

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Transmisión de cargas en uniones de reparación en paneles de material compuesto

Autor: Juan Diego González Villalba

Tutores: Jesús Justo y Federico París

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

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Transmisión de cargas en uniones de reparación en paneles de material compuesto

Autor:

Juan Diego González Villalba

Tutor:

Jesús Justo Estebanz

Profesor ayudante Doctor

Federico París Carballo

Catedrático de Universidad

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Transmisión de cargas en uniones de reparación en paneles de material compuesto

Autor: Juan Diego González Villalba

Tutores: Jesús Justo & Federico París

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

La realización de este proyecto ha sido posible gracias al enorme apoyo de mis padres y a la atención y colaboración de mis tutores así como del personal del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales, tanto por su atención a la hora de prestar ayuda en el manejo de máquinas y herramientas de laboratorio, como por el asesoramiento a la hora de orientar el proyecto.

Mención especial a mis compañeros de fatiga que han hecho que este arduo camino se convierta en algo no solo mucho más fácil si no también en pura alegría. Por todo eso que nos llevamos y que nos queda, gracias Héroes sin capa.

Juan Diego González Villalba
Estudiante de Ingeniería Aeronáutica
Sevilla, 2016

Resumen

Los negativos resultados obtenidos en recientes investigaciones elaboradas en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla acerca de la efectividad de las reparaciones en paneles de material compuesto tipo *Step Sanded* motivan entender las causas así como intentar mejorar el método de reparación.

El objetivo principal de este proyecto consiste en analizar experimentalmente cómo se transmiten las cargas en uniones de paneles análogas a las uniones que se producen en las reparaciones reales entre las distintas láminas que constituyen la estructura. Para tal cometido se fabricarán distintas configuraciones estructurales y se ensayarán a tracción hasta la rotura con vistas a someter a estudio varios paneles con reparación real.

Abstract

Negative results of recent research carried out in the Laboratory of Elasticity and Strength of Materials School of Engineering of Seville about the effectiveness of repairs in composite panels type Step Sanded motivate understand the causes and try to improve the repair method.

The main goal of this project is to experimentally analyze how loads are transmitted in panel joints similar to joints of actual repairs between the different sheets making up the structure. For this purpose different structural configurations are manufactured and tested to failure with a view to submitting a study some panels with real repair.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
1.1. <i>Reparaciones de Materiales compuestos</i>	2
1.1.1 Daños típicos	4
1.1.2 Técnicas de Reparación	4
1.1.2.1 Reparación de tipo adhesiva (Bonded Repair)	5
1.1.2.1.1 Materiales utilizados en reparación	8
1.1.2.1.2 Procedimiento para realizar la reparación	8
1.2. <i>Motivación y objetivos</i>	9
1.3. <i>Estrcutura del proyecto</i>	9
2 Plan de Ensayos y Fabricación de Probetas	10
2.1 <i>Configuraciones estructurales</i>	10
2.1.1 Configuración básica, Tipo A	10
2.1.2 Configuraciones Tipo B	11
2.1.3 Configuraciones Tipo C	13
2.1.4 Aplicación a paneles reparados, Configuraciones Tipo D	14
2.2. <i>Proceso de fabricación de paneles</i>	17
2.2.1. Laminación	17
2.2.1.1. Procedimiento	20
2.2.2. Curado	23
2.2.2.1. Bolsa de compactación final y montaje de configuraciones	24
2.2.2.2. Autoclave	27
2.3. <i>Resanado y reparación de paneles en configuración D</i>	29
2.3.1. Resanado en configuración D1	29
2.3.2. Proceso de Reparación en Configuraciones D	31
2.4. <i>Normalización de probetas</i>	33
3 Resultados de los Ensayos	41
3.1. <i>Tipo A</i>	43
3.2. <i>Tipo B1</i>	45
3.3. <i>Tipo B2</i>	46
3.4. <i>Tipo B3</i>	47
3.5. <i>Tipo B4</i>	48
3.6. <i>Tipo C1</i>	49
3.7. <i>Tipo C2</i>	50
3.8. <i>Tipo C3</i>	52

3.9. Tipo C4	52
3.10. Tipo D1	54
3.11. Tipo D2	55
4 Análisis de los resultados	58
4.1. Resultados por tipo	58
4.2. Comparativas	70
5 Conclusiones y Desarrollos Futuros	73
Referencias	78
Anexo	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Tipos de reparación en función de condiciones externas	5
Tabla 2-1. Distinción de los paneles tipo B	12
Tabla 2-2. Distinción de los paneles tipo C	13
Tabla 2-3. Listado de láminas a cortar	17
Tabla 2-4. Caracterización de probetas tipo A	35
Tabla 2-5. Caracterización de probetas tipo B1	35
Tabla 2-6. Caracterización de probetas tipo B2	36
Tabla 2-7. Caracterización de probetas tipo B3	36
Tabla 2-8. Caracterización de probetas tipo B4	37
Tabla 2-9. Caracterización de probetas tipo C1	37
Tabla 2-10. Caracterización de probetas tipo C2	38
Tabla 2-11. Caracterización de probetas tipo C3	38
Tabla 2-12. Caracterización de probetas tipo C4	39
Tabla 2-13. Caracterización de probetas tipo D1	39
Tabla 2-14. Caracterización de probetas tipo D2	40
Tabla 4-1. Resultados tipo A	59
Tabla 4-2. Resultados tipo B1	60
Tabla 4-3. Resultados tipo B2	61
Tabla 4-4. Resultados tipo B3	62
Tabla 4-5. Resultados tipo B4	63
Tabla 4-6. Resultados tipo C1	64
Tabla 4-7. Resultados tipo C2	65
Tabla 4-8. Resultados tipo C3	66
Tabla 4-9. Resultados tipo C4	67
Tabla 4-10. Resultados tipo D1	68
Tabla 4-11. Resultados tipo D2	69
Tabla 4-12. Tensión de rotura media de cada configuración	71
Tabla 5-1. Comparación en tipo D	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Secuencia de decisiones en reparaciones	3
Figura 1-2. Daños típicos	4
Figura 1-3. Reparación adhesiva	6
Figura 1-4. Parche adhesivo superpuesto	6
Figura 1-5. Reparación cónica	7
Figura 1-6. Reparación cónica	7
Figura 2-1. Configuración tipo A	11
Figura 2-2. Configuración tipo B	12
Figura 2-3. Alzado de Configuración C	13
Figura 2-4. Vista en planta de Configuración C	14
Figura 2-5. Planta de paneles REP1 y REP4	14
Figura 2-6. Configuración D1 antes de reparación	15
Figura 2-7. Configuración D1 tras la reparación	15
Figura 2-8. Configuración D2 antes de reparación	16
Figura 2-9. Configuración D2 tras reparación	16
Figura 2-10. Condiciones de trabajo en Sala Limpia	20
Figura 2-11. Rollo de fibra de Carbono antes de ser extraído	21
Figura 2-12. Disposición para el corte de láminas	21
Figura 2-13. Compactación de láminas	22
Figura 2-14. Aplicación de vacío para compactación	23
Figura 2-15. Esquema de bolsa de vacío	23
Figura 2-16. Montaje de configuración B4 sobre la plancha de la bolsa de vacío	24
Figura 2-17. Paneles protegidos con corcho para evitar la fluencia	25
Figura 2-18. Cierre final de la bolsa de vacío	26
Figura 2-19. Bolsa de vacío finalizada	26
Figura 2-20. Ciclo termodinámico para curado en Autoclave	27
Figura 2-21. Autoclave	28
Figura 2-22. Paneles configuración C extraídos de Autoclave	28
Figura 2-23. Paneles C4 y B4 defectuosos	29
Figura 2-24. Fresadora empleada para resanado	30
Figura 2-25. Proceso de resanado en panel D1	31
Figura 2-26. Lijado de la superficie en paneles D	31

Figura 2-27. Adhesión de las capas reparadoras en configuración D	32
Figura 2-28. Medidas de las probetas en cm	33
Figura 2-29. Equipo necesario para el corte de los paneles en probetas	33
Figura 2-30. Probetas normalizadas	34
Figura 3-1. Esquema de la máquina INSTRON e imagen real	41
Figura 3-2. Posicionamiento de la Probeta en la máquina INSTRON	42
Figura 3-3. Leyenda de identificación de probetas	43
Figura 3-4. Representación tensión-desplazamiento en configuración A	43
Figura 3-5. Rotura en probeta de tipo A	44
Figura 3-6. Representación tensión-desplazamiento en configuración B1	45
Figura 3-7. Roturas en probetas tipo B	46
Figura 3-8. Representación tensión-desplazamiento en configuración B2	46
Figura 3-9. Representación tensión-desplazamiento en configuración B3	47
Figura 3-10. Representación tensión-desplazamiento en configuración B4	48
Figura 3-11. Representación tensión-desplazamiento en configuración C1	49
Figura 3-12. Representación tensión-desplazamiento en configuración C2	50
Figura 3-13. Rotura en probeta tipo C2	51
Figura 3-14. Detalle de rotura preliminar en Configuración C	51
Figura 3-15. Representación tensión-desplazamiento en configuración C3	52
Figura 3-16. Representación tensión-desplazamiento en configuración C4	52
Figura 3-17. Curva tensión-desplazamiento para ensayo de rotura preliminar	53
Figura 3-18. Probeta tipo C4 con rotura preliminar	54
Figura 3-19. Representación tensión-desplazamiento en configuración D1	54
Figura 3-20. Esquema de rotura en configuración D1	55
Figura 3-21. Representación tensión-desplazamiento en configuración D2	55
Figura 3-22. Esquema de rotura en configuración D2	56
Figura 3-23. Rotura de probetas tipo D	56
Figura 4-1. Gráfico de tensiones de rotura en tipo A	59
Figura 4-2. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B1	60
Figura 4-3. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B2	61
Figura 4-4. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B3	62
Figura 4-5. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B4	63
Figura 4-6. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C1	64
Figura 4-7. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C2	65
Figura 4-8. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C3	66
Figura 4-9. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C4	67
Figura 4-10. Gráfico de tensiones de rotura en tipo D1	68
Figura 4-11. Gráfico de tensiones de rotura en tipo D2	69

Figura 4-12. Comparativa de tensiones de rotura en todas las configuraciones	70
Figura 5-1. Sensibilidad de la tensión de rotura con el refuerzo	74
Figura 5-2. Agarre de mordazas de la máquina INSTRON a probetas tipo C	75

1 INTRODUCCIÓN

*“La ciencia humana consiste más en destruir errores
que en descubrir verdades”.*

- Sócrates -

El uso de materiales compuestos en aplicaciones de carácter industrial como por ejemplo la aeroespacial o la producción de energía eólica, se ha visto enormemente incrementado a lo largo de las últimas décadas. Debido a sus extraordinarias propiedades, el uso de estos materiales permite la construcción de estructuras más ligeras, grandes y resistentes. Sin embargo, el uso de estos materiales en componentes o estructuras de alta responsabilidad estructural se ve coartado por la deficiencia de conocimiento sobre su fiabilidad estructural. En otras palabras, debido a la configuración de dichos materiales aparecen nuevos modos de fractura que deben ser comprendidos y controlados para mejorar el diseño de estructuras de material compuesto y garantizar, así, su misión como portadores de carga.

Este tema ha motivado muchos esfuerzos en investigación durante los últimos años, incluso desde el punto de vista del mantenimiento operacional. Durante el tiempo de servicio, se realizan rigurosas inspecciones no destructivas en busca de posibles defectos a fin de prevenir riesgos en la estructura, resultando a veces en la toma de decisión entre sustituir o reparar la pieza en cuestión.

Es este uno de los pilares donde reside la motivación de este documento, pues la mejora de procesos de reparación puede tener repercusiones positivas desde el punto de vista económico, dado el elevado coste de fabricación que llevan asociadas las piezas de material compuesto.

El fin de las reparaciones es el de llevar la estructura dañada a un rango aceptable de rendimiento en base a propiedades tales como rigidez y durabilidad, teniendo por acabado ideal aquel estado original de la pieza. Sin embargo, hay bastantes variables que toman un papel importante en la posterior transmisión de cargas en este tipo de materiales, tales como el espesor, orientación de la fibra, calidad, etc...

Para introducir el problema que se va a tratar en este proyecto (retomado en la sección 1.2.Motivación y Objetivos), es preciso en primera instancia tener presente una serie de conceptos del ámbito de las reparaciones de Materiales Compuestos.

1.1. Reparaciones de Materiales compuestos

Una reparación tiene el objetivo de recuperar una estructura dañada hasta un nivel aceptable en términos de dureza, durabilidad, rigidez y rendimiento de la pieza. Idealmente una buena reparación debería devolver a la pieza la apariencia y propiedades propias de la misma en su estado original.

Antes de la realización de una reparación, se requiere una evaluación de daños, la selección de un criterio de reparación, la elección de materiales adecuados y los procesos que se realizarán, especificando el área y tamaño de la reparación. La mayoría de las reparaciones se llevan a cabo generalmente mediante la utilización de parches.

El diagrama de la figura 1-1 extraído de [1] es un esquema que contiene los distintos pasos en los que se basa una reparación de materiales compuestos.

Lo que en él se describe es que una vez detectado el daño, se procede a realizar una evaluación del mismo, con el fin de determinar si será reparado, o en caso contrario será desechado. En el caso de que el daño sea reparable, se determinará si la reparación que se tendrá que hacer será fácil o compleja. Las reparaciones fáciles son generalmente pequeñas y no afectan a la integridad estructural del componente, son las conocidas como reparaciones cosméticas, mientras que las reparaciones complejas son realizadas cuando el daño es mayor y puede afectar al rendimiento de la pieza.

En algunos casos, cuando se tiene una pieza 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.

Sea cual fuese el tipo de reparación que se haya realizado, posteriormente se deberá realizar una inspección, generalmente mediante ensayos no destructivos, con el fin de poder determinar la calidad de la reparación realizada, prestando principalmente atención a la zona de unión de la parte reparada y la original.

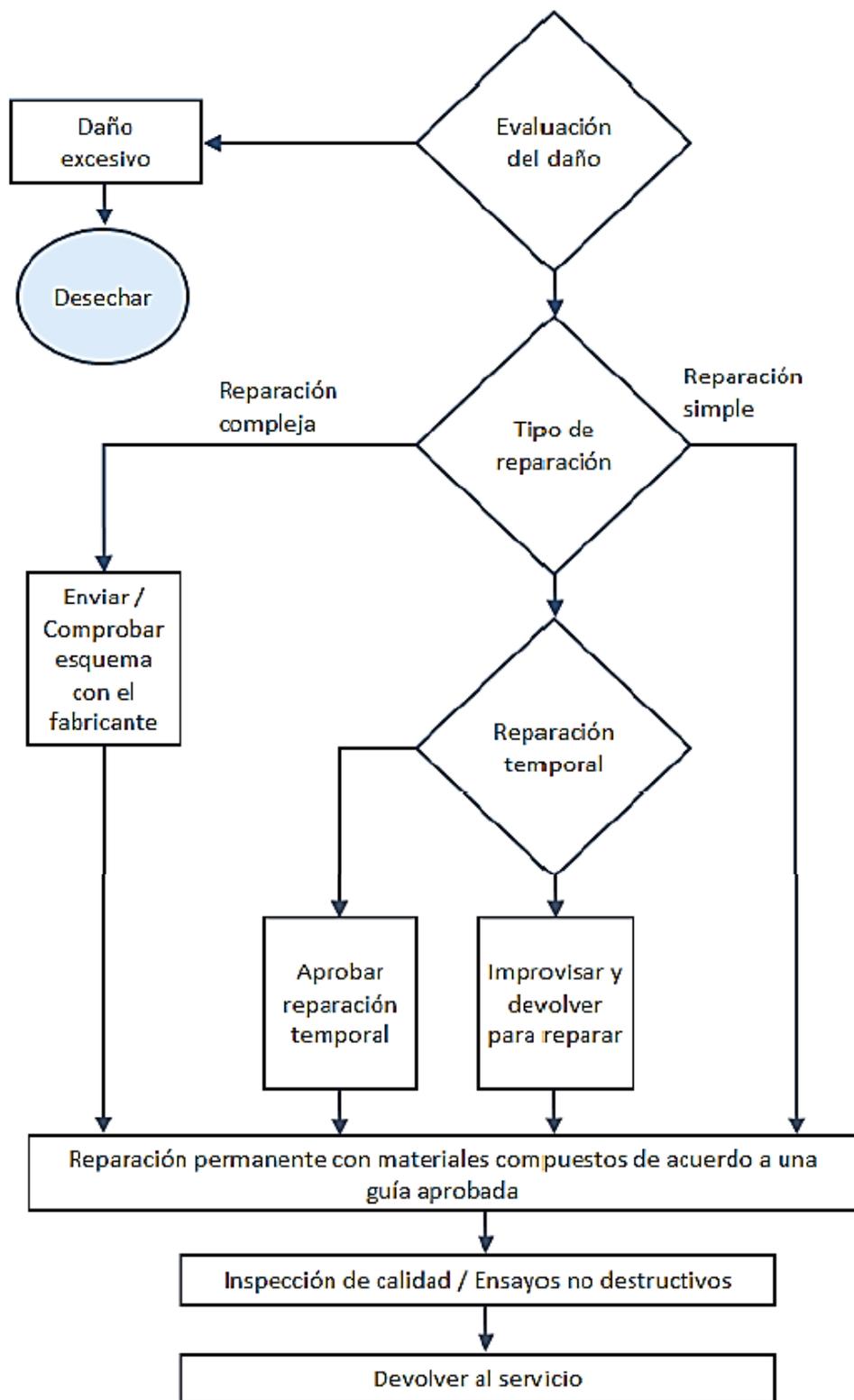


Figura 1-1. Secuencia de decisiones en reparaciones

1.1.1 Daños típicos

Se muestran a continuación ejemplos de algunos daños típicos en laminados y en estructuras tipo sándwich.

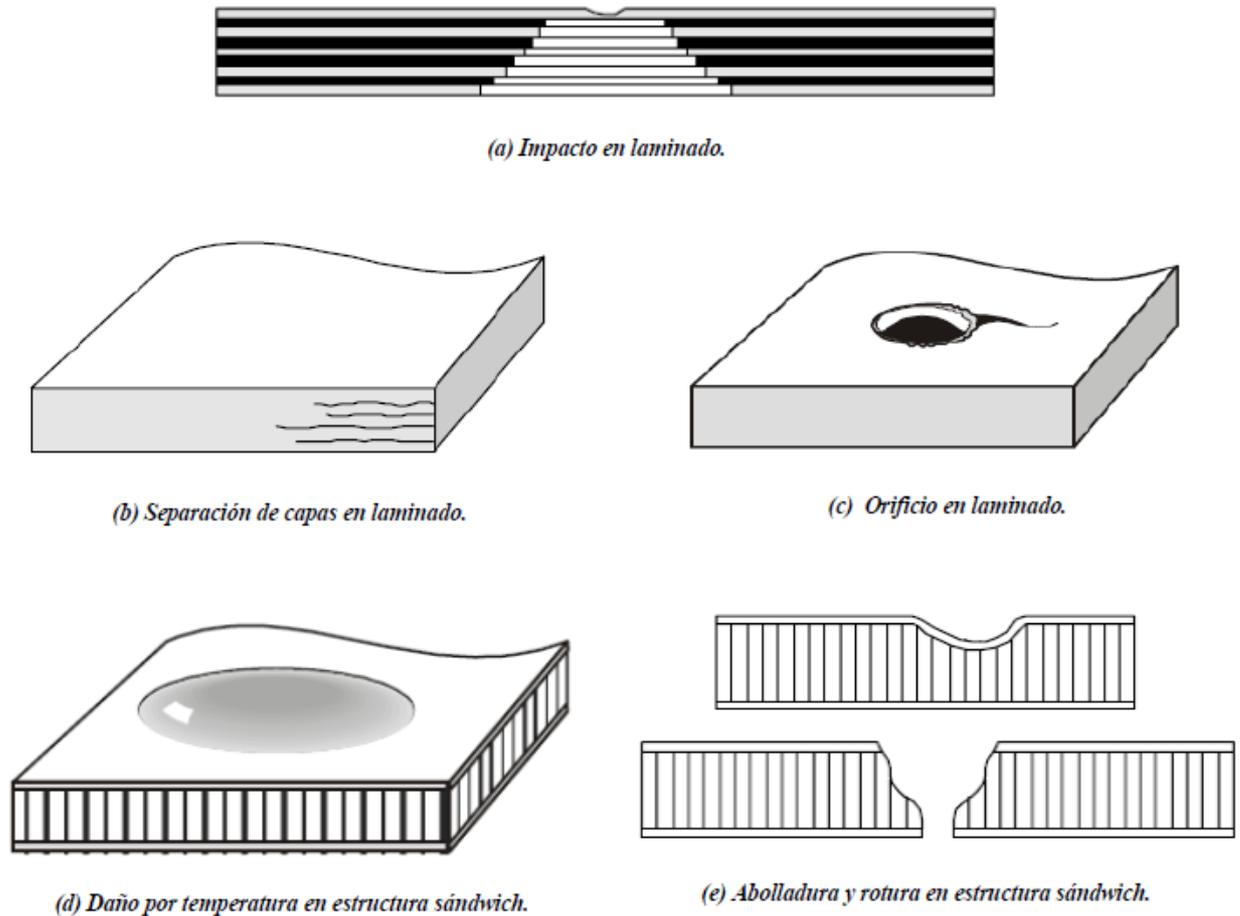


Figura 1-2. Daños típicos

Para la consecución de este proyecto, se simulará el daño en un panel (cuya configuración se detallará en la sección 2.1.4) mediante la eliminación de material en una franja de éste. Asimismo, en la sección 3 del presente proyecto, se analizarán algunas roturas en las que tiene lugar la delaminación, según se presenta el caso b) de la figura 1-2.

1.1.2 Técnicas de Reparación

La tarea de la reparación comienza cuando se ha inspeccionado y evaluado el daño a reparar, teniendo como finalidad la de devolverle a la estructura las propiedades que tenía originalmente.

Generalmente las piezas estructurales a reparar están sometidas a distintos tipos de carga, por lo que con la reparación se trata de reforzar las zonas debilitadas de la estructura agregando materiales nuevos los cuales se adhieren a la estructura, ya sea mediante uniones abulonadas o adhesivas. Por lo tanto, se podría decir que la reparación no es más que una unión donde se logra la transmisión de cargas desde la estructura hacia el parche o viceversa.

Los criterios de reparación de diseño, la pieza a reparar, así como también los equipos con los que se cuenta determinaran si es preferible realizar una reparación abulonada (bolted) o mediante el uso de adhesivos (bonded). En la tabla 1-1 se muestran algunas condiciones que ayudan a determinar qué tipo de reparación es preferible.

Tabla 1-1. Tipos de reparación en función de condiciones externas

Condición	Reparación abulonada	Reparación adhesiva
Ligeramente cargada, delgada < 2.5 mm		X
Altamente cargada, gruesa > 2.5 mm	X	
Altas tensiones de pelado	X	
Estructura de panel de abeja		X
Superficies de adherencia limpias y secas	X	X
Superficies de adherencia mojadas o contaminadas	X	
Requiere sellado	X	X
Requiere desmontaje	X	
Recuperar la resistencia sin marcas		X

Aunque es posible clasificar las reparaciones en estos dos tipos, abulonadas o adhesivas, cada una de ellas se puede realizar utilizando distintos métodos.

