

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis y estudio experimental de la influencia de las imperfecciones iniciales en el comportamiento en postpandeo de placas de material compuesto

Autor: Alejandro Rubio Arce

Tutores: Antonio Blázquez Gámez

Jesús Justo Estebaranz

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

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis y estudio experimental de la influencia de las imperfecciones iniciales en el comportamiento en postpandeo de placas de material compuesto

Autor:

Alejandro Rubio Arce

Tutores:

Antonio Blázquez Gámez

Jesús Justo Estebanz

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales
Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Análisis y estudio experimental de la influencia de las imperfecciones iniciales en el comportamiento en postpandeo de placas de material compuesto

Autor: Alejandro Rubio Arce

Tutor: Antonio Blázquez Gámez
Jesús Justo Estebaranz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mis padres Alfredo y Aurora.

A mi hermano Jose.

A Inés.

Agradecimientos

La realización de este proyecto se ha llevado a cabo gracias a la colaboración desinteresada y profesional de muchas personas a las que me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento.

Empezando por mis dos tutores D. Antonio Blázquez Gámez y D. Jesús Justo Estebaranz que siempre han mostrado su predisposición a ayudarme en todo lo necesario tanto en la realización como en el planteamiento del proyecto y cuyos conocimientos han sido fundamentales a la hora de desarrollar este trabajo.

También me gustaría agradecer a todo el personal del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales que me han aportado no solo cualquier tipo de ayuda y colaboración en el día a día, sino también un apoyo constante en el transcurso de la realización del TFG, mención especial para D. Antonio Cañas Delgado y D. Miguel Muñoz, que siempre ante cualquier inconveniente me aportaron soluciones. Además, me gustaría hacer mención a mis compañeros que han estado realizando proyectos a la par del mío en el LERM, con los que ha habido siempre un ambiente de colaboración y profundo respeto.

Por último, reconocer también la aportación de la empresa TEAMS que ha cedido sin ninguna retribución a cambio el sistema ARAMIS con el cual hemos recabado datos durante la realización de los ensayos y de forma especial a D. Rafael Cabrera Melgar, que se implicó y ayudó durante dicho proceso.

Alejandro Rubio Arce
ETSI Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Índice

Agradecimientos	9
Índice	10
1 Introducción	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Motivación	12
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Principal	15
1.3.2 Secundarios	15
1.3.3 Personal	15
1.4 Organización del proyecto	15
2 Planificación	17
2.1. Configuración de las placas	17
2.1.1 Laminado 1	18
2.1.2 Laminado 2	19
2.1.3 Laminado 3	19
2.1.4 Laminado 4	20
2.1.5 Laminado 5	21
2.1.6 Laminado 6	21
2.1.7 Laminado 7	22
2.1.8 Laminado 8	23
2.1.9 Laminado 9	23
2.1.10 Laminado 10	24
2.1.11 Laminado 11	25
2.1.12 Laminado 12	25
2.2. Estado del arte	26
2.3. Plan de Trabajo	27
3 Descripción y limpieza del molde	28
4 Fabricación de las placas	30
4.1. Descripción del material	30
4.2. Corte del material	31
4.3. Proceso de apilado	33
4.4. Fabricación de la bolsa de vacío	36
4.5. Curado en el autoclave	44
4.6. Acabado de las probetas	46
5 Útil de ensayo	49
5.1. Diseño y limpieza del útil original	49
5.2. Modificaciones del útil	52

6	Preparación de los ensayos	57
6.1.	Comprobación visual y experimental de las probetas finales	57
6.2.	Preparación de los sistemas de recopilación de datos	62
6.2.1	Sistema ARAMIS	62
6.2.2	Colocación de las galgas extensométricas	64
7	Realización de los ensayos	74
8	Resultados de los ensayos	83
8.1.	Placas de fibra a 0°	84
8.1.1	Comprobación entre las placas a 0°	94
8.2.	Placas de fibra a 90°	96
8.2.1	Comprobación entre las placas a 90°	105
8.3.	Placas de fibra mixtas	107
8.3.1	Comprobación entre las placas mixtas	118
8.4.	Placas de fibra a 45°/-45°	119
8.4.1	Comprobación entre las placas de 45°/-45°	129
9	Conclusiones	131
10	Bibliografía	133

1 INTRODUCCIÓN

El hombre nunca hizo un material tan resistente como el espíritu humano.

