita una alta habilidad, es difícil de conseguir y conlleva una gran cantidad de tiempo realizarla. En las siguientes figuras se pueden observar las reparaciones cónicas tanto en laminados como en paneles sándwich:

En los laminados se lija una superficie de forma cónica para exhibir una sección de cada capa del laminado y posteriormente se unen las láminas de refuerzo (Figura 1-8).

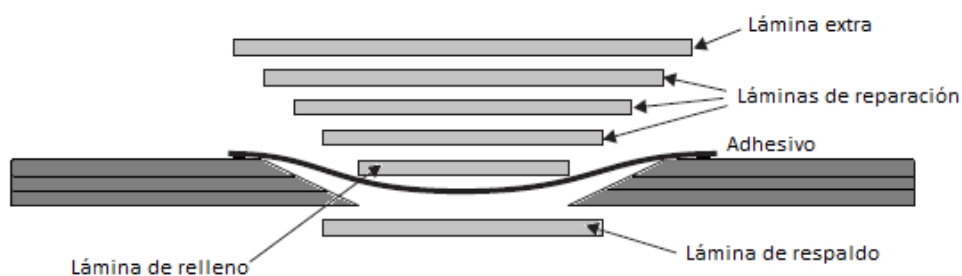


Figura 1-8. Reparación cónica en laminados [3]

En el caso de los paneles sándwich, se sustituyen las láminas y el núcleo dañado por otros nuevos y se unen mediante un adhesivo. Posteriormente, se fijan a la superficie las láminas de reparación y extra (Figura 1-9).

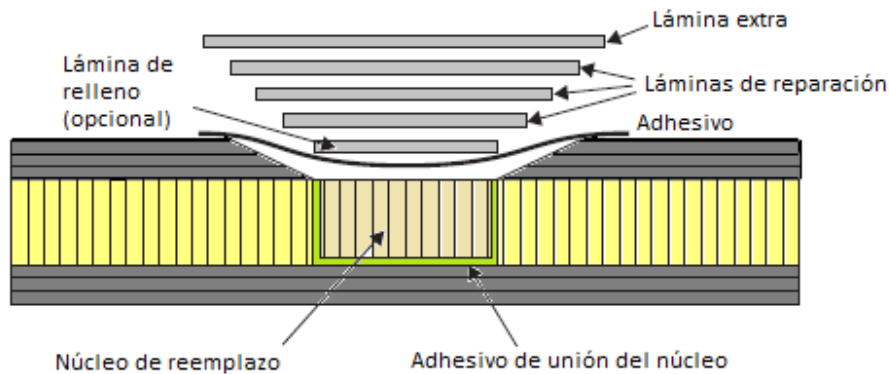


Figura 1-9. Reparación cónica en paneles sándwich [3]

3) Reparación escalonada lijada (Step sanded repair)

Las ventajas de este tipo de reparación son que se proporciona una trayectoria de carga más recta y resistente, aún más que la cónica, porque cada capa de reparación se superpone completamente a la capa que se está reparando y, además, es un solo un poco más gruesa que el laminado original. Como desventaja se destaca que se necesita mayor habilidad, precisión y tiempo que en la reparación cónica.

En las siguientes figuras se pueden observar las reparaciones cónicas tanto en laminados como en paneles sándwich:

En el caso del laminado se lija de tal forma que exhibe una superficie plana en cada capa y posteriormente se unen las láminas de refuerzo (Figura 1-10).

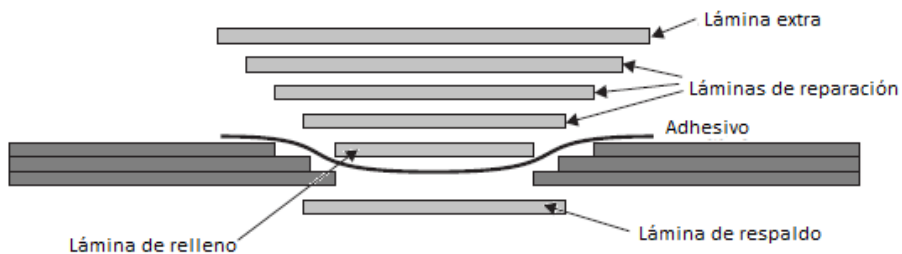


Figura 1-10. Reparación en escalón en laminados [3]

En cuanto a los paneles sándwich, se sustituyen las láminas y el núcleo dañado por otros nuevos y se unen mediante un adhesivo. Posteriormente, se fijan a la superficie las láminas de reparación y extra (Figura 1-11).

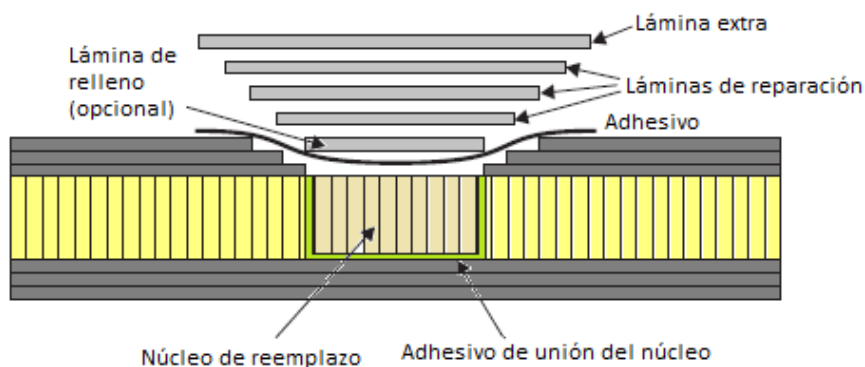


Figura 1-11. Reparación en escalón en paneles sándwich [3]

1.2. Motivación y objetivos

El objetivo principal de este proyecto es determinar la eficacia de diferentes métodos de reparación con manta térmica en paneles de material compuesto. Para ello, se fabricarán y resanarán para eliminar los defectos. Posteriormente, se colocarán unos parches en cada uno de los paneles para completar la zona eliminada y se curarán en un instrumento de curado llamado Hotbonder. Por último, se ensayan las probetas a tracción hasta la rotura para determinar la resistencia que tienen los laminados y establecer si son lo suficientemente seguros para su uso.

1.3. Estructura del proyecto

La estructura del proyecto se organiza de la siguiente forma:

- Capítulo 2: “Configuración de probetas”, en él se establece la orientación y dimensión de las probetas, así como la forma de los paneles finales.
- Capítulo 3: “Fabricación y resanado de paneles”, se aborda el proceso de fabricación de los paneles y posterior resanado con herramienta neumática para eliminar material.
- Capítulo 4: “Unión del parche al panel”, en este capítulo se presenta la colocación del parche en cada uno de los paneles para repararlos.
- Capítulo 5: “Curado de parches en el equipo Hotbonder”, se detalla el uso del instrumento y los ciclos de curado de cada panel reparado.
- Capítulo 6: “Acabado de las probetas”, se recoge la unión de los tacones a los paneles, el corte de probetas y la posterior comprobación de medidas.
- Capítulo 7: “Ensayos”, en este capítulo se presentan gráficos, tablas y figuras de cada tipo de probeta ensayada a tracción hasta la rotura para evaluar sus propiedades. Además, se realiza un examen macroscópico con “lupa” para observar defectos en el laminado tras ser ensayado.
- Capítulo 8: “Discusión de resultados”, se profundiza en los resultados obtenidos en el capítulo anterior.
- Capítulo 9: “Conclusiones y desarrollos futuros”, en este último capítulo se recogen las ideas de mayor interés y se proponen unas nuevas líneas de investigación relacionadas con el proyecto.

2 CONFIGURACIÓN DE PROBETAS

En este capítulo se describe la configuración de los paneles a fabricar y posteriores probetas.

Se considera un laminado de un compuesto de carbono-epoxy de denominación AS4/8552, formado por 7 capas con las fibras orientadas $[90, -45, 45, 0, 45, -45, 90]$. En un primer momento se decidió crear el laminado de 8 capas con la siguiente configuración: $[90, -45, 45, 0, 0, 45, -45, 90]$, con dos láminas de 0° en vez de una, pero no se realizó debido a que cuando resanamos las láminas centrales, al ser las dos iguales, es imposible distinguir las capas para realizar los escalones de la reparación. Además, se eligió que las láminas exteriores fuesen a 90° debido a que después, en algunas probetas, se colocan unos extra-plies también a 90° para reforzar la zona reparada. Si este refuerzo se colocase a 0° soportaría demasiada carga y lo que se pretende en este proyecto es determinar la resistencia de la unión del parche al panel. Más adelante se detallarán estos pasos.

En la Figura 2-1 se observa la simulación virtual de la secuencia de apilado de los paneles.

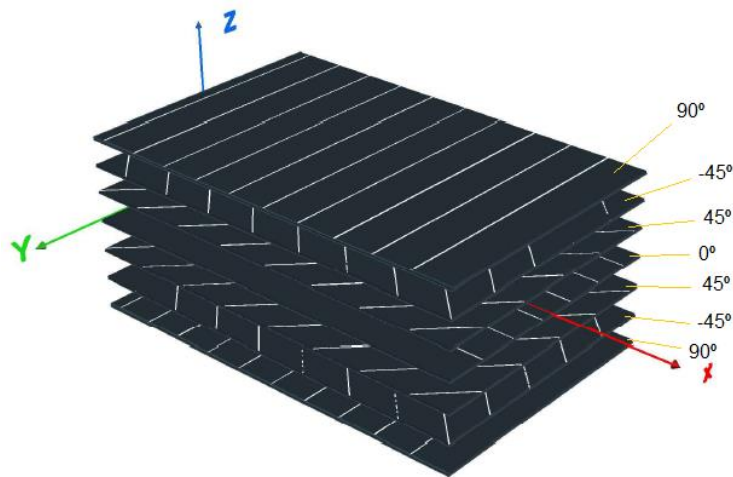


Figura 2-1. Capas y orientaciones del laminado

En cuanto a las dimensiones, no se ha considerado ninguna norma en concreto debido a que existen pocas técnicas de reparación universales y los métodos dependen de los detalles de cada estructura. Se ha determinado un largo de 310 mm porque se necesita una superficie considerable para realizar las reparaciones. Las probetas tendrán una dimensión de $310 \times 20 \text{ mm}^2$ y se colocarán en los extremos unos tacones de fibra de vidrio de $50 \times 20 \text{ mm}^2$ para poder sujetarlas en el ensayo. En la Figura 2-2 se muestra una simulación virtual de la probeta a realizar.

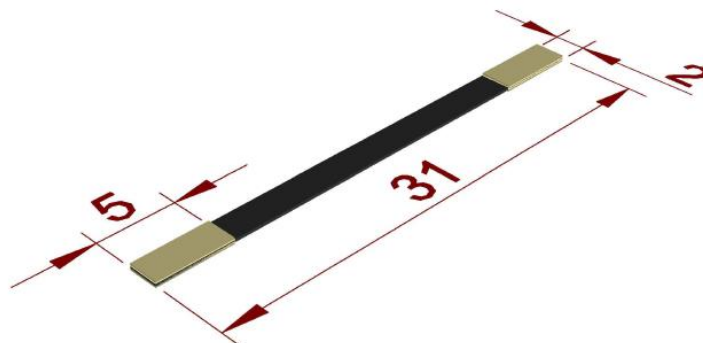


Figura 2-2. Dimensiones de la probeta en cm

2.1. Tipos de probetas

En los siguientes puntos se exponen los tipos de probetas realizados para dar un enfoque superficial de las estructuras a reparar y que sea más sencillo su entendimiento.

2.1.1 Tipo A

Es un panel virgen para caracterizar las propiedades el material y comparar los resultados con los reparados (Figura 2-3).

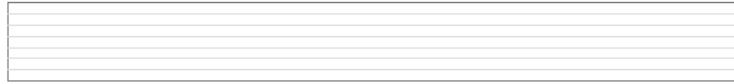


Figura 2-3. Probeta tipo A

2.1.2 Tipo B

Probetas con defecto interno compuesto por una lámina de teflón que inducirá al fallo de la probeta con antelación. La placa se compone de 7 capas, por lo que la lámina de teflón se coloca entre la lámina 3 y 4 (Figura 2-4).

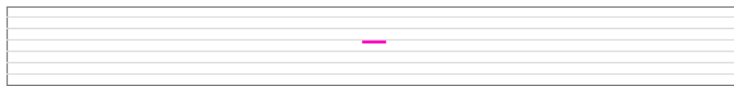


Figura 2-4. Probeta tipo B

2.1.3 Tipo C

Probetas tipo B, pero con un parche superficial orientado a 0 grados (Figura 2-5).

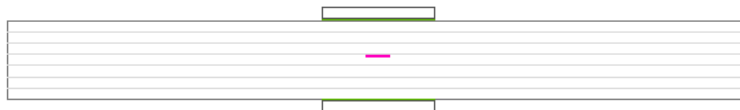


Figura 2-5. Probeta tipo C

2.1.4 Tipo D

Panel con un resanado de 5 láminas de forma escalón (step) de 1 cm de anchura cada uno. Posteriormente se colocará un parche para completar el laminado (Figura 2-6).

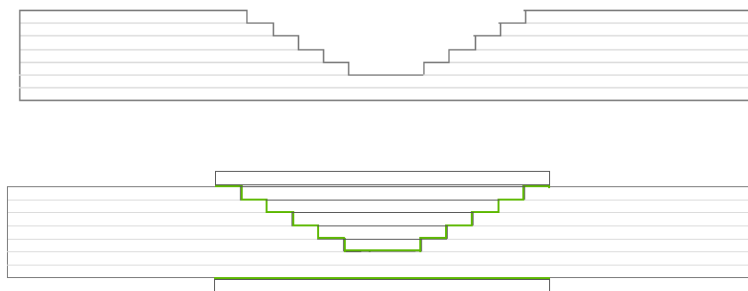


Figura 2-6. Probeta tipo D

2.1.5 Tipo E

Panel con un resanado de láminas de forma escalón (step) de 1 cm de anchura cada uno. Más adelante, en el *Punto 3.2*, se detallará la causa de dejar dos láminas sin resanar a la misma altura (Figura 2-7).

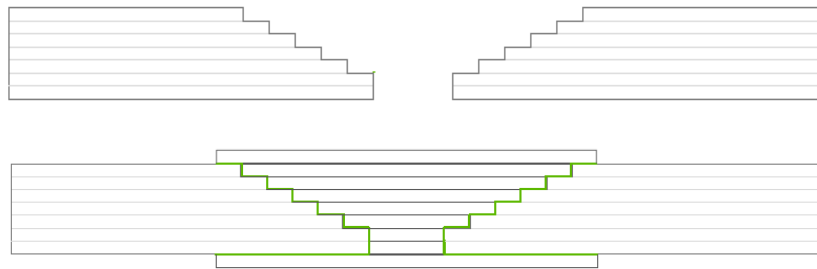


Figura 2-7. Probeta tipo E

2.1.6 Tipo F

Este panel tiene la misma configuración que el Tipo E, pero ocurrió un error al curar el parche y se dejó para determinar la resistencia de un panel con curado incompleto. En la sección 5.3 “*Curado 3: Probetas tipo F*” se explica este caso.

2.1.7 Tipo G

Configuración tipo step, pero no se realiza resanado, en esta ocasión se apilan las capas de tal forma que imitan los escalones de 1 cm de anchura. Esto se realiza para determinar la diferencia entre un resanado manual, con errores humanos, y otro con los escalones sin errores de reparación con lija (Figura 2-8).

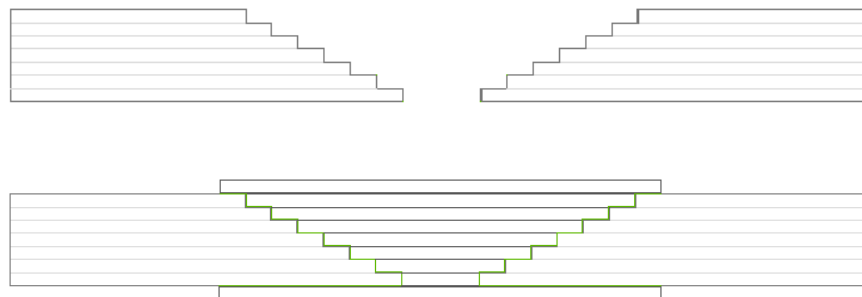


Figura 2-8. Probeta tipo G

3 FABRICACIÓN Y RESANADO DE PANELES

En este capítulo se aborda el proceso de fabricación de los paneles y posterior resanado con herramienta neumática para eliminar material.

3.1 Fabricación de paneles

Para la fabricación de paneles se van a dividir en dos series, una primera será de las probetas Tipo: B, C, E, F y G, y una segunda de los Tipo: A y D.

La fabricación de los paneles tiene lugar en una sala limpia (Figura 3-1) donde se dan unas condiciones específicas de temperatura, presión y humedad. El método usado es el de bolsa de vacío curado en autoclave.



Figura 3-1. Sala limpia del LERM

El material a usar se denomina preimpregnado o prepreg, el cual está formado por fibras unidireccionales de carbono impregnadas en resina epoxy (resina pre-catalizada). Para prolongar la vida útil del material se mantiene congelado a -18°C y cuando se quiera hacer uso de él, se retira del congelador y se atempera. Puede durar varias semanas con el catalizador latente una vez descongelado, pero se puede volver a congelar de nuevo. [4]

Las láminas se miden con regla, escuadra y cartabón y se cortan con un cúter. Después, cuando se tiene clara la secuencia de apilado, se montan una encima de otras para formar el laminado, aplicándole presión en la dirección de las fibras mediante una espátula de nylon para compactarlas adecuadamente y evitar pliegues y porosidades. También se puede utilizar una bolsa de vacío reutilizable para este fin. Es recomendable dejar la capa protectora encerada para evitar que se contamine el laminado en la compactación. En la Tabla 3-1 se exponen las dimensiones de cada panel fabricado.

Nº Panel	Tipo Probeta	Dimensión	Nº Láminas
1	E y F	30x15	7
2	B y C	33x15	7
3 (3.1 y 3.2)	G	-	7
		15x15	Lámina 1
		14x15	Lámina 2
		13x15	Lámina 3
		12x15	Lámina 4
		11x15	Lámina 5
		10x15	Lámina 6
9x15	Lámina 7		
4	A y D	33x15	7

Tabla 3-1. Dimensiones de paneles.

En la Figura 3-2 se puede observar la orientación y dimensiones de cada lámina del panel 3 antes de ser curado.

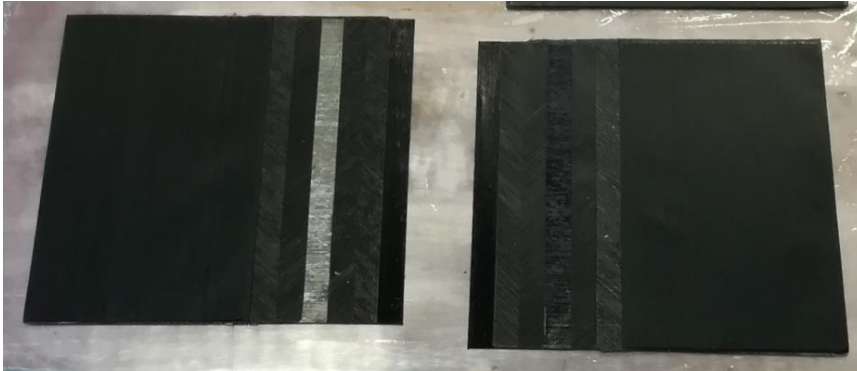


Figura 3-2. Paneles 3.1 y 3.2.

En primer lugar, antes de cubrir los paneles con una bolsa de vacío, hay que conocer los materiales a usar (Figura 3-3 y 3-4):

- Airweave: Es una capa aislante que, además, hace que todo el laminado esté a la misma presión, homogeneiza su superficie y elimina el exceso de resina.
- Teflón: Capa antiadherente o desmoldeante para evitar el derrame de la resina y poder desmoldarla con facilidad.
- Bolsa de vacío: Película de plástico para envasar al vacío.



Figura 3-3. Arriba el Airweave, en el medio el teflón y abajo la bolsa de vacío.

- Cromato: Cinta adhesiva que se usa para el sellado a partir de un cierre hermético entre la bolsa de vacío y la superficie del molde metálico.
- Cinta de alta temperatura: Cinta adhesiva que aguanta temperaturas mayores de 180°C.



Figura 3-4. Cromato. Cinta de alta temperatura

Una vez conocidos, se dispone a explicar el procedimiento de fabricación de la bolsa de vacío:

- En primer lugar, se coge una placa de aluminio o de acero y se limpia con acetona o alcohol. Si tiene algún resto de resina o cromato de algún proceso anterior, se lija.
- Se corta un trozo de teflón con una dimensión mayor que las placas para que cuando fluya la resina no se adhiera a la placa metálica.
- Se coloca el laminado encima del teflón, dejando un espacio de un palmo para la colocación de las válvulas de vacío, para evitar que las tomas aspiren resina. Antes de la colocación, es muy importante quitar la capa encerada que protege el prepreg ya que, si se olvidase, al curarla crearía tensiones de curado que pueden ocasionar una deformación no deseada del panel. Si éste tuviese muchas capas, se tiene que colocar corcho alrededor del laminado para evitar que fluya la resina, pero en nuestro caso no es necesario puesto que son 7 capas.
- Se corta otro trozo de teflón y se coloca encima del laminado.
- Posteriormente, se coloca el airweave cubriendo la totalidad de la placa metálica, menos los bordes.
- Se sitúa el soporte de las válvulas de vacío en la zona que hemos dejado anteriormente para ello.
- Se coloca cromato en los bordes (con solape para evitar la entrada de aire) y se adhiere la bolsa de vacío mediante una espátula.
- Se conectan los cabezales de las 2 válvulas.
- Se aplica vacío y se observa si hay alguna entrada de aire. Si la hubiese, se compacta el cromato con la espátula hasta que desaparezca.

En la Figura 3-5 se observa el esquema de la bolsa de vacío.

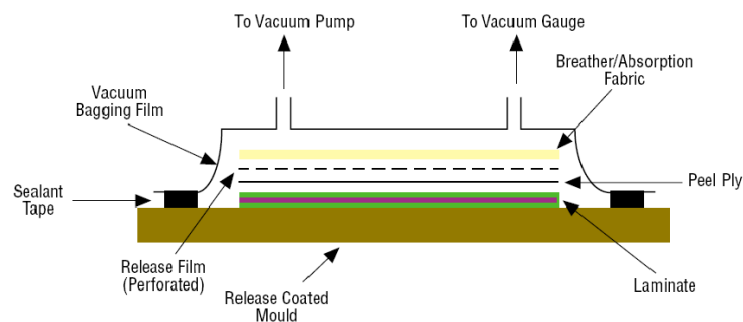


Figura 3-5. Esquema de bolsa de vacío [4]

3.1.1 Curado en autoclave

La autoclave (Figura 3-6) es un recipiente de forma cilíndrica con un sistema de control de presión y temperatura, en la cual se curan los materiales compuestos. El tamaño varía dependiendo del tipo de piezas a procesar, por ejemplo, las del sector aeronáutico pueden tener un diámetro de 5-6 metros y una longitud de 20-25 metros. [6]



Figura 3-6. Autoclave del LERM

Primeramente, antes de realizar el ciclo de curado de los paneles, se debe comprobar que no hay entradas de aire en la bolsa de vacío. Se acoplan las mangueras de vacío de la autoclave a las válvulas de la bolsa y se hace vacío hasta alcanzar una presión en la bolsa de 0.8 bar. Al alcanzar esta presión, se interrumpe el vacío y se esperan unos minutos. Si en este tiempo no se reduce la presión en la bolsa, se puede considerar que no tiene entradas de aire.

El ciclo dura 4 horas – 45 minutos y se destacan tres etapas fundamentales:

- Temperatura del aire: Se produce una subida en rampa de 1.5°C/min desde la temperatura ambiente hasta los 180 °C y se mantiene durante 2 horas. Posteriormente, desciende la temperatura hasta la ambiente a un nivel de 2.5°C/min.
- Presión: Se produce una subida en rampa desde los 0 bares hasta 9 bares en 1 hora - 45 minutos, se mantiene durante 2 horas – 30 minutos y desciende en rampa hasta los 0 bares en 30 minutos.
- Vacío en la bolsa: Se mantiene constante a 0.8 bares durante 4 horas - 15 minutos y se despresuriza durante 30 minutos.

En la Figura 3-7 se observa el ciclo de curado en autoclave descrito anteriormente.

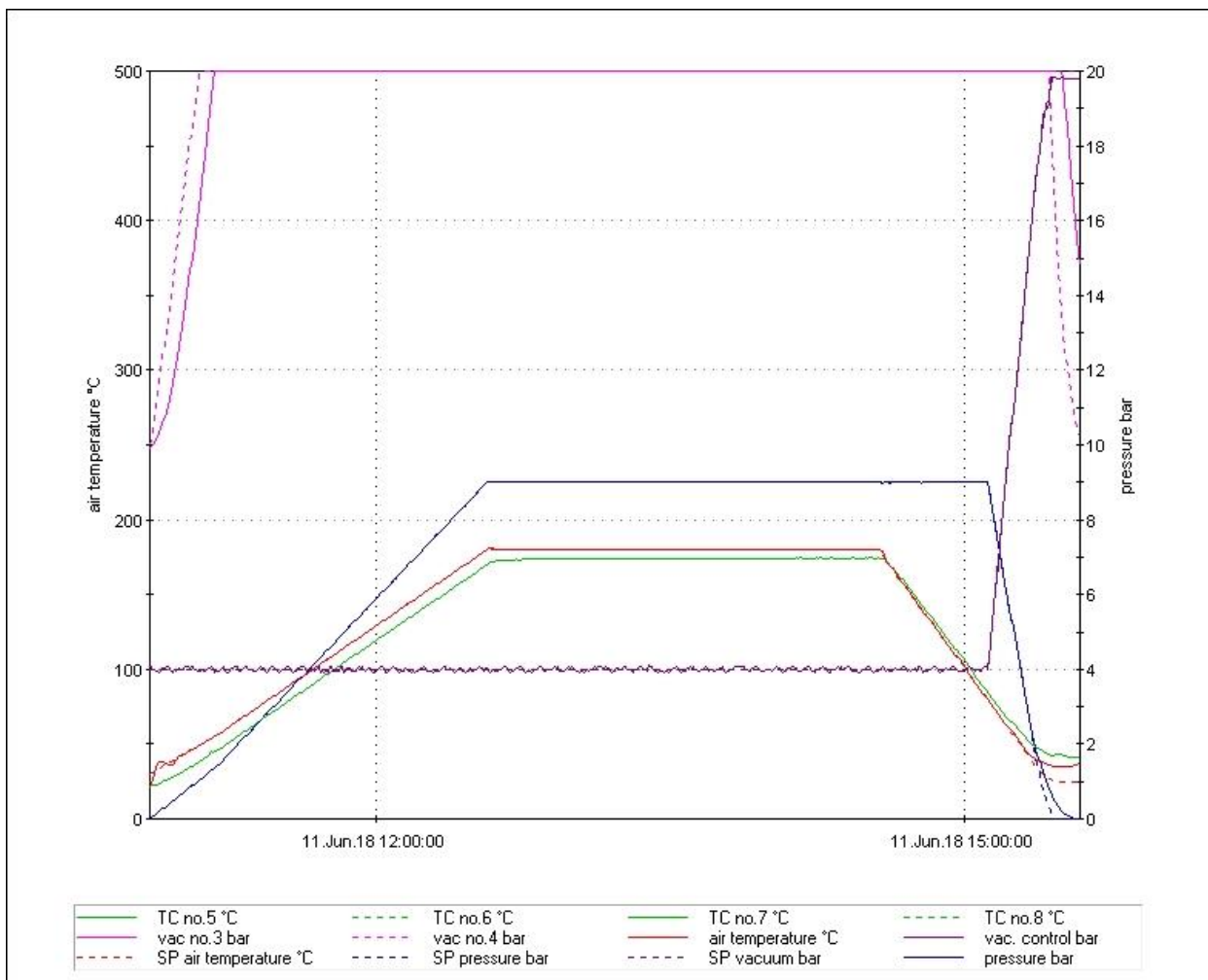


Figura 3-7. Ciclo de curado en autoclave

3.1.2 Paneles curados

En esta sección se exponen las dos series de paneles fabricados en distintos ciclos:

- Serie 1: Paneles 1 (E y F), 2 (B y C) y 3 (G).

En la Figura 3-8 se observa los paneles de la Serie 1 antes de ser curados y el detalle del defecto de teflón de 1cm ancho del panel número 2 que será el usado para las probetas B y C.

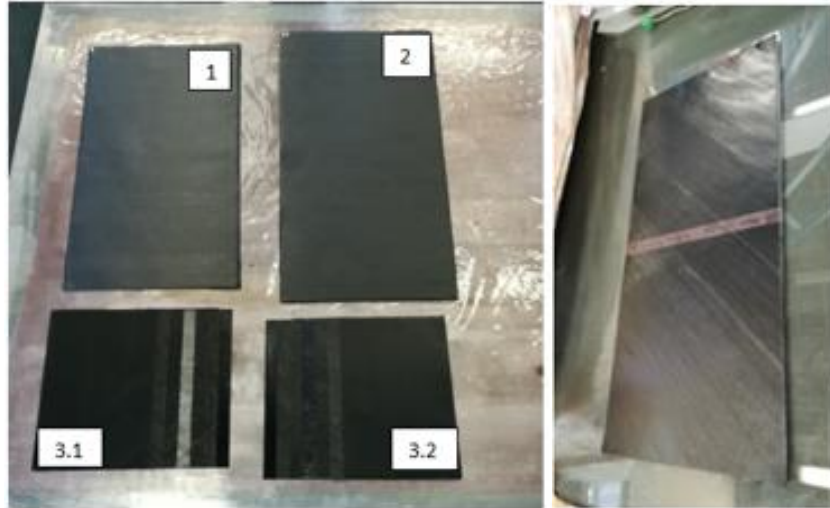


Figura 3-8. Placas número 1, 2 y 3. Defecto en el panel 2.