El parche que se utiliza se puede pre-curar y adherir a la pieza a reparar, puede ser realizado mediante preimpregnado y cocurado al mismo tiempo que el adhesivo, o se puede realizar utilizando una tela seca, resina y tras ello cocurada.

Los ciclos de curado pueden variar en lo que a duración del tiempo del proceso se refiere, así como la presión de curado, incrementado el número de posibilidades para realizarse la reparación.

Conviene precisar que en este proyecto se contemplará el tipo de reparación con adhesivo.

1.1.2.1 Reparación de tipo adhesiva (Bonded Repair)

Los tipos de reparaciones más comunes son la utilización de parches internos o externos realizados con el mismo material de la pieza a reparar.

Los parches externos generalmente son del tipo escalonado (stepped), mientras que las reparaciones internas se suelen realizar generando una superficie cónica (scarfed), como se muestra la figura 1.3.

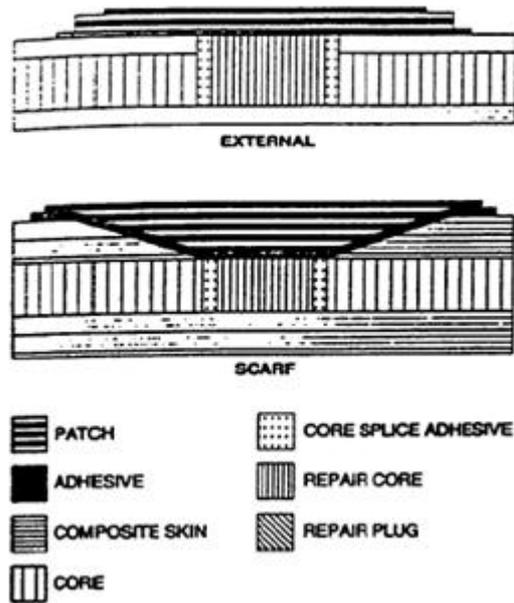


Figura 1-3. Reparación adhesiva

La función del adhesivo ubicado entre el parche y la pieza es la de transferir la carga que soporta ésta hacia el parche. Asimismo, los materiales utilizados en este tipo de reparación deben superponerse y estar adecuadamente adheridos a las capas del laminado original.

Se presentan a continuación los tipos de reparaciones adhesivas más comunes.

Reparación usando parche superpuesto (Patch repair)

En este caso el espesor del laminado original está compuesto por capas de relleno y los materiales utilizados en la reparación son adheridos a la superficie del laminado.

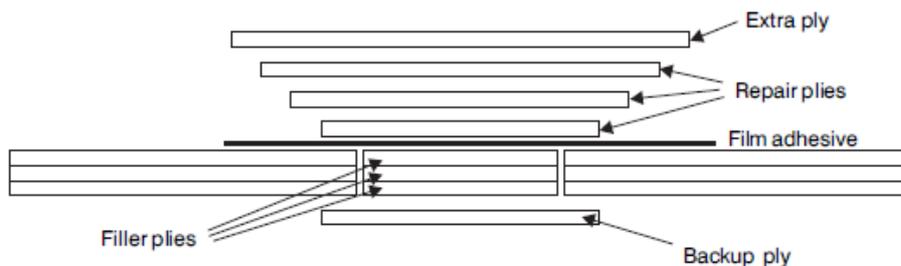


Figura 1-4. Parche adhesivo superpuesto

Las ventajas de este modelo pasan por la rapidez y simpleza a la hora de materializarlo, además de requerir una preparación mínima.

Sin embargo, el laminado reparado poseerá mayor espesor y será más pesado que el original.

Reparación con superficie cónica (Taper sanded repair)

Se elimina la superficie dañada con forma cónica y se reponen las capas sobre ella.

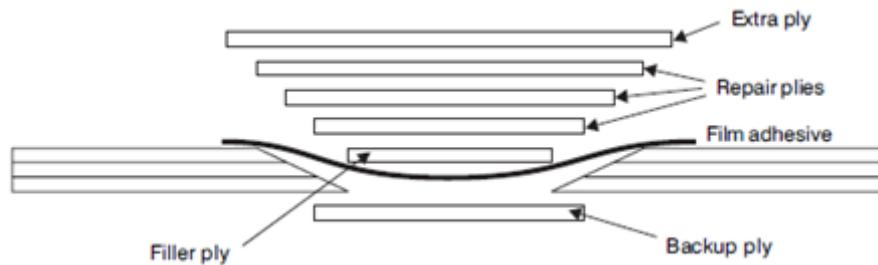


Figura 1-5. Reparación cónica

Las principales ventajas son que la reparación posee un espesor un poco mayor que el original, que cada nueva capa utilizada en la reparación se encuentra superpuesta con la capa a reparar, aportando mayor rigidez y posibilidad de soportar cargas y que se logra una buena adhesión entre las capas.

La principal desventaja es el grado de dificultad de la reparación, lo que conlleva una gran habilidad y gran cantidad de tiempo para llevarla a cabo.

Reparación escalonada (Step sanded repair)

Es muy similar a la anterior, la principal diferencia es que la eliminación del material se ha realizado escalonadamente.

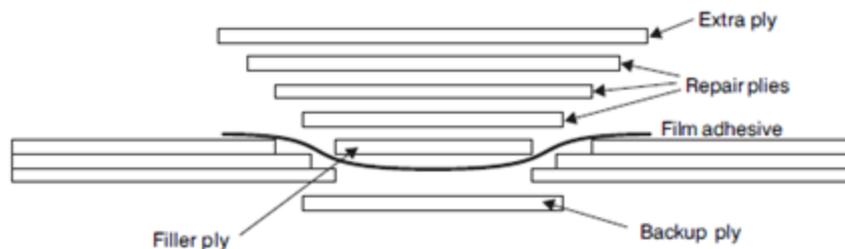


Figura 1-6. Reparación cónica

Sus ventajas e inconvenientes son prácticamente las mismas que las del tipo *Taper sanded repair*.

Las investigaciones de las que nace este proyecto se realizaron para este tipo de reparación, con lo que se procede a entrar un poco más en detalle en los siguientes subapartados.

1.1.2.1.1 Materiales utilizados en reparación

Este tipo de reparaciones requieren la elección del material que se utilizara para el parche y del adhesivo. La elección de ambas no puede ser independiente ya que los parámetros de curado del adhesivo y del material del parche deben ser compatibles para un posterior cocurado.

La realización de este tipo de reparación también requiere la utilización de materiales auxiliares para realizar la misma, que no quedarán en la pieza reparada. Varios materiales utilizados en este tipo de reparación requieren de una gran habilidad manual por parte del operario, además de en algunos casos ser necesario el control del ambiente en donde se lleva a cabo la reparación.

Los parches de metal utilizados para este tipo de reparación son construidos utilizando hojas de este material que se unirán formando un parche con forma escalonada en sus bordes. El mismo método es utilizado para parches de material compuesto pre curado, donde las láminas son hechas de dos o más tejidos unidireccionales. En algunos casos estos tipos de parche son realizados con el mismo material de la pieza a reparar.

Los adhesivos que se utilizan pueden separarse en dos categorías: pastosos o líquidos, que formarán una película sobre la superficie. Aunque las películas proveen una mayor uniformidad en el área de contacto entre adhesivo y el parche que los adhesivos en pastas, la inaccesibilidad de áreas a reparar o la falta de equipos de refrigeración hacen necesario la utilización de los adhesivos pastosos.

Las reparaciones del tipo wet lay up generalmente utilizan adhesivos pastosos debido a la compatibilidad con las resinas en términos de las características del curado. En el caso de los adhesivos que forman una película, estos se utilizan generalmente cuando los parches son realizados mediante pre impregnado, debido a que se requiere una mayor temperatura y presión de curado.

1.1.2.1.2 Procedimiento para realizar la reparación

Las reparaciones realizadas mediante la utilización de adhesivos requieren un estricto control del proceso de reparación y el medio ambiente de trabajo.

Las cuatro actividades que pueden afectar este tipo de reparaciones son la preparación de la superficie y el parche, la aplicación del adhesivo, utilización de la bolsa de reparación y curado. Cada una de estas actividades puede variar dependiendo la reparación a realizar, el material a utilizar y la pieza a reparar.

Una vez que se haya determinado el tamaño del parche a realizar se debe proceder a realizar el mismo, generalmente por laminación por vía seca o pre impregnado. En el caso de que se quiera realizar el parche por el proceso de wet lay up, se debe partir de un tejido el cual debe ser cortado con el tamaño del parche antes de ser impregnado con la resina.

Antes de la colocación del adhesivo, el parche, así como también la superficie de la pieza debe ser limpiada. En el caso de parches de aluminio o titanio, estos requieren de una preparación especial.

Los adhesivos del tipo de película deben ser unidos al parche, recortados y por ultimo debe ser aplicado al área dañada.

1.2. Motivación y objetivos

Los negativos resultados obtenidos en recientes investigaciones en reparaciones tipo *Step Sanded* motivan a entender en primer lugar la forma en la que se transmiten las cargas en uniones de paneles análogas a las que se producen en las zonas de unión de paneles con reparación, naciendo por tanto la iniciativa de este proyecto.

En definitiva, el objetivo de este trabajo consiste en analizar cómo se produce la transmisión de cargas en distintas configuraciones de uniones por solape en paneles de fibra de carbono, a fin de extender los resultados a posibles métodos más efectivos de reparación de piezas estructurales.

Los distintos montajes, pruebas de equipo y ensayos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de Sevilla.

En cuanto a las siguientes secciones del documento, es preciso comentar que primeramente se realizará un estudio del procedimiento seguido para obtener los diferentes tipos de configuraciones estructurales a ensayar. Se continuará con la descripción de los ensayos y por ende se analizarán los resultados obtenidos, dando esto pie a conclusiones y desarrollos futuros.

1.3. Estructura del proyecto

En cuanto a las siguientes secciones del documento, es preciso comentar que se organizará como sigue:

- En el Capítulo 2, “Plan de Ensayos y Fabricación de las probetas”, se abordará tanto la descripción teórica de cada una de las configuraciones que se requerirá analizar, como el procedimiento de fabricación que se ha llevado a cabo en el LERM hasta obtener las probetas que se someterán a ensayo.
- En el Capítulo 3, “Resultados de los ensayos”, se detallará la metodología de los ensayos y se expondrán los resultados que de ellos se derivan mayoritariamente mediante gráficas tensión-desplazamiento.
- En cuanto al Capítulo 4, “Análisis de los resultados”, se presentarán en tablas y gráficos para cada tipo y cada probeta los valores de tensión de rotura obtenidos, teniendo en cuenta además el factor estadístico a que está sometida la campaña de ensayos.
- Por ende, en el Capítulo 5, “Conclusiones y Desarrollos futuros”, se recogerán las ideas de mayor interés alcanzadas durante el desarrollo del trabajo, proponiéndose finalmente líneas de investigación relacionadas con el problema abordado en este proyecto.

2 PLAN DE ENSAYOS Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

“El experimento debería diseñarse para abrir tantas ventanas como sea posible a lo imprevisto”.

- Frédéric Joliot-Curie -

En este capítulo se describirán primeramente en detalle las diferentes configuraciones estructurales a analizar desde un punto de vista teórico-cualitativo, así como la metodología seguida en el laboratorio y taller durante el proceso de fabricación de los 11 paneles y su posterior normalización, resultando finalmente en las probetas que se ensayarán.

2.1 Configuraciones estructurales

Los procesos de fabricación que se realizarán en este proyecto comprenden los necesarios para construir 9 paneles (1 tipo A, 4 de tipo B y 4 del tipo C) en los que se trata de emular mediante la disposición del laminado las zonas conflictivas de unión en reparaciones reales. Asimismo se describirá esquemáticamente en esta sección 2 configuraciones en las que se llevará a cabo una reparación real (tipo D).

2.1.1 Configuración básica, Tipo A

Tanto en este tipo como en la familia de tipo B (a esta última se añadirán láminas de refuerzo) se va a partir de dos paneles de dimensión $10 \times 15 \text{ cm}^2$ dispuestos sin ningún tipo de adhesivo y de forma contigua, tal y como se indica en la figura 2-1.

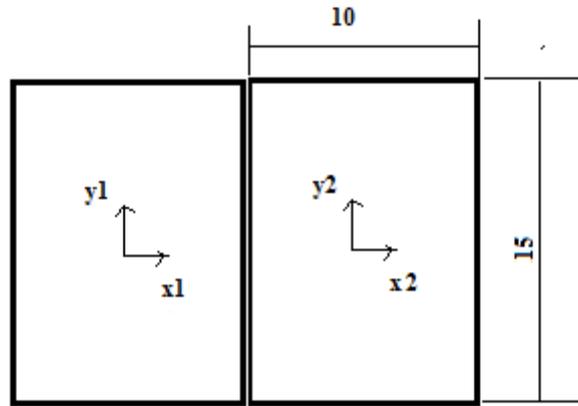


Figura 2-1. Configuración tipo A

Cada uno de estos paneles se corresponde con un laminado de fibra de carbono constituido por 6 láminas cuya fibra está orientada según x_1 y x_2 en sendos paneles. Es preciso destacar que todos los laminados que se fabricarán durante la consecución de este proyecto tendrán, al igual que en este caso, la dirección de la fibra de cada lámina a 0° .

Con el objetivo de clarificar explicaciones e ilustraciones de configuraciones posteriores, los paneles así dispuestos se denominarán en el presente texto como *Simples* y se nombrarán como *paneles S*.

El panel fabricado con configuración A será justamente con la disposición de la figura 2-1.

2.1.2 Configuraciones Tipo B

Esta disposición consta de paneles S dispuestos tal y como se comentó en la anterior sección, con la novedad ahora de tener solapados dos paneles de refuerzo tipo R de ancho d , tal y como se muestra en las vistas esquemáticas de alzado y planta de la figura 2-2.

Se puede observar también la presencia de dos laminados denominados con la etiqueta SAC, es decir, actuarán como material de sacrificio a fin de que durante el curado el conjunto S+R, que es el que se va a someter a estudio, no se deforme fuera del plano.

Es preciso comentar también que la línea roja de la figura se corresponde con material que evitará que solapen R y SAC durante el curado. Para tal cometido se usará una lámina desmoldeante.

Tanto los paneles de refuerzo como los de material de sacrificio estarán constituidos por 3 láminas de la misma fibra de carbono y dispuesta en la misma dirección que la de los paneles S.

Por último, el tipo de configuración vendrá dado por la longitud d del panel de refuerzo, tal y como se especifica en la tabla 2-1.

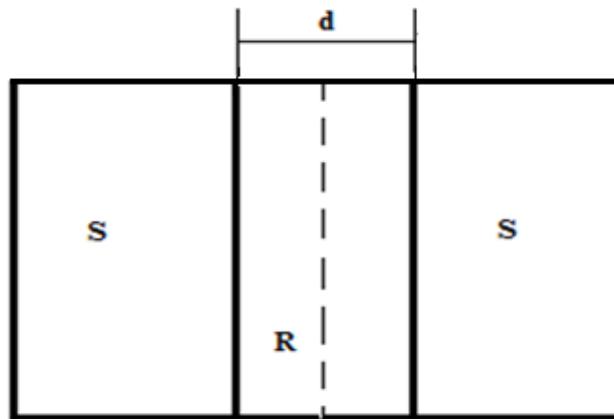
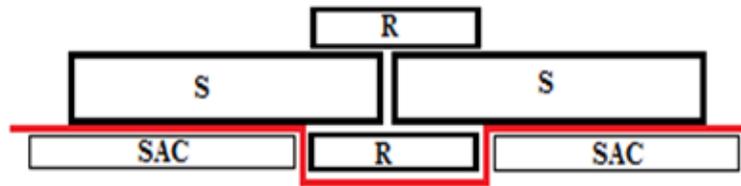


Figura 2-2. Configuración tipo B

Tabla 2-1. Distinción de los paneles tipo B

Tipo	Longitud d (cm)
B1	2
B2	4
B3	6
B4	15

Podemos observar en la tabla 2-1 que la configuración B4 tiene la mayor longitud d , a fin de poder investigar

posteriormente el efecto que tiene en la tensión de rotura del material la colocación de un panel de refuerzo mucho mayor que los de su misma serie.

2.1.3 Configuraciones Tipo C

Este tipo de configuración constará de paneles medios (tipo M) cubiertos por paneles de protección (tipo P) tal y como se muestran en la figura.

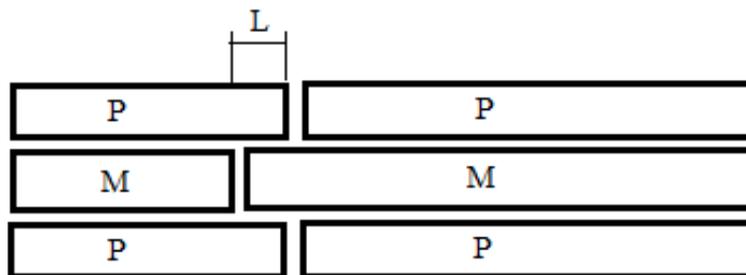


Figura 2-3. Alzado de Configuración C

La familia de tipo C constará de 4 subtipos cuyo elemento distintivo será la longitud L señalada en la figura anterior.

Tabla 2-2. Distinción de los paneles tipo C

Tipo	Longitud L (cm)
C1	1
C2	2
C3	3
C4	8

Se muestran a continuación los paneles M en planta:

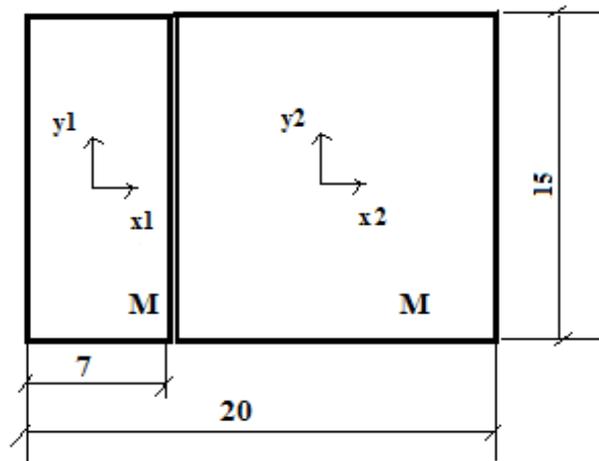


Figura 2-4. Vista en planta de Configuración C

Además, es preciso comentar que se incluye el tipo C4 con el mismo objetivo que el B4 nombrado con anterioridad.

2.1.4 Aplicación a paneles reparados, Configuraciones Tipo D

Se pretende ahora estudiar la rotura de material reparado, para lo cual se establecerán dos configuraciones análogas D1 y D2, cuyas diferencias se detallarán posteriormente.

En este tipo de configuraciones, se usarán paneles tipo REP1 (para configuración D1) y REP4 (para configuración D2), ambos constituidos de 6 y 3 láminas respectivamente, cuyas medidas en planta (en centímetros) se muestran a continuación.

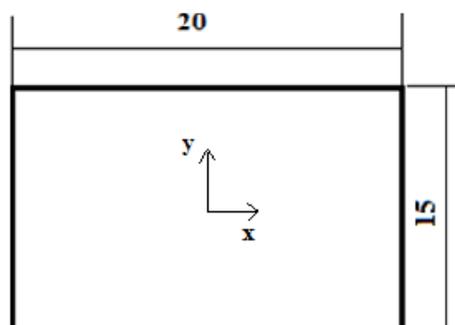


Figura 2-5. Planta de paneles REP1 y REP4

La dirección de la fibra irá según el eje x indicado en el esquema.

La configuración tipo D1 se caracterizará por ser un panel REP1, en el que se eliminarán (una vez curado) 3 capas de material en la zona central con un ancho de 5 cm, resanándose así la estructura para posteriormente repararla y estudiar su rotura. Tras la eliminación de material, se obtendrá un panel como el mostrado en el esquema de la figura 2-6.

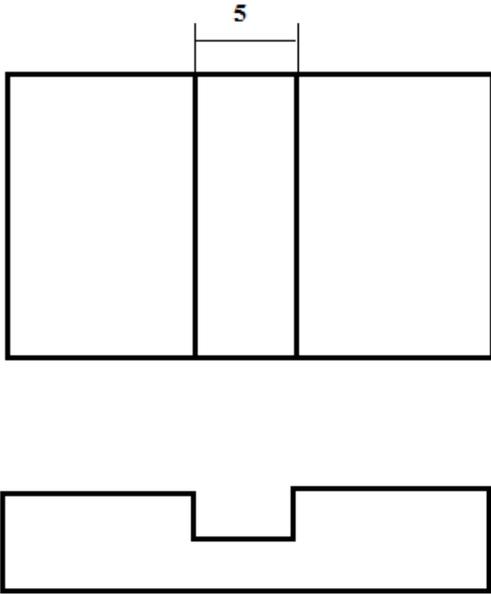


Figura 2-6. Configuración D1 antes de reparación

Finalmente, la estructura será reparada con 3 láminas de 5x15 cm² ubicadas en el hueco existente tras el paso anterior, colocándose además una lámina adicional de 15x15 cm² a fin de completar la reparación adecuadamente, tal como se indicó en el apartado 1.1.2.1 de este proyecto. Las láminas de las estructuras REP2 y REP3 serán emplazadas con la misma dirección de la fibra que REP1. La configuración D1 quedará finalmente como se indica en la siguiente figura:

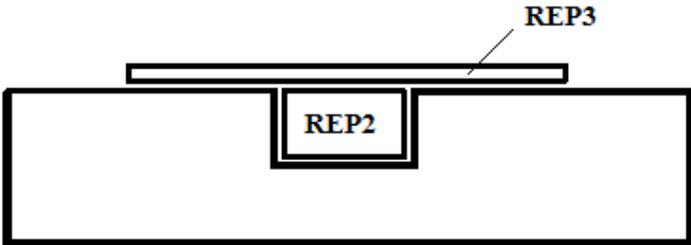


Figura 2-7. Configuración D1 tras la reparación

En cuanto a la configuración tipo D2, es preciso señalar que estará constituida de un panel REP4 formado por 3 láminas $20 \times 15 \text{ cm}^2$ con dirección de fibra 0° , sobre las cuales se colocarán laminados REP5 constituidos por 3 capas $7.5 \times 15 \text{ cm}^2$ según se muestra en la siguiente figura:

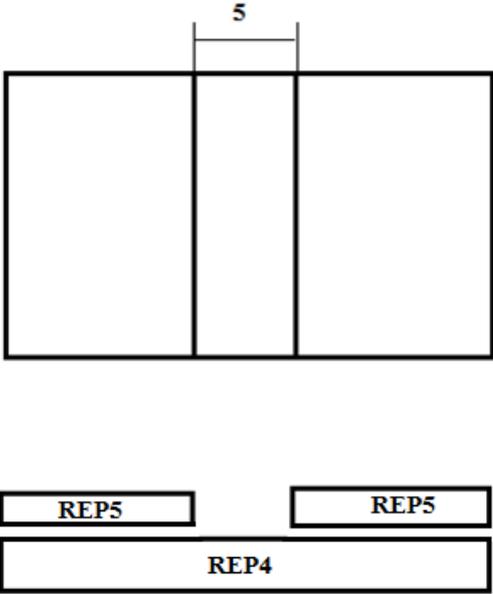


Figura 2-8. Configuración D2 antes de reparación

Como podemos observar, esta configuración es análoga a la D1 tras la eliminación de material, con la particularidad de que con la construcción D2 se ha evitado dicho paso para formar el hueco central, pudiéndose así estudiar posteriormente las consecuencias que tiene el proceso de resanado de material.