- Bernard Williams -

A lo largo de este capítulo se tratan los antecedentes del proyecto, la motivación que ha llevado a su realización y los objetivos marcados en el inicio y a lo largo del desarrollo del trabajo.

1.1 Antecedentes

La realización de este Trabajo Fin de Grado se enmarca en el Plan de Estudios del Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales en el plan de estudios del año 2011, para la finalización de dicho grado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) en la Universidad de Sevilla (US).

Dentro de la organización de la Escuela este TFG se desarrolla en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, concretamente en el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM). Gran parte del desarrollo del mismo se ha realizado en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) en las dependencias de la Escuela.

Los tutores del trabajo son D. Antonio Blázquez Gálvez y D. Jesús Justo Estebaranz.

Este proyecto toma como idea de partida el Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Aeronáutica de D. Rafael A. Roig Ortega, desarrollado también en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla en el año 2015, titulado “Análisis experimental de la influencia de las imperfecciones geométricas en el comportamiento en postpandeo de placas de material compuesto”. [1]

1.2 Motivación

Los materiales compuestos o composites han existido en la naturaleza y a lo largo de la historia en distintas civilizaciones si bien hasta el siglo XX no podemos encontrar materiales compuestos tal y como los definimos en la actualidad, como “combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material”. [2]. Dicha definición se va modificando y acotando a medida que surgen nuevos materiales para poder englobar los materiales compuestos como se conocen hoy día en su conjunto.

A raíz del desarrollo constante de nuevos materiales ingenieriles que nos permitan un mayor rendimiento en estructuras y proyectos de ingeniería se produce una auténtica revolución con el desarrollo de los composites, pues se consiguen materiales con unas características mejores que los materiales de partida combinados y con propiedades de gran utilidad para la industria.

La evolución de los procesos de fabricación de los materiales compuestos y la continua investigación ha conseguido que estos materiales sean ya una realidad, ya que de la mano de sus excelentes propiedades se ha conseguido una fiabilidad mediante ensayos y certificaciones a prueba de toda duda. Así, si bien al principio

estos materiales se utilizaban en partes poco comprometedoras y que no tuviesen relación con la seguridad de estructuras o máquinas, hoy podemos ver que son utilizados en posiciones de riesgo (por ejemplo, figura 1.1)¹ o de importantes solicitaciones pues hemos avanzado en su comprensión y estudio.



Figura 1.1: Casco de moto con calota fabricada en fibra de carbono

Aunque ya se esté extendiendo su uso a todo el ámbito ingenieril, es en la industria del transporte donde se le ha dado un gran impulso al desarrollo de los materiales compuestos. Esto es debido principalmente a las buenas características de resistencia mecánica, resistencia al impacto, tolerancia frente a daños, rigidez y resistencia a la fatiga unidas a un bajo peso de dichos materiales en comparación con los materiales tradicionales, siendo esto capital en la industria aeronáutica. Tanto es así que en la actualidad estamos observando una proliferación masiva de los composites en los aviones comerciales que salen al mercado, cuando en su inicio estaban más restringidos al campo de la aeronáutica militar.

Poniendo el ejemplo de una empresa líder en aeronáutica como es Airbus, en la figura 1.2 se puede ver el aumento progresivo en estos últimos años de la cantidad de material compuesto presente en sus aviones comerciales.