Se realiza el curado en autoclave aplicándole perfectamente el vacío. Se puede contemplar la acción del airweave de homogeneizar la superficie de los paneles en la Figura 3-9.



Figura 3-9. Curado paneles 1, 2 y 3

En la Figura 3-10 se observan los paneles 1, 2 y 3 curados. Destacar la deformación del panel 3 debido a la diferente dirección de las fibras en cada capa y a su asimetría.

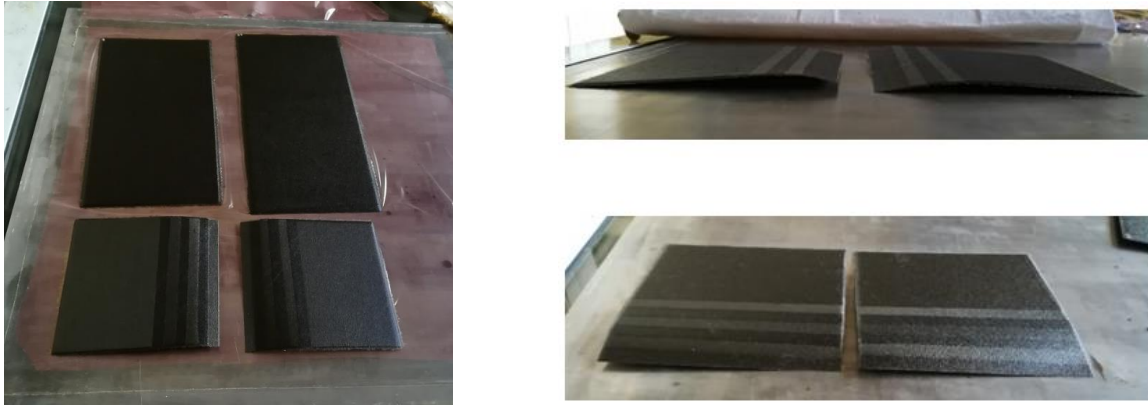


Figura 3-10. Paneles 1, 2 y 3 curados.

Para determinar perfectamente donde se encuentra el defecto del panel 2, que hemos introducido manualmente, se va a optar por la técnica de ultrasonidos, una prueba utilizada para el ensayo no destructivo de materiales. Se aplica para conocer el interior de un material al procesar la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras. Se conoce que la propagación de las ondas en el interior de la pieza depende de las discontinuidades del material examinado, lo que permite evaluar aquella discontinuidad acerca de su tamaño, forma y orientación, ya que estos oponen resistencia conocida como impedancia acústica. Una vez conocida la propagación de las ondas sonoras, se determina su velocidad y con ello las propiedades de los materiales. [7]

El primer paso es impregnar la placa con un gel acoplante que evita el ruido y mejora que la onda generada y recibida pierdan la menor energía posible. Después, con el palpador se va determinando la posición del defecto y se va marcando. La Figura 3-11 explica el procedimiento: La pieza (a) no presenta defectos, la onda viaja libremente en el interior de la pieza hasta encontrarse con otro material para ser reflejado. En la pieza (b) la onda es reflejada por el defecto en el interior de la pieza.

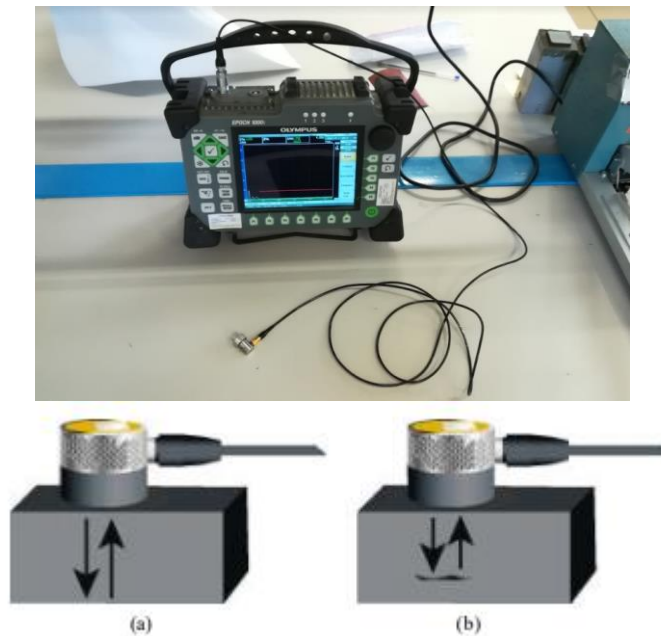


Figura 3-11. Equipo de ultrasonidos en una pieza sin defectos (a) y en otra con defectos (b) [7]

- Serie 2: Panel 4 (A y D)

Es un panel para la fabricación de las probetas vírgenes tipo A y las probetas tipo D que posteriormente serán resanadas para su reparación. En la Figura 3-12 se observa el curado del panel 4.

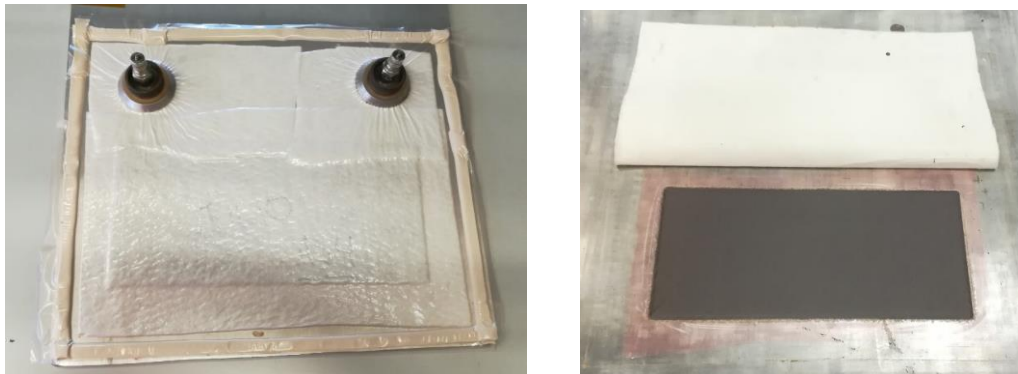


Figura 3-12. Curado del panel 4

3.2 Resanado de paneles

En este capítulo vamos a describir un procedimiento para eliminación de material y con ello la eliminación del supuesto defecto. Existen varios tipos de reparaciones como los mencionados en la sección 1.1.3. “Reparación en laminados y paneles sandwich”, pero se opta por el tipo **step sanded o escalonado** debido a que transmite mejor las cargas que el taper sanded o cónico por la unión entre el parche y el panel.

Para realizar el resanado de placas se va a utilizar una herramienta neumática que desbasta el material según el tamaño de grano de las lijas. Esta herramienta se compone de una pistola, cabezal, lijas (120, 80 y 60 de tamaño de grano), lubricante (morlina) y manómetro. En la Figura 3-13 se puede observar el equipo utilizado.



Figura 3-13. Equipo de presión y lubricante. Herramienta neumática. Tipos de lijas.

Para realizar el resanado se tiene que equipar con bata, guantes, mascarilla, botas de seguridad, gatos y una aspiradora. Es muy importante evitar respirar las partículas de fibra de carbono que produce el resanado, ya que son muy perjudiciales para la salud.

Todos los procesos de resanado tendrán los mismos parámetros:

- Presión de 3 bares de entrada de aire a la herramienta neumática.
- Lija de 80 para desbastar y lija de 60 para mejorar el acabado superficial.
- Abrir la llave del lubricante cada 30 minutos, proporcionándole a la herramienta unas 5 gotas (más o menos).

A continuación, se exponen los resanados de los paneles número 1 y 4:

- Panel número 1 (probetas E y F): En un primer momento se quiso realizar un resanado de 6 capas, pero se efectuó una prueba y no fue satisfactoria. Es muy difícil realizar un resanado hasta la última lámina debido a que esta es muy quebradiza. Podemos observar la rotura de la última capa en la Figura 3-14.

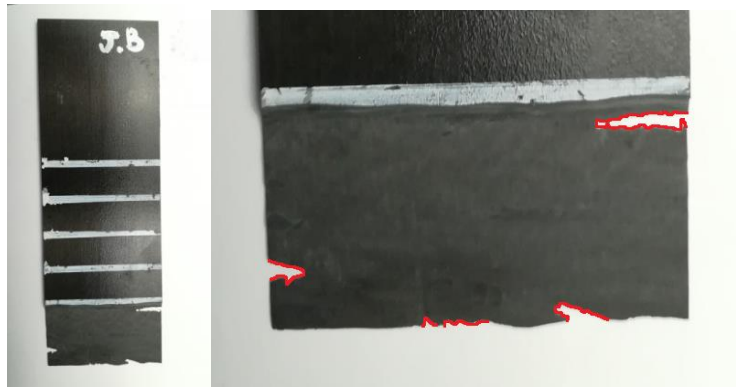


Figura 3-14. Resanado hasta la última lámina.

Debido a esto, se opta por realizar un resanado de 5 capas y dejar dos sin resanar en vez de una. Se sujeta la pieza y se empieza con el resanado de 1cm de ancho capa por capa (Figura 3-15). Es un proceso lento que requiere paciencia, concentración y destreza para no eliminar más láminas de la cuenta.

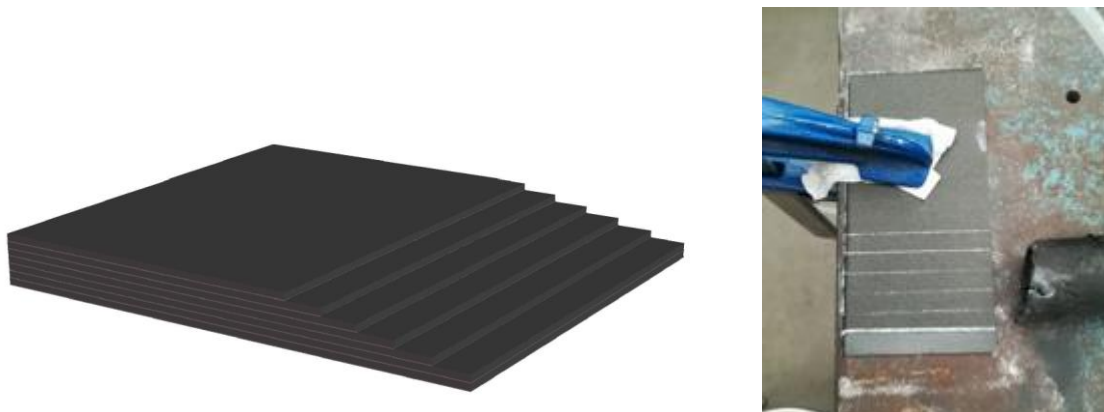


Figura 3-15. Simulación y reparación real del panel dejando 2 láminas sin resanar

Una vez realizado el resanado, se puede observar la deformación de los paneles en la Figura 3-16 de igual forma que en las placas curadas de la Figura 3.10 (Placa 3) anteriormente vistas:



Figura 3-16. Deformación placas E y F

- Panel número 4 (placa D): El panel se divide en dos mitades a lo largo, ya que una parte es para las probetas tipo A y la otra para las D.

Se empieza eliminando material por el centro del panel, el cual mide 3 cm, y posteriormente se va resanando los escalones de 1 cm hacia el exterior. Se puede observar en la Figura 3-17 una gran deformación del panel al eliminar las capas debido a la diferencia de orientación de fibras de cada lámina.



Figura 3-17. Panel de probetas tipo D antes y después del resanado.

4 UNIÓN DEL PARCHE AL PANEL

El parche de reparación intenta reemplazar exactamente el área dañada en el laminado compuesto, restaurándolo lo más posible al original. Por lo tanto, el número de capas y orientaciones de cada capa debe coincidir con la estructura original.

En este punto del proyecto se pretende explicar la colocación de un parche (de pre-preg) para completar la zona resanada y unos extra-plyes en ambas caras para compensar la pérdida de resistencia y rigidez causada por la reparación.

Antes de todo, se debe lijar la superficie de los paneles para tener mayor adherencia placa-adhesivo y posteriormente se limpia con alcohol. Después, se coloca un adhesivo tipo FM-300K en las zonas ya curadas para que se adhiera el parche. Se van apilando las láminas de prepreg con sumo cuidado y compactando con una espátula (además, también se puede usar una bolsa de vacío reutilizable). En el caso de colocar una lámina del parche con otra orientación supondrá que el panel se deforme al curarlo.

La colocación del parche se hace de abajo a arriba, es decir, primero el extra-ply inferior y luego los demás ascendiendo hasta completar el laminado.

4.1. Unión del parche al panel G

El adhesivo (zona verde) fija el parche de prepreg a las zonas del panel ya curadas. Los dos paneles separados se colocan de forma opuesta a una distancia de 3 cm y se comienza a apilar el parche, el cual está formado por 7 láminas, para completar la zona a reparar, y dos extra-plyes.

En la Figura 4-1 se observa el apilamiento del parche en el panel G.

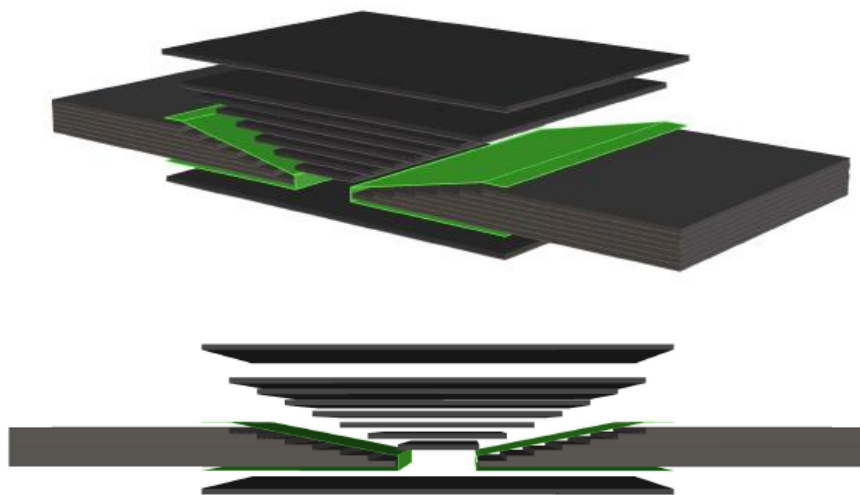


Figura 4-1. Recreación virtual de la unión del parche al panel G

En la colocación se observa una considerable deformación (Figura 4-2) debido a que las tensiones no están compensadas porque la zona del parche no está curada. Una vez realizado el curado, se espera que la placa quede totalmente plana.



Figura 4-2. Panel G con parche sin curar

En la Tabla 4-1 se exponen las dimensiones y orientaciones del parche:

	Largo (mm)	Ancho (mm)	Ángulo (°)
1) Extra-ply	180	150	90
2) Ply	30	“	90
3) Ply	50	“	-45
4) Ply	70	“	45
5) Ply	90	“	0
6) Ply	110	“	45
7) Ply	130	“	-45
8) Ply	150	“	90
9) Extra-ply	180	“	90

Tabla 4-1. Dimensión y orientación del parche del panel G

4.2. Unión del parche al panel C

Se coloca un parche superpuesto con orientación a 0° en ambas caras de la placa que contiene el defecto de la lámina de teflón en el medio. En las Figuras 4-3 y 4-4 se observa el apilamiento del parche en el panel C.

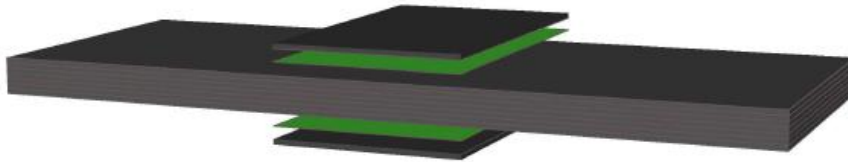


Figura 4-3. Recreación virtual de la unión del parche al panel C.

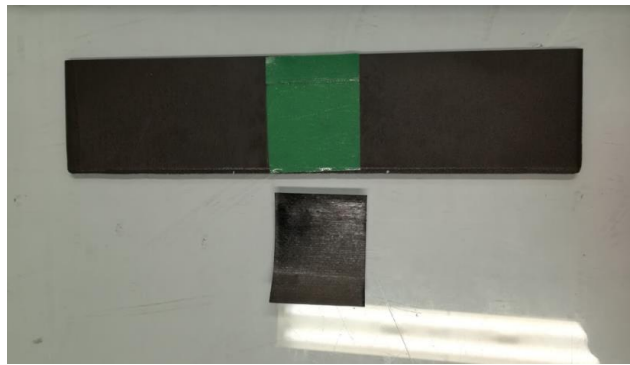


Figura 4-4. Unión del parche al panel C.

En la Tabla 4-2 se exponen las dimensiones y orientaciones del parche:

	Largo (mm)	Ancho (mm)	Ángulo (°)
1) Ply	75	75	0
2) Ply	75	75	0

Tabla 4-2. Dimensión y orientación del parche del panel C

4.3. Unión del parche al panel D

El parche del panel D consta de 5 láminas, ya que el resanado es de 5 capas, y dos extra-ply. En las siguientes Figuras 4-5 y 4-6 se observa el apilamiento del parche en el panel.

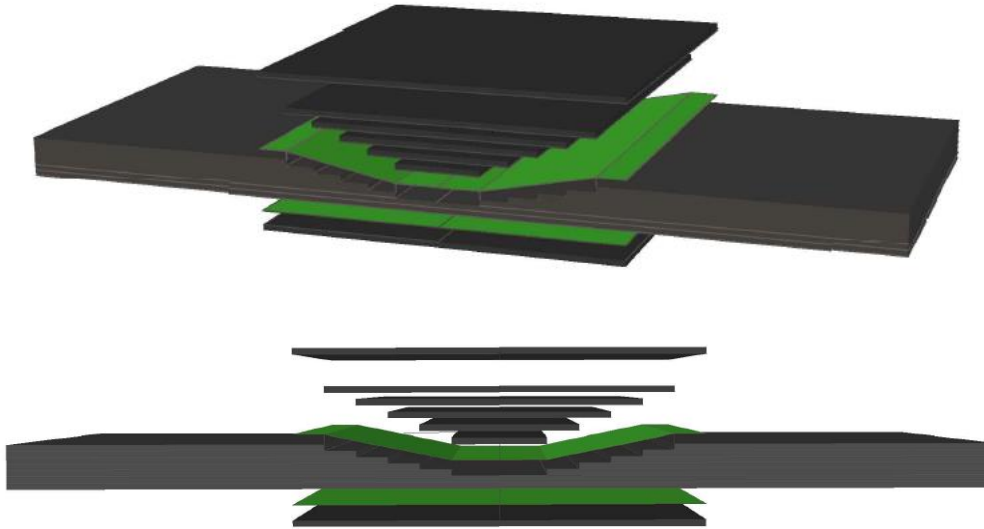


Figura 4-5. Recreación virtual de la unión del parche al panel D.



Figura 4-6. Unión del parche al panel D.

En la Tabla 4-3 se exponen las dimensiones y orientaciones del parche:

	Largo (mm)	Ancho (mm)	Ángulo (°)
1) Extra-ply	130	75	90
2) Ply	30	“	45
3) Ply	50	“	0
4) Ply	70	“	45
5) Ply	90	“	-45
6) Ply	110	“	90
7) Extra-ply	130	“	90

Tabla 4-3. Dimensión y orientación del parche del panel D

4.4. Unión del parche al panel E y F

Se colocan las dos placas de forma opuesta con una separación de 3 cm y se une el parche que consta de 7 láminas y dos extra-plys. Se puede observar en la siguiente Figura 4-7 que dos láminas del parche tienen la misma dimensión debido a no resanar la última capa y en la Figura 4-8 el apilamiento real.

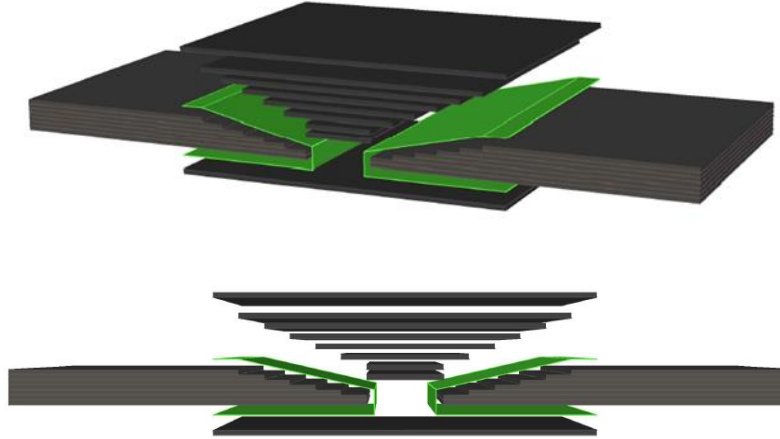


Figura 4-7. Recreación virtual de la unión del parche al panel E y F.

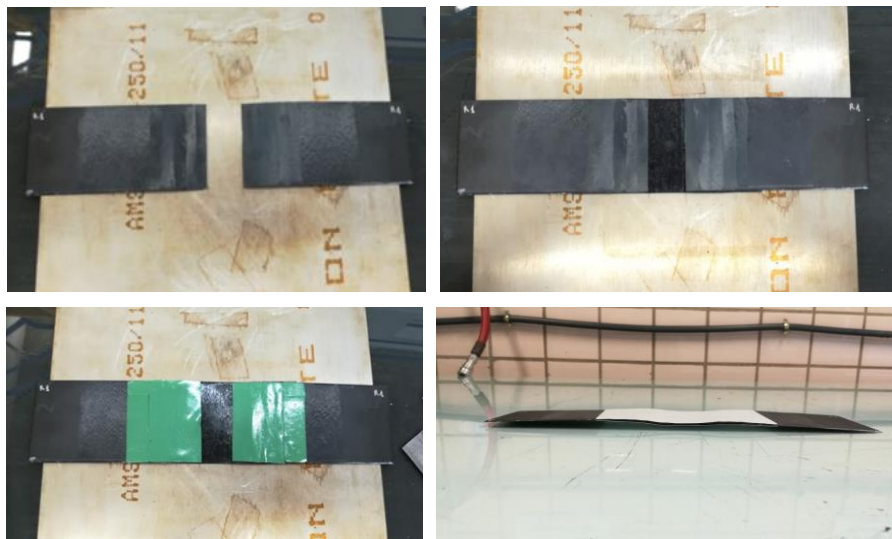


Figura 4-8. Unión del parche al panel F

En la Tabla 4-4 se exponen las dimensiones y orientaciones del parche:

	Largo (mm)	Ancho (mm)	Ángulo (°)
1) Extra-ply	150	75	90
2) Ply	30	“	90
3) Ply	30	“	-45
4) Ply	50	“	45
5) Ply	70	“	0
6) Ply	90	“	45
7) Ply	110	“	-45
8) Ply	130	“	90
9) Extra-ply	150	“	90

Tabla 4-4. Dimensión y orientación del parche del panel E y F.

5 CURADO DE PARCHES EN EL EQUIPO HOTBONDER

En este capítulo se expone el curado de parches en un equipo especializado para controlar fuentes de calor localizadas para una amplia variedad de aplicaciones de fabricación y reparación que requieren el curado de preregs, resinas o adhesivos.

El equipo Hotbonder AHB-380DV3 [2][5] (Figura 5-1) es un instrumento de curado con control de temperatura y presión que, frente a la autoclave, tiene la ventaja de ser más económico, ligero y portátil. Esta última ventaja hace posible la reparación en el lugar donde se encuentre la pieza dañada sin necesidad de trasladarla a una autoclave, que en algunos casos es imposible debido a su tamaño. En definitiva, el método de procesamiento está determinado por la calidad, el costo y el tipo de componente que se fabrica.

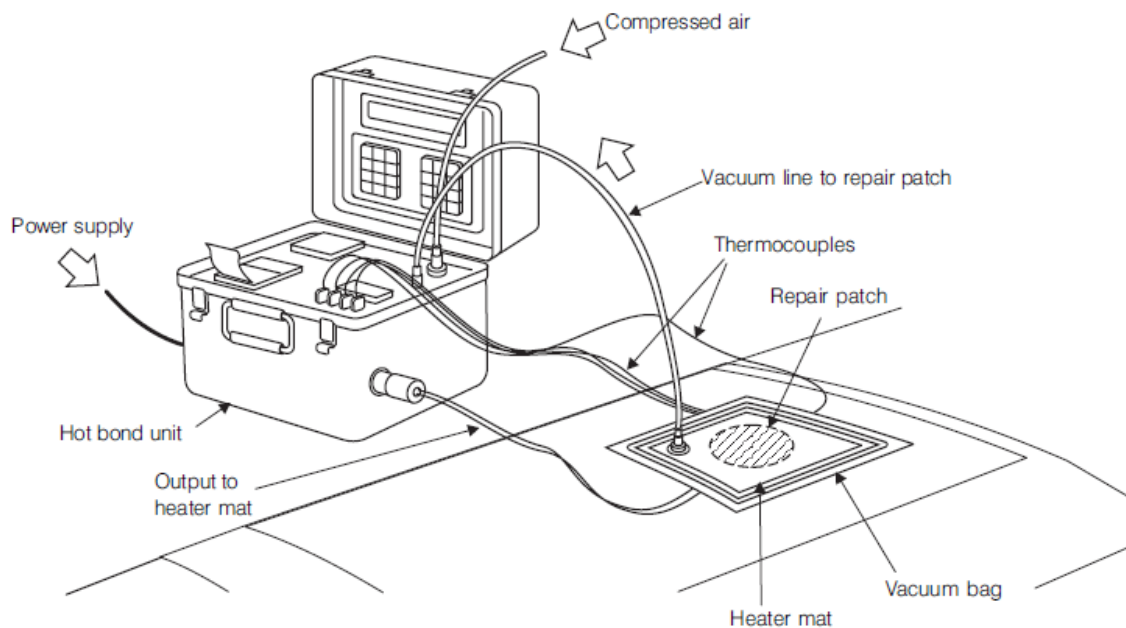


Figura 5-1. Hotbonder [3]

En nuestro caso solamente se utilizará el control de temperatura, ya que el de presión se realiza mediante un compresor externo disponible en el LERM a 0.6 bares.

Consta de dos módulos, A y B, para realizar dos curados simultáneamente. Se utilizará solo un módulo en este proyecto.

En primer lugar, se realizará una bolsa de vacío para curar el parche en el equipo Hotbonder. Se compone de:

- Bolsa de vacío
- Airweave
- Placa de aluminio
- Teflón
- Panel de material compuesto
- Cinta de alta temperatura
- Cromato
- Termopares
- Manta térmica
- Válvulas

En la Figura 5-2 se puede observar dos elementos del equipo:

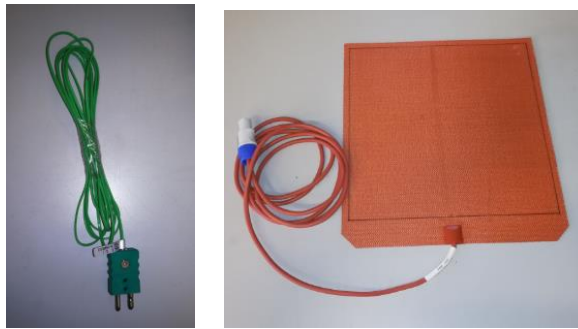


Figura 5-2. Termopar y Manta Térmica

- Un termopar es un dispositivo que utiliza un circuito de dos cables de metales o aleaciones diferentes, cuyas uniones están a diferentes temperaturas. Una fuerza electromotriz neta, o corriente, ocurre como resultado de esta diferencia de temperatura y puede ser leída por varios instrumentos (galvanómetro o potenciómetro) o por unidades de control como sistemas de reparación portátiles. En definitiva, es el sensor del equipo. [2]
- La manta térmica es la fuente de temperatura del equipo y debe ser considerablemente más grande que el área de reparación.

Con la ayuda de cinta de alta temperatura, se fija la punta de los cables de los termopares: Uno entre las láminas del parche del panel a curar y otro debajo de la placa de aluminio. Esto nos ayudará a medir la temperatura real del panel y la de la placa de aluminio. En el caso de que estas 2 temperaturas sean similares, se puede considerar que ha sido un curado válido, ya que el parche se habrá curado igual por las dos caras (una en contacto con la manta térmica y la otra con la placa de aluminio). En la Figura 5-3 se observa el montaje de la bolsa de vacío.

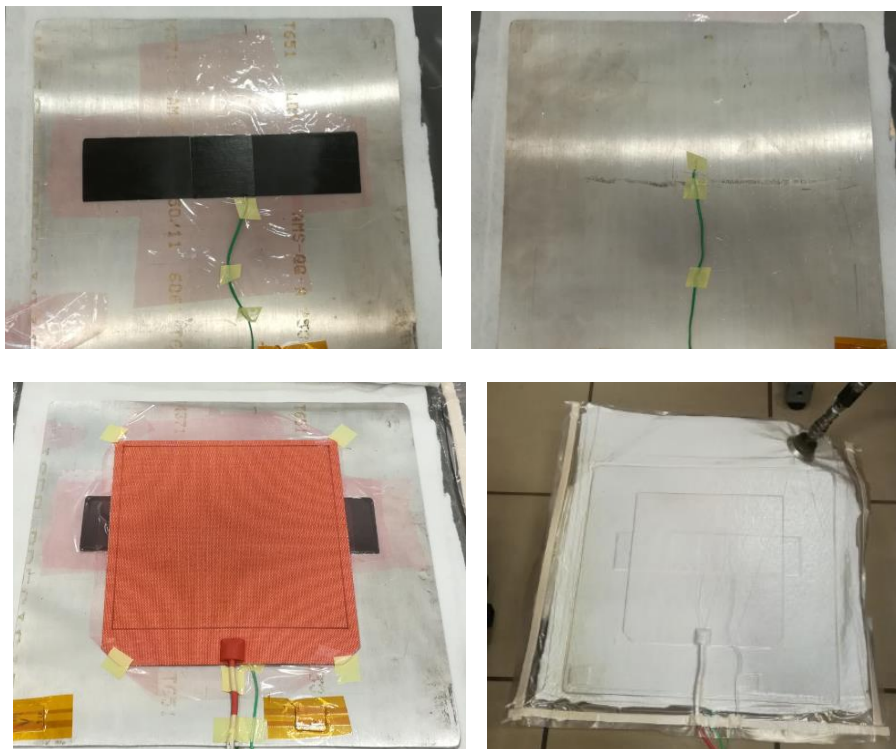


Figura 5-3. Panel sin curar. Termopar por detrás de la placa de aluminio. Colocación de la manta térmica. Bolsa de vacío acabada.