Finalmente, realizando la reparación al igual que en el tipo D1, se tiene lo siguiente:

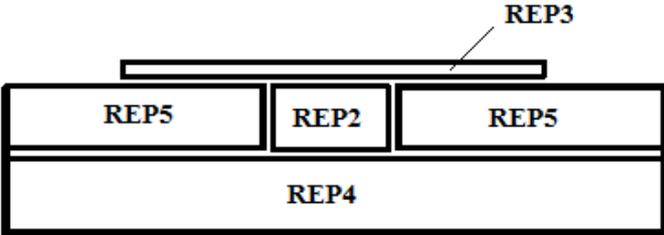


Figura 2-9. Configuración D2 tras reparación

2.2. Proceso de fabricación de paneles

La fabricación de los paneles de material compuesto [6] necesita de dos procesos fundamentales: uno en el que se apilen las láminas de preimpregnado (o fibras sin preimpregnar de resina) según una secuencia siguiendo un molde determinado, como se comentó en la sección anterior, y otro en el que se polimerice la resina que contienen dichas láminas para obtener finalmente los paneles buscados.

Para la consecución de este trabajo se ha hecho uso de fibra de carbono Pre-preg AS4/8552 de curado a alta temperatura (180°C) en formato cinta unidireccional 34%/194 masa de fibra por unidad de área.

Las operaciones complementarias a la etapa de apilado como puede ser el corte, así como los útiles empleados se describirán en mayor detalle en las secciones posteriores.

La reacción de polimerización consiste en la generación de enlaces entre los monómeros de la resina para formar cadenas y en el cruce de estas cadenas para formar estructuras sólidas. Para esta reacción, en principio sólo es necesario un aporte de temperatura, aunque, sólo con esto, las láminas no se compactan bien y la pieza final presentará defectos. Para ayudar a la compactación y a mantener la forma final de la pieza durante el curado, se aplicará presión y vacío gracias a la autoclave.

En esta parte del proyecto es clave el factor humano ya que muchas actividades como la medición o el corte implican desviaciones con respecto a lo requerido teóricamente. Por lo tanto será de vital importancia obrar cuidadosamente a fin de minimizar errores futuros.

2.2.1. Laminación

Previo a la entrada en detalle a cada actividad del proceso, es preciso clasificar y realizar un listado aclarativo de todas las láminas y las dimensiones que se van a necesitar para obtener finalmente los paneles deseados.

Tabla 2-3. Listado de láminas a cortar

	TIPO CONF.	Nº LÁMINAS	MEDIDAS (cm ²)
PANELES S	TA	12	10X15
	TB1	12	10X15
	TB2	12	10X15
	TB3	12	10X15
	TB4	12	10X15
PANELES R	TB3	6	6X15
	TB2	6	4X15
	TB1	6	2X15

	TB4	6	15X15
PANELES SAC	TB3	6	9X15
	TB2	6	10X15
	TB1	6	11X15
	TB4	6	5X15
PANELES M	TC1	6	7X15
		6	13X15
	TC2	6	7X15
		6	13X15
	TC3	6	7X15
		6	13X15
	TC4	6	7X15
		6	13X15
PANELES P	TC1	6	8X15
		6	12X15
	TC2	6	9X15
		6	11X15
	TC3	12	10X15
	TC4	6	15X15
		6	5X15
PANELES REP1	D1	6	20X15
PANELES REP2	D1	3	5X15
	D2	3	5X15
PANELES REP3	D1	1	15X15

	D2	1	20X15
PANELES REP4	D2	3	20X15
PANELES REP5	D2	6	7.5X15

Para llevar a cabo el corte de cada una de las láminas especificadas en la tabla, se hará uso de un cúter, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Se utilizará una lámina de nailon para proteger al laminado de la posible contaminación de la mesa.
- Se utilizarán batas y guantes para no contaminar el material con la ropa de los operarios y con la grasa de las manos respectivamente.
- La laminación se llevará a cabo dentro de una habitación de ambiente controlado, que se suele denominar sala limpia.

Los equipos a usar en la sala limpia para el control de las condiciones ambientales son:

- Humidificador de aire
- Bomba de vacío
- Equipo de introducción de aire para mantener la sobrepresión
- Aire acondicionado

Los equipos a usar en la sala limpia para la medición de las condiciones ambientales son:

- Control de Contaminación: Medidor de Partículas GT-521 (Met OneInstruments, Inc.), permite medir la concentración de partículas en suspensión de tamaño superior a 0.3 μm (siendo este límite de tamaño ajustable entre 0.3 y 5 μm).
- Control de Temperatura y Humedad: Data Logger Testo 175-H2, permite almacenar hasta 16000 lecturas de temperatura y humedad, trabajando en un rango de 0 a 100 % HR, y -20°C a 70°C , lo que implica un registro continuo de dichos parámetros en el tiempo.
- Control de Presión Diferencial: Transmisor de Presión Diferencial Testo 6342, para medida de presión diferencial entre 0 y 50 Pa, con una resolución de 0.35 Pa. Este equipo se complementa con un data logger de corriente-tensión Testo 175-S2 (con capacidad para 16000 lecturas), para el registro de las medidas que realiza el transmisor de presión.

Para la conservación de los materiales preimpregnados se utiliza un arcón-congelador IGNIS IG-410, de 400 l de capacidad útil, dimensiones 134 x 66 x 88.5 cm, regulación de la temperatura, cerradura y alarma de ruptura de la cadena de frío. El congelador mantiene los materiales a temperatura inferior a -18°C , siendo capaz de alcanzar -20°C en continuo.

Con el fin de cerrar herméticamente las bolsas que contienen los laminados antes de introducirlas en el congelador, se dispone de un sellador de bolsas de polietileno.

2.2.1.1. Procedimiento

En primer lugar (tras la obtención de batas y guantes) se observarán los indicadores de la Sala limpia para comprobar que se está trabajando en las condiciones climáticas correctas. Estas condiciones son:

- La sobrepresión mínima ha de ser de 1mm de H₂O.
- La concentración de partículas en suspensión de un tamaño superior a 5 μ no debe sobrepasar en ningún caso 50 partículas por litro de aire.
- Las condiciones de temperatura y humedad no deben sobrepasar las condiciones de la Figura.

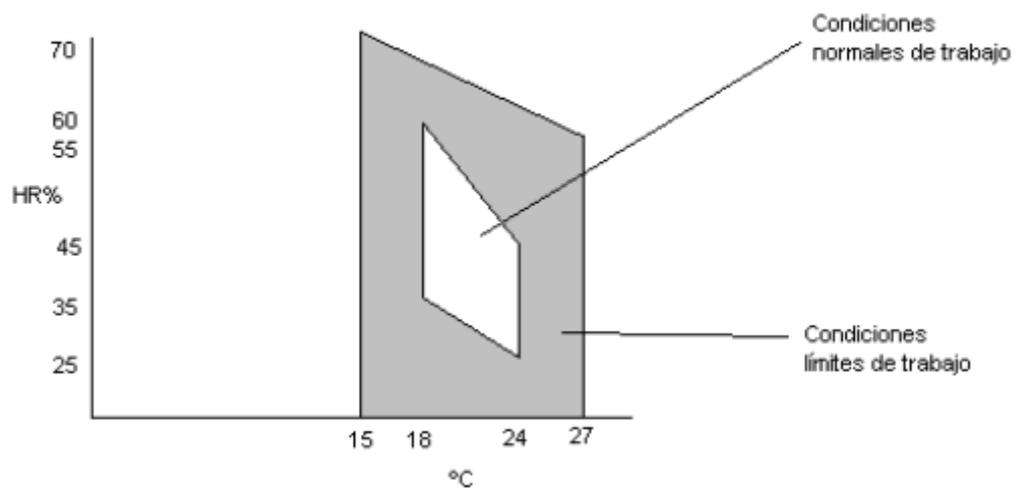


Figura 2-10. Condiciones de trabajo en Sala Limpia

Una vez hechas las comprobaciones pertinentes, se extrae el rollo de material de la bolsa termosellada cortando la misma con el cúter. El rollo habrá sido sacado del congelador unas horas antes de la realización del proceso con el fin de que el material atempere.



Figura 2-11. Rollo de fibra de Carbono antes de ser extraído

A continuación se cuelga el rollo de uno de los tubos giratorios habilitados a tal efecto de modo que, al tirar del material, quede enfrentada a la mesa la cara con protección.

Antes de colocar el material sobre la mesa es conveniente cortar un trozo de lámina de nailon que cubra esta última para evitar traspasos de partículas.

Tras colocar la cinta sobre la mesa, se marcan las medidas necesarias de cada lámina (con ayuda de regla, escuadra y cartabón) y se corta con el cúter apoyándose en el útil de corte (pletina de aluminio habilitada a tal efecto) y corrigiendo el ángulo con la escuadra, para evitar desviaciones en la dirección de la fibra. Al tomar la medida antes de cortar, es prescriptivo dar un sobre-largo, ya que, una vez curada la pieza, los bordes se cortarán con la sierra para eliminar los defectos acumulados en los mismos (longitudes diferentes, bordes no rectos, marcas de cinta, trozos de retenedor de corcho, exceso de resina,...). Por ello, a modo de ejemplo, para un panel de $150 \times 150 \text{ mm}^2$, es recomendable laminarlo de $160 \times 160 \text{ mm}^2$.

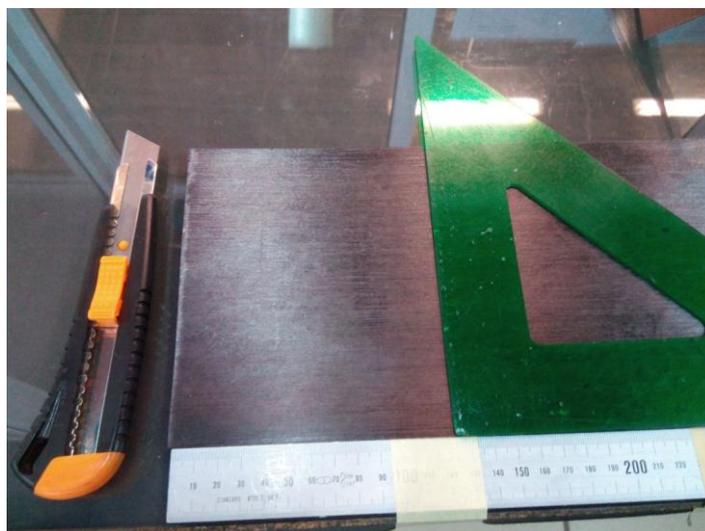


Figura 2-12. Disposición para el corte de láminas

Finalmente, una vez se han cortado las láminas, se apilan, teniendo siempre en cuenta que hay que retirar la capa protectora antes de pegar la siguiente lámina (a la primera lámina sí se le deja la capa protectora que apoya en la mesa). Se coloca la segunda capa sobre la primera en la dirección apropiada, siendo en este caso a 0°, y se compacta con una espátula de nylon realizando movimientos en la dirección de la fibra.

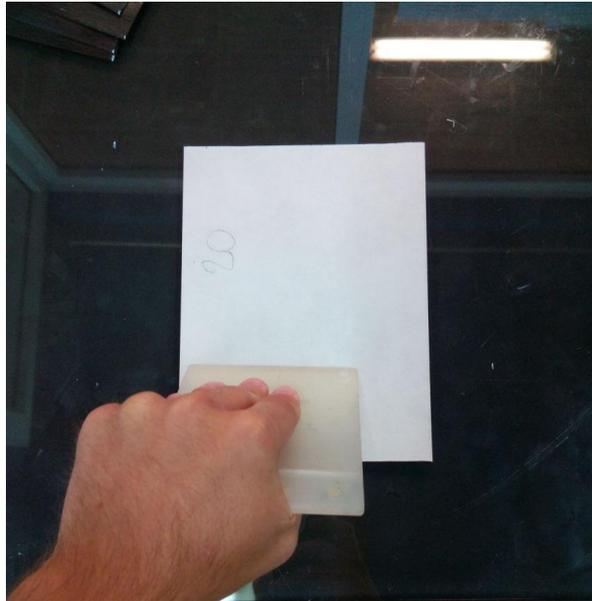


Figura 2-13. Compactación de láminas

La compactación es necesaria para evitar que queden pliegues y para eliminar el aire entre las capas el cual puede generar futuras de laminaciones y porosidades.

Cada tres capas se debe realizar una compactación en bolsa de vacío utilizando la bolsa de compactación reutilizable de que se dispone en el laboratorio. A ella se le conecta una manguera de vacío unida a un compresor que puede realizar vacío de aproximadamente 0.6 bares.

Cada tres capas se debe realizar una compactación en bolsa de vacío utilizando la bolsa de compactación reutilizable de la que se dispone en el laboratorio. A ella se le conecta una manguera de vacío unida a un compresor que puede realizar vacío de aproximadamente 0.6 bares.

Cuando se pegue la última es recomendable dejar la capa protectora hasta que se vaya a curar para evitar contaminar el material o que la luz lo degrade.

En el caso de que el laminado requiera adaptarse a un útil con curvas y/o esquinas, o las láminas no se adhieran bien, se puede utilizar un secador de aire caliente teniendo cuidado de no quemar el material.



Figura 2-14. Aplicación de vacío para compactación

2.2.2. Curado

Cuando todas las capas han sido colocadas se debe fabricar una bolsa de compactación final, como la que se indica en el siguiente esquema, a fin de realizar posteriormente el curado de los paneles. Es realmente este proceso en el cual el material compuesto adquirirá sus propiedades características finales.

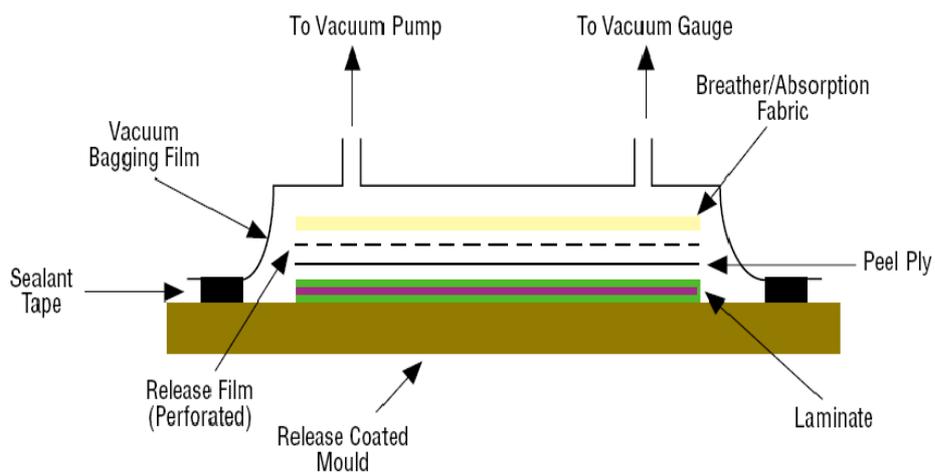


Figura 2-15. Esquema de bolsa de vacío

2.2.2.1. Bolsa de compactación final y montaje de configuraciones

Hay que tener presente que durante la fabricación de la bolsa de vacío, será necesario construir cuidadosamente las configuraciones estructurales que se someterán a análisis posteriormente.

Los materiales que se usarán para la bolsa serán los siguientes:

- Útil de aluminio: Base que dará la forma final al laminado. La bolsa de vacío se cierra sobre esta pieza.
- Teflón: Lámina de material antiadherente que facilita la extracción del laminado una vez curado.
- Cromato: Cinta adhesiva en toda su superficie cuya finalidad es el cierre de la bolsa de vacío durante todo el proceso de curado.
- Retenedor de corcho: Cinta de corcho utilizada para mantener la resina dentro del área deseada.
- Airweave: Tejido poroso utilizado en la distribución del vacío por toda la superficie del laminado.
- Tela de vidrio: Tela usada para mejorar la succión y el apoyo de las tomas de vacío.
- Plástico de cierre: Plástico resistente que conforma la bolsa de vacío. El plástico se adhiere al útil metálico a través del cromato.
- Tomas de vacío: Tomas de aire a las que se conectan las mangueras de vacío para hacer la succión.

En cuanto al procedimiento, lo primero que se necesita para fabricar una bolsa de compactación final es un útil, que suele ser una plancha de acero o aluminio de tamaño superior al panel que se desea curar. Este útil debe ser limpiado con acetona para eliminar partículas de suciedad y mejorar la posterior adherencia del cromato a la placa.

Sobre este útil se coloca una capa de teflón, ya que al ser antiadherente impedirá que el panel o la resina que fluye durante el curado se adhieran al útil. Encima de esta capa de teflón se colocarán los paneles según lo establecido para cada configuración. En la siguiente figura podemos observar por ejemplo la estructura B4 sobre la capa de teflón y la plancha de acero.



Figura 2-16. Montaje de configuración B4 sobre la plancha de la bolsa de vacío

Si se pretende curar a la vez más de un panel hay que rodearlos con corcho para evitar que la resina fluya de unos a otros.

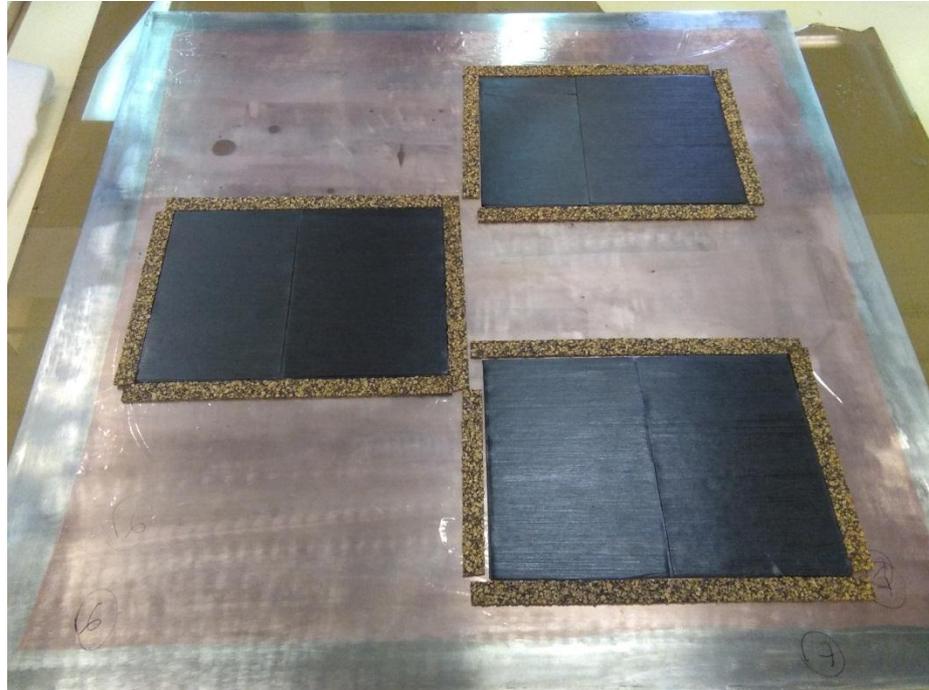


Figura 2-17. Paneles protegidos con corcho para evitar la fluencia

Encima de los paneles irá situada otra capa de teflón. Cubriendo el teflón se colocará una capa de tejido aireador (airweave) suficientemente grande para poder situar las tomas de vacío en un área adjunta al panel, sin que queden sobre este. En la zona libre del airweave se colocarán dos tomas de vacío, preferentemente no muy cerca de las esquinas de la bolsa para evitar fugas de vacío. El siguiente paso es pegar cromato alrededor de los elementos mencionados para poder cerrar la bolsa. El cromato se coloca suavemente y se presiona con una espátula de nylon para asegurar la correcta adherencia a la placa. Es importante asegurar las esquinas ya que en ellas se deberá colocar el cromato en forma de cruceta y hay más posibilidad de que haya fugas por esa zona.

Una vez pegado el cromato se coloca el plástico para realizar la bolsa final. Se sitúa primero sin adherirlo del todo, para asegurar que este en la posición correcta, y se procede a realizar presión con la espátula por toda la superficie de contacto del plástico con el cromato.



Figura 2-18. Cierre final de la bolsa de vacío

Cuando la bolsa está cerrada se conecta la manguera a una de las tomas de vacío, haciendo previamente un pequeño agujero en el interior del plástico que cubre a las tomas de vacío y se realiza este, resultando la bolsa con el aspecto de la figura. En este punto los paneles están listos para comenzar el proceso de curado.

Una vez realizada la succión en la bolsa, es necesario comprobar que no existen entradas de aire con las consiguientes pérdidas de vacío. Para ello, se conectará un manómetro a las tomas de vacío y se comprobará que el vacío se pierde como mucho a un ritmo inferior a 0.17 bares cada 5 minutos.



Figura 2-19. Bolsa de vacío finalizada

2.2.2.2. Autoclave

Una autoclave es un recipiente (normalmente en forma cilíndrica) con un sistema de temperatura y presurización, utilizado para curar y consolidar materiales compuestos.

El tamaño y el diseño de la autoclave depende de la aplicación o, lo que es lo mismo, del tipo de piezas a procesar.

En la autoclave se realizarán tanto procesos de fabricación como de reparación, y esta es una de las principales diferencias con respecto a la anterior investigación [4] que motivó este proyecto: mientras en aquella investigación se reparaban los paneles mediante Hotbonder, en la consecución de este trabajo se usará Autoclave.

El material a curar o reparar se introduce en la bolsa de vacío anteriormente descrita para mejorar su compactación y este vacío lo controla la misma autoclave, según el ciclo termodinámico expuesto en la siguiente figura.

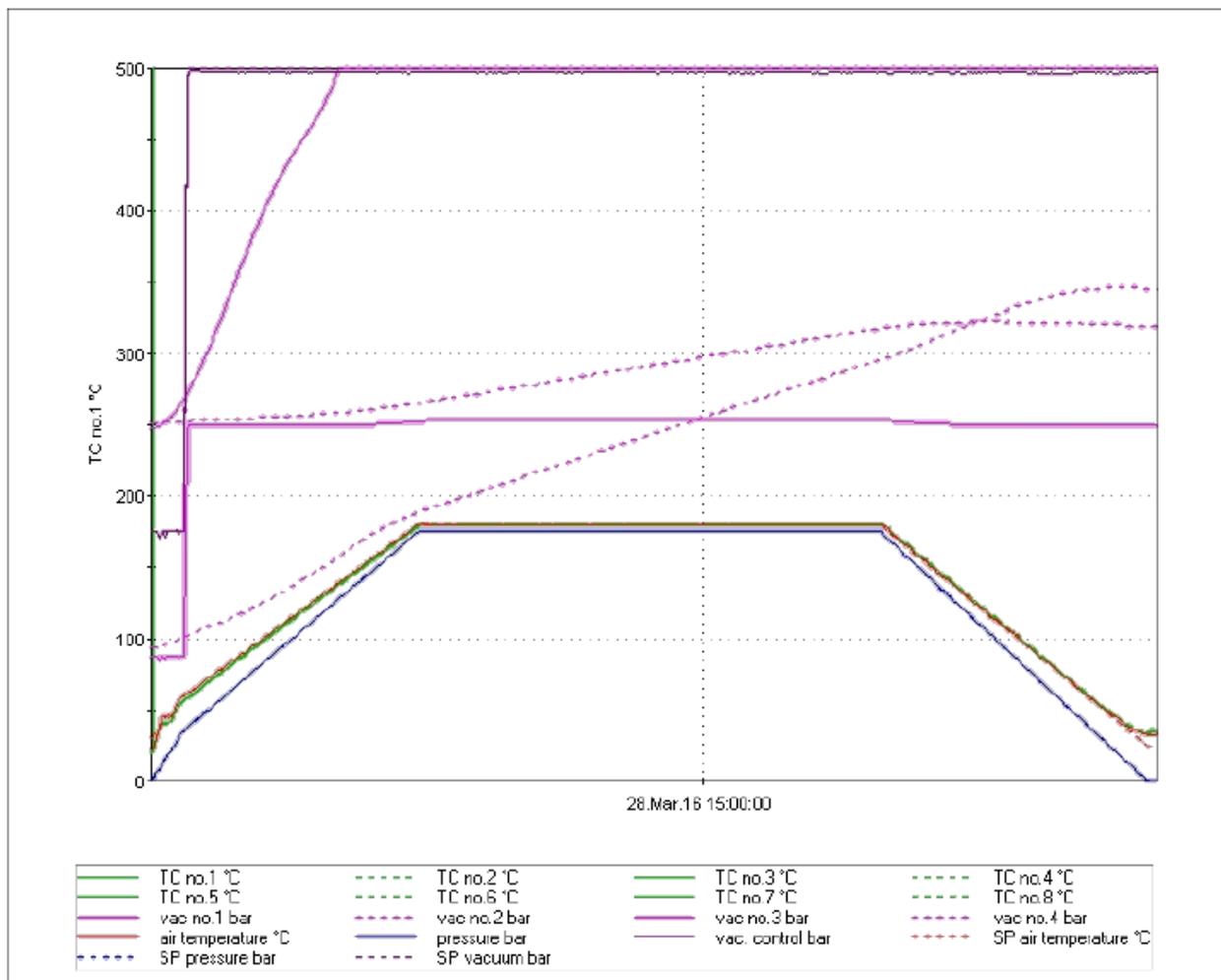


Figura 2-20.Ciclo termodinámico para curado en Autoclave



Figura 2-21. Autoclave

Una vez acabado el ciclo, se extraen los paneles cuidadosamente de la plancha y eliminamos los restos de corcho y teflón que puedan quedar adheridos, quedando finalmente lo que observamos a la izquierda de la figura 2-22.

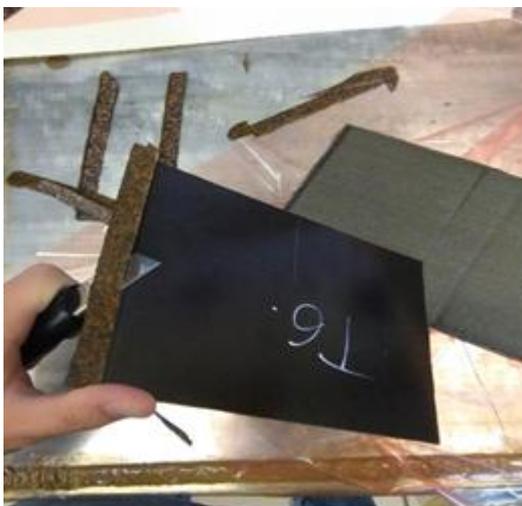


Figura 2-22. Paneles configuración C extraídos de Autoclave

Cabe destacar que si se realiza la etapa de curado tras un montaje erróneo de la configuración estructural, se obtendrán paneles con defectos tales como los que se muestran en la imagen 2-23. Concretamente, se colocaron láminas cuya dirección de fibra difería 90° con respecto al resto del laminado, obteniéndose paneles curvos que no son válidos para ser sometidos a este estudio.

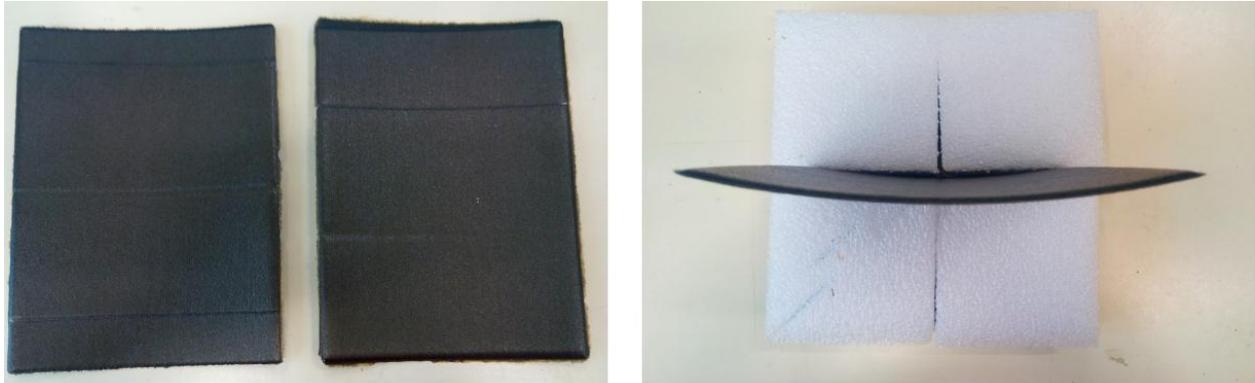


Figura 2-23. Paneles C4 y B4 defectuosos

2.3. Resanado y reparación de paneles en configuración D

Se trata en esta sección de poner de manifiesto cómo se han obtenido las probetas listas para ensayo resultantes de los paneles en configuración D, es decir, aquellos sometidos a reparación real con autoclave.

2.3.1. Resanado en configuración D1

Con objeto de eliminar 3 capas de material en la estructura D1 y obtener una configuración como la que se indicó en la figura 2-6, la herramienta que resulta ser la seleccionada para dicho resanado es una fresadora manual con broca de diamante.

La fresadora cuenta con un soporte al que se puede conectar un sistema de aspiración para eliminar el polvo de carbono, el cual al tener conectado una aspiradora limita la maniobrabilidad del aparato. Es preciso comentar que será necesario por seguridad usar bata, mascarilla y guantes.



Figura 2-24. Fresadora empleada para resanado

Las ventajas determinantes de dicha fresadora frente a otras herramientas probadas son la precisión (siendo la precisión teórica de 0.1 mm) y el tiempo de resanado, el cual es bastante menor que con las otras herramientas probadas.

Sin embargo, la selección de esta herramienta presenta varios problemas:

- Para realizar un resanado uniforme a una misma profundidad la herramienta necesita tener su base correctamente apoyada sobre la misma superficie. Al acercarse a las esquinas del panel se provoca un cambio de altura entre la parte apoyada de la base en el panel y la parte restante, que apoyará en la superficie donde se esté trabajando o suspendida en el aire
- La destreza de la persona que maneja la fresadora tiene un gran peso en la realización de este proceso. Con los primeros resanados aparecen dificultades para trazar líneas rectas, dando lugar a una superficie resanada a la que será difícil adaptar correctamente las capas en la posterior reparación.



Figura 2-25. Proceso de resanado en panel D1

2.3.2. Proceso de Reparación en Configuraciones D

Teniendo ahora dos configuraciones D completamente análogas con el mismo tipo de geometría (una obtenida por eliminación de material y otra por montaje en la fabricación), se procede a repararlas mediante el acople con adhesivo de los paneles REP2 y REP3, según se esquematizó en las figuras 2-7 y 2-9.

Es conveniente lijar la superficie con el objetivo de mejorar el mojado con el adhesivo, tal y como se indica en la siguiente figura.

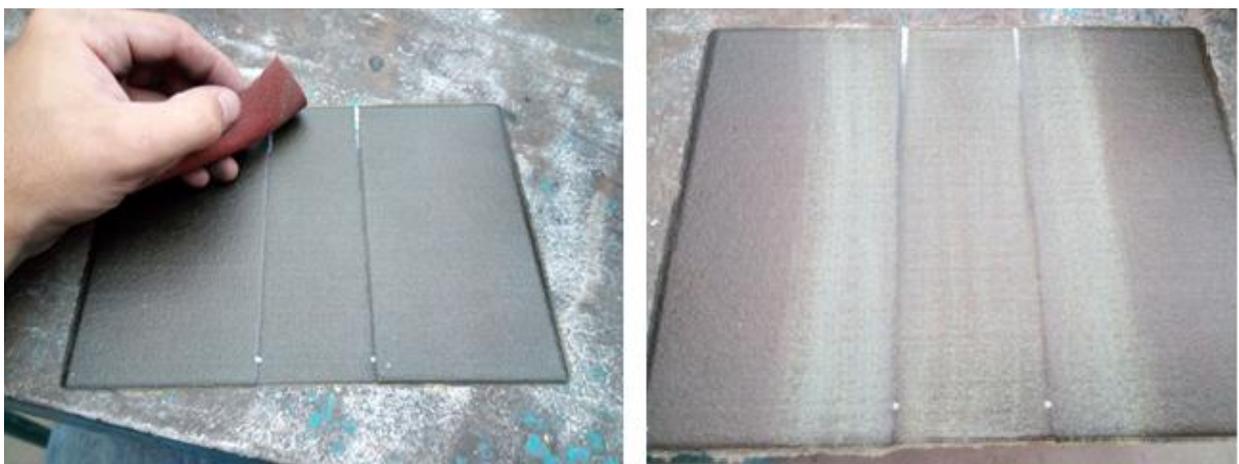


Figura 2-26. Lijado de la superficie en paneles D

Se procede ahora a colocar adhesivo (de especificación AIMS 10-01-006 para 180°C) sobre la zona lijada y las capas que sustituirán los huecos en el panel, según se esquematiza en las figuras 2-7 y 2-9.

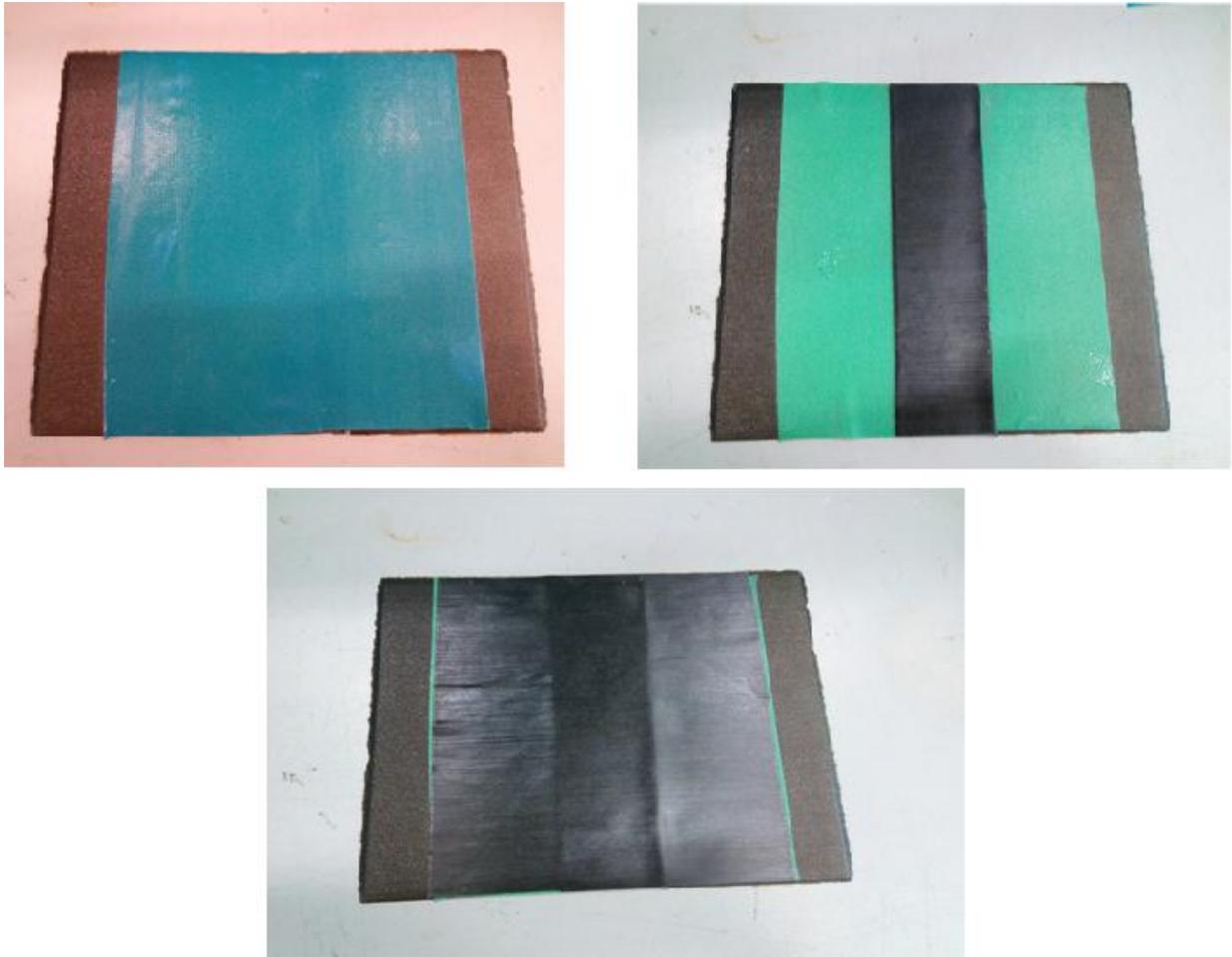


Figura 2-27. Adhesión de las capas reparadoras en configuración D

Posterior a esta última etapa de montaje para la reparación, se procede a la fabricación de una bolsa de vacío y a introducirlo en la autoclave para el correcto curado, siguiéndose el ciclo expuesto en la figura 2-20.

2.4. Normalización de probetas

Antes de comenzar con los ensayos del material, es preciso establecer una medida estándar de las probetas que se van a fracturar a fin de unificar resultados adecuadamente.

Por tanto, se ha decidido que las medidas de cada probeta sean las que se representan a continuación en centímetros:

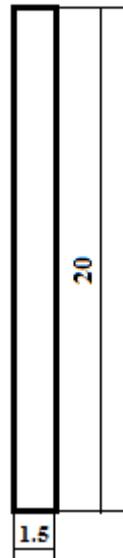


Figura 2-28. Medidas de las probetas en cm

Para obtenerlas se procederá a cortar los paneles obtenidos, eliminando en primer lugar el material sobrante de los bordes que puede haber fluido durante el curado y posteriormente se cortarán a medida según el esquema anterior.

Para ello se hará uso de la fresadora y del calibre preparándose tal y como se indica a continuación para proceder a cortar:

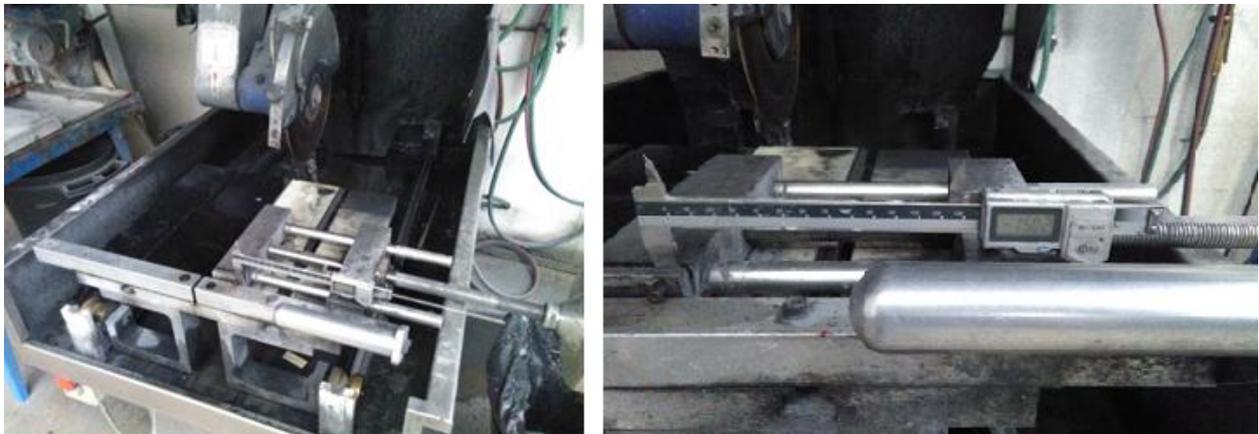


Figura 2-29. Equipo necesario para el corte de los paneles en probetas



Figura 2-30. Probetas normalizadas

Hay que tener en cuenta que tras estas operaciones en las que el factor humano vuelve a jugar un papel importante, no todas las probetas tendrán exactamente las mismas medidas. Es por ello que se han recogido todas las medidas que serán útiles de cara a la obtención de tensiones en las tablas que se presentan a continuación.

Recordemos que durante el ensayo de tracción se aplicará una fuerza sobre la probeta y la tensión vendrá dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde A es el área de la sección transversal que será calculada como sigue:

$$A = \text{espesor} * \text{ancho}$$

Es por ello que nos interesará medir cuidadosamente el valor del área de cada probeta. Además en las configuraciones tipo B se medirá también el área de la zona con refuerzo para futuros análisis por comparativa. De las tensiones asociadas a dicho área de refuerzo.

Tabla 2-4. Caracterización de probetas tipo A

TIPO A			
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ÁREA (mm²)
1	1,05	14,84	15,58
2	0,91	14,82	13,48
3	0,95	14,8	14,10
4	0,976	14,75	14,40
5	0,98	14,76	14,46
6	0,8833333	14,82	13,09

Tabla 2-5. Caracterización de probetas tipo B1

TIPO B1					
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR REF (mm)	ÁREA (mm²)	ÁREA REF (mm²)
1	1,09	15,84	1,97	17,34	31,20
2	1,16	16,16	2,12	18,74	34,25
3	1,11	15,92	2,05	17,75	32,64
4	1,14	16,26	2,08	18,54	33,83
5	1,19	16,19	2,07	19,26	33,51
6	1,14	16,11	2,11	18,37	34,00

Tabla 2-6. Caracterización de probetas tipo B2

TIPO B2					
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR REF (mm)	ÁREA (mm²)	ÁREA REF (mm²)
1	1,16	14,84	2,21	17,29	32,80
2	1,19	14,82	2,13	17,71	31,57
3	1,1	14,8	2,14	16,28	31,67
4	1,15	14,75	2,14	16,96	31,56
5	1,12	14,76	2,15	16,53	31,73
6	1,13	14,82	2,11	16,75	31,28

Tabla 2-7. Caracterización de probetas tipo B3

TIPO B3					
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR REF (mm)	ÁREA (mm²)	ÁREA REF (mm²)
1	1,05	15,35	2	16,11	30,7
2	0,91	15,67	2,23	14,25	34,94
3	0,95	15,75	2,22	15,01	34,96
4	0,97	15,49	2,24	15,12	34,69
5	0,98	15,62	2,21	15,30	34,52
6	0,88	15,71	2,2	13,87	34,56

Tabla 2-8. Caracterización de probetas tipo B4

TIPO B4					
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR REF (mm)	ÁREA (mm²)	ÁREA REF (mm²)
1	1,15	15,44	2,26	17,75	34,89
2	1,12	15,83	2,3	17,72	36,40
3	1,1	15,49	2,22	17,03	34,38
4	1,15	15,48	2,22	17,80	34,36
5	1,16	15,71	2,21	18,22	34,71
6	1,11	15,51	2,27	17,21	35,20

Tabla 2-9. Caracterización de probetas tipo C1

TIPO C1			
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ÁREA (mm²)
1	2,04	15,84	32,31
2	2,05	16,16	33,12
3	2,01	15,92	32,009
4	2,03	16,26	33,01
5	2,09	16,19	33,83
6	2	16,11	32,23

Tabla 2-10. Caracterización de probetas tipo C2

TIPO C2			
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ÁREA (mm²)
1	2	15,65	31,3
2	2,15	15,54	33,41
3	2,07	15,71	32,51
4	2,16	15,46	33,39
5	2,15	15,65	33,64
6	2,12	15,69	33,26

Tabla 2-11. Caracterización de probetas tipo C3

TIPO C3			
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ÁREA (mm²)
1	2,04	15,34	31,29
2	2,06	15,48	31,88
3	2,01	15,53	31,21
4	2,04	15,73	32,08
5	2,09	15,55	32,49
6	2,03	15,87	32,21

Tabla 2-12. Caracterización de probetas tipo C4

TIPO C4			
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ÁREA (mm²)
1	2,33	15,61	36,37
2	2,24	15,48	34,67
3	2,25	15,63	35,16
4	2,28	15,42	35,15
5	2,28	15,59	35,54
6	2,26	15,71	35,50

Tabla 2-13. Caracterización de probetas tipo D1

TIPO D1			
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ÁREA (mm²)
1	1,11	14,61	16,21
2	1,12	15,42	17,27
3	1,11	15,65	17,37
4	1,12	15,92	17,83
5	1,08	15,38	16,61
6	1,11	15,2	16,87

Tabla 2-14. Caracterización de probetas tipo D2

TIPO D2			
PROBETA	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ÁREA (mm ²)
1	1,12	15,69	17,57
2	1,12	15,73	17,61
3	1,11	15,7	17,42
4	1,12	15,6	17,47
5	1,08	15,75	17,01
6	1,11	15,73	17,46

3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

“Los hechos pueden destruir nuestros raciocinios pero no viceversa”.

- Alessandro Volta -

Cada una de las probetas obtenidas será sometida a un ensayo de tracción hasta la rotura, tratándose en esta sección del documento de recoger una curva representativa tensión-desplazamiento para cada familia de probetas.

Para ello se hará uso de la máquina INSTRON 8801 del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Se trata de una máquina hidráulica de carga máxima 100 kN controlada desde un paquete de software instalado en un ordenador, el cual permite definir todo tipo de parámetros para realizar cualquier clase de ensayo de tracción, ya sean dinámicos o estáticos, siendo este último el tipo seleccionado.

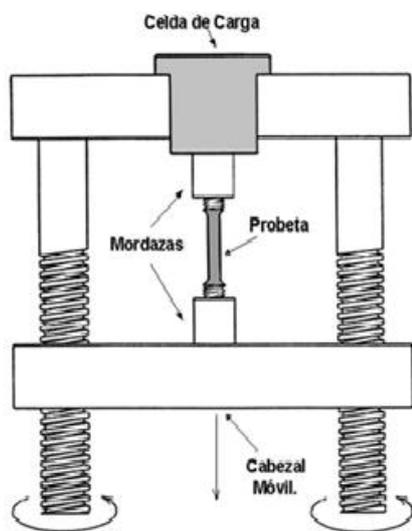


Figura 3-1. Esquema de la máquina INSTRON e imagen real

Las probetas se posicionan de forma centrada en las mordazas gracias al mando de control y a continuación se programa el ensayo a realizar. En todos los casos la velocidad del cabezal móvil será de 0.5 mm/min.

Una vez esté todo correctamente preparado, se comienza a ejercer fuerza sobre las probetas hasta la rotura.

En la siguiente imagen podemos observar una captura del proceso mencionado.



Figura 3-2. Posicionamiento de la Probeta en la máquina INSTRON

Los datos que del ensayo se derivan (desplazamiento y fuerza) son archivados a tiempo real en un documento de extensión Excel gracias a la computadora asociada a la máquina. Con objeto de representar en una curva tensión-desplazamiento los ensayos realizados a cada familia de estructuras fabricadas, se hará uso de MATLAB [5], trabajando así con los datos obtenidos en Excel. Para facilitar la tarea se ha diseñado el código que se detalla en la sección *Anexos* de este proyecto.

A la vista del código, se observa por ejemplo cómo a partir del archivo del ensayo de la probeta 3 del tipo B3, denominado TB3P3.csv, podemos obtener la representación gráfica anteriormente comentada, además de exportar datos a otro archivo Excel a fin de analizar los resultados obtenidos, lo cual será objeto de la siguiente sección del presente documento.