La bolsa de vacío es diferente a la de curado de paneles en autoclave, por lo que se representa el montaje mediante un corte transversal en la Figura 5-4.

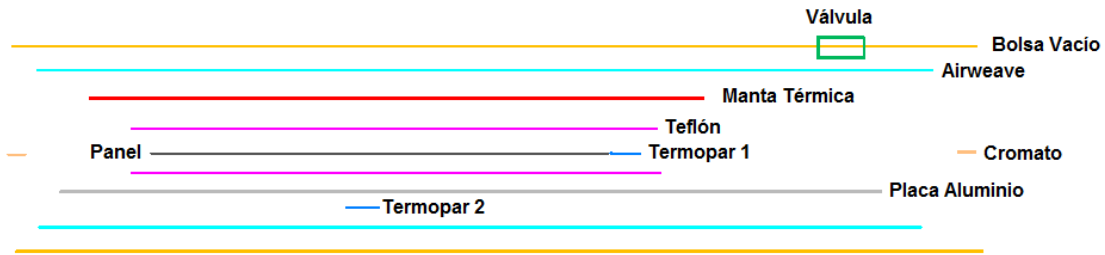


Figura 5-4. Corte transversal del montaje de la bolsa de vacío para Hotbonder

Para proceder a la conexión del equipo Hotbonder nos basaremos en el manual de usuario “Hotbonder AHB-380Dv3 iss 3.3.” de la empresa AEROFORM FRANCE [5]:

- 1) Para encender el equipo, primero se debe conectar el cable de conexión (16-32 Amp, 100-240v, 50-60 Hz).
- 2) Se sube el interruptor principal.
- 3) Se sube el interruptor del módulo A.
- 4) Se colocan dos termopares en la zona A.
- 5) Se fabrica la bolsa de vacío con la manta térmica y posteriormente se conecta a la Hotbonder.

En la siguiente Figura 5-5 se muestra el panel de control del equipo Hotbonder.



Figura 5-5. Panel de control de Hotbonder

En la pantalla del instrumento se selecciona “Menú” y “Login”. Nos indicará que introduzcamos un Usuario y una Contraseña. En nuestro caso sería User: 2, Password: 2, correspondiente al Nivel Técnico, el cual nos permite realizar un curado, crear un perfil térmico de curado, crear un informe y consultar el historial.

Se crea un perfil de temperaturas: Seleccionamos “Cure” y “Perfiles de Configuración”.

Hay que destacar varias zonas del perfil:

- Gradiente: es el gradiente de temperatura de subida o de bajada en °C/min. En el caso de querer una rampa de bajada se debe introducir un 0 en los campos “Level” y “Dwell”.
- Level: indica la temperatura que desea alcanzar el gradiente anterior en °C.

- Dwell: muestra el tiempo que va a permanecer (tiempo de estabilización) la temperatura indicada en Level en minutos.

La zona de “Alarms” nos indica las alarmas que podemos establecer para interrumpir el ciclo de curado en caso de error. Son 3 las alarmas disponibles:

- Intensity of heat: alarma que se activa si la manta no está siendo atravesada por tanta energía como debería.
- Over Temperature: alarma que se activa si algún termopar excede el nivel de sobret temperatura definido.
- Minimum Vacuum: alarma que se activa si el valor mínimo de vacío no está por encima del límite definido.

Si se quiere desconectar cualquiera de estas alarmas, se escribe un 0 en esta zona.

La zona “Deviation” nos indica las desviaciones aceptables del perfil térmico. Hay dos límites: Upper limit, superior, y Lower limit, inferior. En el caso de que la diferencia de temperatura entre el termopar y el ciclo de curado exceda el valor impuesto en el límite superior el ciclo se interrumpirá. Pasaría lo mismo en el caso de que el termopar no supere la temperatura impuesta en el límite inferior.

En la Figura 5-6 se observa el perfil de temperatura creado para el curado de los paneles.

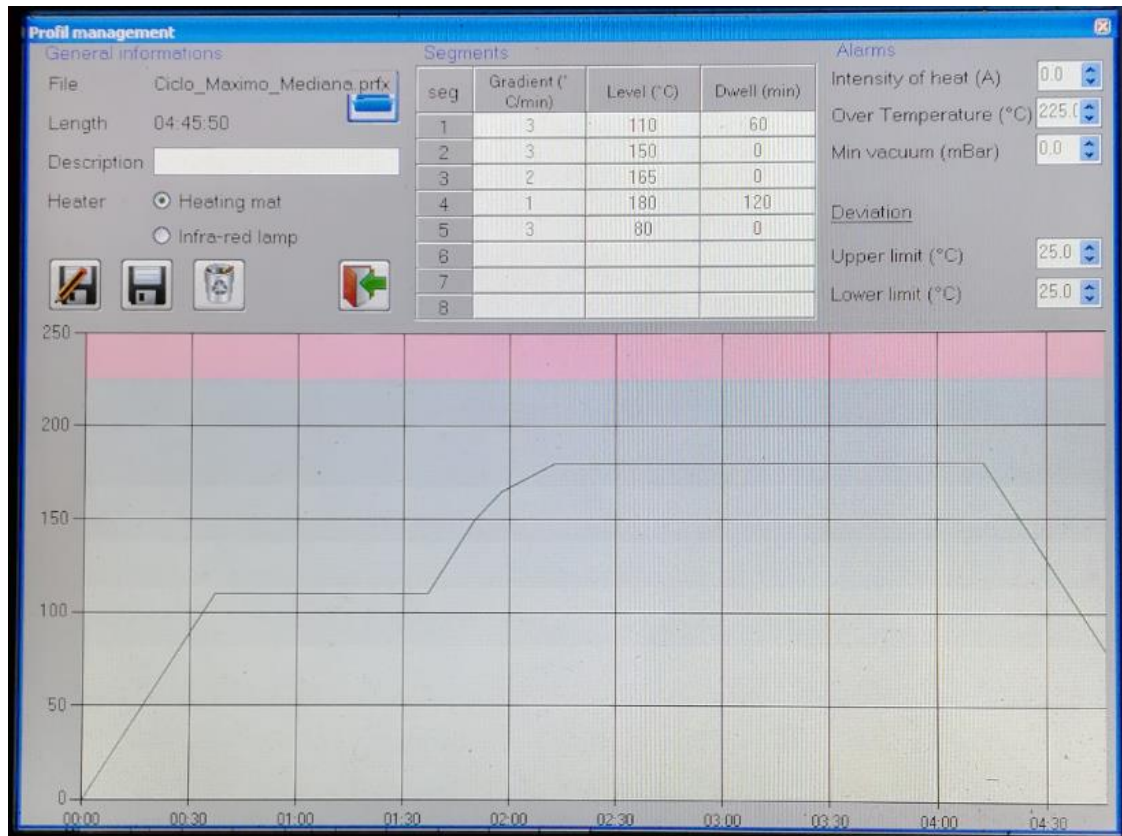


Figura 5-6. Perfil de temperaturas.

Seleccionamos “New Cure”. Añadimos la zona A, nombramos nuestro curado, en “Control Mode” seleccionamos “Hottest” y el ciclo que vayamos a usar. Posteriormente se pulsa PLAY y comienza el ciclo de curado.

Uno de los puntos clave de este proyecto es determinar si parche se adhiere correctamente al panel y si hace recuperar la planitud que tendría el laminado inicial.

5.1 Curado 1: Probetas Tipo G.

El ciclo de curado tiene impuesto una subida de 3°C/min hasta llegar a los 110°C durante 1 hora para estabilizar el adhesivo y el parche. El fabricante nos recomienda curar el prepreg hasta los 180°C durante 2 horas para alcanzar sus propiedades óptimas, por lo que para llegar hasta esta temperatura se utilizan unas rampas de gradiente 3, 2 y 1 °C/min para superar el “lower limit” y no producir error. Esto depende del tamaño de la manta y de la superficie donde se realiza el curado. El ciclo dura en torno a 4 horas y 45 minutos.

En la Figura 5-7 se muestra el ciclo de curado del parche de las probetas tipo G.

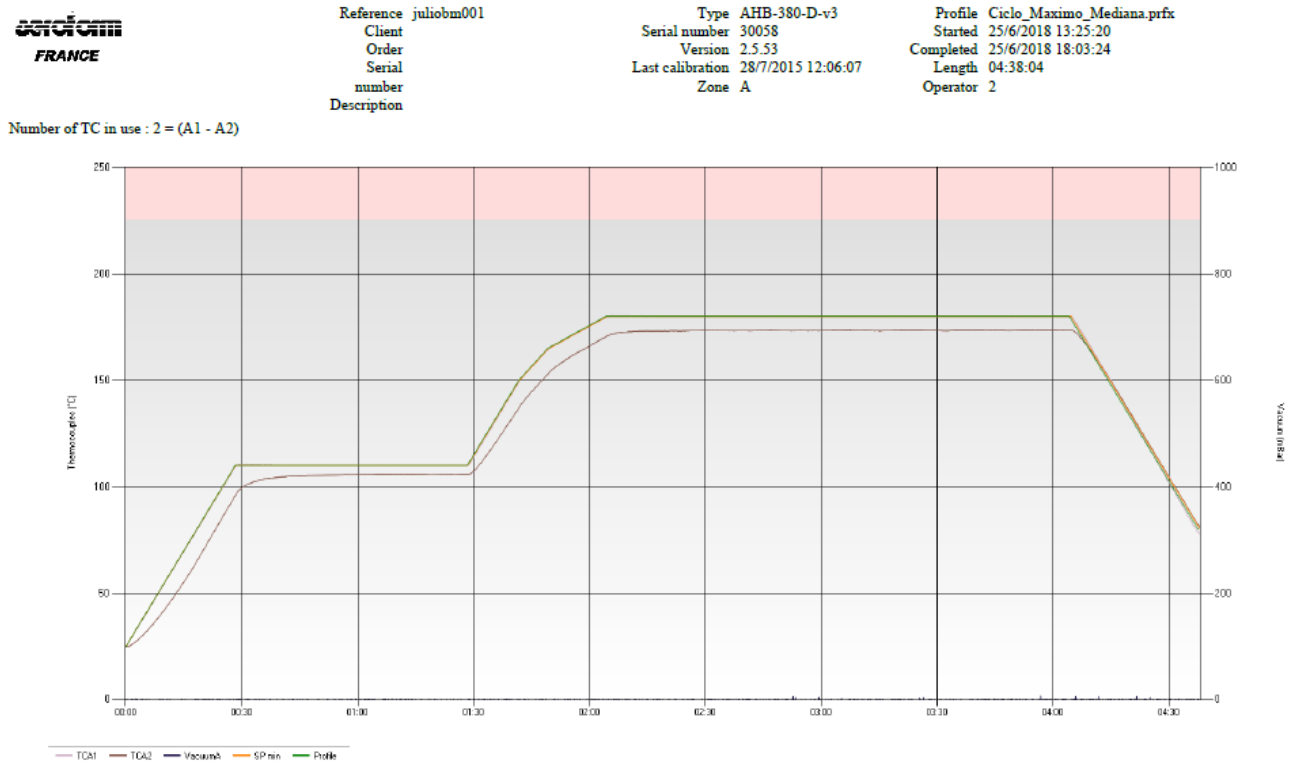


Figura 5-7. Ciclo de curado del parche de probetas tipo G

Se observa un curado con éxito, ya que el perfil del termopar 1 coincide con el perfil de temperatura del ciclo y el termopar 2 se acerca lo suficiente a este. Además, el panel (Figura 5-8) es totalmente plano y adquiere la simetría que, al principio, con las dos partes separadas no tenía.

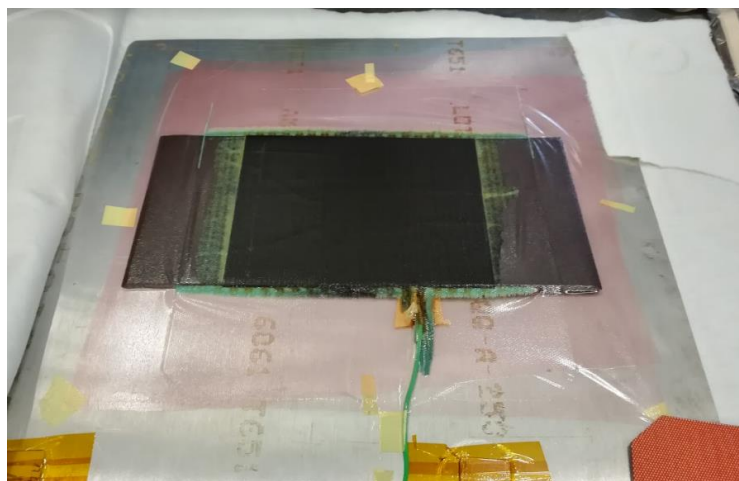


Figura 5-8. Resultado del curado del parche de probetas tipo G.

5.2 Curado 2: Probetas Tipo C.

En la realización del curado del parche de la placa C hubo un error y el ciclo se detuvo debido a la gran diferencia de temperatura entre el termopar 2, colocado en la placa de aluminio, con respecto al perfil de temperaturas, el cual superó los 25°C (lower limit). En la Figura 5-9 se muestra el ciclo errado de curado del parche de las probetas tipo C.

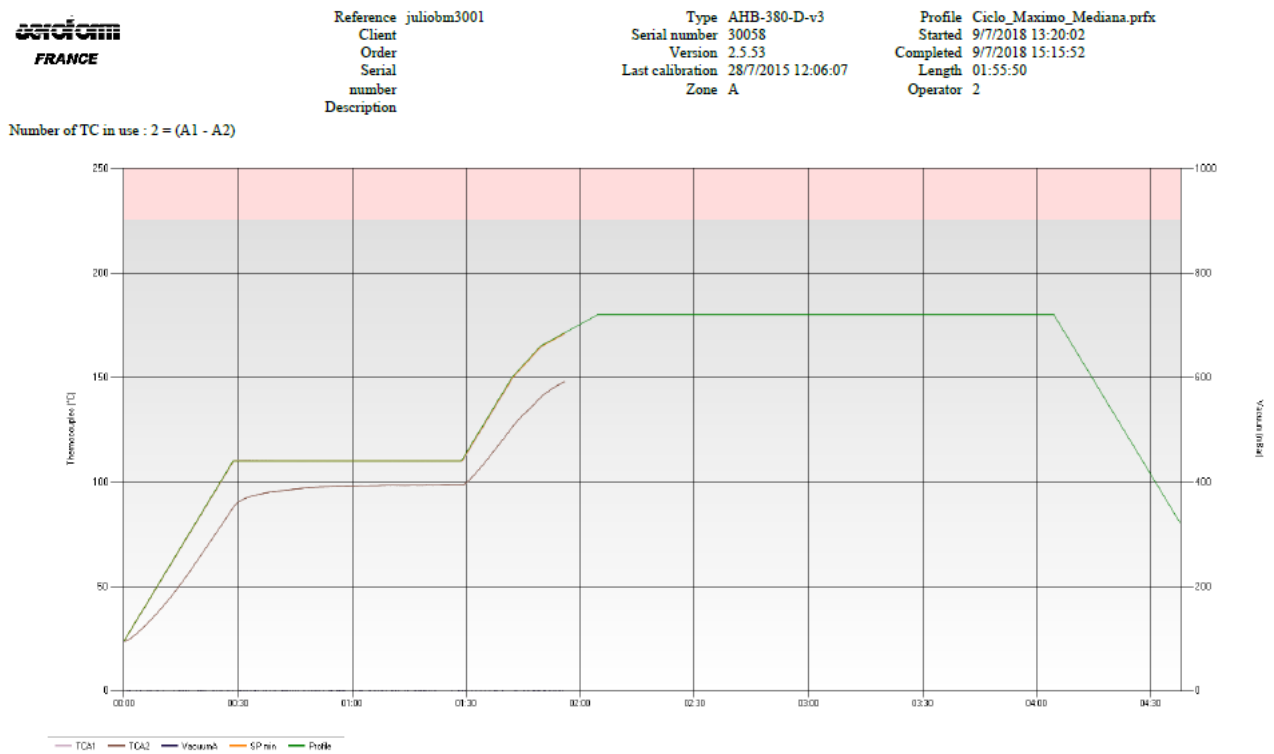


Figura 5-9. Ciclo errado de curado del parche de probetas tipo C

Una manera de comprobar el mal curado es por medio de inspección visual y auditiva. Se puede observar en la siguiente Figura 5-10 que el color del adhesivo no es el adecuado y, además, al aplicarle un poco de flexión con las manos se podía escuchar algún “crujido” de resina.

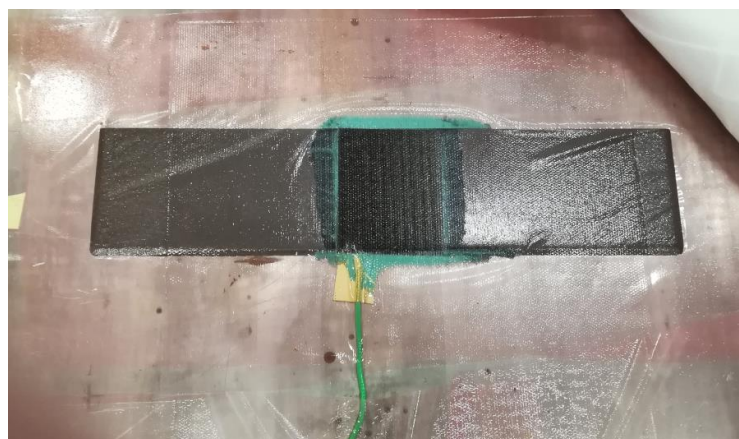


Figura 5-10. Resultado errado del curado del parche de probetas tipo C.

Debido a esto se decidió eliminarlo mediante resanado neumático y volver a pegar un nuevo parche. Se observa un embotamiento de la lija debido a que la resina no está bien curada y por lo tanto se adhiere (Figura 5-11).

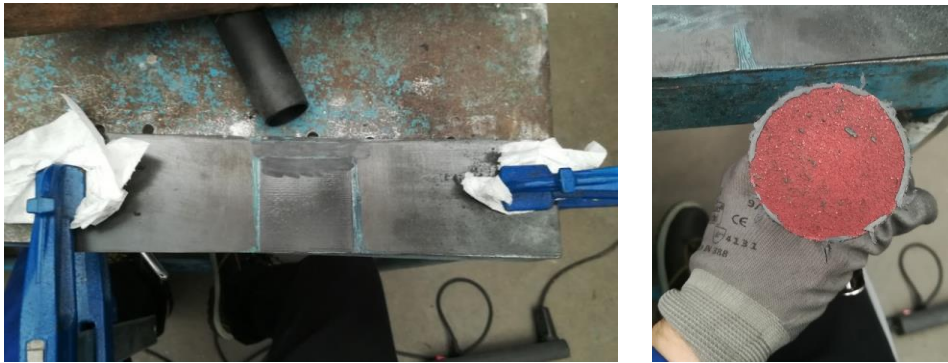


Figura 5-11. Resanado del parche mal curado y embotamiento de lija

Se procede a colocar de nuevo el parche y a realizar su curado. Se puede observar en las siguientes Figuras 5-12 y 5-13 que esta vez ha sido un curado con éxito.

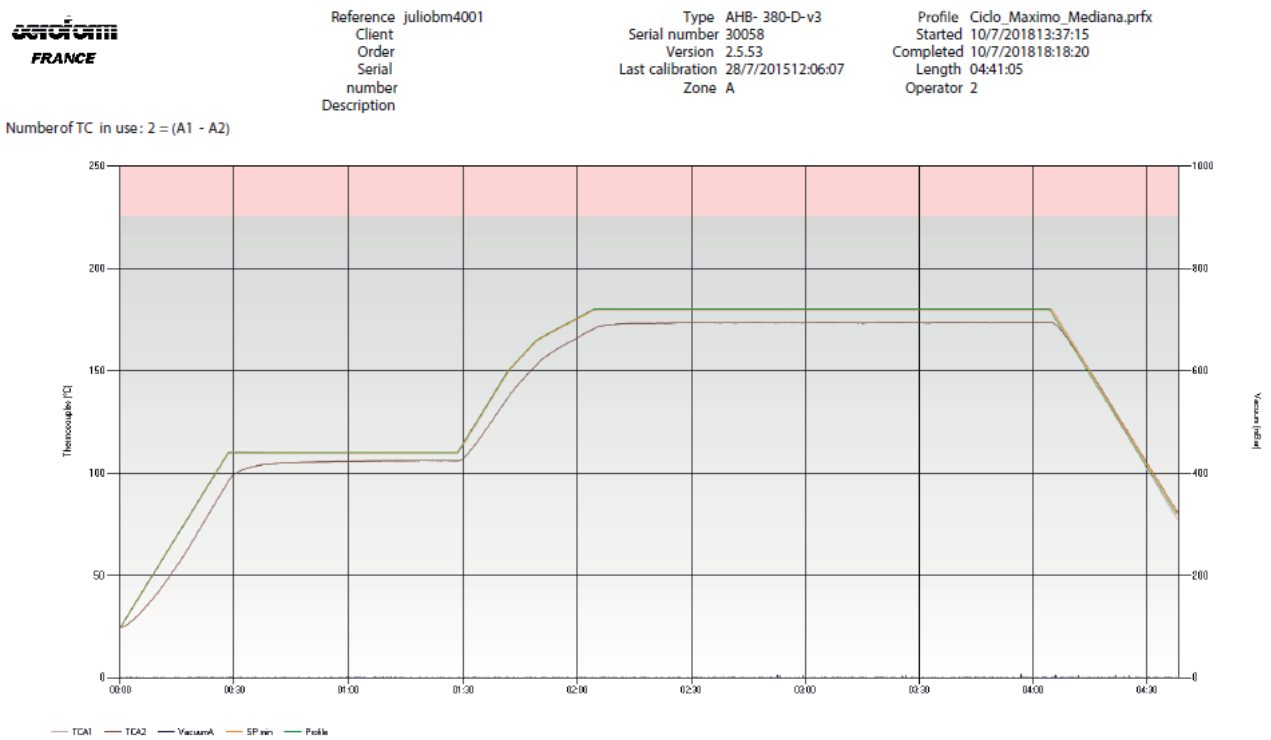


Figura 5-12. Ciclo de curado del parche de probetas tipo C

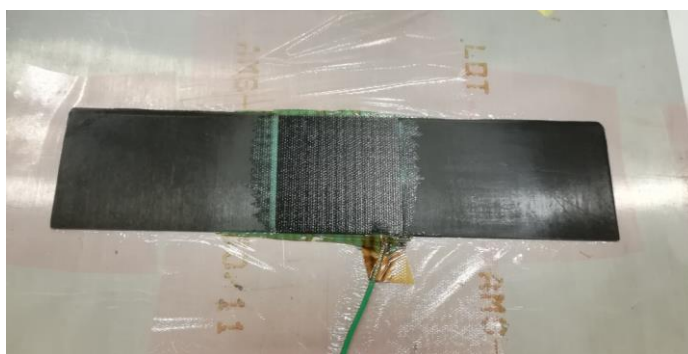


Figura 5-13. Resultado del curado del parche de probetas tipo C.

5.3 Curado 3: Probetas tipo F.

En la siguiente figura podemos observar que el equipo Hotbonder dio error en torno a los 160°. Esto pudo suceder debido a un mal ajuste del termopar o un fallo del instrumento. En la Figura 5-14 se muestra el ciclo de curado del parche de las probetas tipo F.

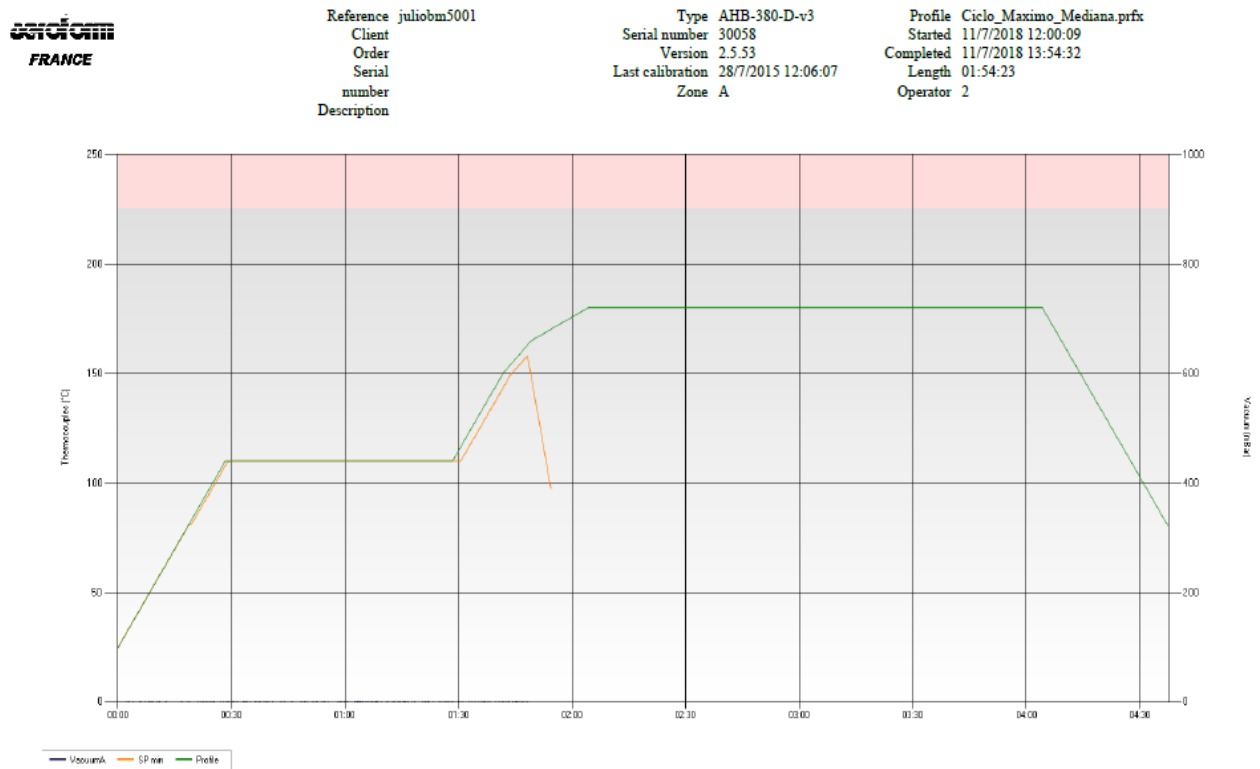


Figura 5-14. Ciclo de curado del parche de probetas tipo F

Se observa en la Figura 5-15 que el color del adhesivo no es el adecuado y además el panel no es plano totalmente. En este caso se deja así para ensayarla con un mal curado y determinar su resistencia, debido a que eliminar el parche como en el caso anterior es muy complicado.

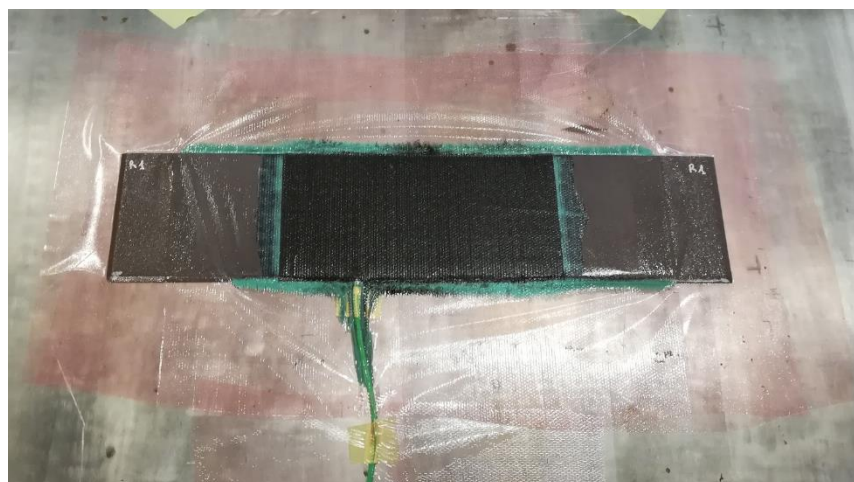


Figura 5-15. Resultado del curado del parche de probetas tipo F.

5.4 Curado 4: Probetas tipo E.

En la siguiente figura se puede observar que se ha realizado un buen curado, tanto por el ciclo (Figura 5-16) como por el resultado del panel (Figura 5-17).