En definitiva, se muestran a continuación las familias de curvas del ensayo así como algunas imágenes de las roturas.

Es preciso puntualizar que en la representación de una familia de panales, cada una de las probetas se identificará con un color a fin de poder distinguir de forma clara cada una de ellas, según se muestra en la leyenda de la figura 3-3, común para todas las representaciones.

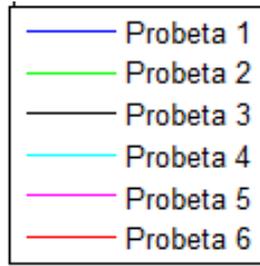


Figura 3-3. Leyenda de identificación de probetas

3.1. Tipo A

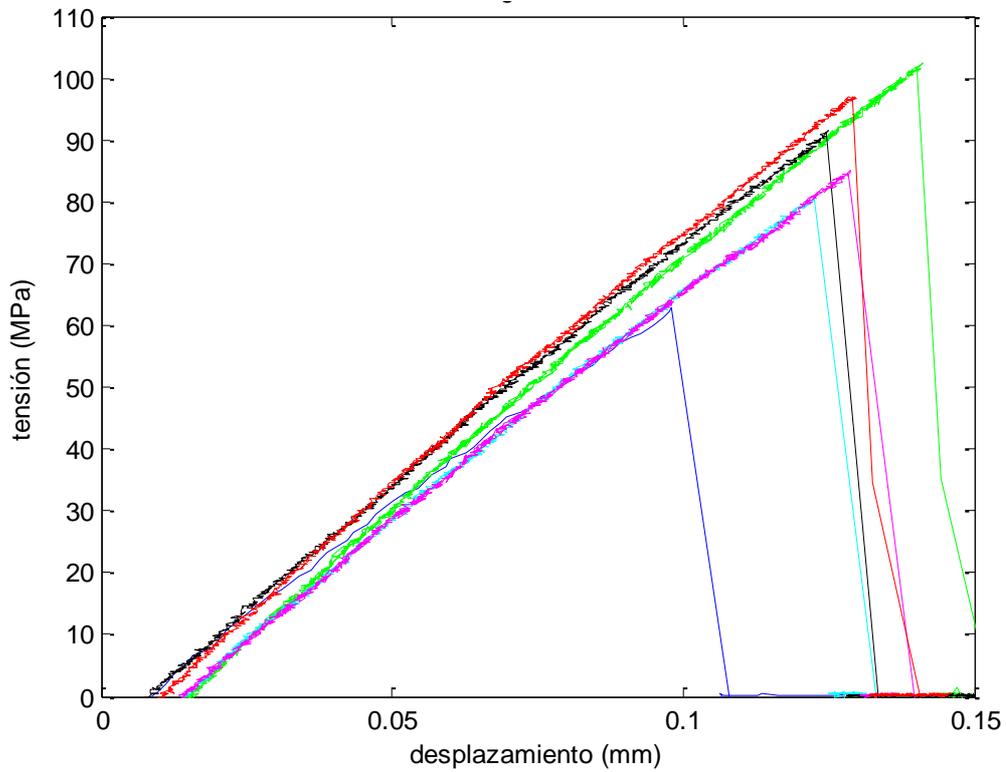


Figura 3-4. Representación tensión-desplazamiento en configuración A

En primer lugar se puede resaltar la baja tensión para la que se produce la fractura en las probetas de esta configuración en comparación con la de otras configuraciones que se expondrán a continuación. Se puede encontrar la causa de este fenómeno atendiendo a la morfología de unión de los paneles S que constituyen la estructura tipo A, pues como se mostró en la figura 2-1, es simplemente una unión a tope.

Asimismo, podemos notar en el gráfico de la figura 3-4 que si bien todas las probetas presentan un comportamiento similar, la probeta 1 rompe soportando una tensión bastante inferior que las demás, lo cual puede deberse a defectos internos en la estructura derivados posiblemente del proceso de fabricación o incluso a un emplazamiento incorrecto en las mordazas de la máquina pre-ensayo. Como consecuencia, dicha probeta no será incluida en los gráficos de la sección “4. Análisis de los resultados” de este documento.

La rotura de las probetas se produce por la zona de unión de los paneles S como era de esperar.



Figura 3-5. Rotura en probeta de tipo A

3.2. Tipo B1

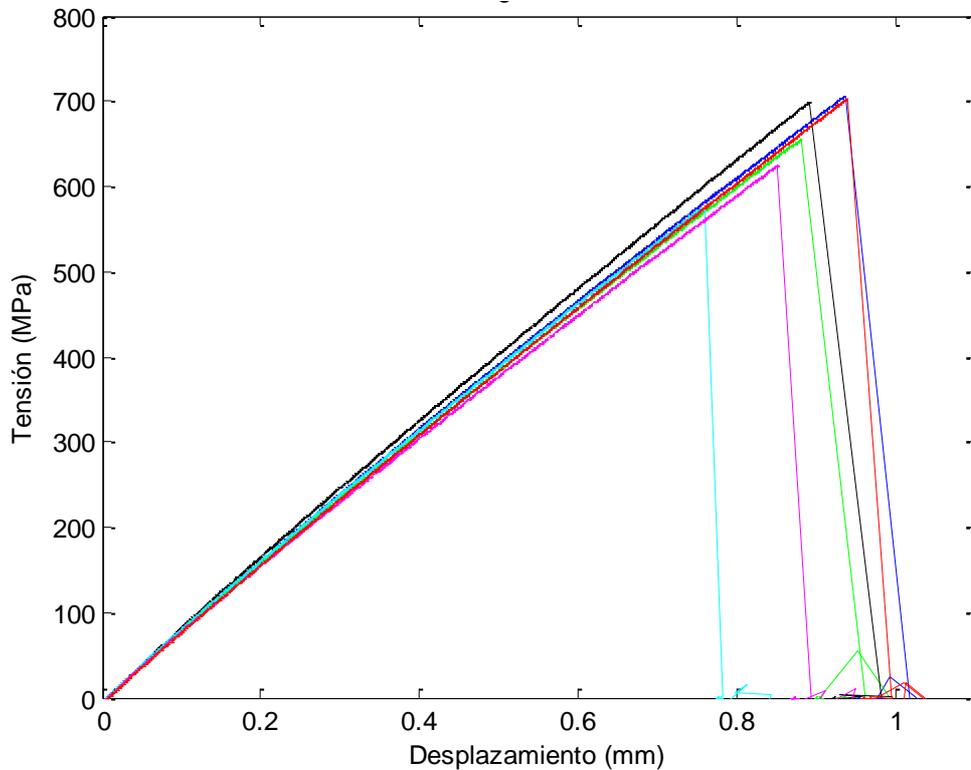


Figura 3-6. Representación tensión-desplazamiento en configuración B1

En primer lugar, podemos observar en el gráfico 3-6 un comportamiento bastante similar entre los especímenes ensayados de esta serie.

Por otro lado, la diferencia en desplazamiento de la mordaza así como la tensión de rotura con respecto a los especímenes de tipo A es bastante acusada (prácticamente 10 veces mayor), lo cual se debe al refuerzo que ahora protege la zona de unión entre los paneles S.

En cuanto a la rotura de las probetas de configuración B1, es preciso comentar que en todas ocurre algo análogo a lo que se aprecia en la imagen 3-7, encontrándose ubicada la fractura en la zona central del panel tipo S como era de esperar. Es importante destacar que todas las probetas de tipo B (B2, B3 y B4) rompen de igual modo.

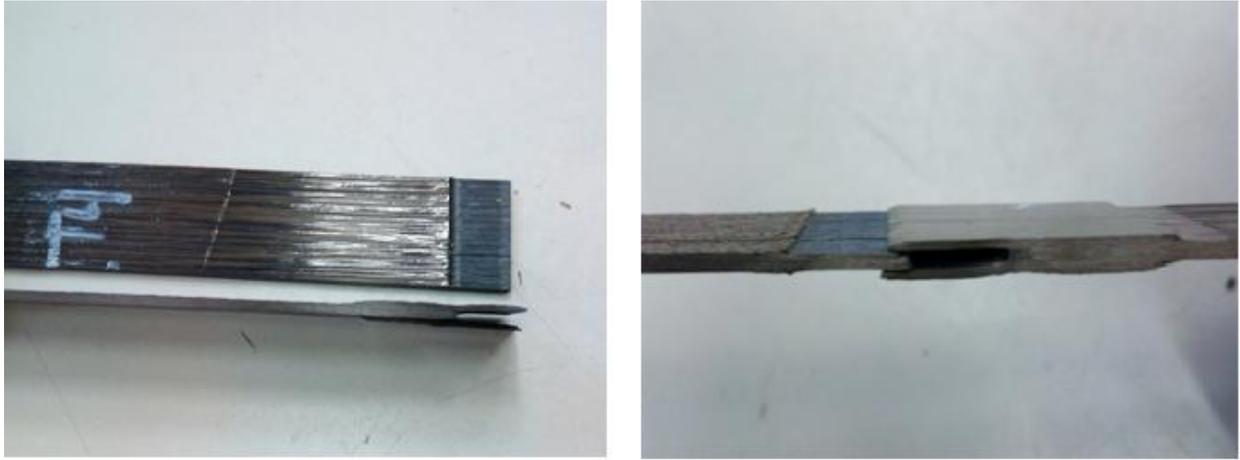


Figura 3-7. Roturas en probetas tipo B

3.3. Tipo B2

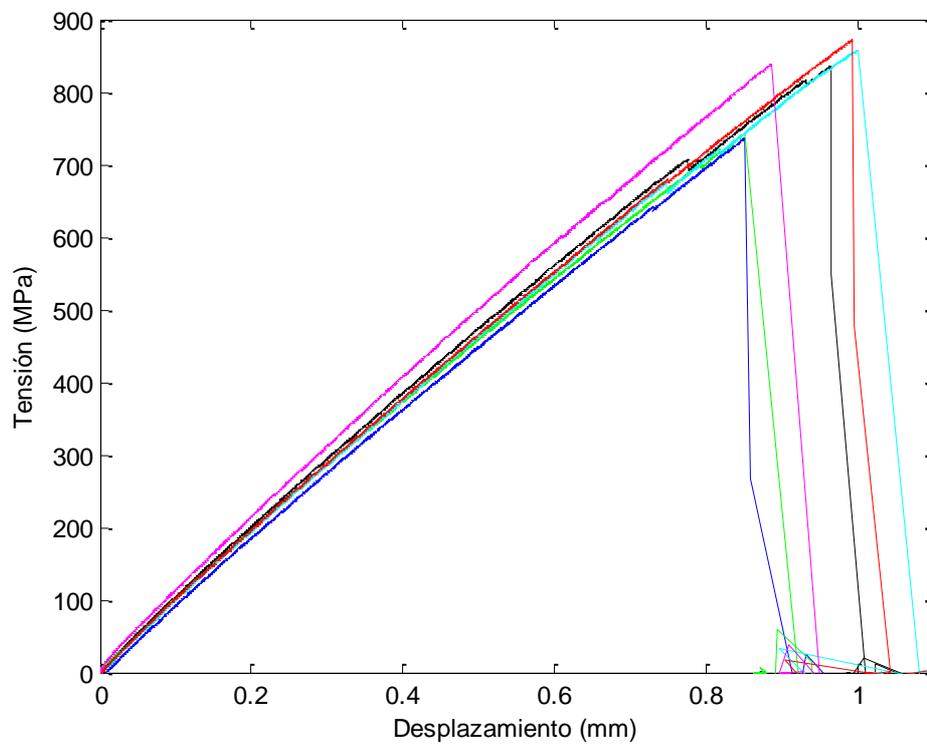


Figura 3-8. Representación tensión-desplazamiento en configuración B2

En cuanto a las representaciones de las configuraciones B2 y B1, se puede observar la similitud de comportamiento existente entre ambas, si bien es preciso comentar que la rotura se produce bajo tensiones menores en el tipo B1 debido a la menor cantidad de material de refuerzo (longitud d menor, según se mostró en el esquema de la figura 2-2) en el solape de unión de los paneles S.

3.4. Tipo B3

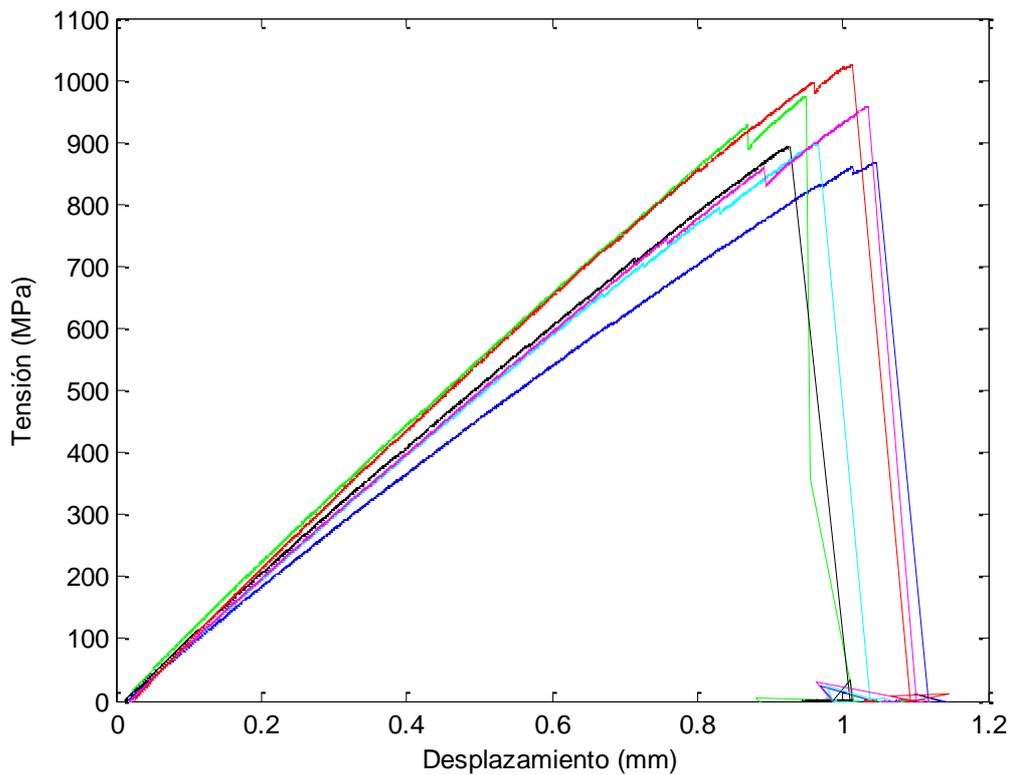


Figura 3-9. Representación tensión-desplazamiento en configuración B3

A la vista de la figura 3-9, es interesante reseñar cómo a diferencia de lo que ocurre en los tipos B1 y B2, en la configuración B3 tiene lugar un fenómeno que se va a denominar en lo que sigue como rotura preliminar, el cual se aprecia con claros picos de bajada de tensión asociados a despegues, previos a la rotura definitiva de la probeta.

3.5. Tipo B4

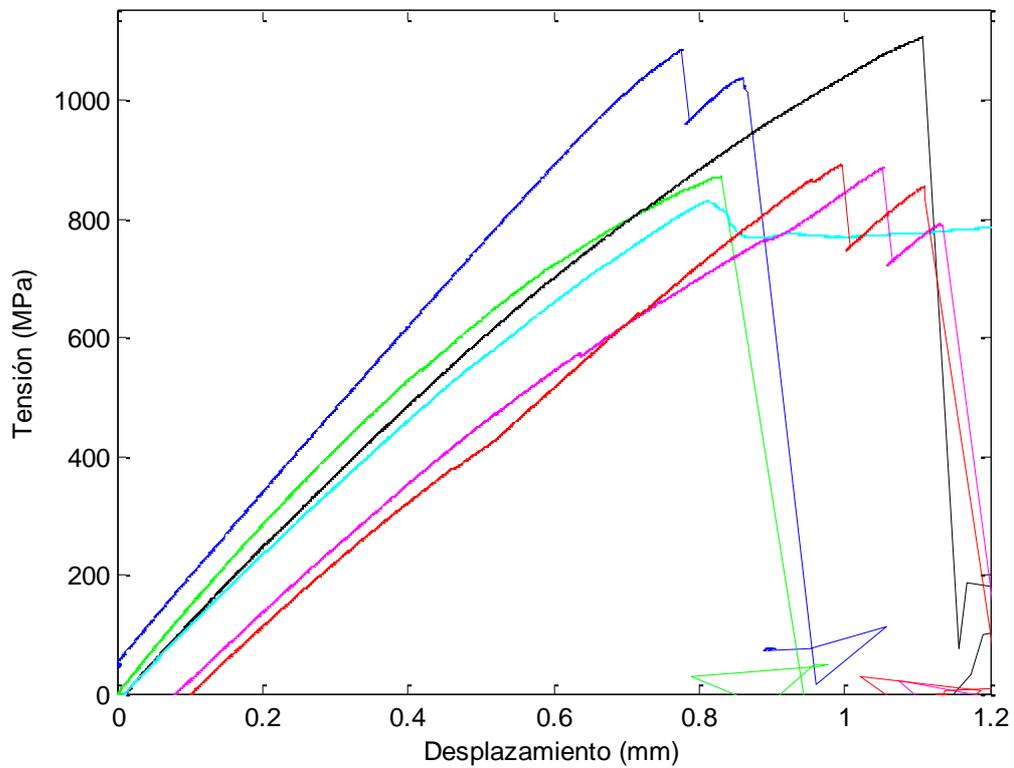


Figura 3-10. Representación tensión-desplazamiento en configuración B4

En primera instancia de la figura 3-9 se puede destacar que los valores de tensión alcanzados en esta configuración son mayores que los del resto de paneles tipo B analizados. Asimismo, al igual que ocurre en configuración B3, se dan picos de rotura preliminar, si bien ahora se aprecia una mayor dispersión en las curvas obtenidas.

3.6. Tipo C1

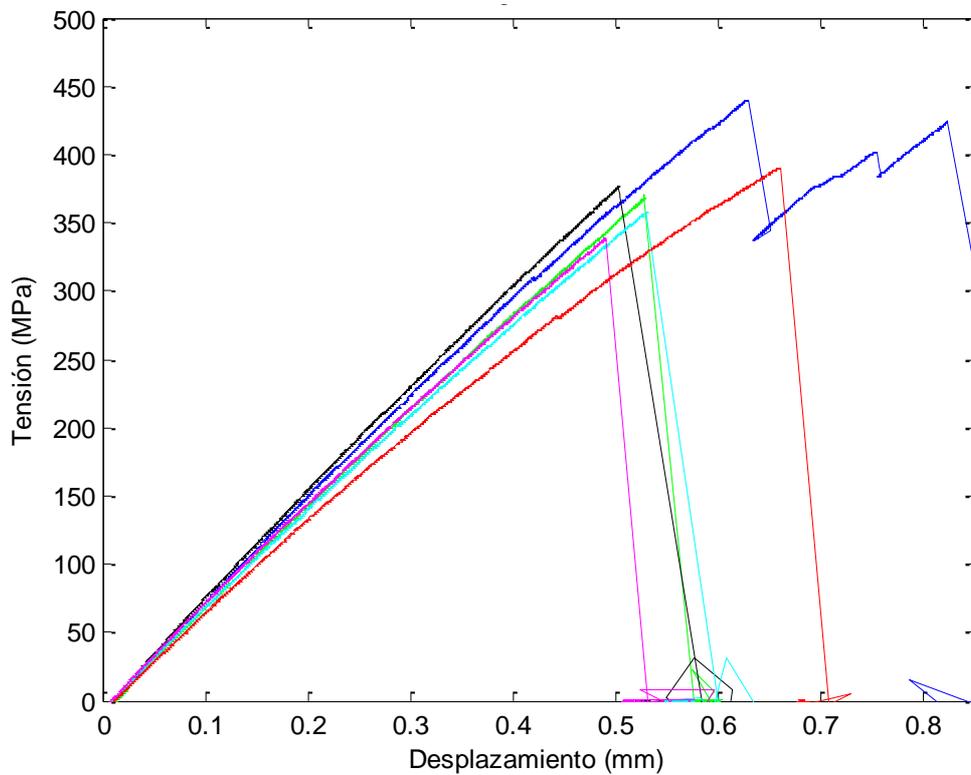


Figura 3-11. Representación tensión-desplazamiento en configuración C1

Según se observa en esta figura, todas las probetas se comportan de forma similar en el ensayo, aunque se puede apreciar que la probeta 1 experimenta el mismo pico de bajada de tensión pre-rotura definitiva que aquellas que constituyen la configuración B1. En definitiva, si bien la tensión de rotura es del mismo orden en todos los tipos de esta configuración, el desplazamiento de la mordaza de la máquina INSTRON ha sido mayor para las probetas 1 y 6.

Además, se puede apreciar una gran diferencia en términos de tensión de rotura entre las probetas 1 y 6 de esta serie.

3.7. Tipo C2

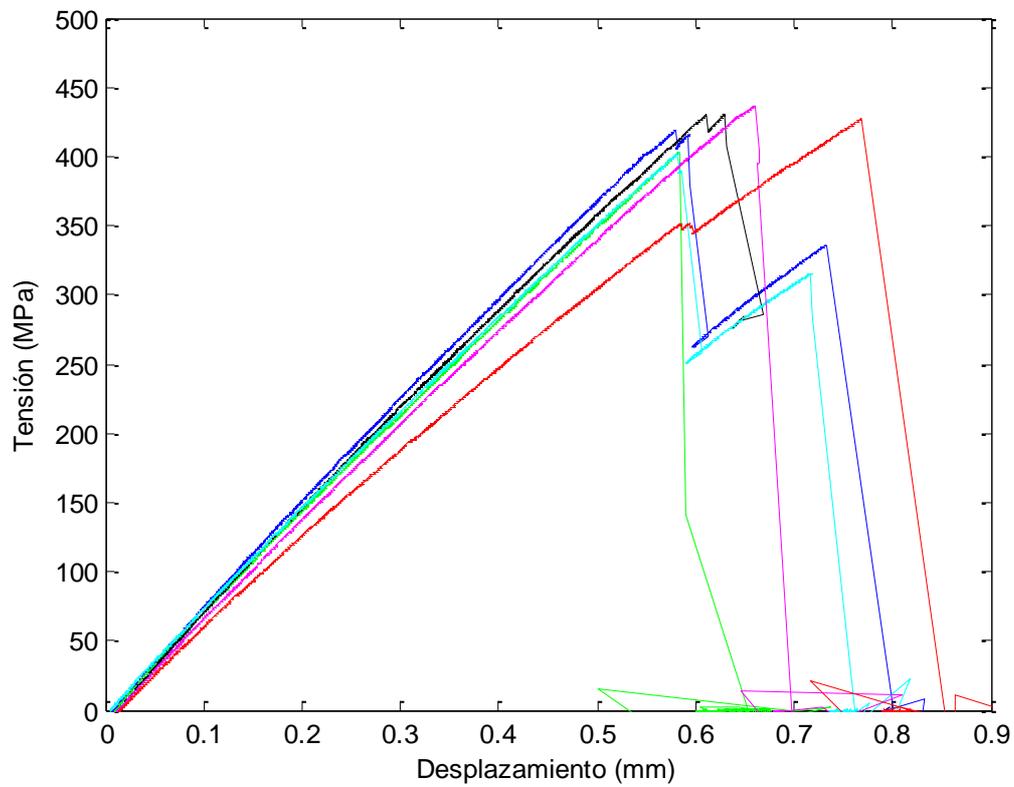


Figura 3-12. Representación tensión-desplazamiento en configuración C2

Podemos observar en las curvas tensión-desplazamiento cómo en la mayoría de los casos se produce una primera bajada drástica de la tensión y luego esta vuelve a aumentar hasta la rotura definitiva, al igual que sucede en la configuración B3 y la probeta 1 de tipo C1. Dicho fenómeno es mostrado de forma aislada en forma de gráfico tensión-desplazamiento en la figura 3-13 para la probeta 4 de tipo C2.

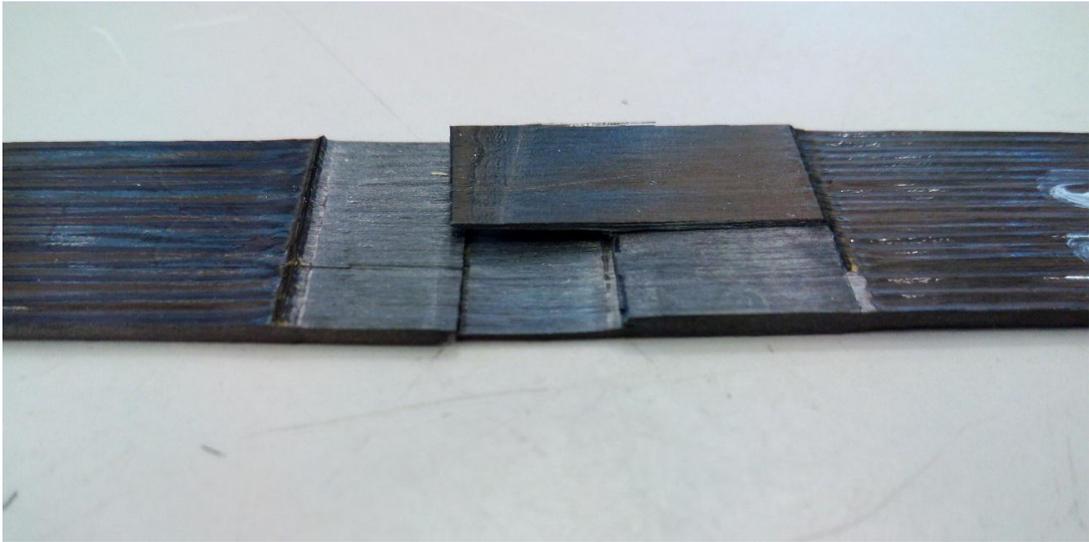


Figura 3-13. Rotura en probeta tipo C2

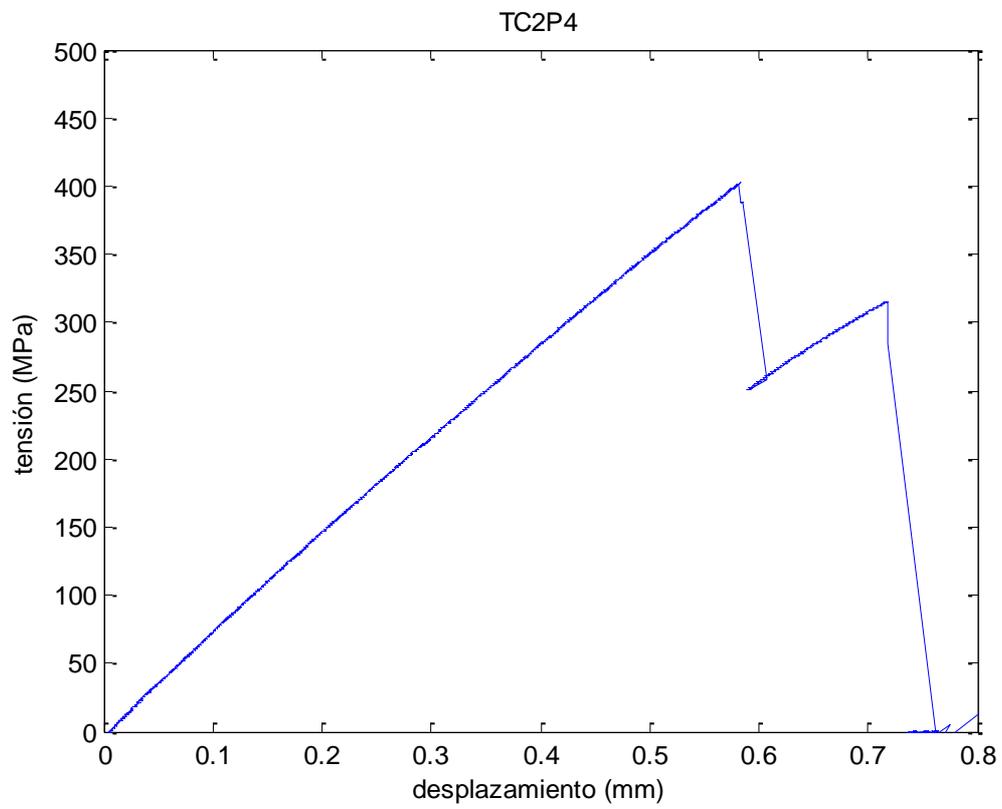


Figura 3-14. Detalle de rotura preliminar en Configuración C

3.8. Tipo C3

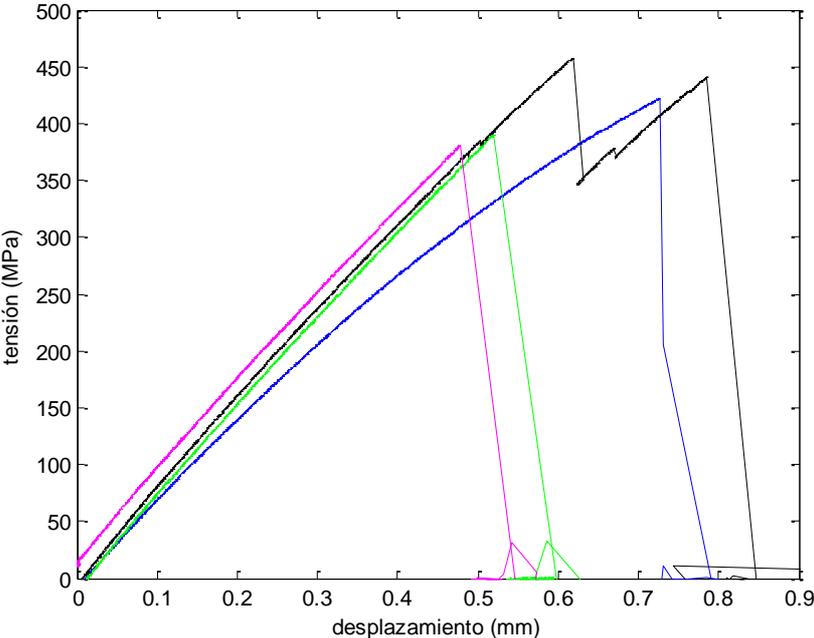


Figura 3-15. Representación tensión-desplazamiento en configuración C3

3.9. Tipo C4

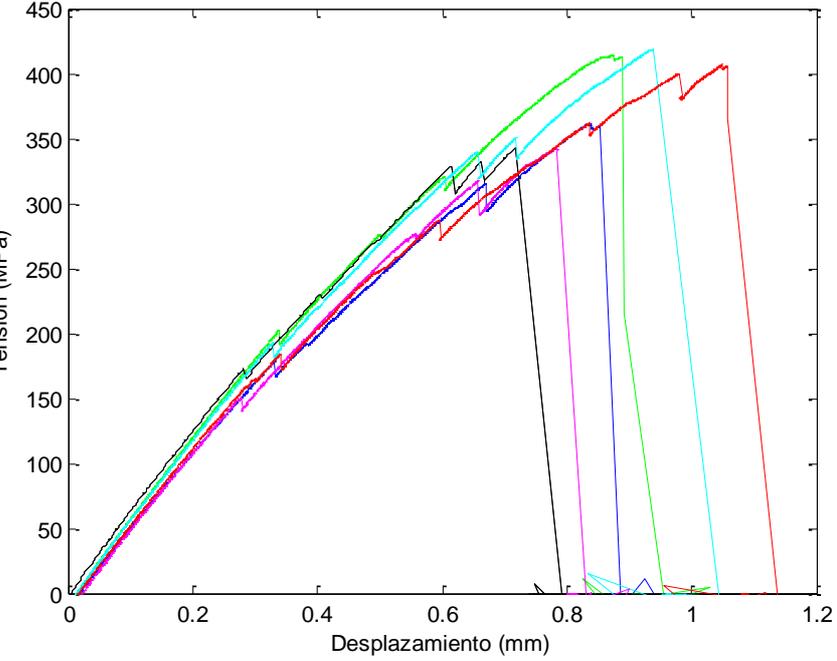


Figura 3-16. Representación tensión-desplazamiento en configuración C4

A la vista de los gráficos 3-15 y 3-16 de las configuraciones C3 y C4, es de reseñar la marcada presencia del fenómeno de rotura preliminar, así como la dispersión de las curvas de ensayo entre las probetas de una misma configuración.

En cuanto a la rotura de las probetas tipo C, cabe resaltar la violencia con la que tiene lugar, rompiéndose cada una de forma catastrófica y siguiendo un mismo patrón de carácter explosivo; los fragmentos de los paneles M y P que conforman las zonas de unión salen despedidos en el instante de la rotura.

Con objeto de analizar qué ocurre en la probeta durante los picos de rotura preliminar previamente mencionados y reseñados en gráficos tensión-desplazamiento, se somete una probeta de tipo C4 a ensayo, de forma que cuando se aprecia dicho pico, se retirará la carga aplicada a la probeta a fin de observar el estado físico de esta. La curva que de dicho ensayo se deriva, es presentada en la figura 3-17.

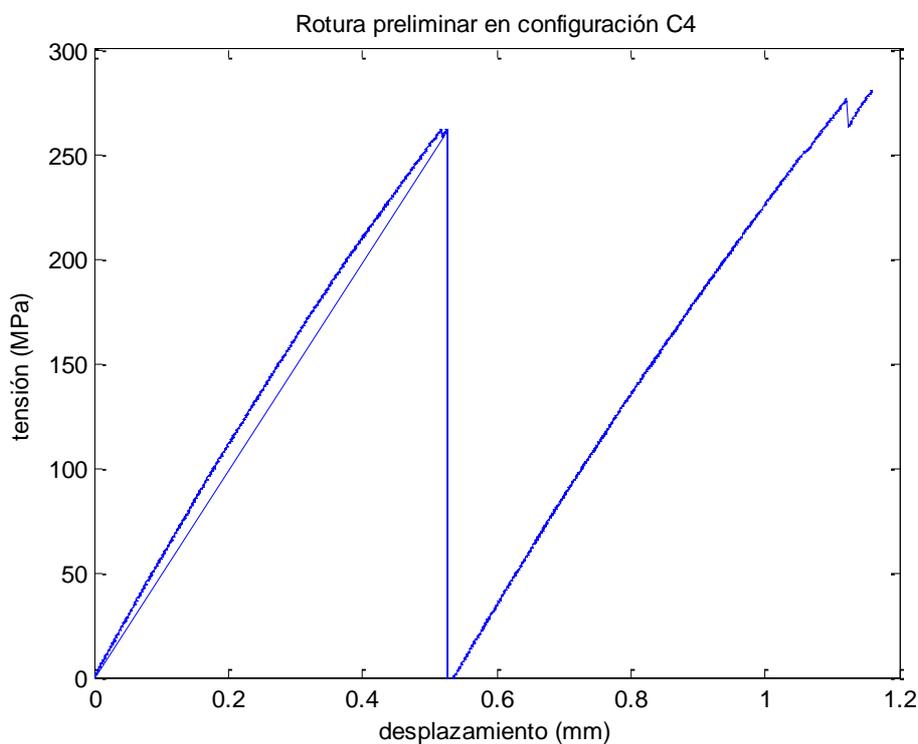


Figura 3-17. Curva tensión-desplazamiento para ensayo de rotura preliminar

Tras el pico que tiene lugar en torno a 0.5 mm de desplazamiento no se observa ningún indicio de rotura en fibras. Al comenzar de nuevo a cargar el material (notar cómo al estar en período elástico la pendiente de la curva es la misma que la de la primera vez que se aplicó fuerza) se tiene que en torno a la misma tensión se da otro pico en el que sí se aprecia rotura de fibras, aunque esta rotura no sea la definitiva de la probeta. Se puede apreciar lo explicado en la figura 3-18.

En dicha imagen se aprecia el despegue de los paneles tipo P de los M, comenzando esto en la zona de unión de los paneles P.



Figura 3-18. Probeta tipo C4 con rotura preliminar

3.10. Tipo D1

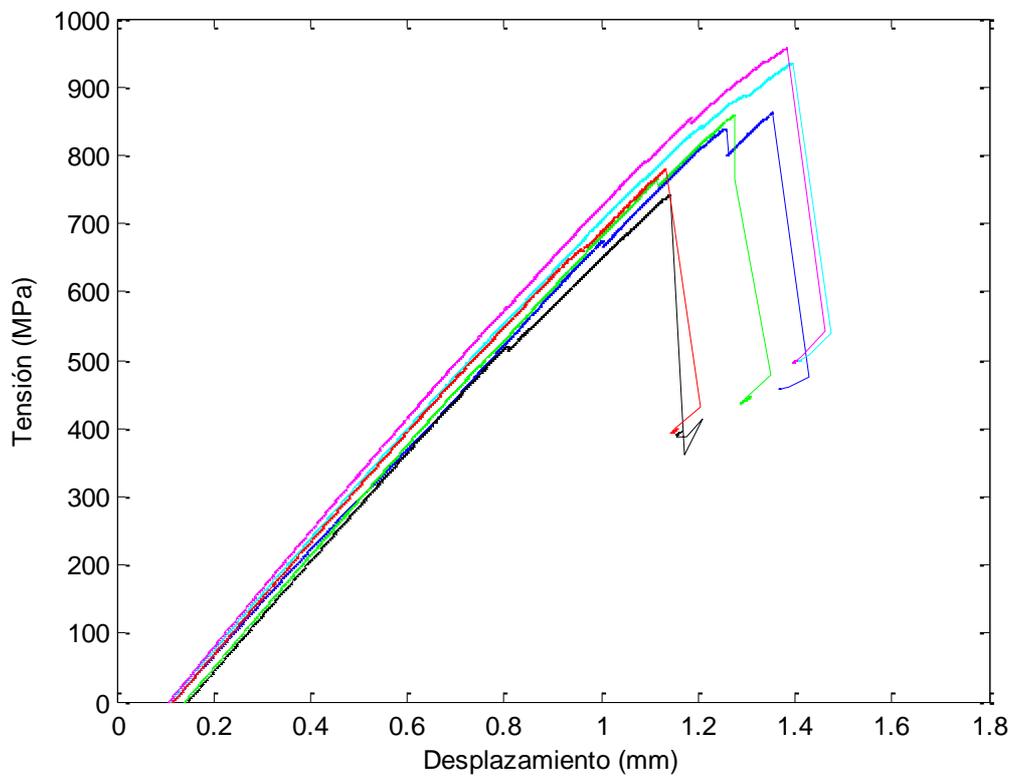


Figura 3-19. Representación tensión-desplazamiento en configuración D1

A la vista del gráfico de la figura 3-19, se observa en primera instancia cómo las tensiones de rotura de las probetas de este tipo son mayores que casi todas la de los tipos anteriores. Se observa asimismo el pico de bajada característico asociado al fenómeno de la rotura preliminar de fibras en la probeta 1 de la serie.

En cuanto a la rotura en las probetas de tipo D1, es preciso comentar que se produce como consecuencia del despegue en primer lugar del laminado REP2 y continuando por la zona marcada con línea roja en el esquema de la figura 3-21.

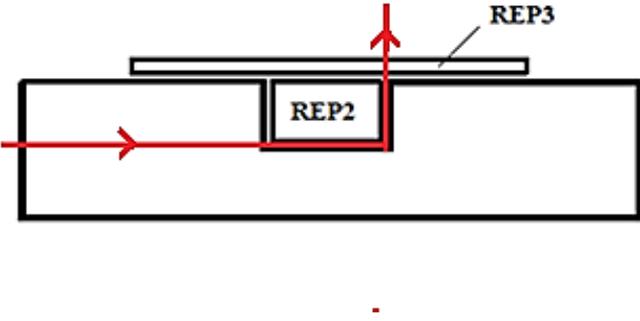


Figura 3-20. Esquema de rotura en configuración D1

3.11. Tipo D2

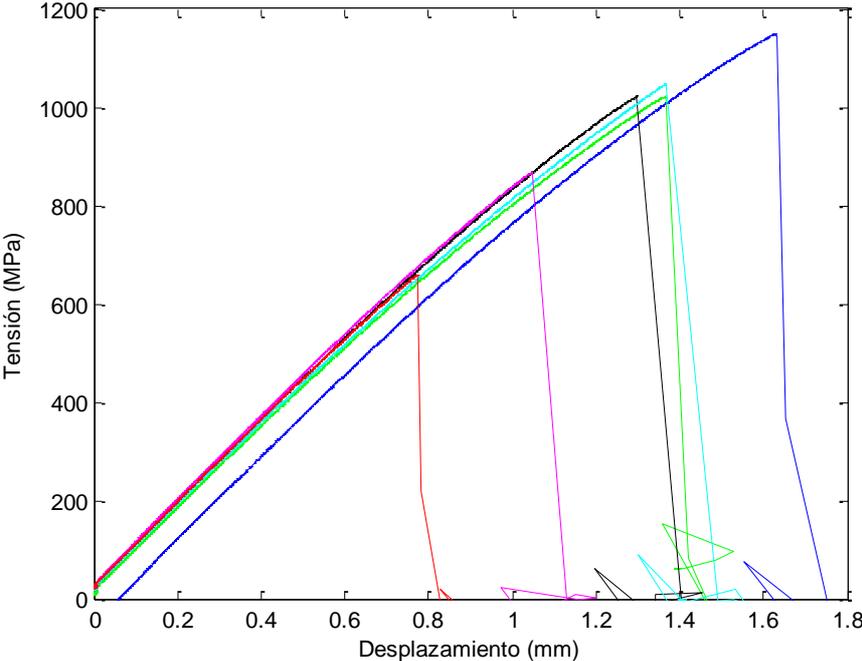


Figura 3-21. Representación tensión-desplazamiento en configuración D2

Al igual que en tipo D1, la rotura para las probetas de esta configuración se produce para tensiones elevadas en comparación con los demás tipos, siendo además destacable de la figura 3-21 la gran diferencia de tensión de rotura obtenida entre las probetas 5, 6 y el resto.

La rotura de las probetas tipo D2 ocurre de una forma totalmente análoga a las de tipo D1, según se muestra en el esquema de la figura.

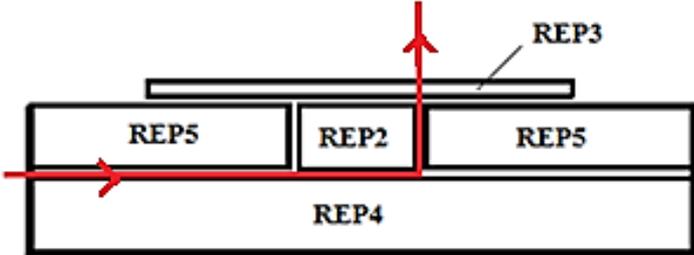


Figura 3-22. Esquema de rotura en configuración D2

Por ende, se muestran en la figura 3-23 imágenes de probetas tipo D1 y D2 tras haber sido sometidas a ensayo.

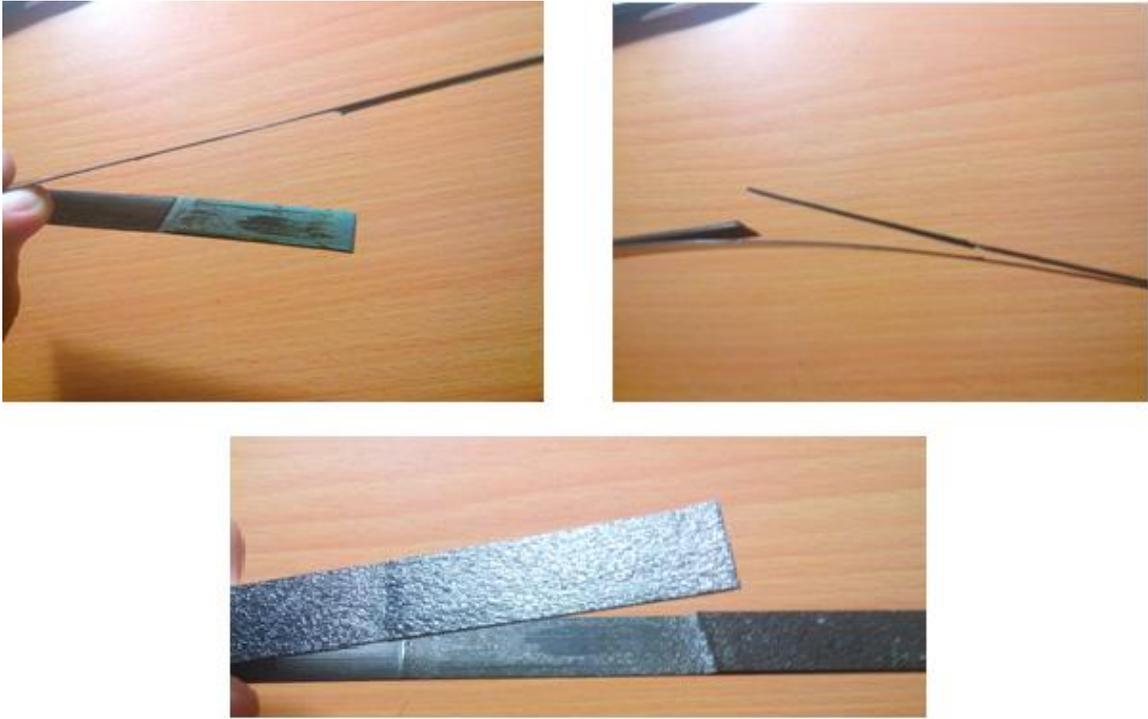


Figura 3-23. Rotura de probetas tipo D

Es interesante observar cómo a pesar de que en configuración D2 existe un solape entre los laminados REP4 y REP5, la rotura se da de la misma forma que en configuración D1, obteniéndose incluso mayores tensiones de rotura en D2, como se verá posteriormente.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

“Ninguna cantidad de experimentación puede demostrar definitivamente que tengo razón. Pero un solo experimento puede probar que estoy equivocado.”

- Albert Einstein -

Se trata en la presente sección de analizar en detalle los resultados obtenidos tras el ensayo de tracción realizado a las probetas de diferentes configuraciones con vistas a arrojar luz sobre el problema bajo estudio.

Se expondrán en primer lugar los resultados de cada configuración de forma aislada en la sección 4.1, y se analizarán en mayor detalle en el siguiente apartado mediante comparativas principalmente.

4.1. Resultados por tipo

Se presentan gráficos ilustrativos de las tensiones de rotura de todas las probetas de una misma serie así como una tabla en la que se detallan los valores correspondientes. Además se hará uso de variables estadísticas para cuantificar la variabilidad de las tensiones de rotura de las probetas de una misma configuración estructural.