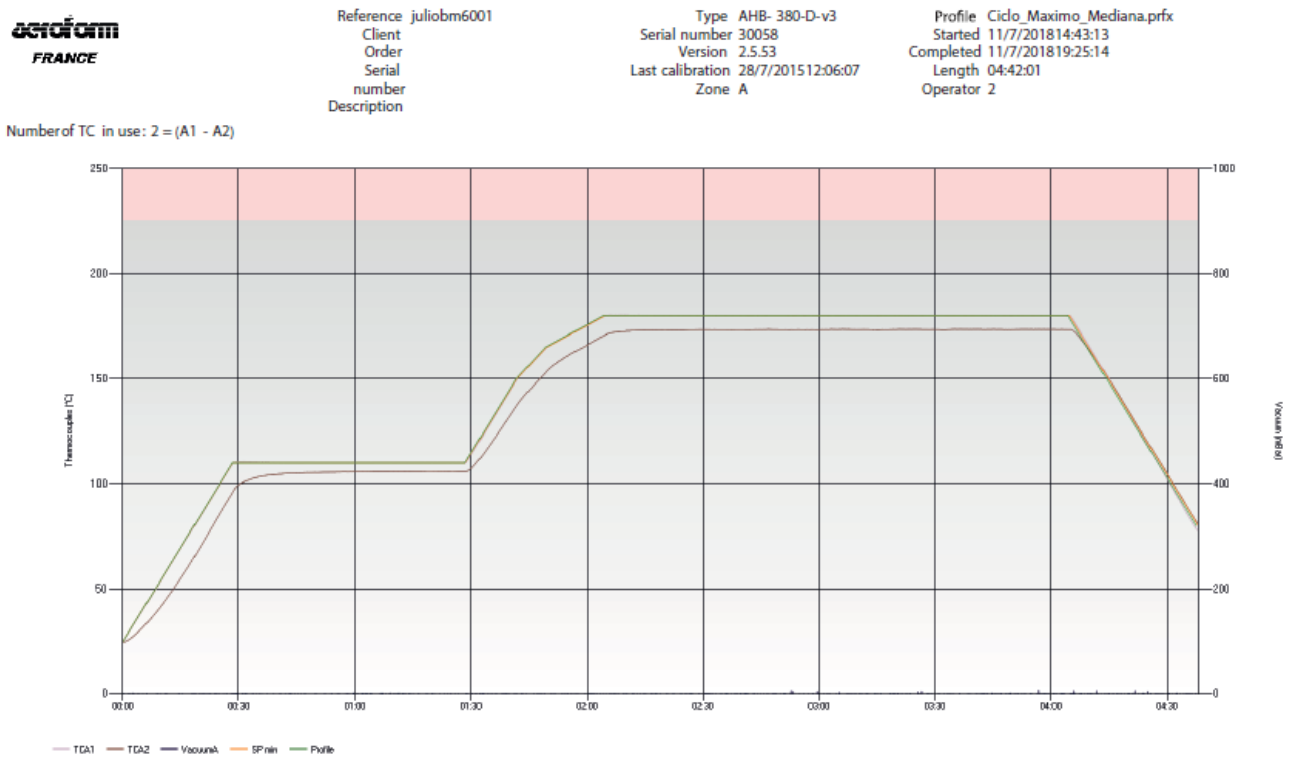


Figura 5-16. Ciclo de curado del parche de probetas tipo E

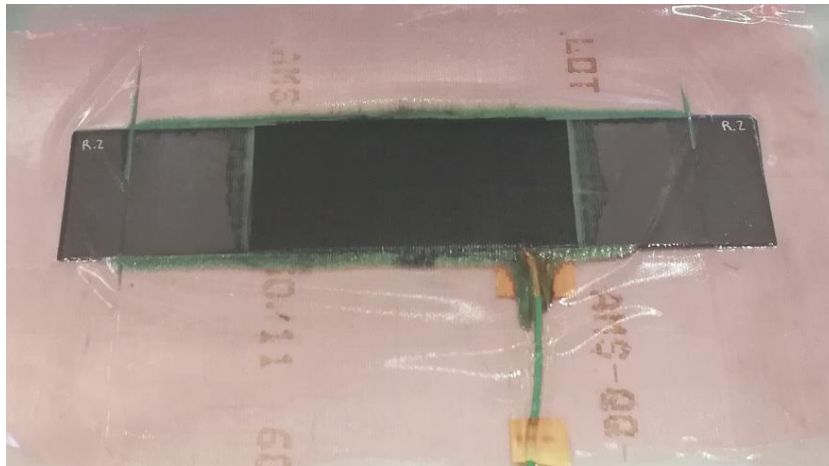


Figura 5-17. Resultado del curado del parche de probetas tipo E.

5.5 Curado 5: Probetas tipo D.

En este caso el termopar 2 se colocó en la parte superior de la placa de aluminio, cerca del panel y en contacto con la manta térmica. Se observa en la Figura 5-18 que de 0 a 150°C este termopar mide mayor temperatura y se acerca aún más al perfil que en los casos anteriores, pero al pasar los 150°C es prácticamente igual.

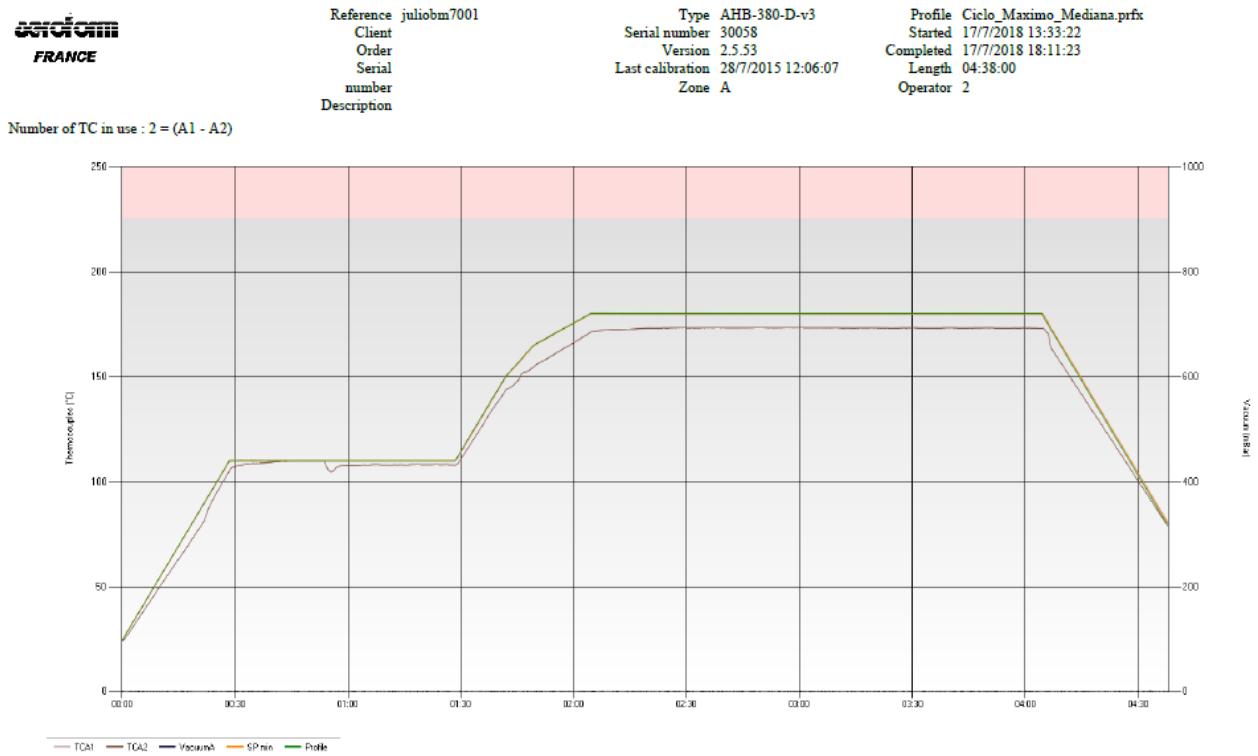


Figura 5-18. Ciclo de curado del parche de probetas tipo D

En la Figura 5-19 se muestra el termopar 2 en la zona superior de la placa de aluminio y el resultado correcto del panel debido a su planitud y color del adhesivo.

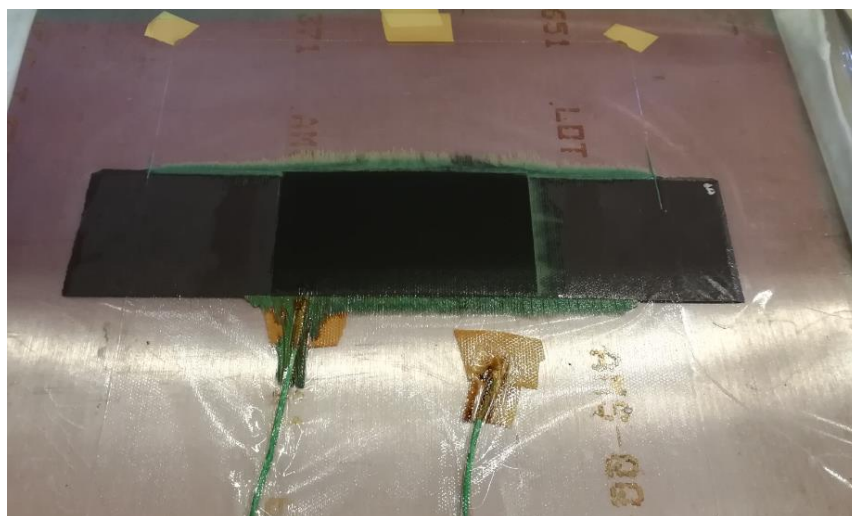


Figura 5-19. Resultado del curado del parche de probetas tipo D.

6 ACABADO DE LAS PROBETAS

En este capítulo se explica el acabado final de las probetas para poder ensayarlas y se divide en tres secciones: la unión de los tacones a los paneles, el corte de probetas y la posterior comprobación de medidas.

6.1 Pegado y curado de tacones

Para la realización del ensayo de tracción es necesario adherir a los extremos de las probetas unos tacones de fibra de vidrio para sostenerlas en las mordazas. En el caso de no ponerlos, la probeta podría romper por la zona de agarre y dar unos resultados no representativos.

Estos tacones se fabrican con una plancha formada por 5 capas de fibra de vidrio que se lija, por medio de un “trompo”, para que se adhiera con mayor eficacia al panel de material compuesto. Esta herramienta no es más que una taladradora con un cabezal de carburo de silicio el cual va abrasando el material y creando nuevos filos mientras se va desgastando. En la Figura 6-1 se observa la plancha y el trompo utilizados.



Figura 6-1. Plancha para tacones y trompo.

El lijado óptimo se obtiene cuando se observa que han desaparecido las rugosidades y el color que obtiene es mate. La fibra de vidrio es muy perjudicial para la salud si se respira, por lo que se debe atender a una protección con mascarilla y aspiradora.

Se cortan los tacos con un tamaño de 50 mm de largo (y ancho según el panel) y se pegan a la placa por medio de un adhesivo tipo Z-15429, dejando un margen de 1 cm para que cuando se cure no fluya hacia el panel. Posteriormente, se le colocan unas pinzas para ejercer presión y que se adhiera correctamente (Figura 6-2). Antes de colocar los tacones también se ha lijado el panel con el trompo.

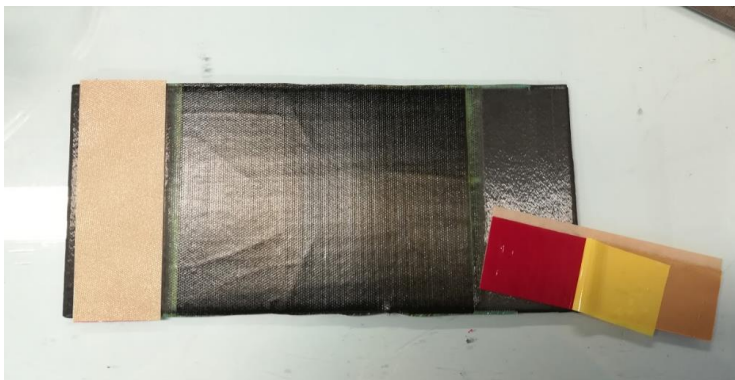


Figura 6-2. Pegado de tacones

Para curar los tacones se hace una bolsa de vacío de la misma forma que en el curado en autoclave, pero en lugar de una placa de aluminio se coloca airweave. En la siguiente Figura 6-3 se puede observar la bolsa de vacío acabada de las probetas G y la preparación de la bolsa de las demás probetas.



Figura 6-3. Bolsa de vacío del panel de probetas tipo G. Bolsa de vacío de los paneles de probetas tipo A, B, C, D, E y F.

Al igual que el ciclo de curado de los paneles, el adhesivo se cura en la autoclave.

El ciclo dura 3 horas – 55 minutos y se destacan tres etapas fundamentales:

- Temperatura del aire: Se produce una subida en rampa de 1°C/min hasta los 125°C y se mantiene durante 1 hora – 15 min a esta temperatura. Posteriormente, descende la temperatura hasta la ambiente a un nivel de 1.5 °C/min.
- Presión: Se produce una subida en rampa desde los 0 bares hasta 1.2 bares en 10 minutos, se mantiene durante 3 horas – 30 min y descende en rampa hasta los 0 bares en 15 minutos.
- Vacío en la bolsa: Se mantiene constante a 0.9 bares durante todo el ciclo y al final se despresuriza en 15 min.

En la Figura 6-4 se observa el ciclo de curado del adhesivo de los tacones en autoclave descrito anteriormente.

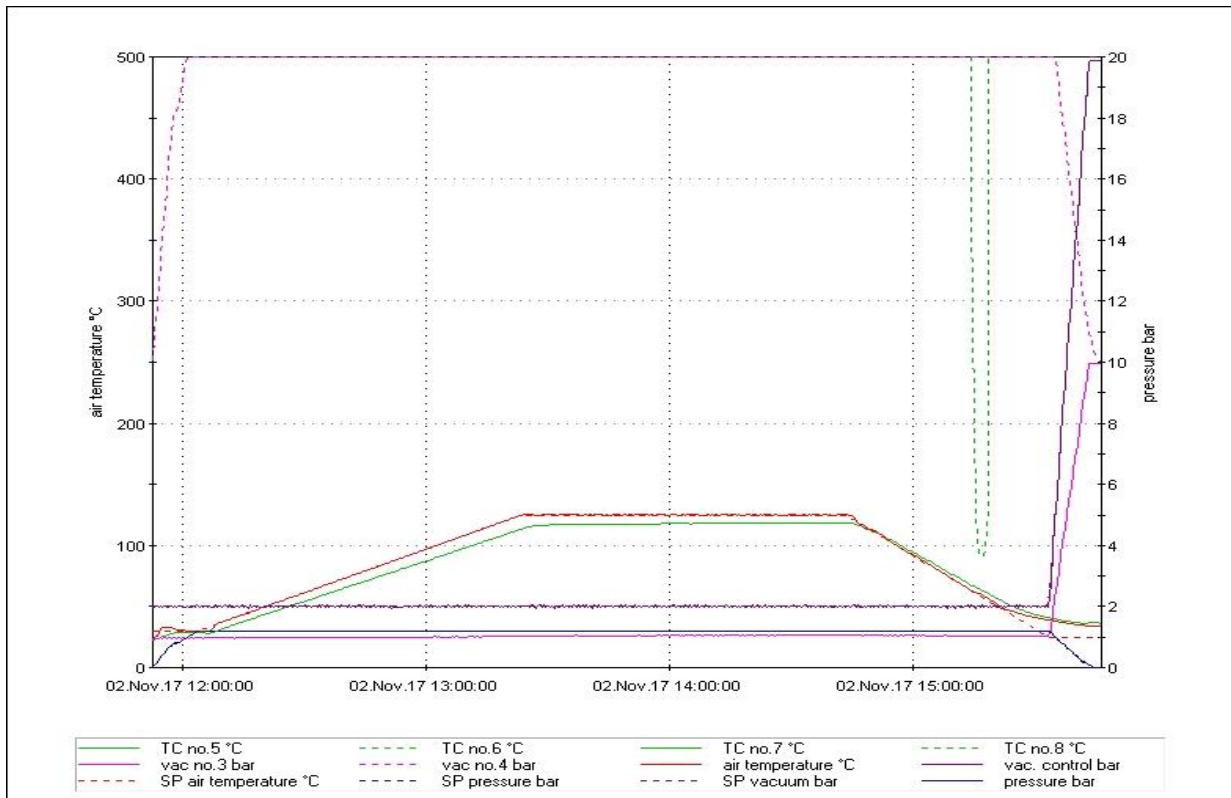


Figura 6-4. Ciclo de curado del adhesivo de los tacones

6.2 Corte de probetas

El corte de los paneles se realiza en el taller del GERM (Figura 6-5). Como se mencionó anteriormente, se ha determinado que todas las probetas medirán 310x20 mm².

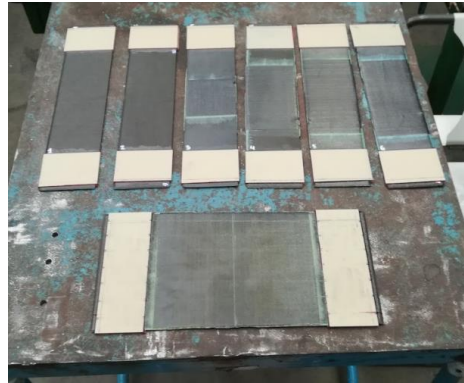


Figura 6-5. Paneles preparados para el corte.

Para realizar el corte de probetas debemos seguir los siguientes pasos:

- En primer lugar, se tiene que equipar con las protecciones y EPIs correspondientes: mascarilla, gafas, guantes, bata, botas de seguridad y extracción localizada de partículas.
- Se lijan los bordes de los paneles (resina sobrante que fluye al curar los paneles) con una lija de grano fino para tener mayor precisión al apoyarla en la máquina de corte.
- Se abre la llave del agua para refrigerar la herramienta de corte. El disco está compuesto por partículas de diamante que hace que sea abrasivo, por lo que en realidad estamos abrasando el material, no cortando.
- Con el calibre calculamos la medida.
- Se realiza el resanado con avance lento (Figura 6-6).



Figura 6-6. Corte de paneles.

En la Figura 6-7 se puede observar el corte de los paneles. Desde el panel A hasta el F se obtienen 3 probetas y del G se obtienen 6.

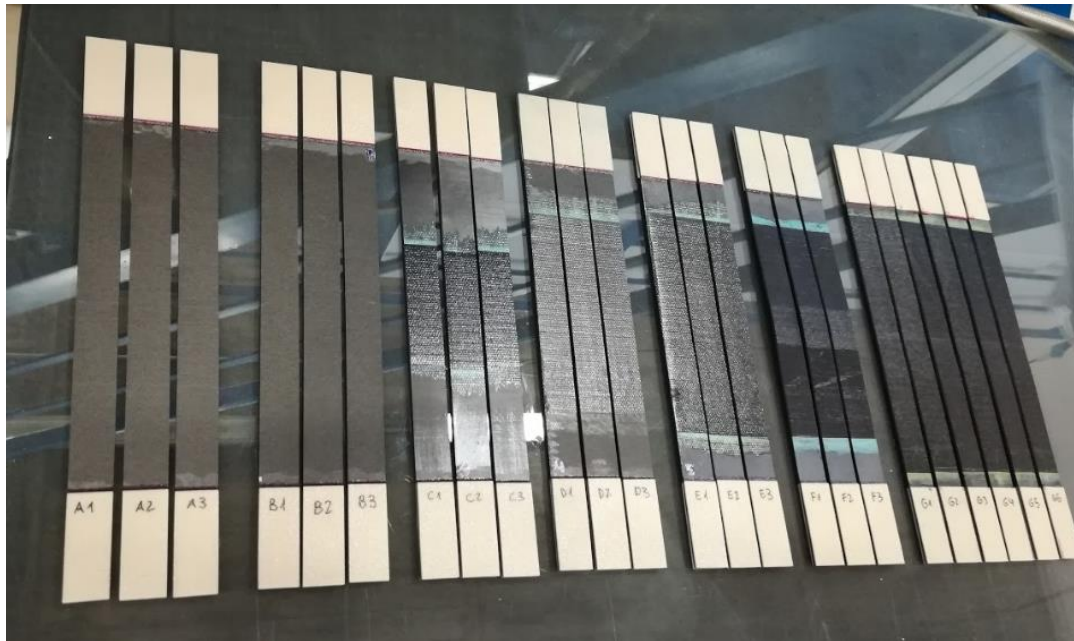


Figura 6-7. Probetas

Un dato importante a destacar es el corte mediante un buen ajuste calibre-máquina-placa para evitar desvíos. El problema principal viene de que la placa debe tener los lados perfectamente rectos, cosa muy difícil ya que queda resina que ha fluido en el curado, y además que la colocación sea perfectamente 90° . En el caso en el que se desvíe por ejemplo 1° , supone que el calibre mida 2 cm pero la parte del disco va a medir otra distancia distinta, en este caso 1.73 cm. En la Figura 6-8 se muestra el ejemplo.

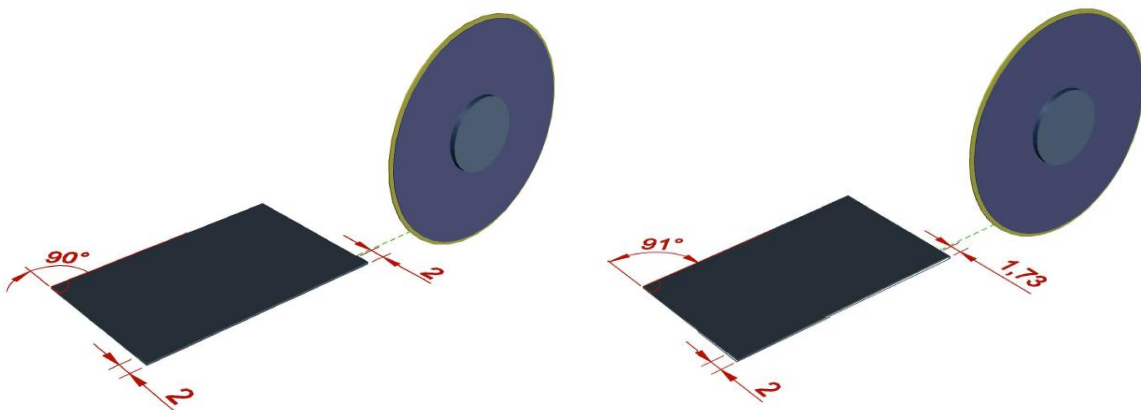


Figura 6-8. Buen ajuste y mal ajuste.

Por esto debemos garantizar la buena colocación de las placas en la máquina y una buena preparación de bordes con una lija de grano fino antes de cortarlas. Además, lo que se recomienda es realizar antes algunos ensayos con piezas que no sirvan para simular lo que queremos hacer y calibrar la máquina. Hay que dar un margen de algunos milímetros, ya que hay que tener en cuenta que el disco tiene un grosor de, más o menos, 2 mm de ancho. En este caso, en vez de medir con el calibre 2 cm de ancho de la probeta, mediríamos 2.2 cm.

6.3 Comprobación de medidas

Antes de realizar el ensayo de tracción es muy importante tener caracterizada correctamente la sección de cada probeta, ya que se tiene que calcular la tensión.

Para las probetas A y B, que no tienen parches, se sigue la norma UNE-EN 2597:1999 [8]:

- Se mide la anchura en el centro de la probeta y en dos puntos opuestos situados a 50 mm del centro y se realiza la media aritmética de tres medidas.
- En segundo lugar, se mide el espesor cerca del centro de la probeta y en dos puntos opuestos situados sobre el eje de la probeta y a 50 mm del centro y se realiza la media aritmética de tres medidas.

Las probetas C, D, E, F y G tienen refuerzo, por lo que tendremos dos espesores diferentes, uno sin y otro con parche. Al no haber una norma específica para este caso, se realizarán las medidas de la siguiente forma:

- La anchura se calcula de la misma forma que el caso anterior.
- El espesor se calcula mediante dos medidas en los dos extremos opuestos sin parche y su media aritmética, y tres medidas en el parche y su media aritmética.

En la Tabla 6-1 se puede observar las dimensiones reales de las probetas teniendo en cuenta el factor humano.

	Nº	Anchura	Espesor	Espesor extremos	Espesor parche
A	1	20.12	1.37		
	2	20.5	1.37		
	3	20.41	1.37		
B	1	20.66	1.37		
	2	20.5	1.37		
	3	20.1	1.37		
C	1	20.49		1.4	1.883
	2	20.56		1.34	1.85
	3	20.49		1.37	1.86
D	1	20.49		1.39	1.88
	2	20.58		1.33	1.88
	3	20.57		1.36	1.963
E	1	20.18		1.235	1.803
	2	20.55		1.21	1.84
	3	19.51		1.23	1.86
F	1	20.15		1.215	1.74
	2	20.13		1.215	1.883
	3	19.7		1.2	1.796
G	1	20.1		1.36	1.916
	2	20.15		1.435	1.936
	3	19.86		1.45	1.936
	4	19.87		1.41	1.99
	5	19.94		1.435	1.976
	6	20.21		1.35	1.95

Tabla 6-1. Dimensiones de cada probeta

Todas las medidas se comprueban mediante un calibre o pie de rey (Figura 6-9).



Figura 6-9. Comprobación de medidas con calibre.

En este capítulo se presentan gráficos, tablas y figuras de cada tipo de probeta ensayada a tracción hasta la rotura para evaluar sus propiedades. Además, se realiza un examen macroscópico con “lupa” para observar defectos en el laminado tras ser ensayado.

7.1 Ensayo de tracción

Se trata de un ensayo destructivo en el que se pretende determinar la curva “Carga - Desplazamiento de cruceta” y “Tensión - Deformación” de cada probeta. Los ensayos se realizan en la máquina INSTRON 4483 de 15000 kg del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM). Esta máquina está compuesta por dos mordazas que agarran la probeta, de las cuales sólo se desplaza la superior mediante dos tornillos sinfín. Gracias a esta herramienta, junto al software instalado en el ordenador llamado “Test Control Instron Series 44V17-6”, se puede determinar el desplazamiento de las crucetas y la carga última y, además, usando un extensómetro podemos determinar la deformación de cada probeta. En la Figura 7-1 se muestra el equipo de ensayo utilizado en el LERM.



Figura 7-1. Equipo de ensayo

Se deben tener en cuenta varios parámetros:

- La alineación de la probeta debe ser suficiente para evitar la introducción de cargas de flexión y las mordazas deben recubrir los talones completamente. [9]
- Se coloca un extensómetro resistivo Clip-On de 50 mm de longitud y 25 mm de apertura máxima en el centro de la probeta. Con este instrumento se mide el alargamiento para posteriormente calcular la deformación de la probeta.
- La carga se aplica a una velocidad constante de separación de mordazas de 1 mm/min.

En la Figura 7-2 se observa la colocación de la probeta en las mordazas y el extensómetro usado:

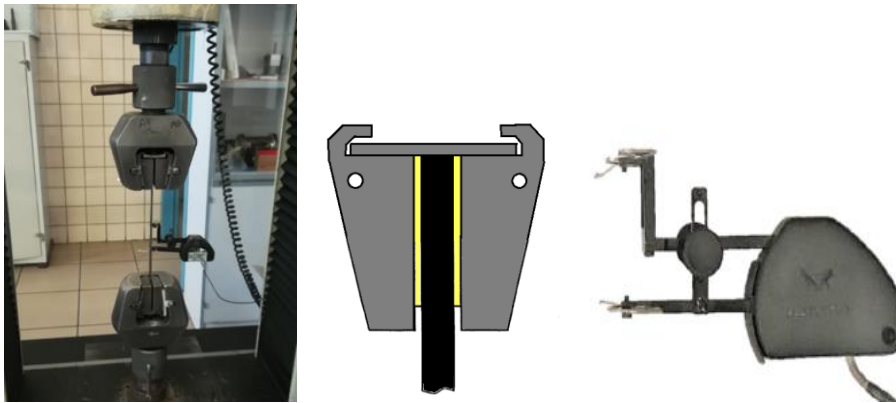


Figura 7-2. Colocación de probeta en mordazas y extensómetro

El software Test Control Instron tiene un funcionamiento muy simple y muy intuitivo. Consta de 3 zonas fundamentales para su uso (Figuras 7-3 y 7-4):

- En la zona 1 seleccionamos dos curvas: la primera será la *Carga (N)* frente al *Desplazamiento de la cruceta (mm)* y la segunda la *Carga (N)* frente a la *apertura del extensómetro (mm)*.
- En la zona 2 el dato relevante para este ensayo es el ajuste de velocidad. Se puede variar conforme se está haciendo el ensayo, pero en nuestro caso será 1mm/min constante.
- En la zona 3 se realiza el control de la célula de carga. En cada ensayo se debe calibrar pulsando “Reset” y “Bal”. Se controla de forma sencilla, la flecha hacia arriba significa que la mordaza superior se desplaza hacia arriba y la flecha hacia abajo significa que esta misma mordaza se desplaza hacia abajo. Si en algún momento se quiere parar el desplazamiento sólo hay que pulsa el botón “Parado”.



Figura 7-3. Panel de control



Figura 7-4. Zonas 1, 2 y 3 del software

El software nos devuelve un archivo con los datos y resultados obtenidos del ensayo y, posteriormente, se realizan las gráficas mediante Excel.

Las fórmulas a utilizar serán:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Resistencia a tracción} = \text{Carga Máxima} / \text{Área}), \text{ siendo } A = \text{espesor} * \text{ancho}.$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Deformación} = \text{Apertura extensómetro} / \text{longitud inicial del extensómetro}), \text{ siendo } l_0 = 50\text{mm}.$$

E (Módulo de Elasticidad longitudinal = Resistencia a tracción / Deformación). El cálculo del módulo de Elasticidad se realiza por estimación lineal, siendo la pendiente de la línea de tendencia de σ/ε . Destacar que, en el ensayo, el extensómetro se coloca en la parte central de la probeta y se retira cuando alcance un nivel de alargamiento aceptable para no dañarlo cuando “rompa”.

A continuación, se exponen imágenes, tablas y gráficas de los ensayos de todas las probetas fabricadas y posteriormente en el capítulo 8, “Discusión de los resultados”, se analizan los resultados obtenidos.

7.1.1 Probetas Tipo A

Es un panel virgen (Figura 7-5) para caracterizar las propiedades el material y comparar los resultados con los reparados.

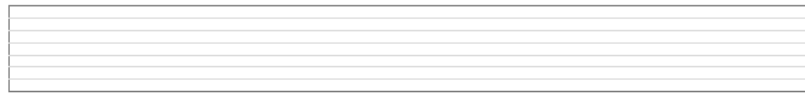


Figura 7-5. Laminado probeta tipo A.

A continuación, en la Figura 7-6 se muestra un gráfico de “Carga - Desplazamiento de cruceta” resultante del ensayo de tracción. Se interpreta de forma que la mordaza superior va ascendiendo a una velocidad de 1 mm/min provocando un aumento de carga hasta que la tensión soportada por la probeta es máxima y se produce la rotura.

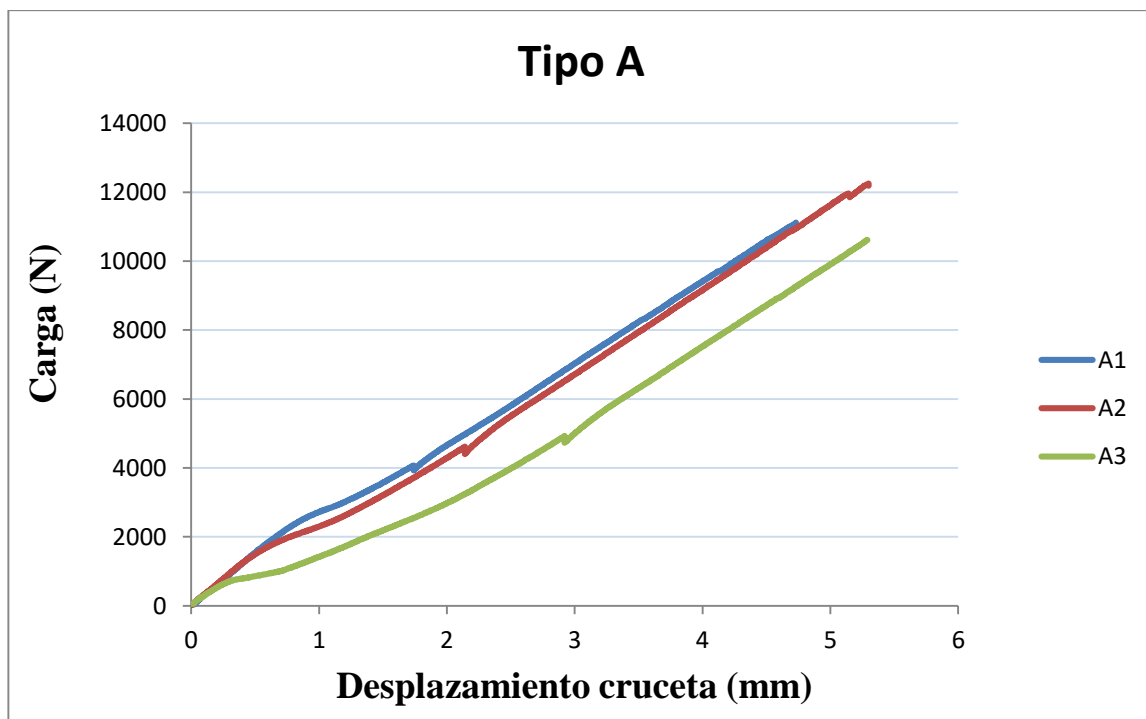


Figura 7-6. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo A

En la Tabla 7-1 se exponen los resultados de carga máxima de las probetas tipo A tras el ensayo.

	Nº	Carga máxima (N)
A	1	11114.73
	2	12184.02
	3	10614.42

Tabla 7-1. Carga máxima probeta tipo A

Las roturas se producen en la zona de los tacones mayormente, pero deberían romper por la zona central como la probeta A1, no obstante, es válido puesto que no difieren mucho los resultados. Esto puede suceder porque tienen un poco menos de anchura la zona de los tacones tras realizar el corte de probetas. En la Figura 7-7 se observan las probetas antes y después del ensayo.

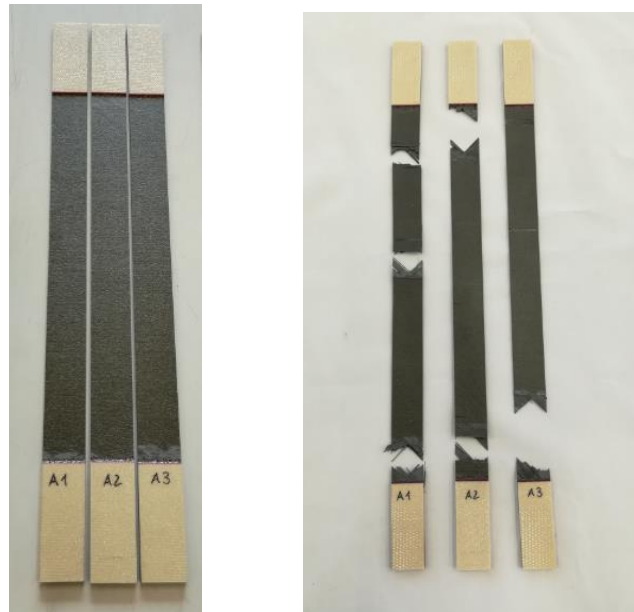


Figura 7-7. Probetas tipo A antes y después del ensayo.

7.1.2 Probetas Tipo B

Son probetas con defecto interno (Figura 7-8) compuesto por una lámina de teflón para inducir el fallo de la probeta con antelación. La placa se compone de 7 capas, por lo que la lámina de teflón se coloca entre la lámina 3 y 4.

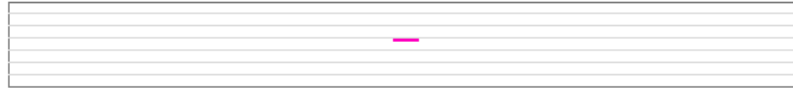


Figura 7-8. Laminado tipo B.

A continuación, en la Figura 7-9 se muestra un gráfico de “Carga - Desplazamiento de cruceta” resultante del ensayo de tracción. Se interpreta de forma que la mordaza superior va ascendiendo a una velocidad de 1 mm/min provocando un aumento de carga hasta que la tensión soportada por la probeta es máxima y se produce la rotura.

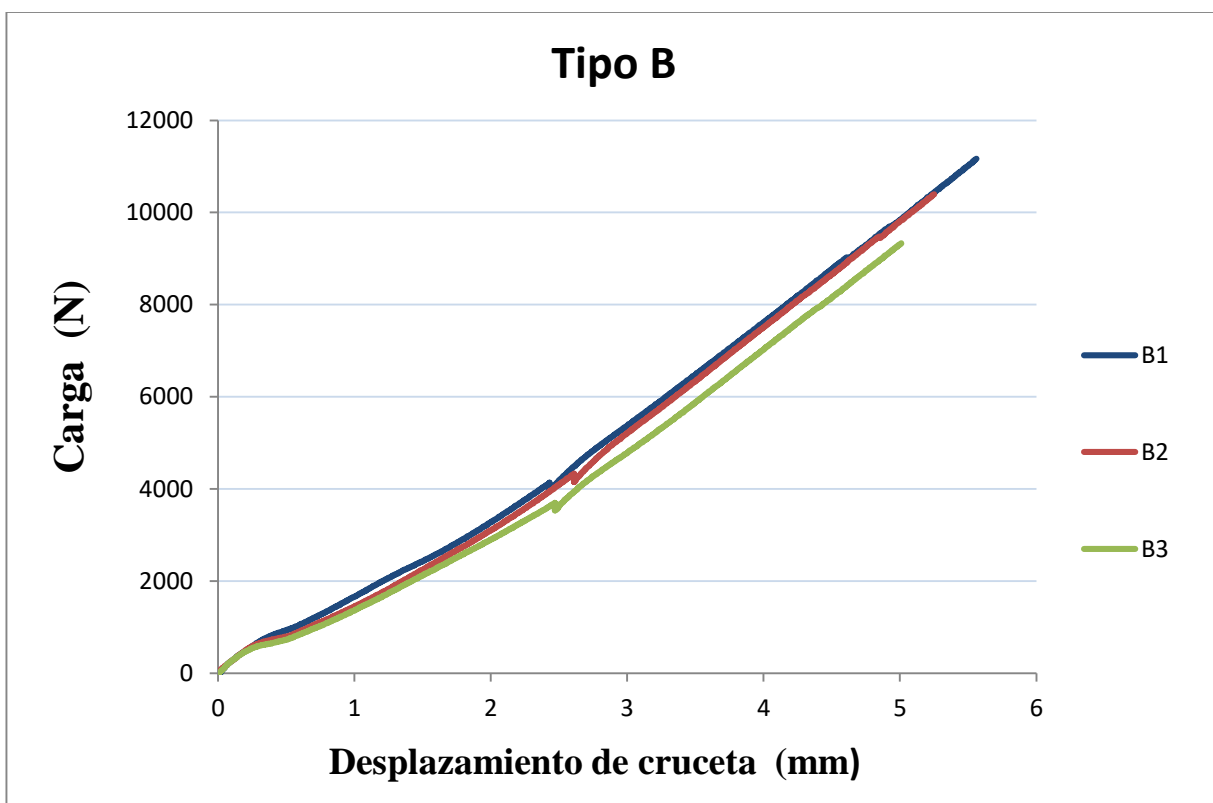


Figura 7-9. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo B

En la Tabla 7-2 se exponen los resultados de carga máxima de las probetas tipo B tras el ensayo.

	Nº	Carga máxima (N)
B	1	11163.78
	2	10398.6
	3	9334.215

Tabla 7-2. Carga máxima probetas tipo B.

Destacar que las probetas B1 y B2 han roto antes por la zona del tacón que por la zona del defecto. Esto puede deberse a que cuando se han lijado para pegar los tacones se ha eliminado mayor cantidad de material por esa zona o que al cortarlas tiene menor ancho y esto influye más que el hecho de que haya un defecto inducido, aunque se puede observar que también quiebran por el centro, pero no del todo. En la probeta B3 se aprecia la rotura en la zona de unión del tacón y también en la zona central del defecto. En la Figura 7-10 se observan las probetas antes y después del ensayo.

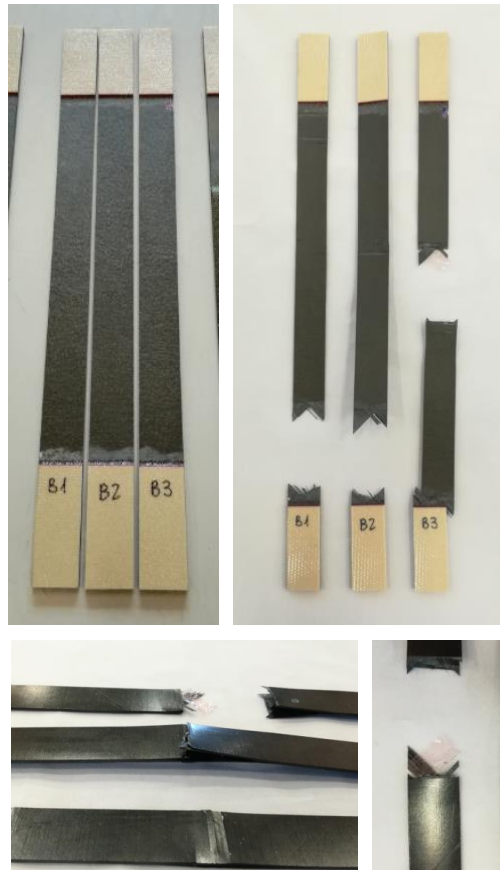


Figura 7-10. Probetas tipo B antes y después del ensayo.

7.1.3 Probetas Tipo C

Probetas tipo B, pero con un parche superficial orientado a 0 grados (Figura 7-11).



Figura 7-11. Laminado probeta tipo C.

A continuación, en la Figura 7-12 se muestra un gráfico de “Carga - Desplazamiento de cruceta” resultante del ensayo de tracción. Se interpreta de forma que la mordaza superior va ascendiendo a una velocidad de 1 mm/min provocando un aumento de carga hasta que la tensión soportada por la probeta es máxima y se produce la rotura.

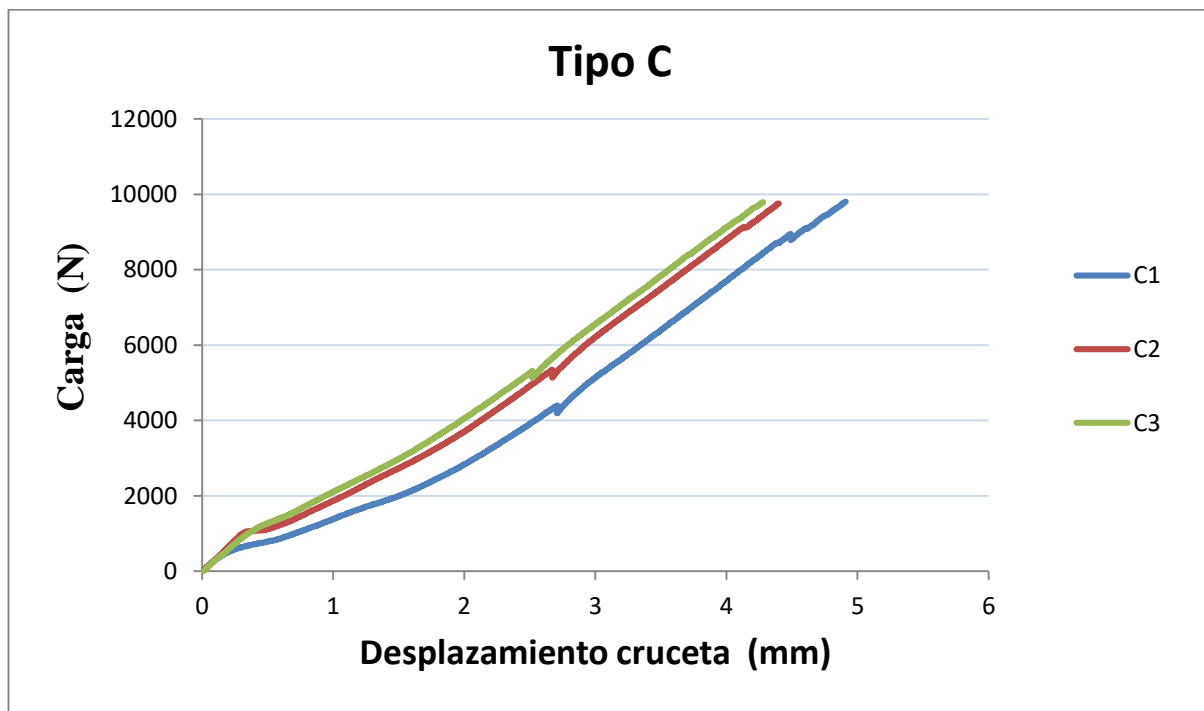


Figura 7-12. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo C

En la Tabla 7-3 se exponen los resultados de carga máxima de las probetas tipo C tras el ensayo.

	Nº	Carga máxima (N)
C	1	9804.11
	2	9760.95
	3	9792.34

Tabla 7-3. Carga máxima probetas tipo C.

Todas las probetas rompen de la misma forma, por la discontinuidad en la zona de unión del parche a 0° y el panel debido a que, al adherir este refuerzo, hemos creado un concentrador de tensiones. En la Figura 7-13 se observa lo descrito anteriormente además de las probetas antes y después del ensayo.

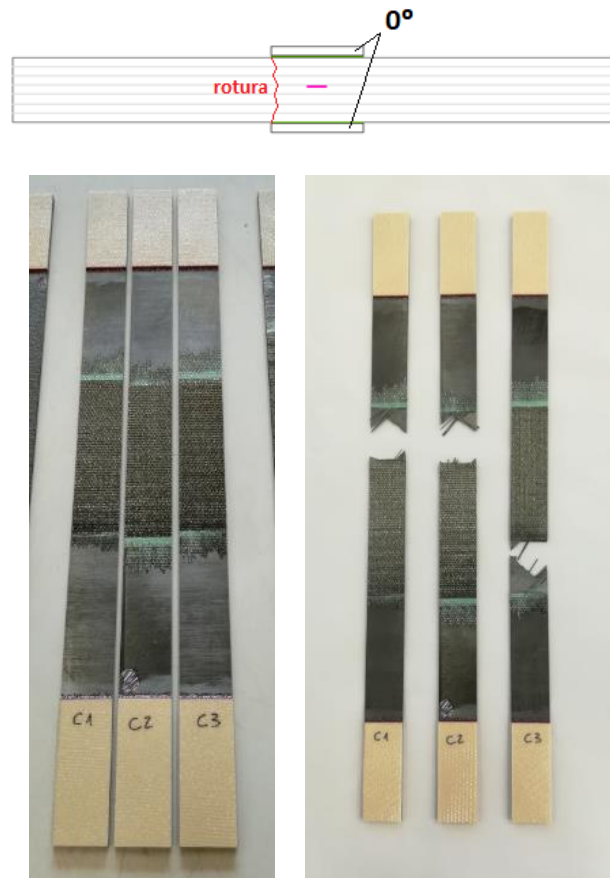


Figura 7-13. Probetas tipo C antes y después del ensayo.

7.1.4 Probetas Tipo D

Panel con un resanado de 5 láminas de forma escalón (step) de 1 cm de anchura cada uno (Figura 7-14).



Figura 7-14. Laminado probeta tipo D.

A continuación, en la Figura 7-15 se muestra un gráfico de “Carga - Desplazamiento de cruceta” resultante del ensayo de tracción. Se interpreta de forma que la mordaza superior va ascendiendo a una velocidad de 1 mm/min provocando un aumento de carga hasta que la tensión soportada por la probeta es máxima y se produce la rotura.

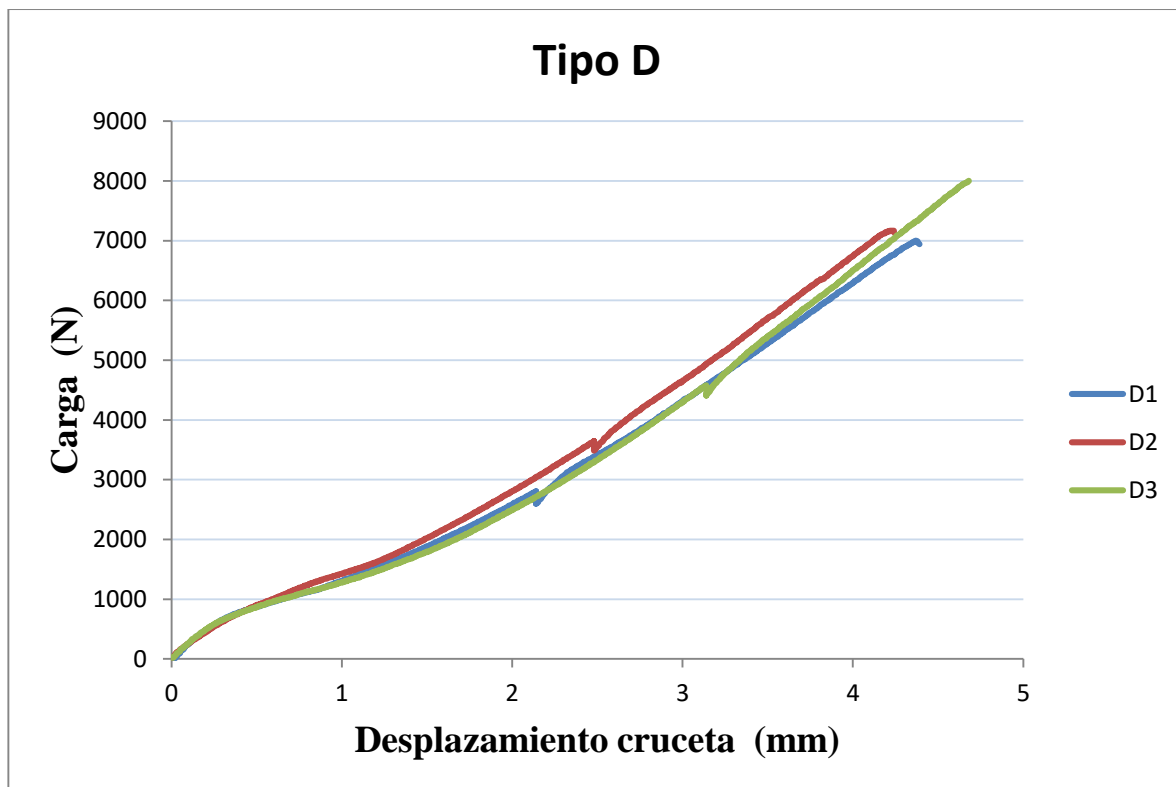


Figura 7-15. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo D

En la Tabla 7-4 se exponen los resultados de carga máxima de las probetas tipo D tras el ensayo.

	Nº	Carga máxima (N)
D	1	6999.44
	2	7166.20
	3	8002.10

Tabla 7-4. Carga máxima probetas tipo D.

Todas las probetas rompen por la misma zona, en torno a la unión del 4 y 5 escalón al parche. En la Figura 7-16 se observan las probetas antes y después del ensayo.

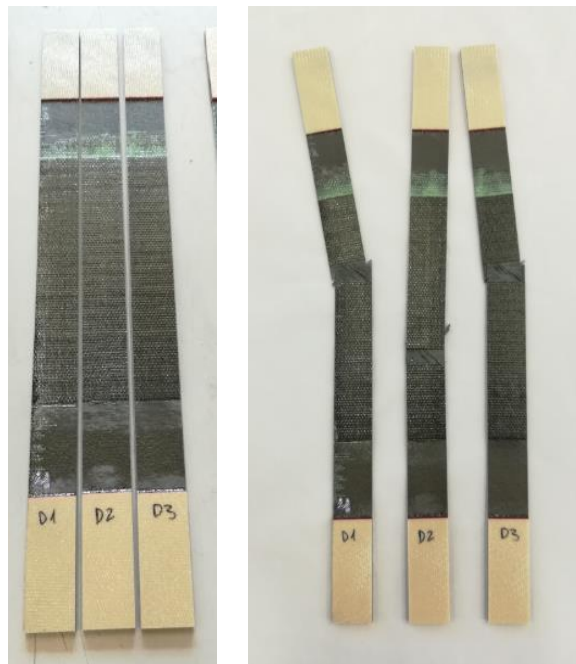


Figura 7-16. Probetas tipo D antes y después del ensayo.

7.1.5 Probetas Tipo E

Panel con un resanado de láminas de forma escalón (step) de 1 cm de anchura cada uno (Figura 7-17).

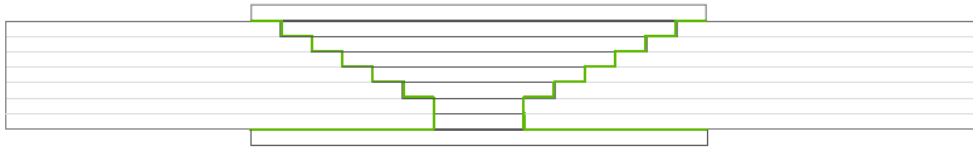


Figura 7-17. Laminado probeta tipo E.

A continuación, en la Figura 7-18 se muestra un gráfico de “Carga - Desplazamiento de cruceta” resultante del ensayo de tracción. Se interpreta de forma que la mordaza superior va ascendiendo a una velocidad de 1 mm/min provocando un aumento de carga hasta que la tensión soportada por la probeta es máxima y se produce la rotura.

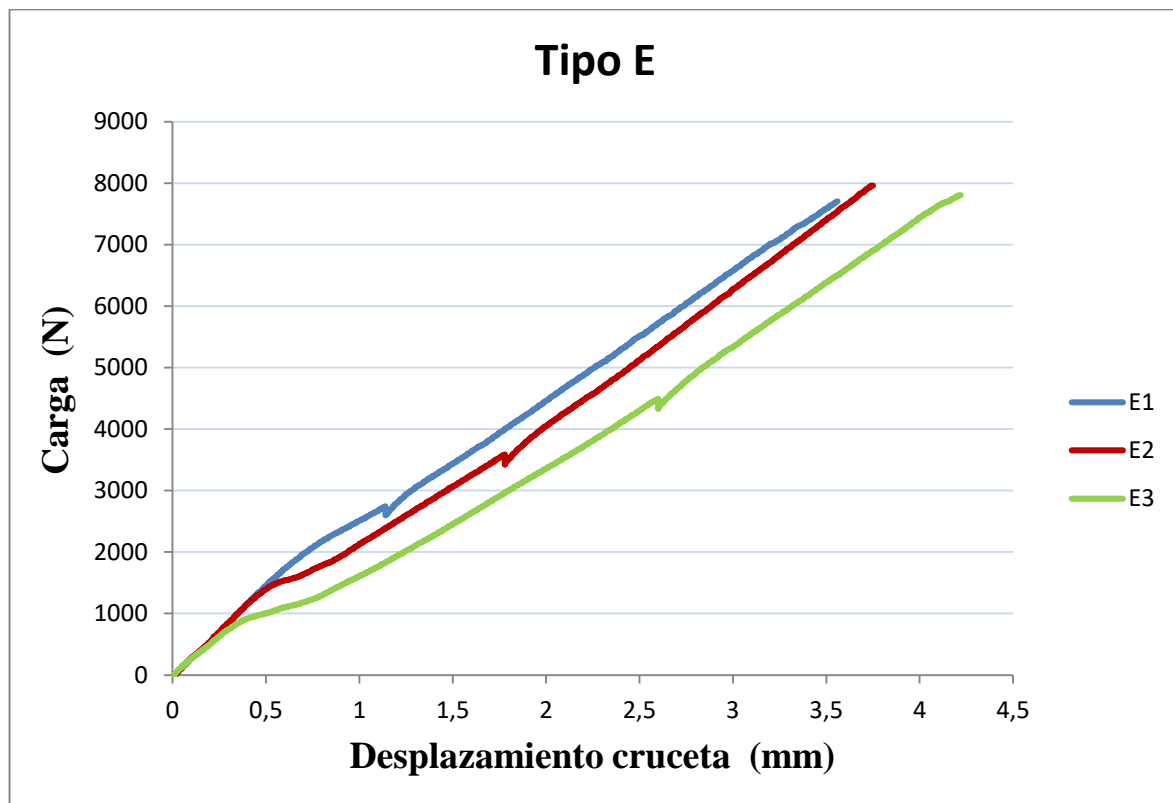


Figura 7-18. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo E

En la Tabla 7-5 se exponen los resultados de carga máxima de las probetas tipo E tras el ensayo.

	Nº	Carga máxima (N)
E	1	7702.81
	2	7959.83
	3	7805.82

Tabla 7-5. Carga máxima probetas tipo E.

Todas las probetas rompen por la misma zona, en torno a la unión del 4 y 5 escalón al parche como en el caso anterior. En la Figura 7-19 se observan las probetas antes y después del ensayo.

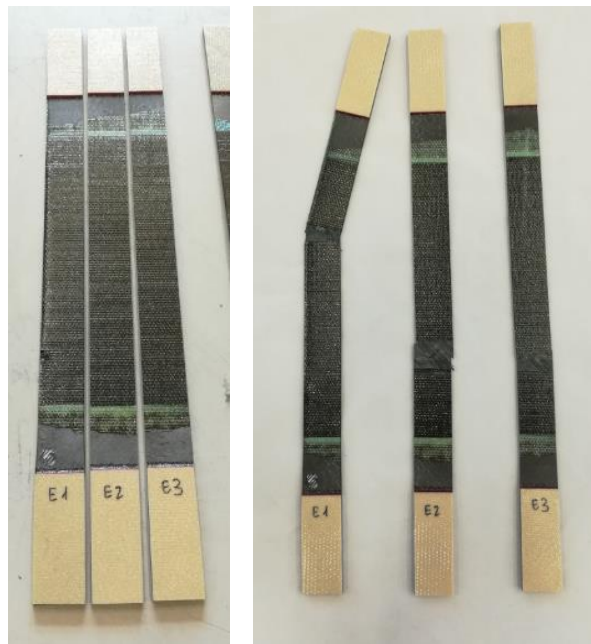


Figura 7-19. Probetas tipo E antes y después del ensayo.

7.1.6 Probetas Tipo F.

Panel con un resanado de láminas de forma escalón (step) de 1 cm de anchura cada uno, pero con curado incompleto (Figura 7-20).

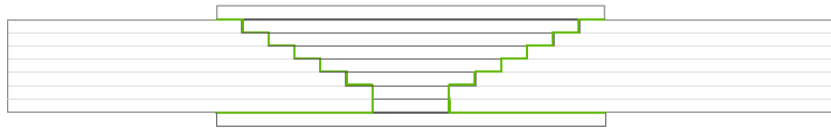


Figura 7-20. Laminado probetas tipo F.

A continuación, en la Figura 7-21 se muestra un gráfico de “Carga - Desplazamiento de cruceta” resultante del ensayo de tracción. Se interpreta de forma que la mordaza superior va ascendiendo a una velocidad de 1 mm/min provocando un aumento de carga hasta que la tensión soportada por la probeta es máxima y se produce la rotura.

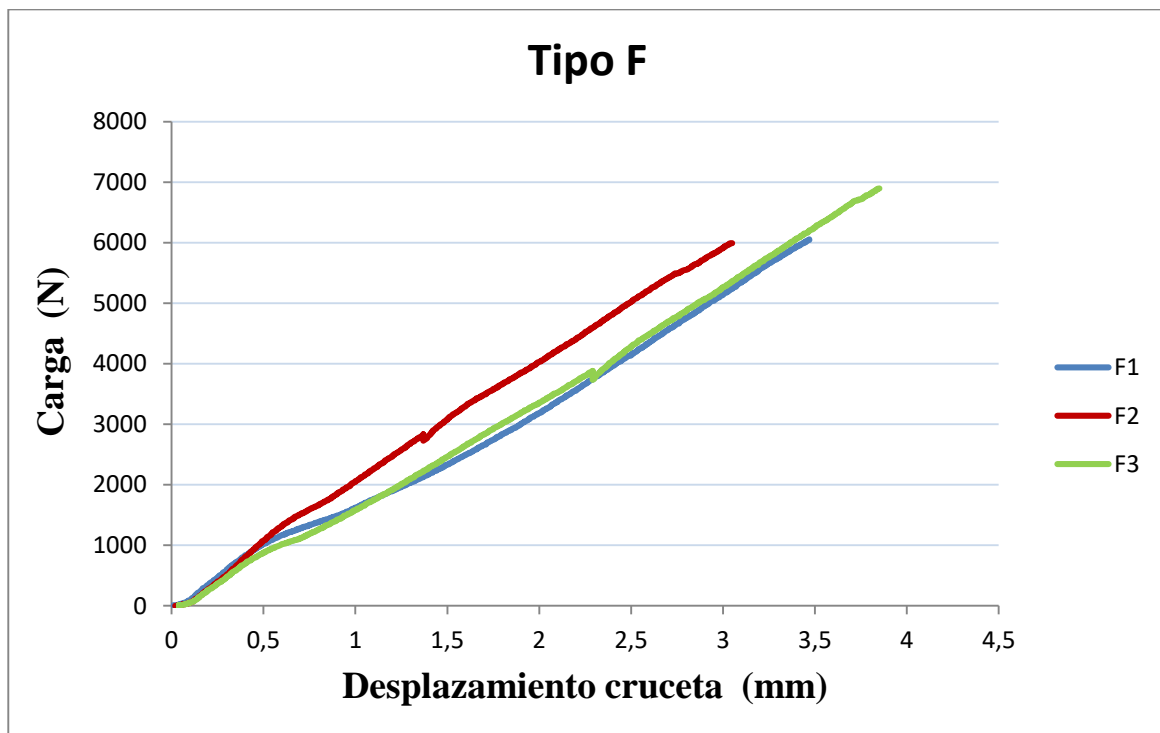


Figura 7-21. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo F

En la Tabla 7-6 se exponen los resultados de carga máxima de las probetas tipo F tras el ensayo.