Concretamente, se cuantificarán los siguientes indicadores:

- Media

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

- Desviación estándar

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

- Coeficiente de variación

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

Donde x_i son los distintos valores de tensión de rotura y N es el total de probetas ensayadas para la serie en

cuestión.

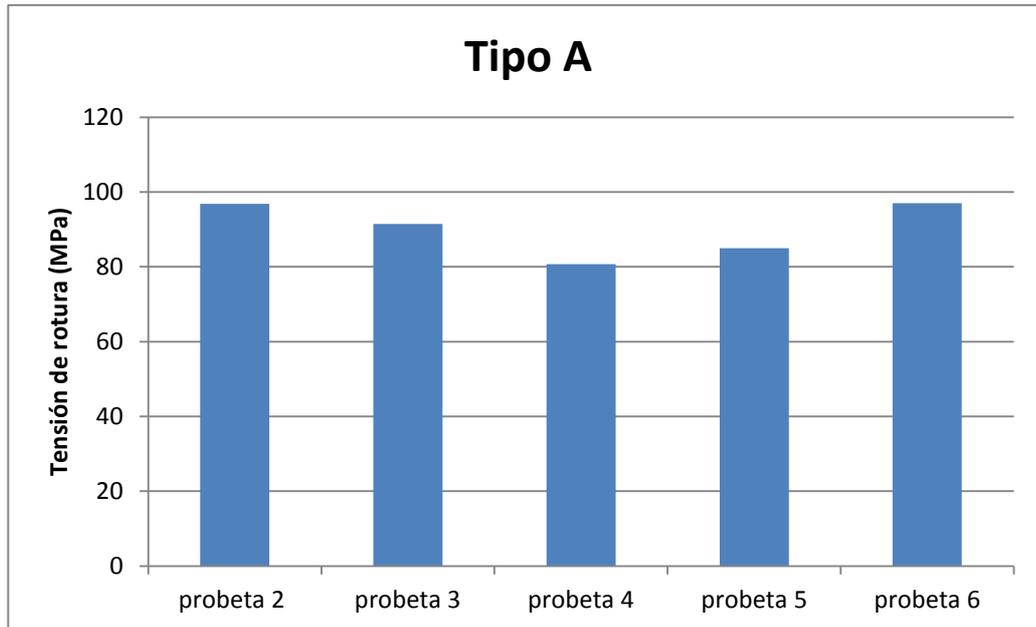


Figura 4-1. Gráfico de tensiones de rotura en tipo A

Tabla 4-1. Resultados tipo A

PROBETA	ROTURA (MPa)
probeta 2	96,823
probeta 3	91,485
probeta 4	80,715
probeta 5	84,935
probeta 6	96,980
MEDIA	90,187 MPa
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	8,01 %
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	7,231

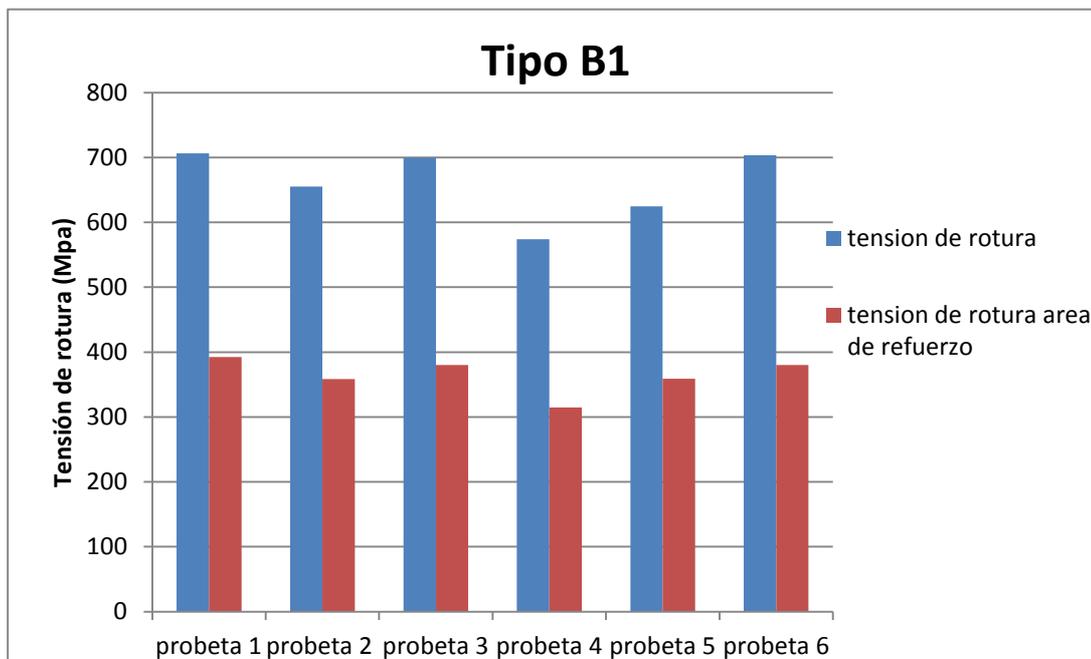


Figura 4-2. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B1

Como se mencionó en la sección 2.4 *Normalización de probetas*, en configuración B se representan también los valores de tensión de rotura asociados al área del refuerzo de cada probeta.

Tabla 4-2. Resultados tipo B1

PROBETA	ROTURA (MPa)	ROTURA REF (MPa)
probeta 1	706,235	392,551
probeta 2	655,029	358,412
probeta 3	699,243	380,320
probeta 4	573,944	314,566
probeta 5	624,778	359,171
probeta 6	703,586	380,136
MEDIA	660,469 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	8,08 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	53,379	
MEDIA (REF)	364,193 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (REF)	7,60 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REF)	27,712	

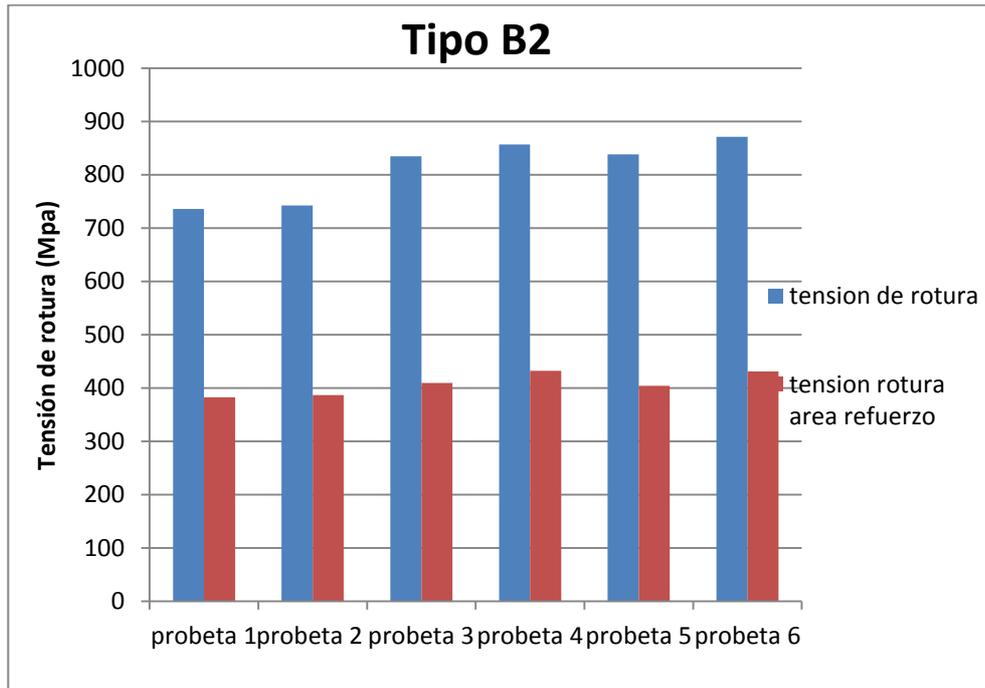


Figura 4-3. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B2

Tabla 4-3. Resultados tipo B2

PROBETA	ROTURA (MPa)	ROTURA REF (MPa)
probeta 1	735,750	382,760
probeta 2	742,416	386,682
probeta 3	834,594	409,622
probeta 4	857,043	432,152
probeta 5	838,468	403,989
probeta 6	871,437	431,320
MEDIA	813,285 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	7,25 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	59,023	
MEDIA (REF)	407,754 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (REF)	5,18 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REF)	21,151	

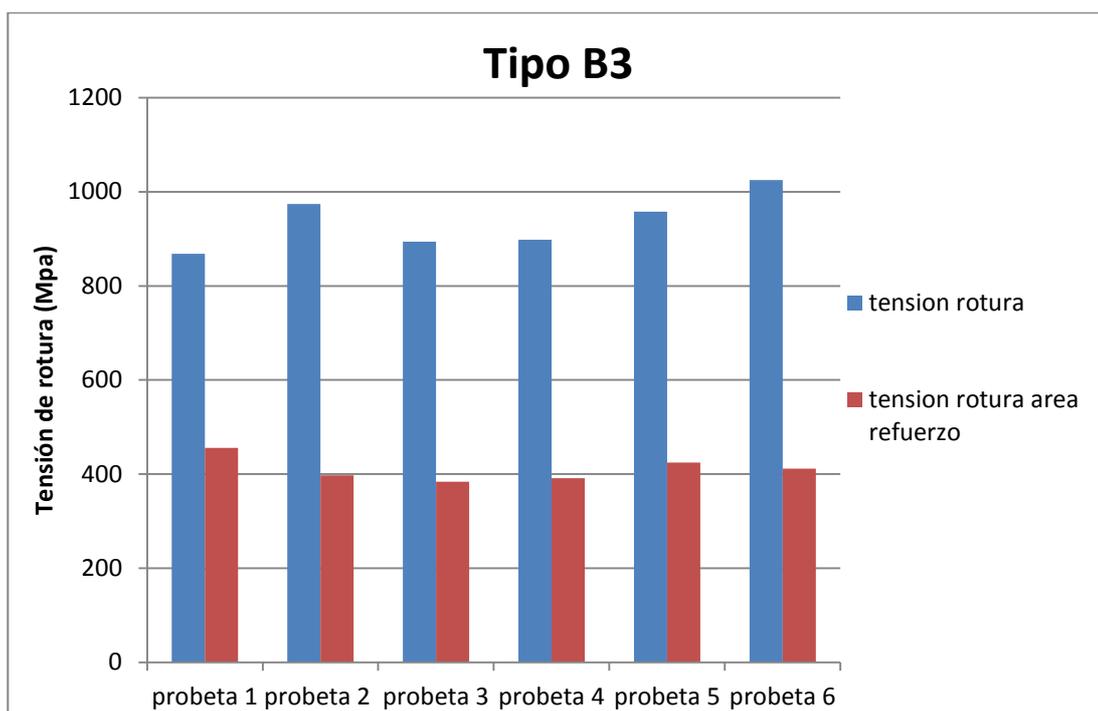


Figura 4-4. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B3

Tabla 4-4. Resultados tipo B3

PROBETA	ROTURA (MPa)	ROTURA REF (MPa)
probeta 1	868,111	455,758
probeta 2	974,005	397,463
probeta 3	894,145	383,959
probeta 4	898,225	391,636
probeta 5	958,096	424,857
probeta 6	1025,281	411,666
MEDIA	936,311 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	6,35 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	59,482	
MEDIA (REF)	410,890 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (REF)	6,42 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REF)	26,401	

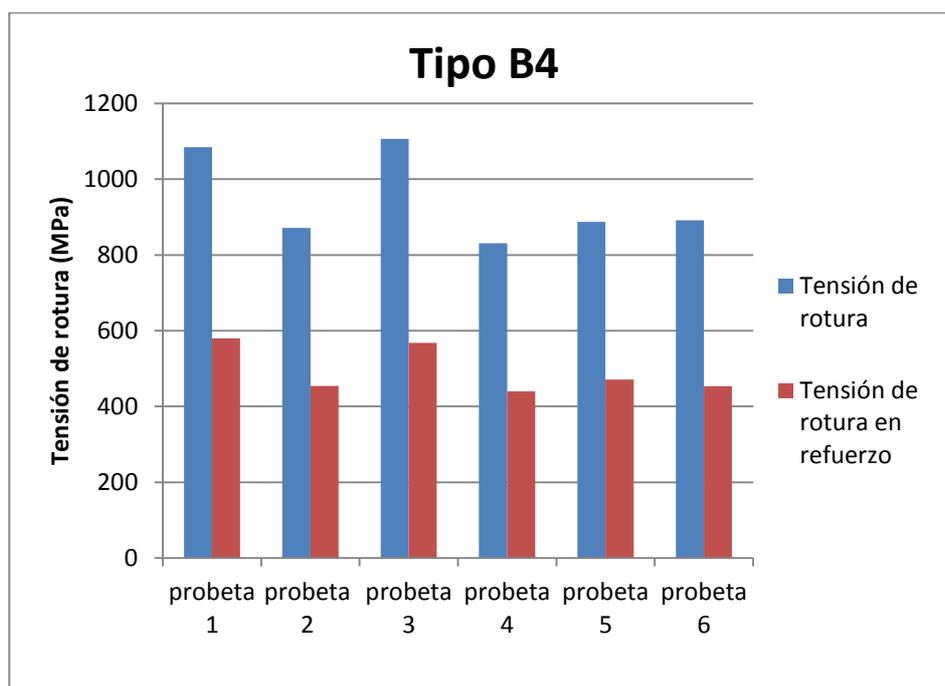


Figura 4-5. Gráfico de tensiones de rotura en tipo B4

Tabla 4-5. Resultados tipo B4

PROBETA	ROTURA (MPa)	ROTURA REF (MPa)
probeta 1	1084,567	579,3497056
probeta 2	871,373	454,2518875
probeta 3	1106,367	568,3268737
probeta 4	830,642	439,5691503
probeta 5	886,953	471,1012752
probeta 6	891,565	453,4497747
MEDIA	945,245 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	12,53 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	118,525	
MEDIA (REF)	494,34 MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (REF)	23,97 %	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REF)	118,525	

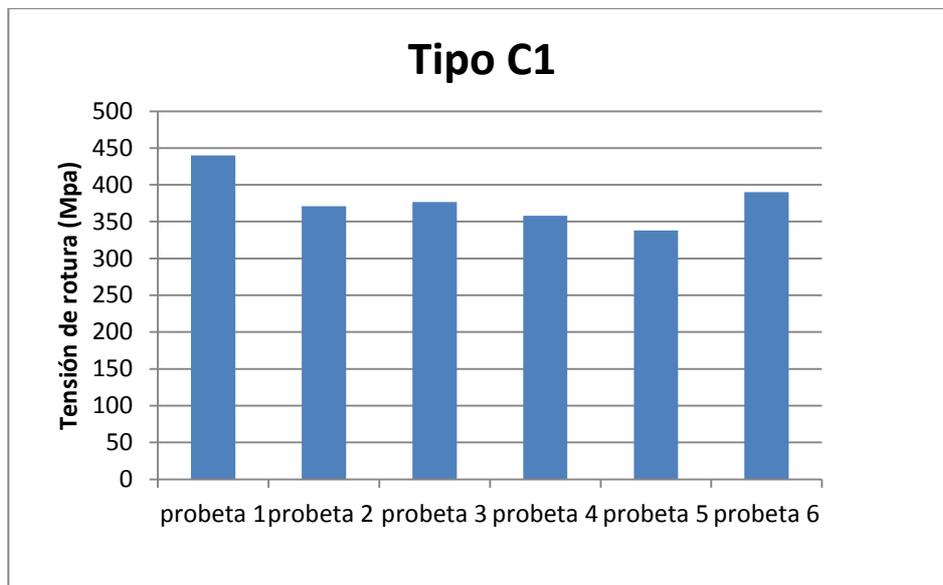


Figura 4-6. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C1

Tabla 4-6. Resultados tipo C1

PROBETA	ROTURA (MPa)
probeta 1	439,837
probeta 2	370,959
probeta 3	376,598
probeta 4	357,807
probeta 5	338,210
probeta 6	390,244
MEDIA	378,94 MPa
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	9,149 %
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	34,672

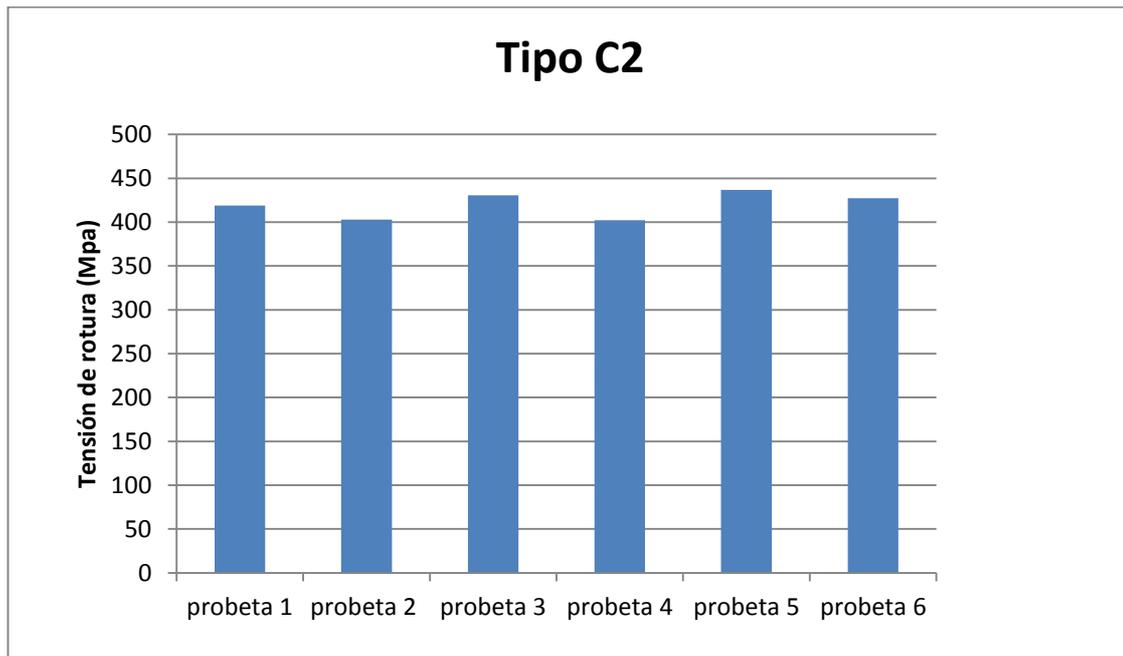


Figura 4-7. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C2

Tabla 4-7. Resultados tipo C2

PROBETA	ROTURA (Mpa)
probeta 1	418,907
probeta 2	403,108
probeta 3	430,443
probeta 4	402,317
probeta 5	436,659
probeta 6	427,436
MEDIA	419,81 Mpa
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	3,43 %
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	14,428

Cabe destacar el pequeño porcentaje de desviación estándar que se tiene en esta configuración.

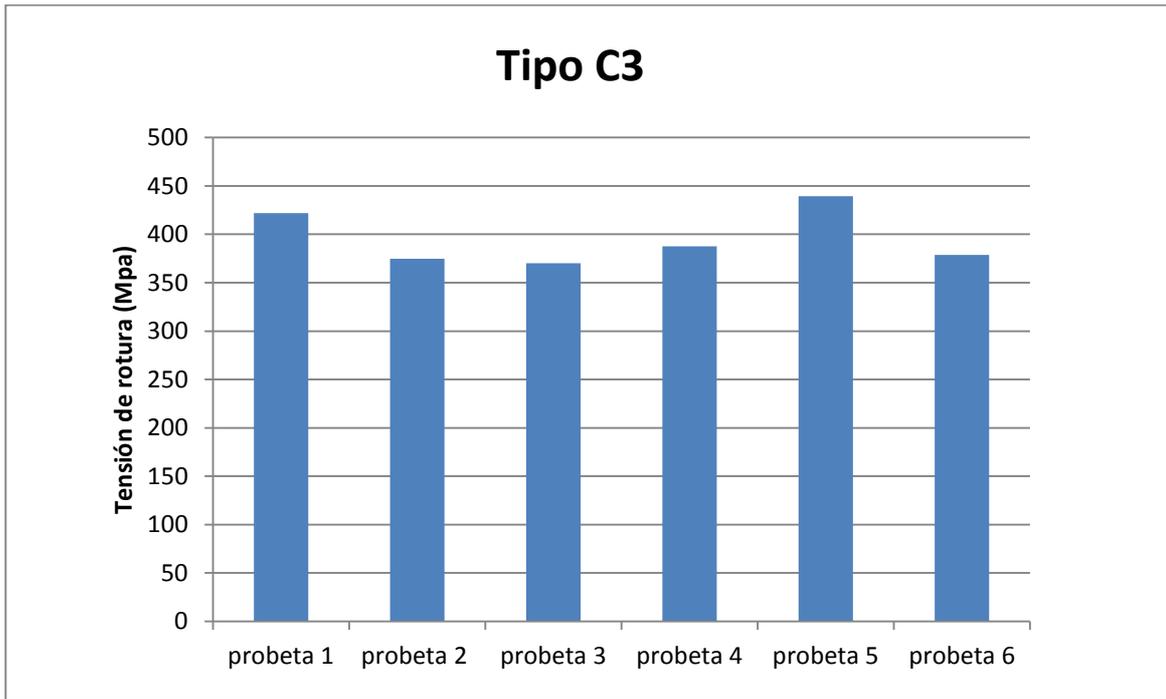


Figura 4-8. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C3

Tabla 4-8. Resultados tipo C3

PROBETA	ROTURA (MPa)
probeta 1	422,062
probeta 2	374,776
probeta 3	370,170
probeta 4	387,566
probeta 5	439,303
probeta 6	378,801
MEDIA	395 MPa
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	28,415
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	7,185 %

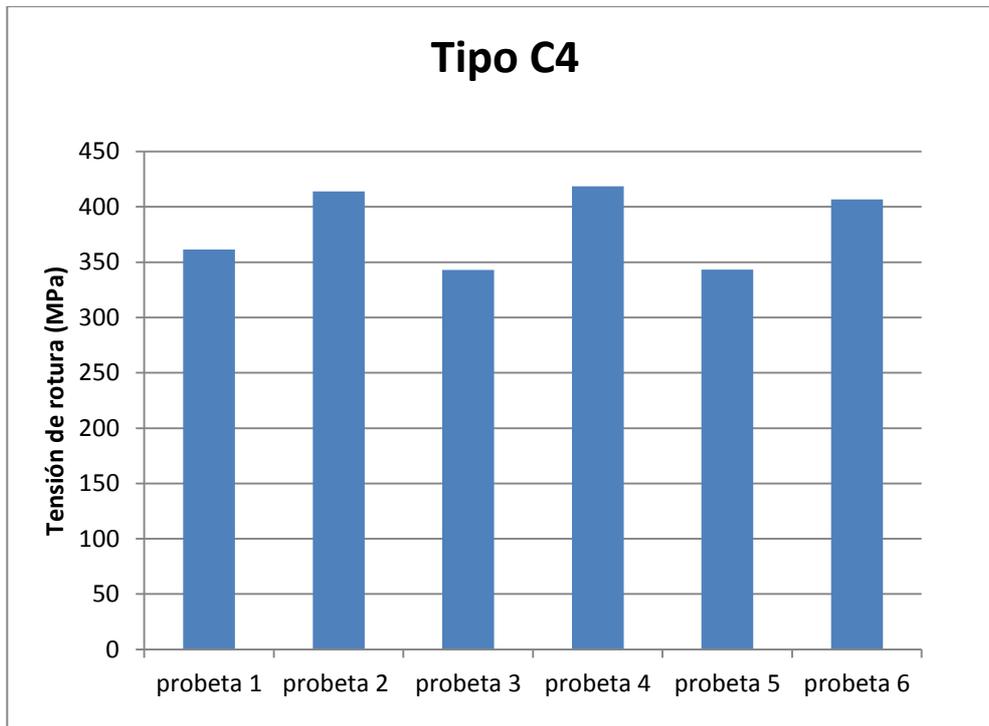


Figura 4-9. Gráfico de tensiones de rotura en tipo C4

Tabla 4-9. Resultados tipo C4

PROBETA	ROTURA (MPa)
probeta 1	361,50
probeta 2	414,08
probeta 3	342,922
probeta 4	418,666
probeta 5	343,188
probeta 6	406,776
MEDIA	381,190 MPa
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	35,882
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	9,41 %