	Nº	Carga máxima (N)
F	1	6051.79
	2	5992.93
	3	6897.41

Tabla 7-6. Carga máxima probetas tipo F.

Todas las probetas rompen por la misma zona, en torno a la unión del 4 y 5 escalón al parche. En la primera imagen de la Figura 7-22 se observa que las probetas no están rectas debido al curado incompleto y en las siguientes se muestran las probetas antes y después del ensayo.

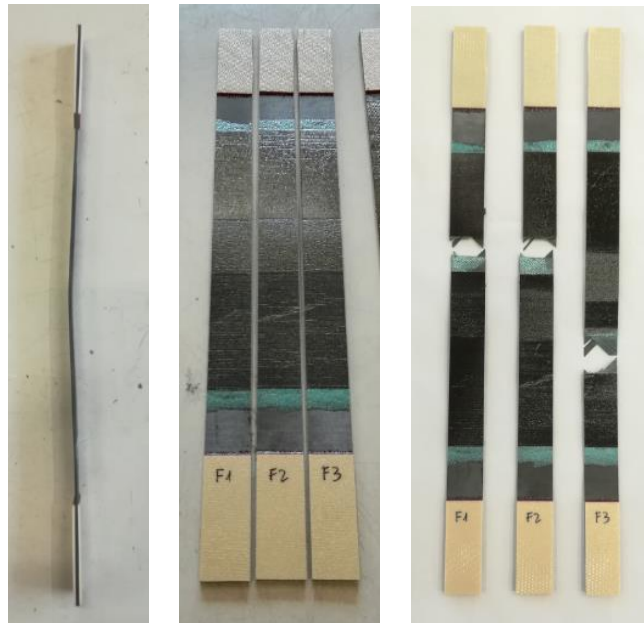


Figura 7-22. Probetas tipo F antes y después del ensayo.

7.1.7 Probetas Tipo G.

Configuración tipo step, pero no se realiza resanado, se apilan las capas de tal forma que imitan los escalones de 1 cm de anchura (Figura 7-23).

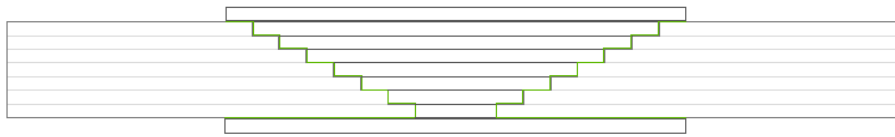


Figura 7-23. Laminado probeta tipo G

A continuación, en la Figura 7-24 se muestra un gráfico de “Carga - Desplazamiento de cruceta” resultante del ensayo de tracción. Se interpreta de forma que la mordaza superior va ascendiendo a una velocidad de 1 mm/min provocando un aumento de carga hasta que la tensión soportada por la probeta es máxima y se produce la rotura.

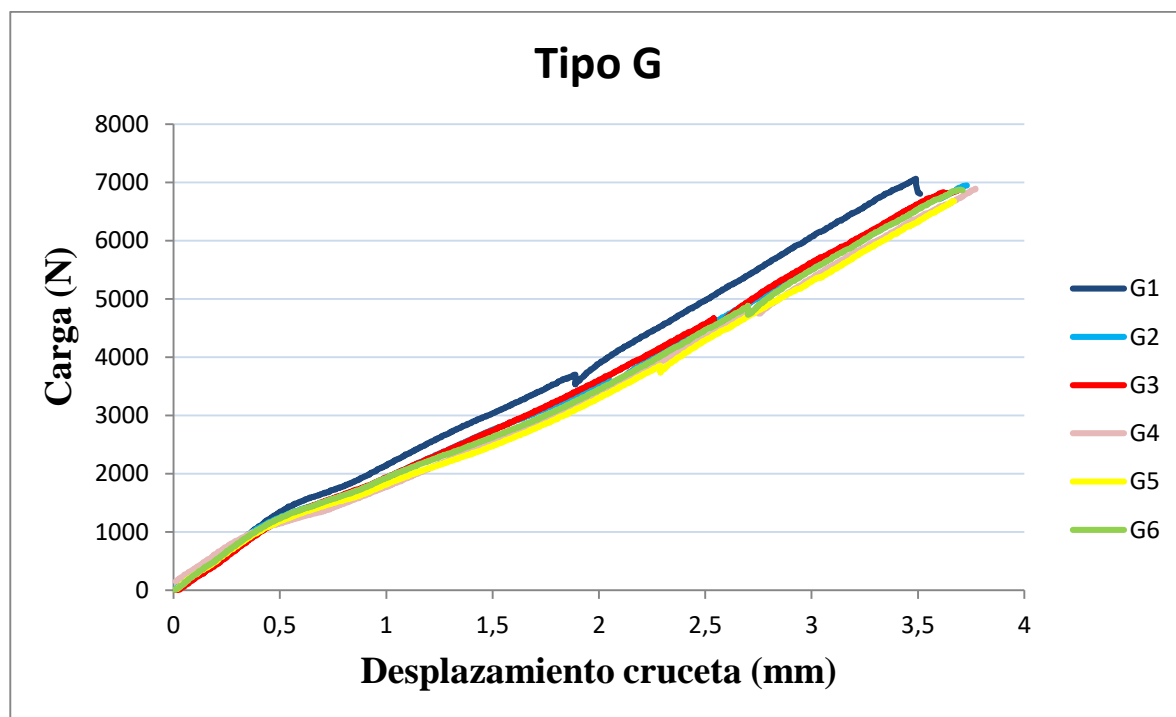


Figura 7-24. Carga – Desplazamiento cruceta probetas tipo G

En la Tabla 7-7 se exponen los resultados de carga máxima de las probetas tipo G tras el ensayo.

	Nº	Carga máxima (N)
G	1	7059.28
	2	6948.42
	3	6877.79
	4	6889.56
	5	6679.63
	6	6873.87

Tabla 7-7. Carga máxima probetas tipo G.

Todas las probetas rompen por la misma zona, en torno a la unión del 4 y 5 escalón al parche. En la Figura 7-25 se observan las probetas antes y después del ensayo.

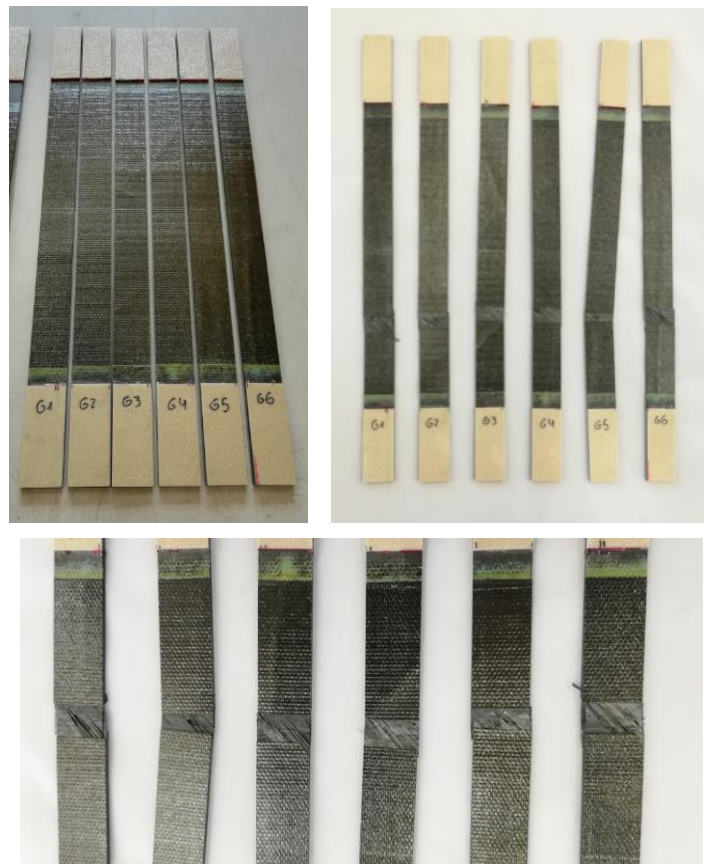


Figura 7-25. Probetas tipo G antes y después del ensayo.

7.2 Examen macroscópico

Este examen se puede realizar con una inspección visual o, como en este caso, con una lupa y una cámara integrada para observar los resultados en un ordenador. Consiste en un ensayo no destructivo en el que se utilizan pocos aumentos para observar defectos como porosidades, delaminaciones o, como en nuestro caso, observar la buena o mala integración del parche en el panel. Lo ideal es que este examen se hubiese realizado antes del ensayo a tracción, pero no fue posible. En la Figura 7-26 se observa el equipo utilizado:



Figura 7-26. Lupa con cámara

Antes de nada, hay que explicar mediante un esquema (Figura 7-27) las partes de las probetas que se van a ver para entender bien las imágenes:

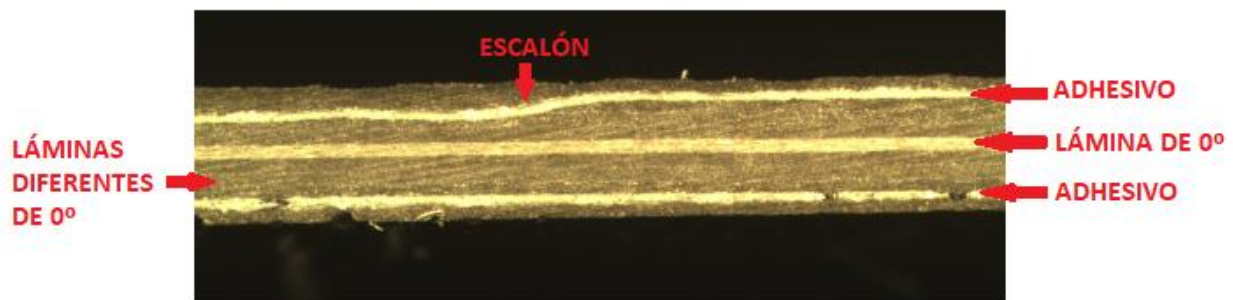


Figura 7-27. Esquema de partes de la probeta

7.2.1 Probeta tipo D

Se observa una buena integración del parche en el panel a excepción de unas pequeñas porosidades, algo común en estos tipos de reparaciones.

Las siguientes imágenes se van a representar en un esquema para verlo con mayor claridad. La Figura 7-28 muestra:

- 1) La bajada del primer escalón de la lámina de 90°.
- 2) La bajada del escalón de la lámina de 45° hasta la de 0°.
- 3) La bajada del quinto escalón de la lámina de -45°.

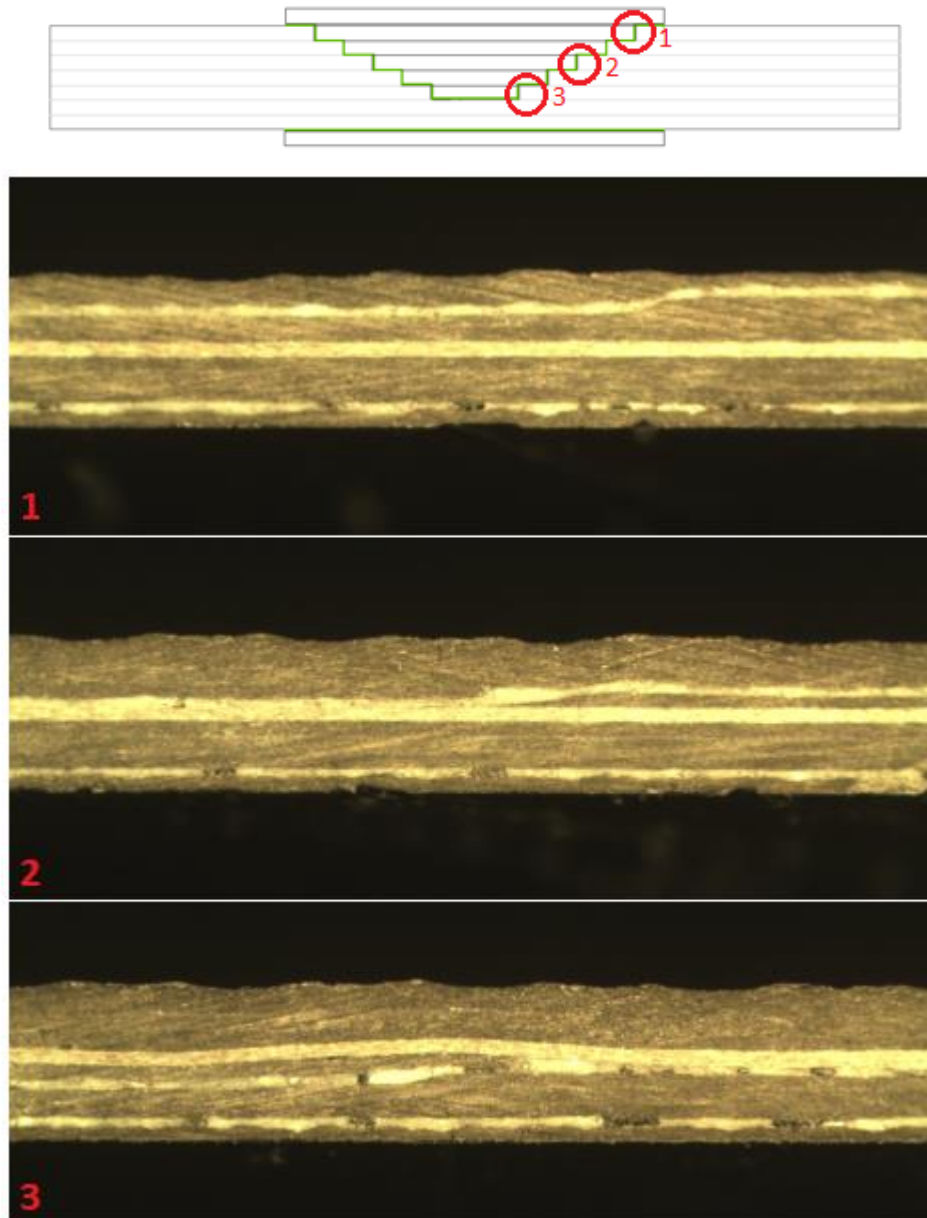


Figura 7-28. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo D

7.2.2 Probeta tipo E

Al igual que en el caso anterior, se observa una buena integración del parche en el panel con pequeñas porosidades. La Figura 7-29 muestra:

- 1) La bajada del primer escalón de la lámina de 90°.
- 2) La bajada del segundo escalón de la lámina de -45°.
- 3) Las capas de -45° y 90° al mismo nivel unidas al panel.

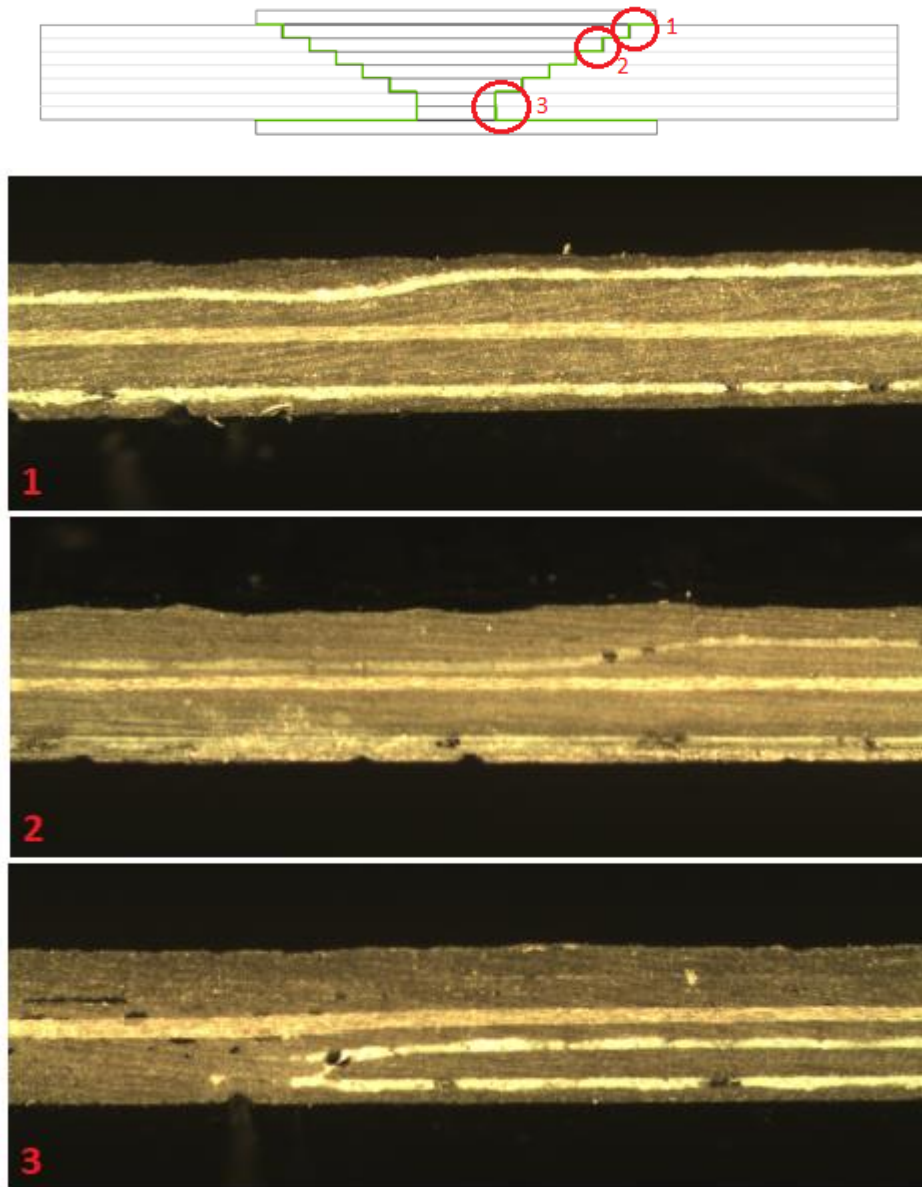


Figura 7-29. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo E

7.2.3 Probeta tipo F

Este tipo de probetas son las que están curadas con un ciclo incompleto. Se observa que el color del adhesivo es más claro y además presenta porosidades, falta de integración y en la primera imagen se ve una rotura transversal que se une a una delaminación. La Figura 7-30 muestra:

- 1) La bajada del cuarto escalón de la lámina de 0°.
- 2) La bajada del quinto escalón de la lámina de 45°.
- 3) Las capas de -45° y 90° al mismo nivel unidas al panel.

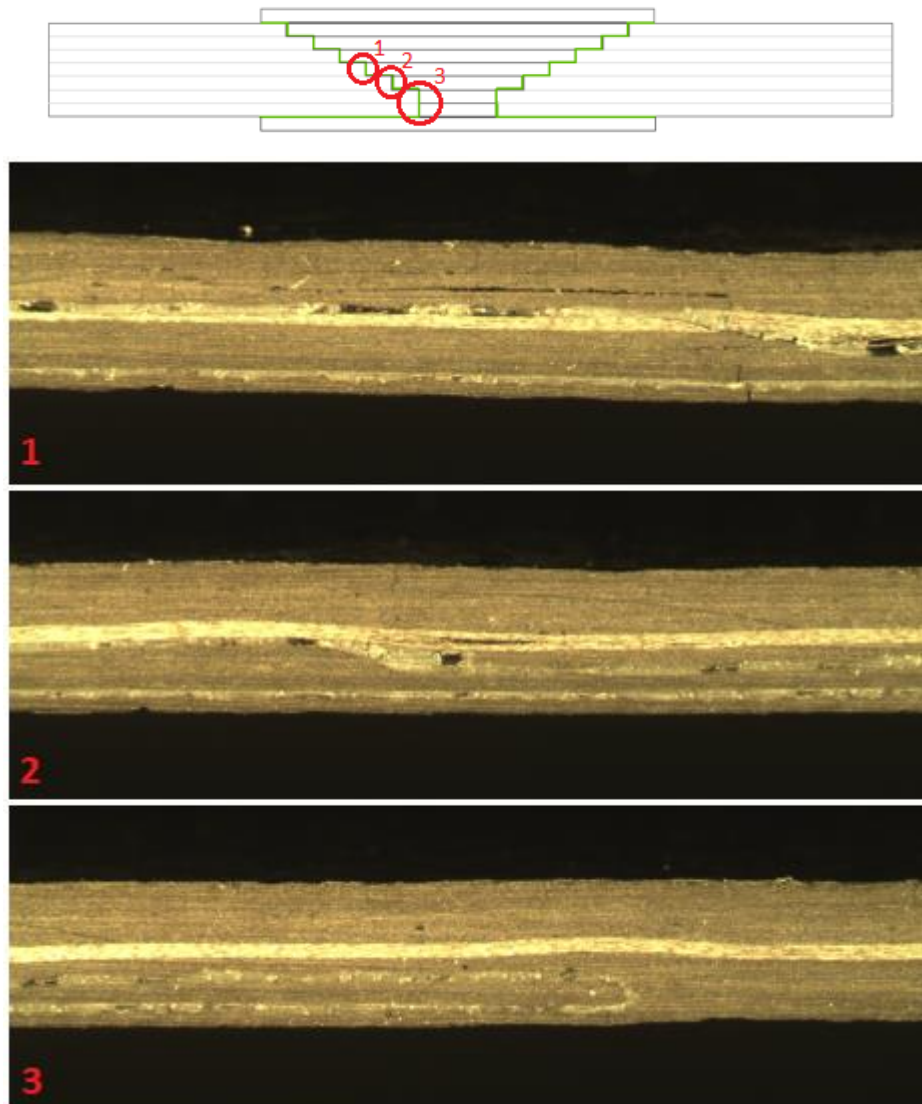


Figura 7-30. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo F

7.2.4 Probeta tipo G

Se observan mayor número de porosidades en el laminado y no tantos en el adhesivo (aunque se puede ver una inclusión). Esto puede deberse porque al ser la primera probeta fabricada se tuvo menos en cuenta la manera de apilar, compactar (tanto con espátula como con bolsa de vacío) y la limpieza. La Figura 7-31 muestra:

- 1) La bajada del quinto escalón de la lámina de 45°.
- 2) La bajada del sexto escalón de la lámina de -45°.
- 3) La bajada del último escalón de la lámina de 90°.

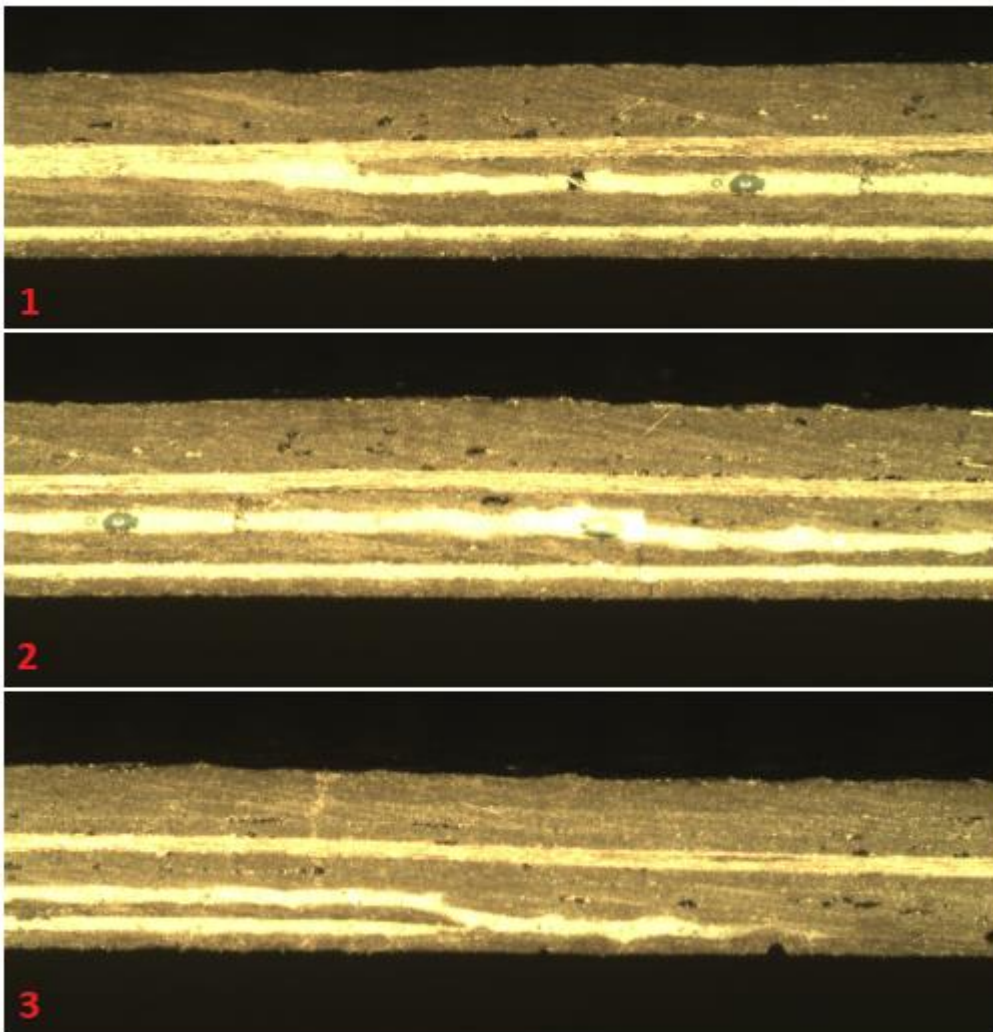


Figura 7-31. Esquema e imágenes del examen macroscópico de las probetas tipo G

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se pretende analizar los resultados obtenidos en la sección anterior. Para ello, se hace uso de tablas, gráficos y variables estadísticas para cuantificar la variabilidad de los resultados de las distintas probetas con una misma configuración.

Las variables estadísticas a usar son las siguientes:

Media aritmética

Desviación estándar

Coefficiente de variación

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Donde x_i son los valores de tensión de rotura de cada probeta y N el total de probetas ensayadas de cada serie.

8.1 Carga y tensión de rotura

8.1.1 Carga de rotura

La carga de rotura es la carga máxima que soporta la probeta en el ensayo de tracción. A continuación, en las Figuras 8-1 y 8-2, se representa en gráficas la carga máxima de cada probeta y la media aritmética de cada tipo:

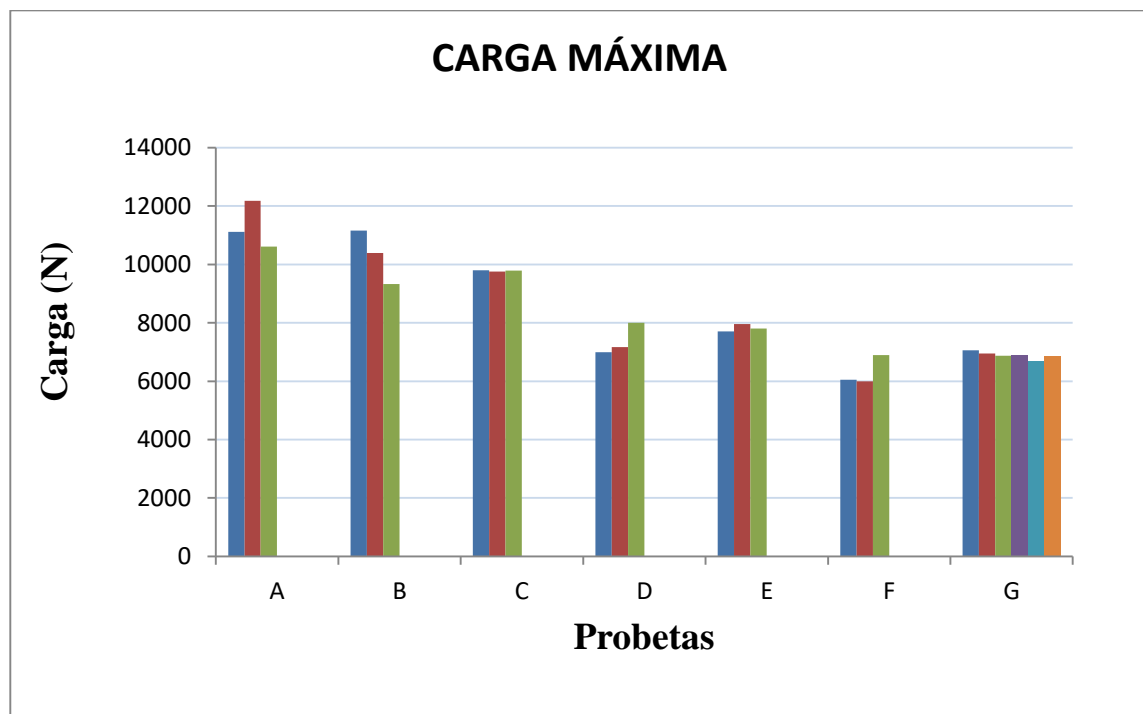


Figura 8-1. Carga Máxima de todas las probetas

Como se puede observar, las probetas Tipo A resisten de una forma similar al tipo B y C puesto que no se ha realizado reparación con eliminación de material. En cambio, en las demás, tipo D, E, F y G, se ve un descenso de la resistencia (además de semejanza entre ellas) por haber reparado con resanado.

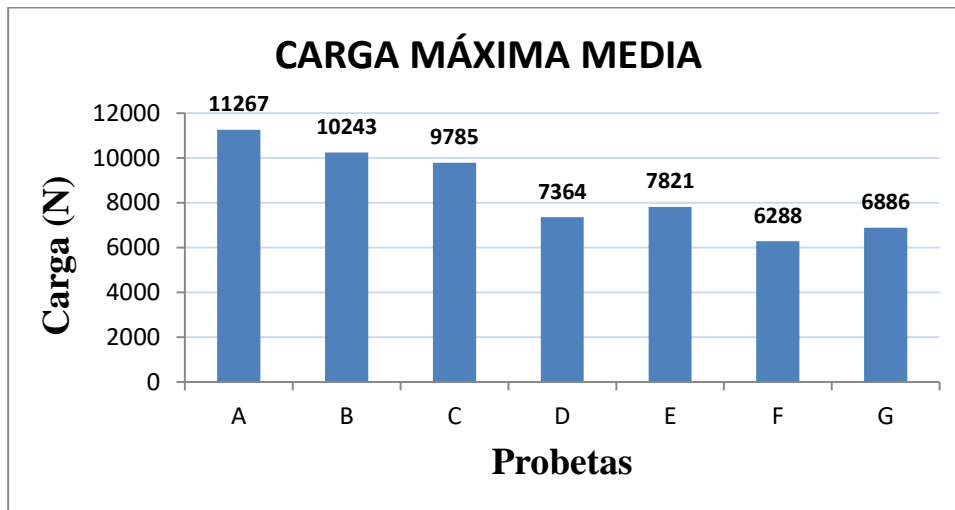


Figura 8-2. Carga Máxima Media de todas las probetas

En la Tabla 8-1 se expone un resumen de los resultados medios de carga máxima y variables estadísticas. En el sector aeroespacial es frecuente una tolerancia de ensayos de hasta un 10-15% de coeficiente de variación, por lo que estos ensayos satisfacen esta regla.

TIPO	Carga Máx. Media (N)	Desviación Estándar (N)	Coef. Variación (%)
A	11267,31	801,80	7,12
B	10243,28	918,85	8,97
C	9785,77	22,31	0,23
D	7364,39	537,77	7,30
E	7821,40	129,35	1,65
F	6288,18	506,07	8,05
G	6886,22	123,86	1,80

Tabla 8-1. Carga máxima media y estadísticas de las probetas

La Tabla 8-2 muestra la comparación de la carga máxima de las probetas A (vírgenes) con los demás tipos:

Tipo i	Carga Máx. A/Carga Máx. i (%)
A	100,0
B	90,9
C	86,9
D	65,4
E	69,4
F	55,8
G	61,1

Tabla 8-2. Comparación de carga máxima con probeta virgen (Tipo A)

Dependiendo de muchos detalles, la estructura reparada suele ser de alrededor del 60-80% tan resistente como la estructura original sin daños [2]. Analizando los porcentajes, se observa que las configuraciones reparadas tipo step D, E y G resisten en torno a 60-70%. Debe ser parte del criterio del ingeniero el decidir si utilizar este tipo de componentes reparados dependiendo de muchas condiciones y especificaciones, ya que se suelen reparar elementos de responsabilidad, como por ejemplo en aviones.

8.2.2 Tensión de rotura

La resistencia a tracción es la tensión de tracción en el momento de la rotura. Como se ha mencionado anteriormente, las fórmulas a utilizar serán:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Resistencia a tracción} = \text{Carga Máxima} / \text{Área}), \text{ siendo } A = \text{espesor} * \text{ancho}.$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Deformación} = \text{Apertura extensómetro} / \text{longitud inicial del extensómetro}), \text{ siendo } l_0 = 50\text{mm}.$$

Hay que destacar que en los tipos de probetas A y B no existe refuerzo, por lo que el área es siempre la misma, la original, pero en el caso de las probetas C, D, E, F y G poseen un refuerzo que hace aumentar su espesor. Como consecuencia, existirán dos tipos de tensiones diferentes: tensión referida al área original (sin refuerzo) y tensión referida al área reforzada (con parche).

En la Figura 8-3 se muestran los distintos espesores de todas las probetas.

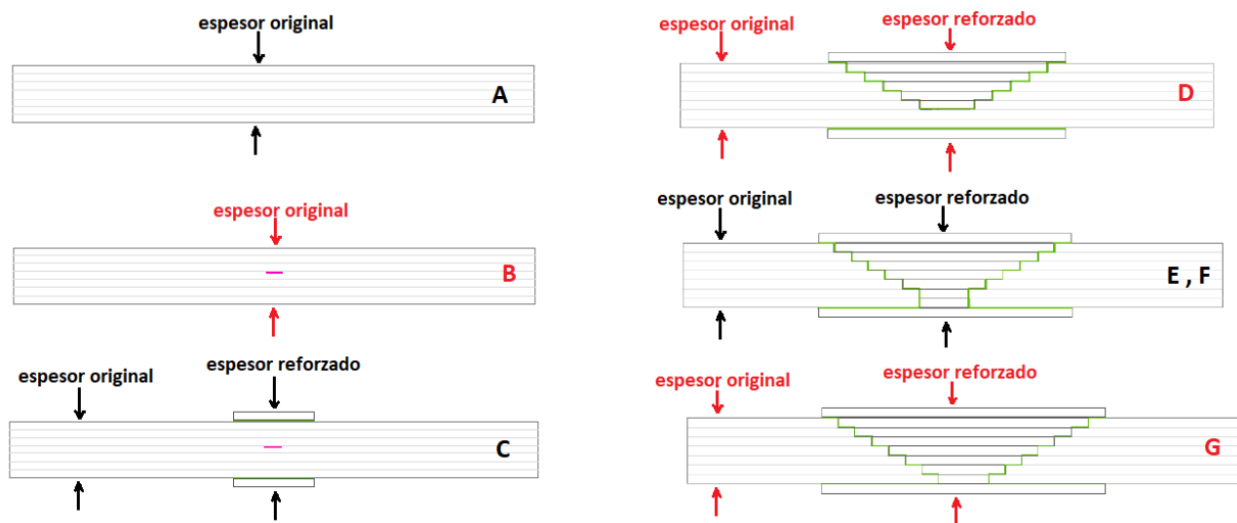


Figura 8-3. Espesor original y reforzado de las probetas

A continuación, se exponen gráficos y tablas referidas a la tensión de todos los tipos de probetas:

TIPO A: La Figura 8-4 representa un gráfico de Tensión (MPa) - Deformación (%) de las probetas Tipo A:

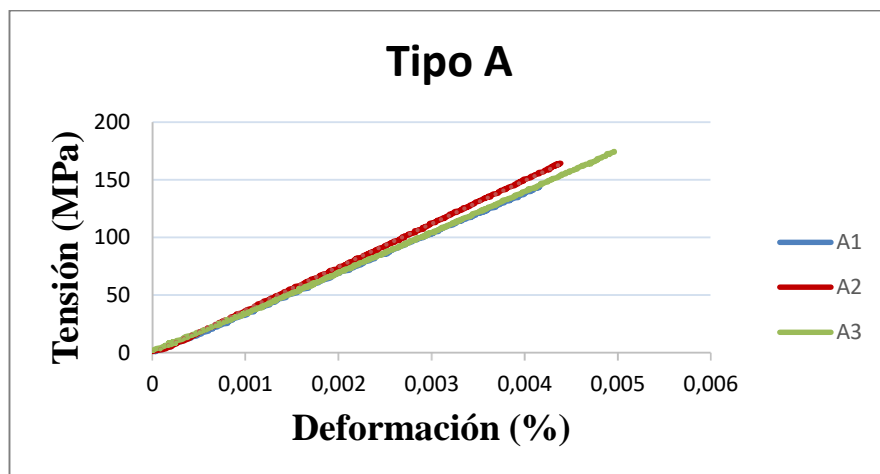


Figura 8-4. Tensión – Deformación probetas tipo A

La Tabla 8-3 muestra las dimensiones y propiedades de las probetas Tipo A:

	Nº	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Mod. Elast. Long (GPa)	Carga máxima (N)	Resistencia a tracción (MPa)
A	1	20,12	1,37	27,56	34,49	11114,73	403,23
	2	20,50		28,09	37,30	12184,02	433,83
	3	20,41		27,96	34,89	10614,42	379,61

Tabla 8-3. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo A

TIPO B: La Figura 8-5 representa un gráfico de Tensión (MPa) - Deformación (%) de las probetas Tipo B:

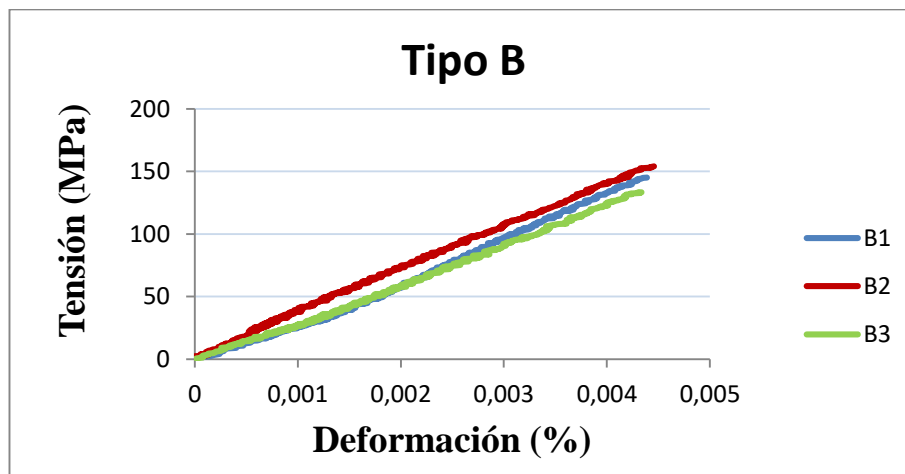


Figura 8-5. Tensión – Deformación probetas tipo B

La Tabla 8-4 muestra las dimensiones y propiedades de las probetas Tipo B:

	Nº	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Mod. Elast. Long (GPa)	Carga máxima (N)	Resistencia a tracción (MPa)
B	1	20,66	1,37	28,30	35,45	11163,78	394,42
	2	20,50		28,09	34,30	10398,60	370,25
	3	20,10		27,54	31,61	9334,22	338,97

Tabla 8-4. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo B

TIPO C: Las Figuras 8-6 y 8-7 representan un gráfico de Tensión (MPa) - Deformación (%) de las probetas Tipo C (C1, C2 y C3) referido al área original y reforzada respectivamente y la Tabla 8-5 muestra las dimensiones y propiedades de las probetas Tipo C:

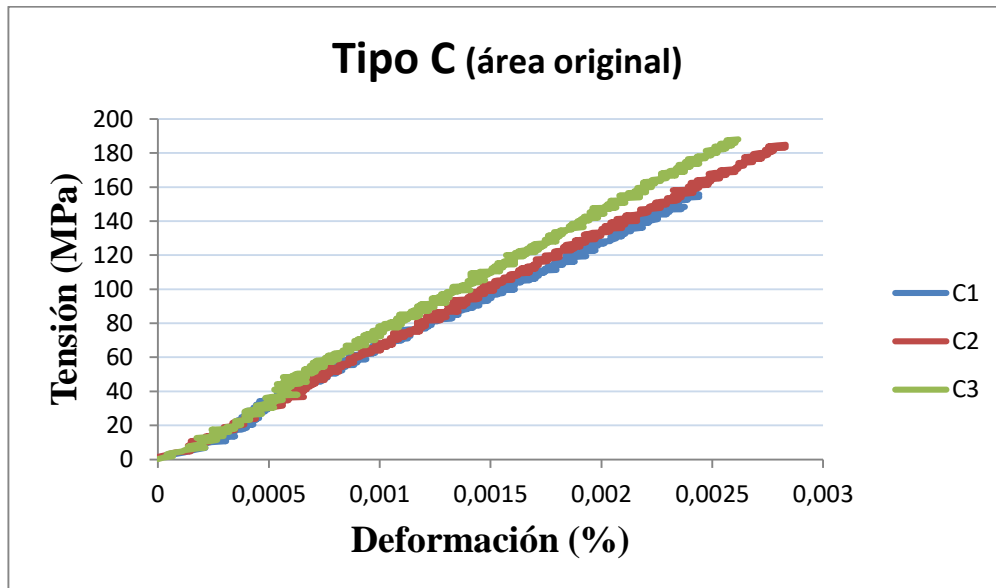


Figura 8-6. Tensión – Deformación probetas tipo C (área original)

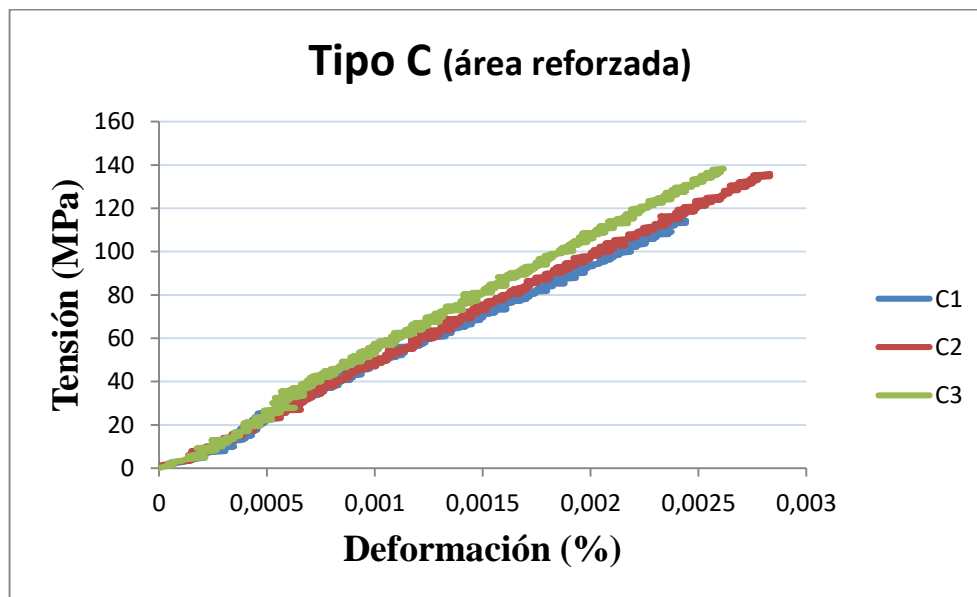


Figura 8-7. Tensión – Deformación probetas tipo C (área reforzada)

	Nº	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Mod. Elast. Long (GPa)	Carga máxima (N)	Resistencia a tracción (MPa)
C (área original)	1	20,49	1,37	28,07	64,34	9804,11	349,26
	2	20,56		28,17	66,79	9760,95	346,54
	3	20,49		28,07	73,20	9792,34	348,84
C (área reforzada)	1	20,49	1,86	38,11	47,28	9804,11	257,25
	2	20,56		38,24	49,07	9760,95	255,24
	3	20,49		38,11	53,79	9792,34	256,94

Tabla 8-5. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo C

TIPO D: Las Figuras 8-8 y 8-9 representan un gráfico de Tensión (MPa) - Deformación (%) de las probetas Tipo D (D1, D2 y D3) referido al área original y reforzada respectivamente y la Tabla 8-6 muestra las dimensiones y propiedades de las probetas Tipo D:

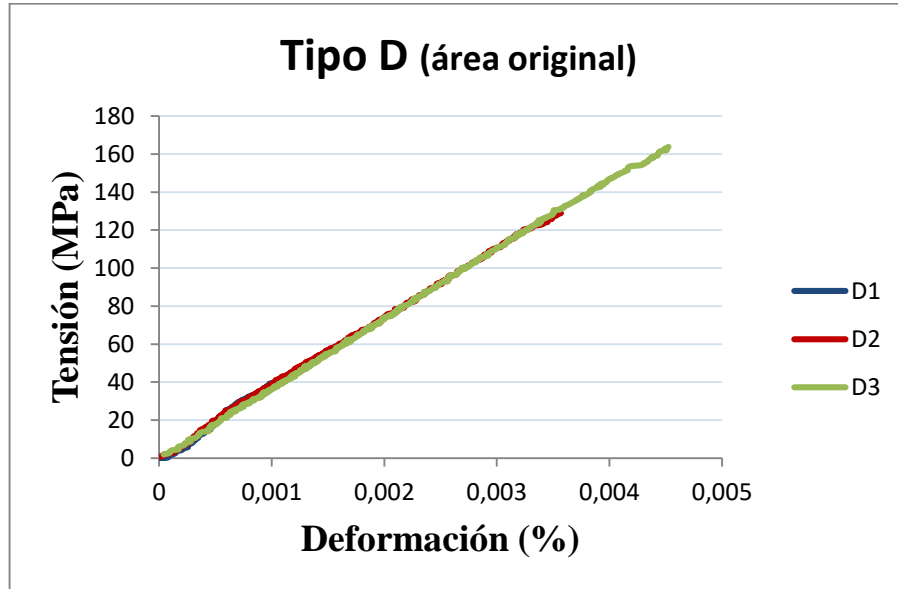


Figura 8-8. Tensión – Deformación probetas tipo D (área original)

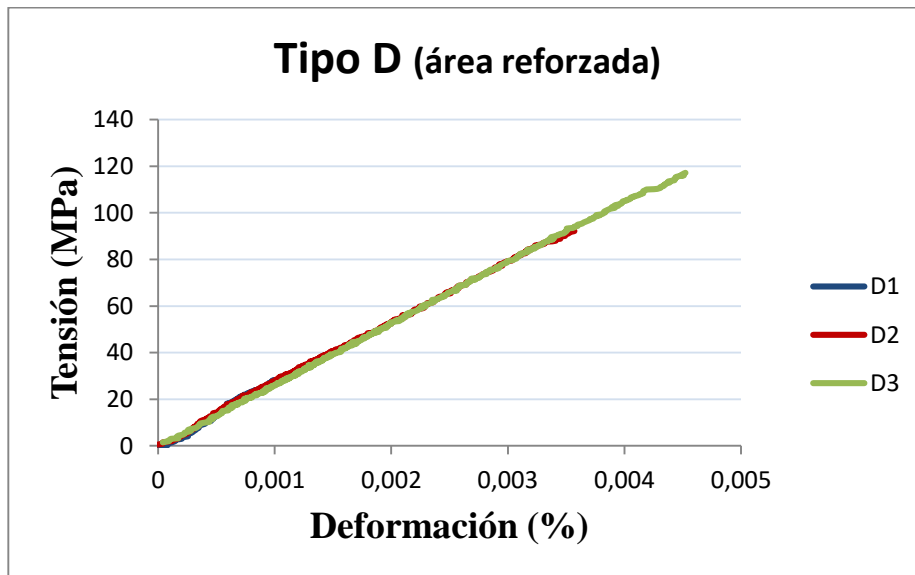


Figura 8-9. Tensión – Deformación probetas tipo D (área reforzada)

	Nº	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Mod. Elast. Long (GPa)	Carga máxima (N)	Resistencia a tracción (MPa)
D (área original)	1	20,49	1,36	27,87	39,17	6999,44	251,18
	2	20,58		27,99	36,14	7166,21	256,04
	3	20,57		27,98	36,62	8003,00	286,07
D (área reforzada)	1	20,49	1,90	38,93	28,03	6999,44	179,79
	2	20,58		39,10	25,88	7166,21	183,27
	3	20,57		39,08	26,21	8003,00	204,77

Tabla 8-6. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo D

TIPO E: Las Figuras 8-10 y 8-11 representan un gráfico de Tensión (MPa) - Deformación (%) de las probetas Tipo E (E1, E2 y E3) referido al área original y reforzada respectivamente y la Tabla 8-7 muestra las dimensiones y propiedades de las probetas Tipo E:

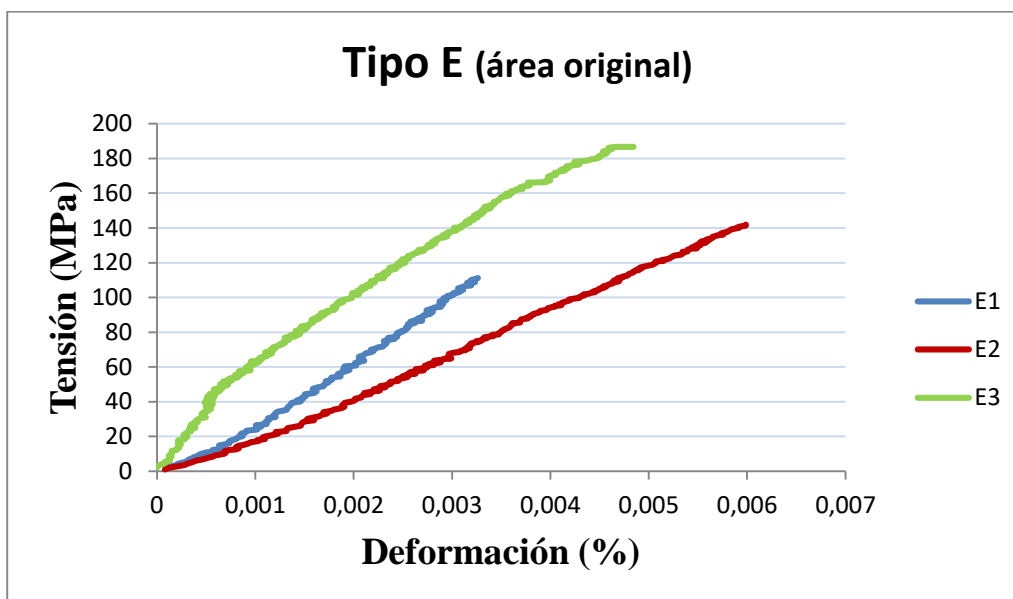


Figura 8-10. Tensión – Deformación probetas tipo E (área original)

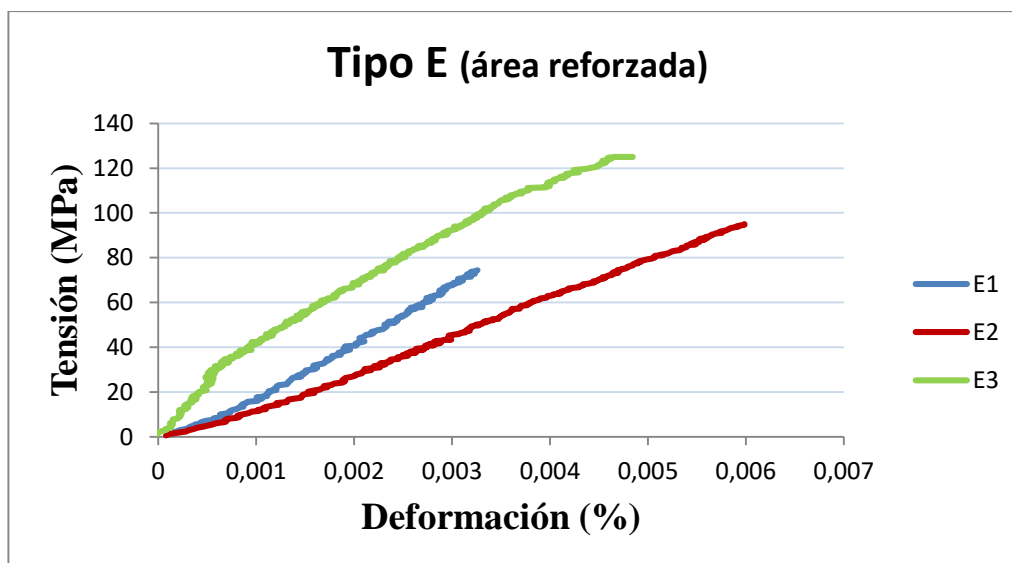


Figura 8-11. Tensión – Deformación probetas tipo E (área reforzada)

	Nº	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Mod. Elast. Long (GPa)	Carga máxima (N)	Resistencia a tracción (MPa)
E (área original)	1	20,18	1,22	24,62	36,56	7702,81	312,87
	2	20,55		25,07	25,1	7959,83	317,49
	3	19,51		23,80	38,55	7805,82	327,95
E (área reforzada)	1	20,18	1,83	36,93	24,50	7702,81	208,58
	2	20,55		37,61	25,80	7959,83	211,66
	3	19,51		35,70	16,80	7805,82	218,63

Tabla 8-7. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo E

TIPO F: Las Figura 8-12 y 8-13 representan un gráfico de Tensión (MPa) - Deformación (%) de las probetas Tipo F (F1, F2 y F3) referido al área original y reforzada respectivamente y la Tabla 8-8 muestra las dimensiones y propiedades de las probetas Tipo F:

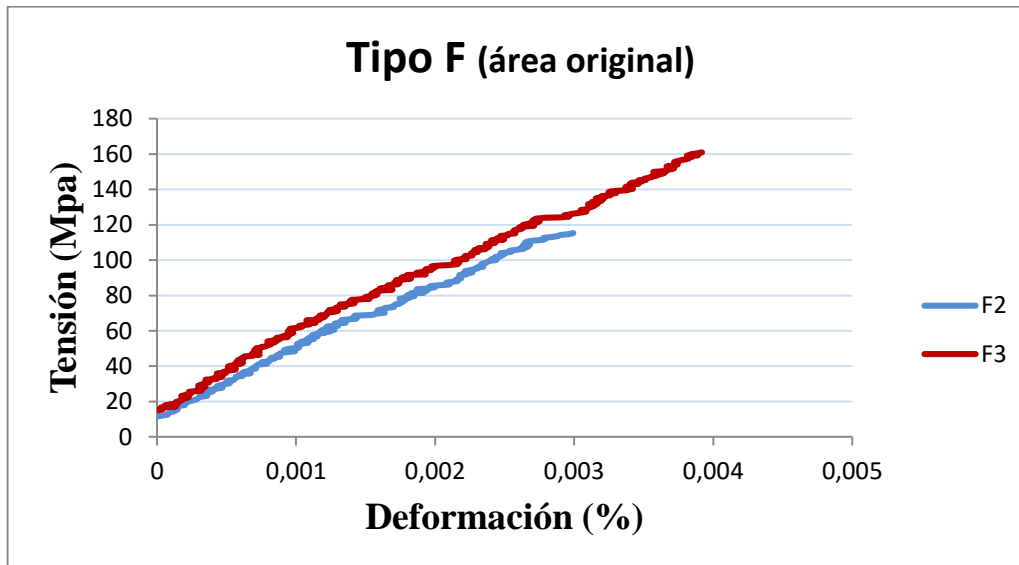


Figura 8-12. Tensión – Deformación probetas tipo F (área original)

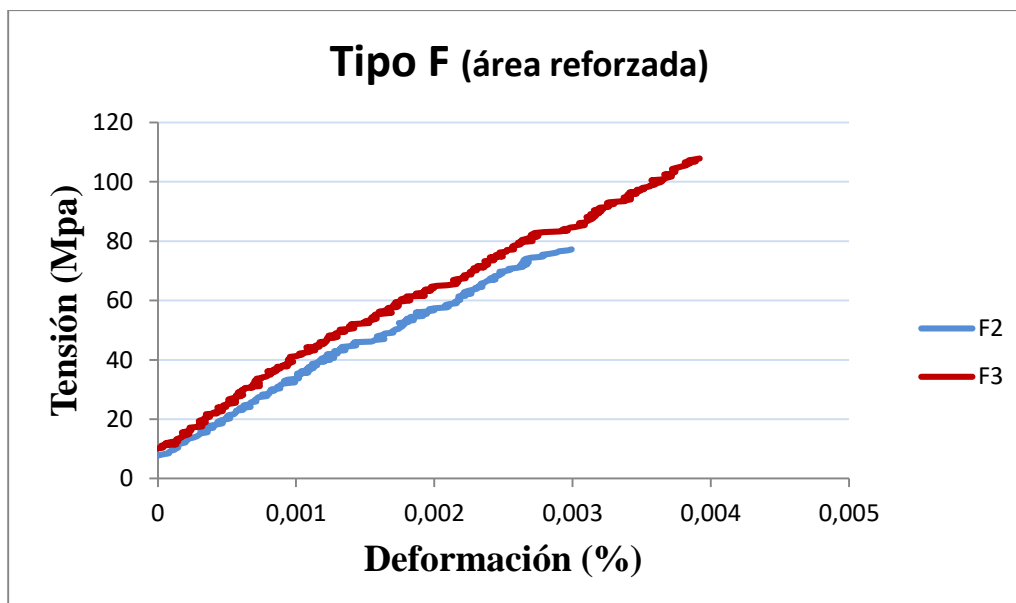


Figura 8-13. Tensión – Deformación probetas tipo F (área reforzada)

	Nº	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Mod. Elast. Long (GPa)	Carga máxima (N)	Resistencia a tracción (MPa)
F (área original)	1	20,15		24,38	-	6051,79	248,21
	2	20,13	1,21	24,36	35,84	5992,93	246,04
	3	19,70		23,84	35,87	6897,41	289,36
F (área reforzada)	1	20,15		36,39	-	6051,79	166,30
	2	20,13	1,81	36,35	24,04	5992,93	164,85
	3	19,70		35,58	24,02	6897,41	193,87

Tabla 8-8. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo F

TIPO G: Las Figura 8-14 y 8-15 representan un gráfico de Tensión (MPa) - Deformación (%) de las probetas Tipo G (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) referido al área original y reforzada y la Tabla 8-9 muestra las dimensiones y propiedades de las probetas Tipo G:

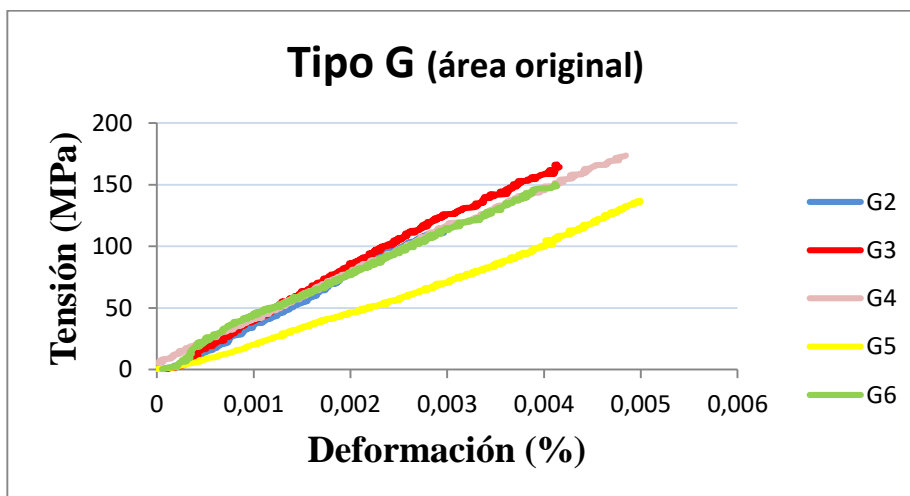


Figura 8-14. Tensión – Deformación probetas tipo G (área original)

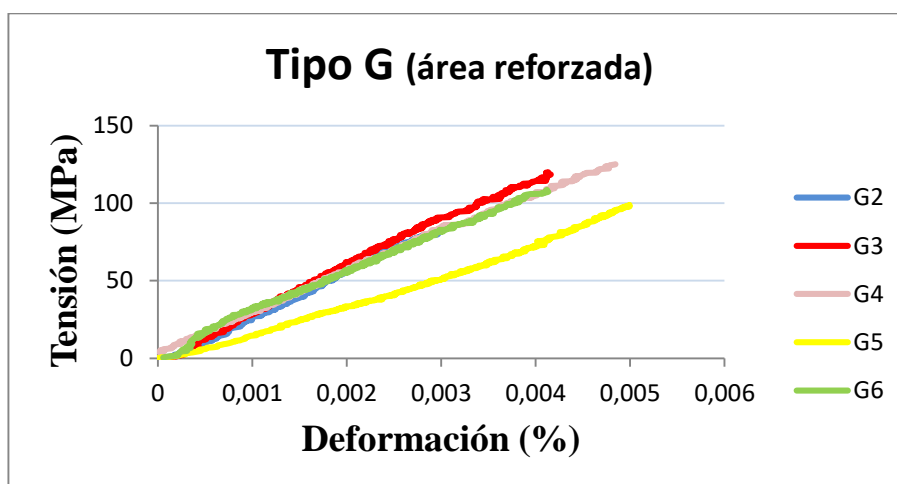


Figura 8-15. Tensión – Deformación probetas tipo G (área reforzada)

	Nº	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Mod. Elast. Long (GPa)	Carga máxima (N)	Resistencia a tracción (MPa)
G (área original)	1	20,10	1,41	28,34	-	7059,28	249,08
	2	20,15		28,41	41,52	6948,42	244,56
	3	19,86		28,00	41,08	6877,79	245,61
	4	19,87		28,02	35,18	6889,56	245,91
	5	19,94		28,12	27,7	6679,63	237,58
	6	20,21		28,50	35,81	6873,87	241,22
G (área reforzada)	1	20,10	1,95	39,20	-	7059,28	180,11
	2	20,15		39,29	29,93	6948,42	176,83
	3	19,86		38,73	29,62	6877,79	177,60
	4	19,87		38,75	25,36	6889,56	177,81
	5	19,94		38,88	19,97	6679,63	171,79
	6	20,21		39,41	25,82	6873,87	174,42

Tabla 8-9. Dimensiones y propiedades de las probetas tipo G

Tras observar los resultados obtenidos de las gráficas Tensión-Deformación se realiza una comparación de todos los tipos de probetas con diferente área.