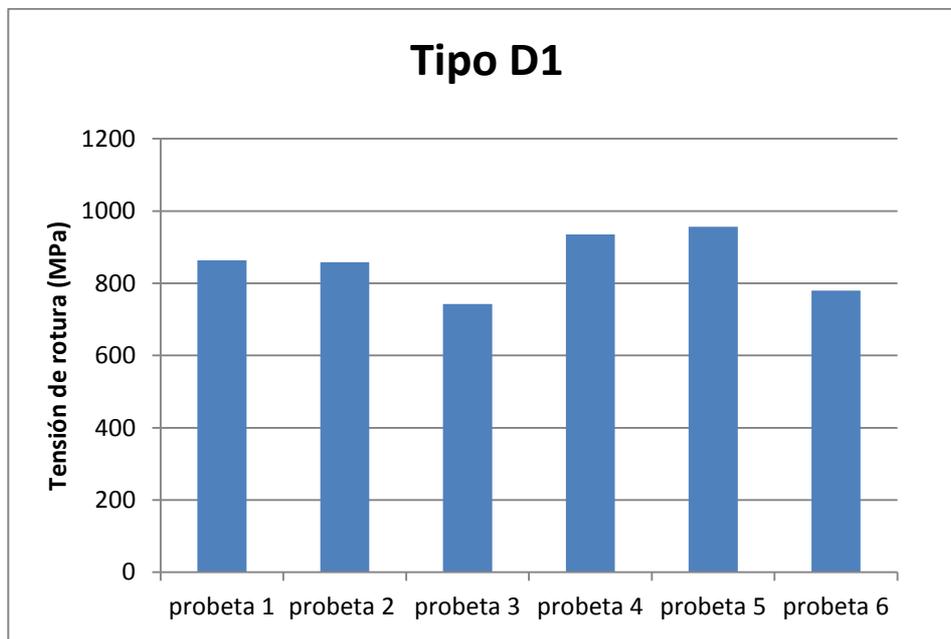


Figura 4-10. Gráfico de tensiones de rotura en tipo D1

Tabla 4-10. Resultados tipo D1

PROBETA	ROTURA (MPa)
probeta 1	863,218
probeta 2	858,233
probeta 3	742,542
probeta 4	935,599
probeta 5	956,780
probeta 6	779,663
MEDIA	856,006 MPa
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	83,963
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	9,80 %

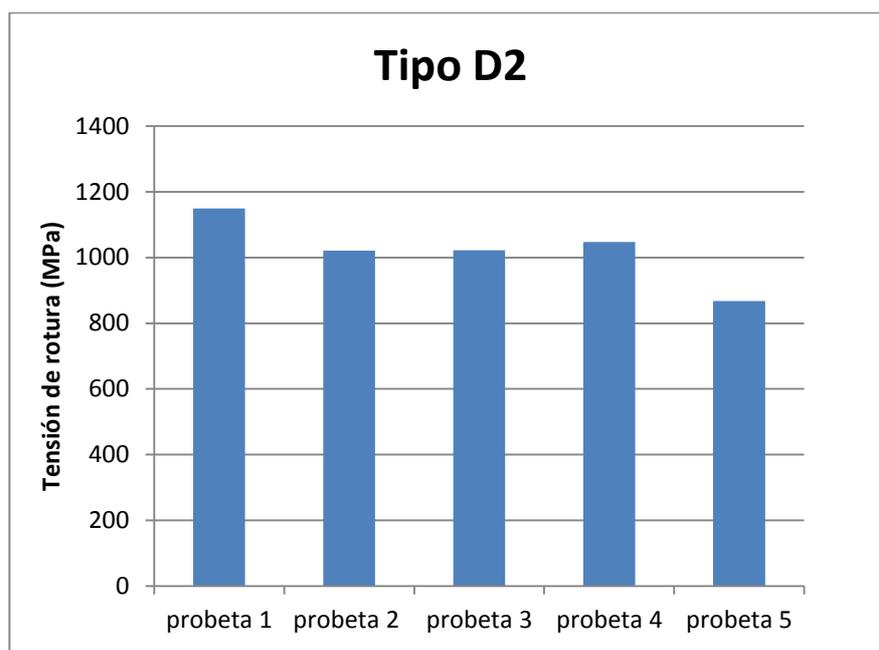


Figura 4-11. Gráfico de tensiones de rotura en tipo D2

Tabla 4-11. Resultados tipo D2

PROBETA	ROTURA (MPa)
probeta 1	1150,029
probeta 2	1021,330
probeta 3	1021,998
probeta 4	1047,582
probeta 5	867,154
probeta 6	659,531
MEDIA	
	1021,619 MPa
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	
	101,274
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	
	9,913 %

Es preciso comentar que en la industria aeroespacial es común la torelancia de ensayos con hasta un 15 % de coeficiente de variación aproximadamente y a la vista de los resultados expuestos, se cumple para todos los casos excepto para la configuración D2 y B4 para el caso de la tensión asociada al área del refuerzo.

4.2. Comparativas

En la presente sección se trata de plasmar claramente las analogías y diferencias entre las distintas estructuras fabricadas. Se representa a continuación con tal fin un diagrama con la tensión de rotura media de cada configuración, así como un cuadro resumen con dichos valores.

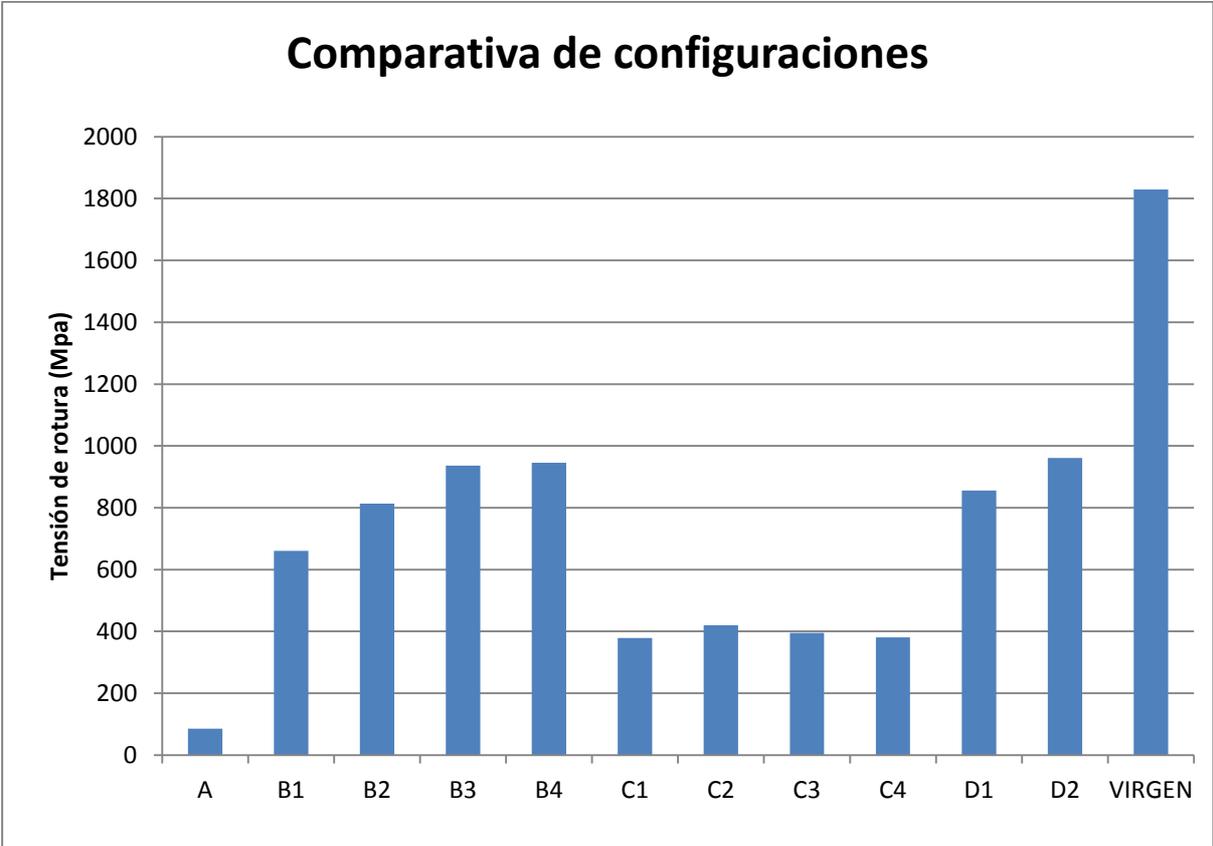


Figura 4-12. Comparativa de tensiones de rotura en todas las configuraciones

Es preciso comentar que se incluye en el gráfico la tensión de rotura del material virgen [4], considerado el cual como un laminado cuya dirección de la fibra está orientada a 0°.

Tabla 4-12. Tensión de rotura media de cada configuración

TIPO	ROTURA (MPa)
A	90,187
B1	660,469
B2	813,285
B3	936,311
B4	945,245
C1	378,942
C2	419,812
C3	395
C4	381,191
D1	856,006
D2	1021,619
VIRGEN	1829,6

A la luz de este gráfico podemos establecer los siguientes razonamientos:

- Como era de esperar, la diferencia entre la configuración A y las demás en el valor de tensión de rotura es bastante acusada. Tal y como se ha venido comentando, la unión a tope de los paneles tipo S se muestra mucho menos robusta que aquellas de los demás tipos.
- En la familia tipo B, se puede apreciar claramente cómo a medida que la longitud característica d asociada al refuerzo aumenta, la tensión de rotura de la configuración es también mayor. El aumento de dicha longitud tiene como consecuencia un aumento de la tensión de rotura hasta una determinada longitud efectiva d_{ef} a partir de la cual no varía dicha tensión. La variación de tensión entre la configuración B3 (para la que $d=6$ cm) y la B4 ($d=15$ cm) es prácticamente nula, con lo que podemos concluir que:

$$d_{ef} \approx 6 \text{ cm}$$

- En un principio se fabricaron y ensayaron las configuraciones C1, C2 y C3 obteniéndose que las variaciones de la longitud L no influyen. Dado que las variaciones de dicha medida son de 1 cm entre cada tipo, estos ensayos no se consideraron algo totalmente representativo, con lo que se decidió fabricar el tipo C4. Finalmente, según observamos en el gráfico de la figura 4-13, se concluye que la tendencia de cambio de tensiones de rotura según varía la longitud característica L en el tipo C es prácticamente nula.
- Es interesante reseñar para el caso de las configuraciones estructurales tipo D que el hecho de obtener una geometría tipo D1 antes de aplicar parches de reparación según la figura 2.6, empleando paneles REP5 tal

como se muestra en la figura 2-8, y evitando por tanto la eliminación de material con fresadora tiene un efecto bastante acusado. En efecto, podemos apreciar en la tabla 4-12 que en media la tensión de rotura para el tipo D2 es prácticamente 150 MPa mayor que en el tipo D1.

- Aunque las configuraciones analizadas durante la realización de este proyecto con mayor tensión de rotura son la B4 (945,245 MPa) y D2 (1021,169 MPa), ambas distan bastante de la tensión de rotura del material original (1829,6 MPa).

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

“El verdadero progreso es el que pone la tecnología al alcance de todos”.

- Henry Ford -

Se pretende en esta última sección del documento exponer tanto las conclusiones que se derivan de los análisis realizados en apartados anteriores, como proponer líneas futuras de investigación en base a dichas conclusiones.

Es preciso recordar que el objetivo inicial de este proyecto se sustentaba en la necesidad de vislumbrar el comportamiento a tracción de distintas configuraciones estructurales de laminados a 0° entre las cuales hay diferencias en geometría, a fin de comprobar cómo de efectivo es variar determinados parámetros geométricos de cara al comportamiento estructural. El fin último de todo ello es posibilitar la extrapolación de algunas ideas derivadas de tal estudio a mejoras en las reparaciones reales de material compuesto.

Después de realizar la campaña de ensayos a fin de examinar el comportamiento a tracción de las configuraciones diseñadas se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- El hecho de que la tensión de rotura en media para paneles configuración A sea de 85.62 MPa pone de manifiesto la debilidad de la unión entre los paneles S que conforman dicha estructura.
- Según se comentó en la sección 2.1.2 del presente proyecto, se consideró la idea de fabricar sendos paneles B4 y C4 para constatar si el tomar valores mucho mayores de las longitudes características d y L respectivamente tiene un efecto apreciable en el comportamiento a tracción de la estructura. Efectivamente, si bien los resultados ponen de manifiesto que en la familia C no tiene efecto alguno la modificación de la longitud L , en la configuración B se llega a un resultado de bastante interés; a medida que aumenta la longitud d el comportamiento mejora obteniéndose valores mayores de tensión de rotura hasta alcanzar una longitud efectiva para la cual se concluye que la tensión de rotura no varía. Se puede apreciar dicho fenómeno en la figura 5-1.

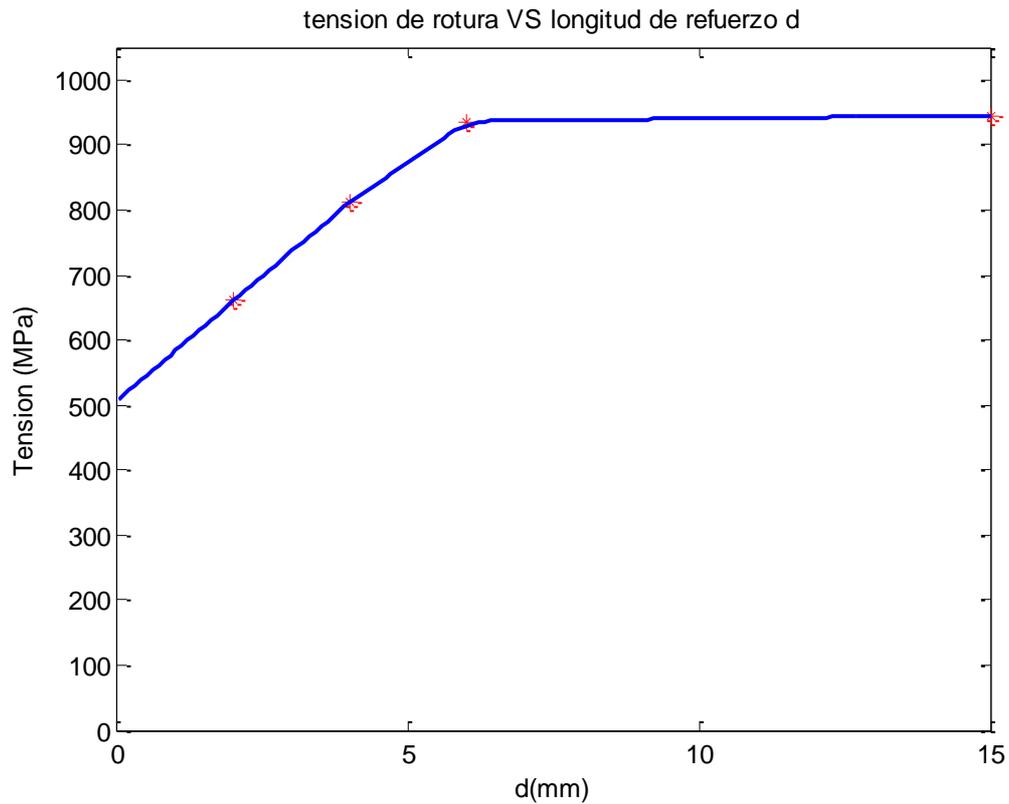


Figura 5-1. Sensibilidad de la tensión de rotura con el refuerzo

A la vista de la presente figura, y de acuerdo a lo postulado en la sección 4.2 del documento, dicha longitud efectiva está en torno a 6 cm.

La aplicación de esta idea a una situación real puede tener como consecuencia un ahorro de material y por tanto económico, teniendo en cuenta la longitud crítica a partir de la cual un aumento de longitud de parche en geometrías análogas a la estudiada no tendrá beneficios en el comportamiento de la pieza.

- La no variación de tensión de rotura con la longitud L en paneles tipo C, puede ser consecuencia del emplazamiento de la probeta en las mordazas de la máquina INSTRON durante el ensayo. Durante la etapa de experimentación se emplazó la probeta tal como se muestra en la siguiente figura.

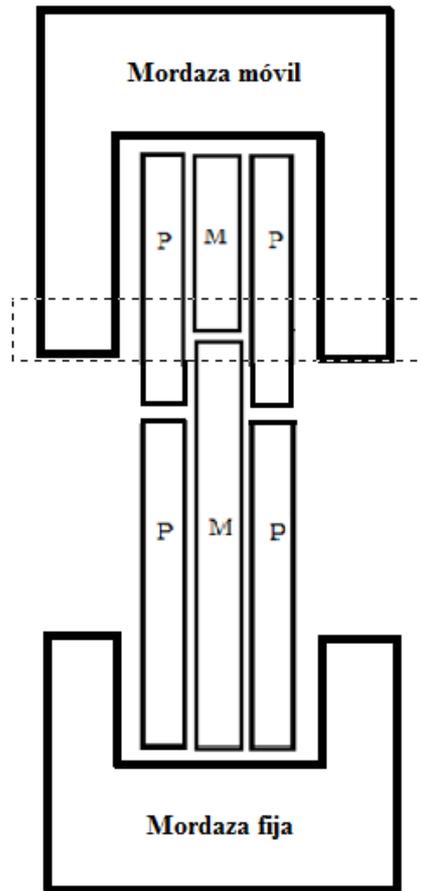


Figura 5-2. Agarre de mordazas de la máquina INSTRON a probetas tipo C

Es posible que la zona de trazo discontinuo, en la que se unen los paneles M sea problemática, provocando una prematura rotura explosiva según se reseñó en la figura 3-13 y teniendo por ende unos resultados no representativos acerca del efecto que tiene la longitud L en la tensión de rotura para esta geometría.

- En cuanto a los paneles de reparación tipo D, es interesante destacar cómo para obtener una geometría de estructura con defecto central como la que se muestra en la figura 2-6, si se hace por eliminación de material con fresadora según se explica en la sección 2.3, los resultados obtenidos son peores que si se construye dicha geometría con paneles REP5 (figura 2-8). En efecto:

Tabla 5-1. Comparación en tipo D

TIPO	ROTURA (MPa)
D1	856,006
D2	1021,169

Una posible aplicación de esta idea a un problema real de pieza dañada (cuando la geometría sea análoga a la aquí estudiada) radica en el estudio de la posibilidad de eliminar capas adyacentes a la zona de daño y volver a construir a base de laminados fabricados a tal efecto un correcto emplazamiento para el parche de reparación (en este proyecto se ha simulado dicho emplazamiento mediante el hueco central de los paneles según los esquemas de las figuras 2-6 y 2-8). En definitiva se trataría de comenzar la reparación tomando como punto de partida una geometría análoga a la de la figura 2-8, en lugar de la reseñada en la imagen 2-6.

Teniendo en cuenta las conclusiones expuestas, sería interesante concluir con las siguientes líneas futuras:

- Dada la baja sensibilidad de la tensión de rotura en paneles tipo C con la longitud efectiva L , sería interesante plantear diseños de panel tal que se mejore el comportamiento a tracción de la estructura bajo el control de cierta magnitud. A tal efecto podrían realizarse estudios de carácter numérico con Abaqus por ejemplo.
- A la vista de la figura 4-9, la efectividad del refuerzo en la geometría tipo B en la mejora del comportamiento estructural hace que sea interesante continuar incidiendo en el establecimiento de diseños de reparación basados en una transmisión de cargas análoga a la que se da en dicha configuración.
- El recurrente resultado obtenido en ensayos de probetas tipo B1, C2 e incluso C1 acerca del pico de rotura preliminar (representado en la figura 3-13) podría tener alguna consecuencia cuando el material está trabajando bajo esfuerzos de tracción. Con lo cual sería conveniente fabricar y probar nuevamente estas configuraciones estructurales según lo expuesto en la figura 3-17.
- Un punto de bastante interés versa sobre la inclusión de modificaciones tanto en el proceso de resanado, como en el de reparación, ya sea mediante el empleo de otro tipo de materiales o mediante configuraciones geométricas distintas de la colocación del parche, con vistas a seguir estudiando la transmisión de cargas.
- Por ende convendría también ampliar el rango de ensayos a fin de analizar el comportamiento de las configuraciones estructurales fabricadas someténdolas a esfuerzos de compresión, cortadura, etc.

REFERENCIAS

[1] Hexcel Composites, «Composites Repair».

[2] F. París, J. Cañas, J. C. Marín y A. Barroso, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos.

[3] Manual de uso de la máquina INSTRON 8801.

[4] L. Velasco «Desarrollo de un método de reparación de reparaciones en laminados monolíticos de fibra de carbono»

[5] MATLAB User Guide .

[6] J. Justo, J. C. Marín y J. Cañas, Prácticas de materiales compuestos, 2014.

[7] A. Miravete y L. Castejón, «Materiales Compuestos,» Descriptiva de materiales. Materiales en el proceso de diseño, 2002.

[8] C. Soutis, «Fibre reinforced composites in aircraft construction,» Progress in Aerospace Sciences, vol. 41, 2005.

Se muestra a continuación el código empleado para la realización de las representaciones mostradas en la sección 3. *Ensayos*.

Representación.m

```
clc; close all; clear all;
rotura=zeros(6,1);
%roturaref=zeros(6,1);
for i=1:6

    s=strcat('TC1P',num2str(i),'.csv');
    d=strcat('TC1P',num2str(i));
    b=strcat('D',num2str(i+1));
    %bref=strcat('F',num2str(i+1));

    desplazamiento=xlsread(s,d,'G2:G12301');
    carga=xlsread(s,d,'H2:H12301'); %en KN

    area=xlsread('AREAS.xlsx','TIPO C1',b); %en mm^2
    %arearef=xlsread('AREAS.xlsx','TIPO B2',bref);

    tension=1000*(carga/area); %en MPa
    %tensionref=1000*(carga/arearef);

    a=strcat('b'); w=strcat('g');y=strcat('k'); l=strcat('c'); u=strcat('m');
    n=strcat('r');
    colores=[a w y l u n];
    j=colores(i);
    %figure %para sacar graficas individuales
    plot(desplazamiento-desplazamiento(1),tension,j); axis([0,0.85,0,500]);
    hold on %para la familia de curvas
    %title(d) %para individuales
    title ('configuración C1') %para la familia

    xlabel('desplazamiento (mm)')
    ylabel('tensión (MPa)');

    rotura(i)=max(tension) %en MPa
    %roturaref(i)=max(tensionref)
end
%xlswrite('GRAFICO.xlsx',rotura,'tipoB2','B2:B7')
```