- En primer lugar, se muestran unas gráficas (Figura 8-16 y 8-17) para analizar la diferencia de tensión entre las probetas de área original (sin parche).

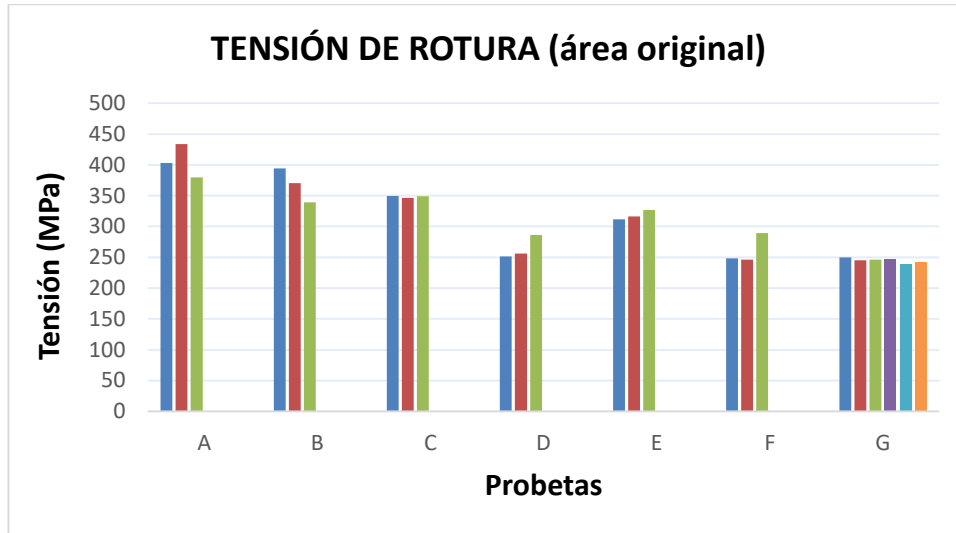


Figura 8-16. Tensión de rotura del área original

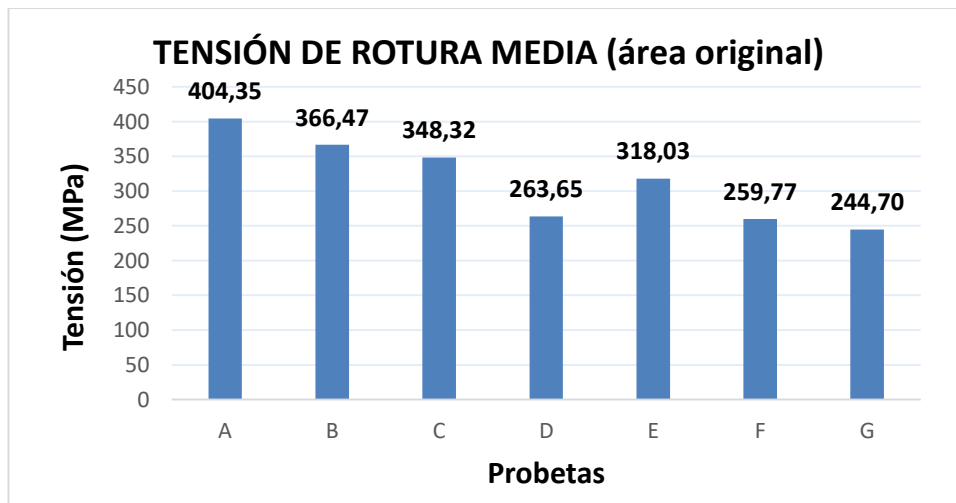


Figura 8-17. Tensión de rotura media del área original

En la Tabla 8-10 se expone un resumen de los resultados medios de tensión y variables estadísticas anteriormente vistos:

TIPO	Tensión Media (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Coef. Variación (%)
A	404,35	27,19	6,72
B	366,47	27,80	7,59
C	348,21	1,47	0,42
D	263,56	18,90	7,17
E	319,31	7,72	2,42
F	259,76	24,41	9,40
G	243,94	4,03	1,65

Tabla 8-10. Tensión media y estadísticas de las probetas

- En segundo lugar, se muestran unas gráficas (Figura 8-18 y 8-19) para analizar la diferencia de tensión entre las probetas de área reforzada (con parche).

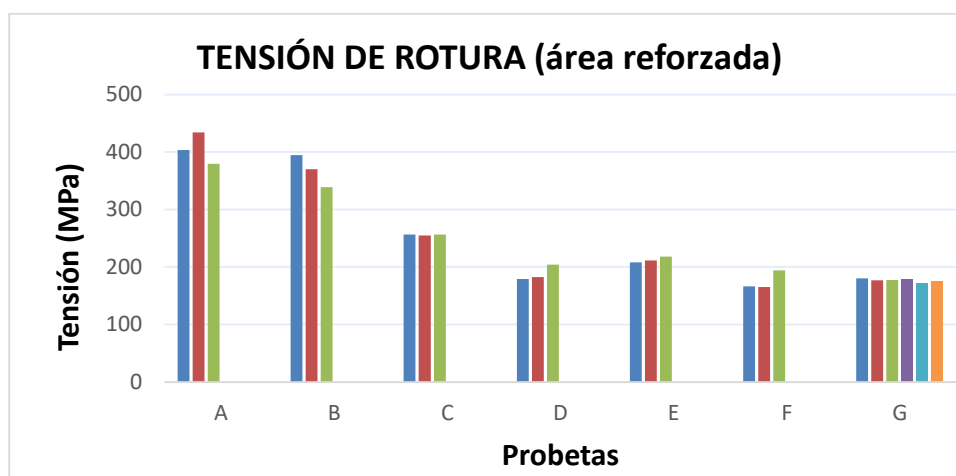


Figura 8-18. Tensión de rotura del área reforzada

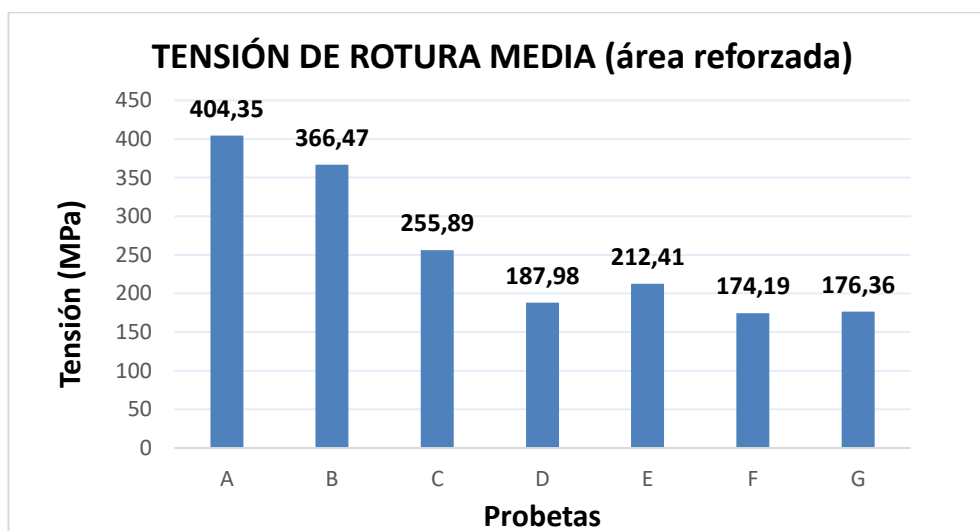


Figura 8-19. Tensión de rotura media del área reforzada

En la Tabla 8-11 se expone un resumen de los resultados medios de tensión y variables estadísticas anteriormente vistos:

TIPO	Tensión Media (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Coef. Variación (%)
A	404,35	27,19	6,72
B	366,47	27,80	7,59
C	256,47	1,08	0,42
D	188,66	13,53	7,17
E	212,88	5,15	2,42
F	174,04	16,35	9,40
G	176,38	2,92	1,65

Tabla 8-11. Tensión media y estadísticas de las probetas

La Figura 8-20 representa la comparación de los diferentes resultados de tensión media referidos al área original y reforzada anteriormente visto. Observamos que en el Tipo A y B la tensión es igual debido a que no poseen refuerzo y ambas barras se refieren a su área original. En cuanto a las demás (C, D, E, F y G), tienen dos tipos de superficies, la primera barra se refiere a la tensión media referida al área original y la segunda barra a la tensión referida al área reforzada. Como es lógico, la tensión referida al área original es mayor, en torno un 30%, que la tensión referida al refuerzo porque esta última posee mayor área debido al refuerzo del parche.

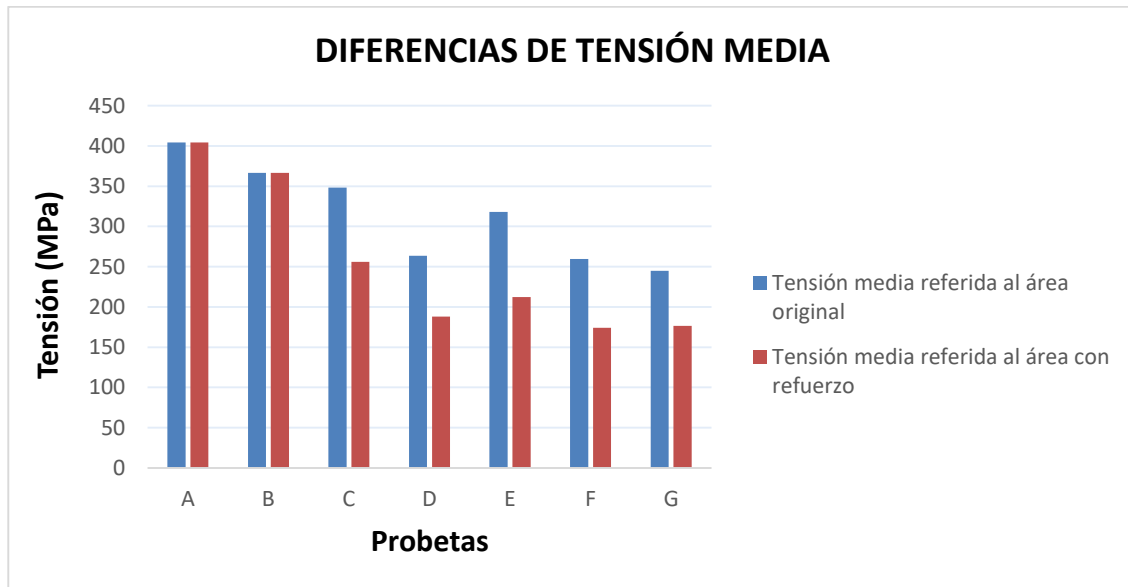


Figura 8-20. Diferencia de tensión según el área seleccionada

A continuación, se comentan los resultados obtenidos tras el ensayo de las distintas probetas.

- 1) Podemos observar que las probetas Tipo B resisten un 10% menos que las Tipo A debido a que las B tienen el defecto de teflón. Este es un valor muy pequeño, ya que el defecto no era lo suficientemente dañino al ser una simple lámina de teflón entre las capas de 0° y 45°.
- 2) Las probetas Tipo C rompen por la discontinuidad de la unión entre el refuerzo y el panel (Figura 8-21). Esto es debido a que al colocar el parche a 0° hemos creado un concentrador de tensiones, por ello la rotura se produce antes y por el borde del parche.



Figura 8-21. Representación de la rotura en la probeta Tipo C.

- 3) Comparando las Tipo E con las Tipo F se puede observar un descenso de la tensión de rotura de, en torno, un 20% debido a que las segundas están curadas con un ciclo incompleto.
- 4) Como se ha mencionado anteriormente, las configuraciones reparadas tipo step D, E y G resisten en torno el 60-70% de la carga del tipo A (virgen).
- 5) Las roturas de las probetas Tipo D, E, F y G se producen a la misma distancia, en la unión entre el parche en los escalones 4 y 5.
- 6) En las probetas con diferente espesor la tensión varía un 30% según la superficie escogida.

8.2 Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad longitudinal representa la constante de proporcionalidad entre una tensión normal aplicada y la deformación a ella asociada en el ensayo de tracción. De forma numérica representa el valor de la tensión normal que hay que aplicar para que la deformación normal a ella asociada alcance el valor unidad. [10]

Como se mencionó anteriormente, el cálculo del módulo de Elasticidad se realiza por estimación lineal mediante Excel, siendo la pendiente de la línea de tendencia de las gráficas Tensión (MPa) – Deformación (%) del apartado 8.1.2 “Tensión de rotura”. Destacar que, en el ensayo el extensómetro se coloca en la parte central de la probeta y se retira cuando alcance un nivel de alargamiento aceptable para no dañarlo cuando “rompa”.

En primer lugar, se muestra una gráfica (Figura 8-22) para analizar la diferencia del módulo de Elasticidad referido al área original (zona sin parche) entre las probetas.

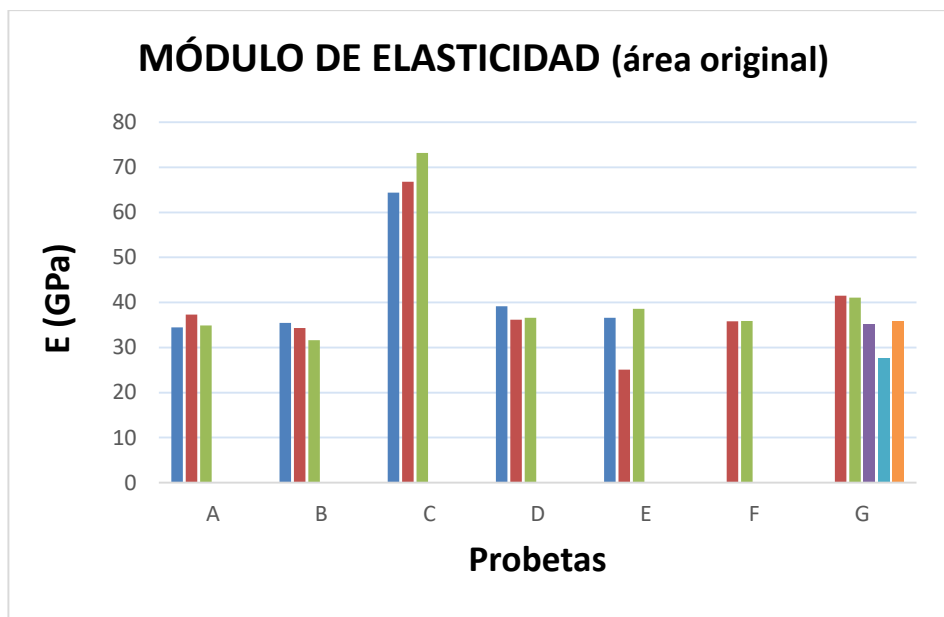


Figura 8-22. Módulo de Elasticidad referido al área original de todas las probetas.

En segundo lugar, se muestra una gráfica (Figura 8-23) para analizar la diferencia de módulo de Elasticidad referido al área reforzada (zona con parche) entre las probetas.

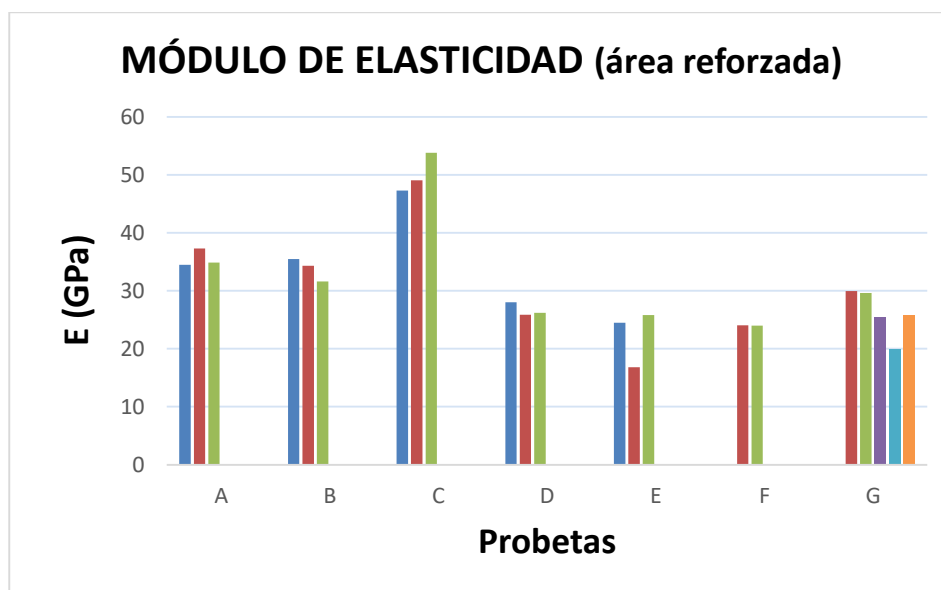


Figura 8-23. Módulo de Elasticidad referido al área reforzada de todas las probetas.

En la Tabla 8-12 se observa el módulo de Elasticidad medio de las probetas resultante del ensayo de tracción:

TIPO	Módulo de Elasticidad (área original) (GPa)	Módulo de Elasticidad (área reforzada) (GPa)
A	35,51	35,51
B	33,7	33,7
C	67,91	51,32
D	37,26	26,67
E	32,21	21,57
F	35,85	24,03
G	35,49	25,58

Tabla 8-12. Módulo de Elasticidad Medio de las probetas

De la misma forma que en el caso anterior con la tensión, ahora se realiza en la Figura 8-24 una comparación del módulo de Elasticidad medio de las probetas referidos a diferente área:

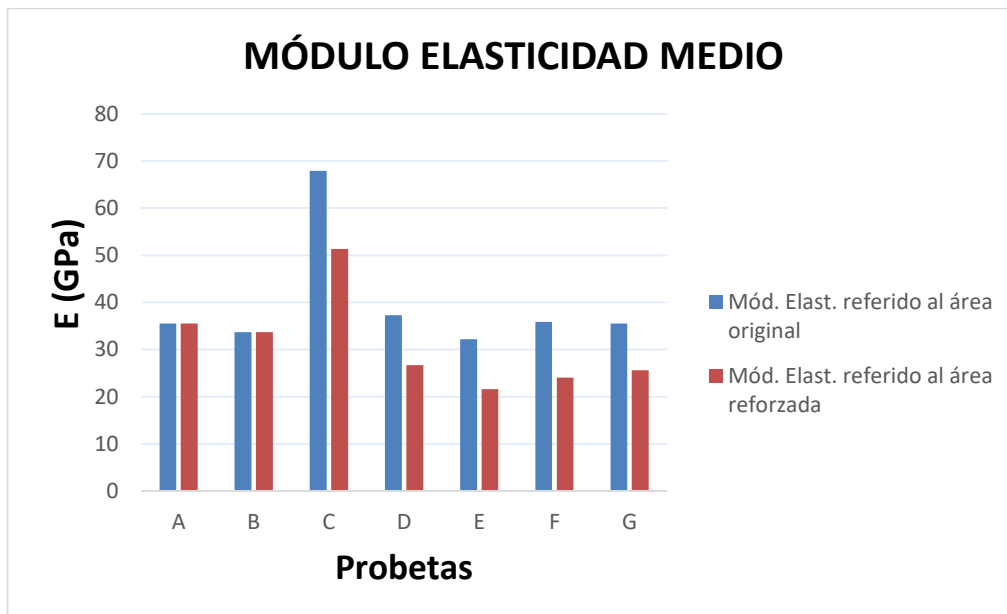


Figura 8-24. Módulo de Elasticidad Medio de las probetas

Analizando el gráfico, la primera barra es el módulo de Elasticidad medio referido al área original y la segunda al área reforzada. En el Tipo A y B se observa que ambas barras tienen el mismo valor debido a que no poseen refuerzo, es el área original. En las demás existen estos 2 tipos de superficie y con ello una diferencia de un 30% de rigidez entre ellas, siendo la rigidez referida al área original (azul) siempre mayor debido a su menor espesor.

Destacar que las probetas Tipo C tienen un mayor módulo de Elasticidad debido a que posee un parche superficial a 0° que le aporta la mayoría de rigidez en el ensayo de tracción.

Comparando las probetas tipo D, E, F y G observamos que no varía mucho la rigidez entre ellas.

9 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este último capítulo se recogen las ideas de mayor interés y se proponen unas nuevas líneas de investigación relacionadas con el proyecto.

Es necesario recordar que el objetivo principal de este proyecto es determinar la eficacia de diferentes métodos de reparación con manta térmica en paneles de material compuesto. Por ello, se han fabricado y resanado para eliminar los defectos. Posteriormente, se han colocado unos parches en cada uno de los paneles para completar la zona eliminada y se han curado en un instrumento de curado llamado Hotbonder. Por último, se han ensayado las probetas a tracción hasta la rotura para determinar la resistencia que tienen los laminados.

Después de realizar la serie de ensayos a fin de determinar el comportamiento a tracción de las configuraciones diseñadas se ha llegado a las siguientes **conclusiones**:

- Los procesos de resanado han sido correctos, aunque se esperaba que se pudiese resanar hasta la última lámina. Se ha comprobado que es muy difícil, puesto que esta es muy quebradiza.
- Los ensayos de curado con manta térmica han sido más que satisfactorios, ya que se ha observado una buena integración entre el parche y el panel. Además, algunos paneles presentaban grandes deformaciones y se ha conseguido que con el curado obtuviese una forma plana, como si fuese un panel virgen.
- El parche a 0° de la probeta C solo le aporta rigidez, pero disminuye su resistencia puesto que se produce una concentración de tensión en el borde debido a la orientación de este. No merece la pena realizar esta reparación, ya que el tiempo de curado del parche es elevado y sus propiedades no son muy convenientes.
- Dependiendo de muchos detalles, la estructura reparada suele ser de alrededor un 60-80% tan resistente como la estructura original sin daños [2]. Analizando los porcentajes, se observa que las configuraciones reparadas tipo step D, E y G resisten en torno a 60-70%. Debe ser parte del criterio del ingeniero el decidir si utilizar este tipo de componentes reparados dependiendo de muchas condiciones y especificaciones, ya que se suelen reparar elementos de responsabilidad, como por ejemplo en aviones.
- Se podría pensar que al unirle unos extra-plyes, la rigidez aumentaría hasta un valor mucho mayor que las probetas vírgenes, pero no es el caso, ya que el parche no es muy resistente y estas láminas extra son a 90°, en las cuales la mayor parte de la tensión en el ensayo de tracción se la lleva la resina y no la fibra.
- Se puede hacer una estructura tan resistente como la original, pero se deben agregar capas de reparación adicionales (extra-plyes) para compensar la pérdida de resistencia causada por la reparación. Esto significa que la reparación no será perfectamente al ras, y también que la estructura reparada será más rígida que la original. La rigidez extra puede llegar a ser un problema, por ejemplo, si la estructura se flexiona significativamente bajo carga, los "puntos rígidos" causados por una reparación pueden causar fallos en los bordes de la reparación. En cambio, si la estructura se carga principalmente en tensión o compresión rectas, lo más probable es que una reparación más rígida sea buena. [2]
- Se ha comprobado que el parche de prepreg y adhesivo debe completar el ciclo de curado según las condiciones del fabricante. Las probetas tipo F no llegaron a curar a los 180 °C, puesto que se paró el ciclo a los 160 °C, por ello no alcanzan su resistencia óptima como las probetas tipo E.
- En las probetas con diferente espesor, original (sin refuerzo) y reforzado, la tensión y rigidez varían un 30% según la superficie escogida.

Como **desarrollos futuros** se proponen varios temas:

- Variar el tamaño de escalón de resanado para determinar la influencia de su modificación (en nuestro caso fue de 1cm). Mientras mayor sea el tamaño de los escalones, mayor será el área de la unión adhesiva y menor la transferencia de carga sobre la unión (Figura 9-1).

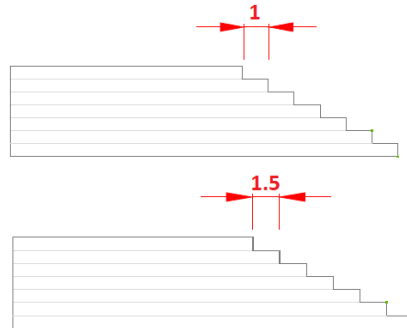


Figura 9-1. Medida del escalón del panel.

- Variar el tamaño del espacio entre las placas para determinar la influencia de su modificación (en nuestro caso fue de 3cm) (Figura 9-2).

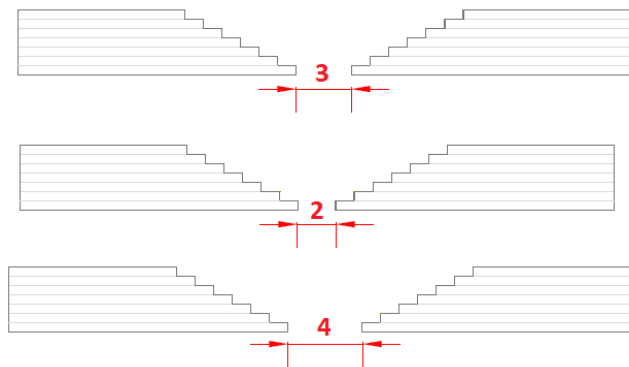


Figura 9-2. Medida de espacio entre placas

- Colocación de más extra-plies para proporcionarle mayor resistencia y rigidez.

- Otra técnica de reparación alternativa a la de mantas térmicas como puede ser la prensa de platos calientes.

- Comprobar la respuesta a otros ensayos estáticos, como por ejemplo a flexión, y a ensayos dinámicos, como por ejemplo a fatiga.

REFERENCIAS

- [1] J. Cañas, F. París, J.C. Marín, J.J. Justo, <<Temario de la asignatura Mecánica de Materiales Compuestos, ETSI, Grado Ingeniería de Tecnologías Industriales 2017-2018>>
- [2] Abaris Training Resources, Inc & NetComposites, <<Guide Repair>>
<https://netcomposites.com/guide-tools/guide/repair/>
- [3] Hexel Composites, <<Composite repairs>>, Publication No. UTC 102 , Abril 1999
http://learn.skillman.eu/pluginfile.php/337/mod_resource/content/1/Composite_Repair.pdf
- [4] Nexus Projectes, <<Métodos de fabricación>>
<http://www.nexusprojectes.com/metodos.aspx?lang=es>
- [5] Aeroform France, <<User Manual Hotbonder AHB-380Dv3 iss 3.3.>>
- [6] Wikipedia, Página web (Consultado el día 10/10/2018)
<https://es.wikipedia.org/wiki/Autoclave>
- [7] Eulogio Santos De La Cruz, Néstor Cancino Vera, Julio Yenque Dedios, David Ramírez Morales, Máximo Palomino Pérez, <<Revista da la facultad de ingeniería industrial>>, Vol. (8) 1: pp. 25-28 (2005) UNMSM EL ULTRASONIDO Y SU APLICACIÓN
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/Vol8_n1/a05.PDF
- [8] UNE-EN 2597:1999, <<Material aeroespacial. Plásticos reforzados de fibra de carbono. Laminados unidireccionales. Ensayo de tracción perpendicular a la dirección de las fibras.>>, abril 1999
- [9] UNE-EN 2561:1996, <<Material aeroespacial. Plásticos reforzados de fibra de carbono. Estratificados unidireccionales. Ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra.>>, junio 1996
- [10] F. París, J. Cañas, J.C. Marín y A. Barroso, << Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos >>, Sección de Publicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