¹ Arai Helmets http://www.araihelmet.es/wp-content/uploads/RX7RC_P.jpg Consultada el 12 de agosto de 2016

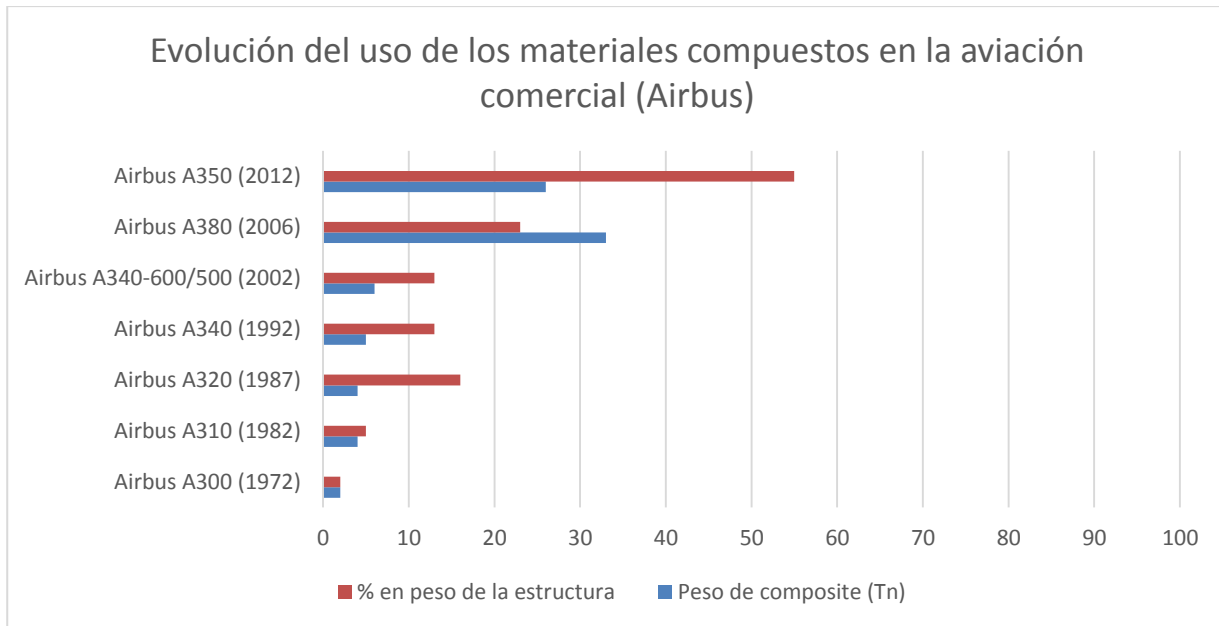


Figura 1.2: Gráfico del uso de composites en la aviación comercial.

El gran aumento del uso de estos materiales conlleva que ya no se utilice solo en unos pocos elementos específicos, si no que ahora hay grandes superficies realizadas de materiales compuestos. Por ello aparece cada vez más la tipología de placas enteras de material compuesto, para poder realizar paneles enteros que cubran la superficie en cuestión, como por ejemplo en el revestimiento del ala del avión.

Estos paneles de gran superficie sufren esfuerzos de muchas características, pero ante esfuerzos de cortadura o de compresión puede llegar a aparecer el fenómeno de pandeo. Se ha podido observar que en los elementos tipo placa de material compuesto cuando se llega a la carga crítica de pandeo, este se produce, pero a diferencia de otras configuraciones, la placa no colapsa y es capaz de mantener su capacidad portante, aún cuando sufra algunas transformaciones en su geometría debido al pandeo. Así, estos elementos son capaces de soportar cargas de compresión mayores que la crítica sin perder la utilidad para las que han sido diseñados.

Cuando se da el fenómeno del postpandeo los desplazamientos en dirección transversal son del orden del espesor de la placa, con lo que para estudiarlo hay que utilizar ecuaciones de grandes desplazamientos y teoría no lineal de forma analítica incluso en problemas sencillos. Por ello se realizan estudios numéricos y experimentales.

En estos estudios experimentales se enmarca este proyecto. Se ha comprobado que elementos con geometrías parecidas o idénticas se comportan de forma muy distinta debido a las imperfecciones existentes. Por ello, es interesante un estudio experimental de distintas configuraciones con imperfecciones introducidas de forma deliberada para ver como condicionan el desarrollo del régimen de postpandeo. En dicho estudio experimental está basado este proyecto.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo principal

El proyecto ha tenido como objetivo principal un ensayo eminentemente experimental que permitiese comprobar si es posible condicionar la evolución del régimen de postpandeo de las placas de material compuesto y cómo se condiciona en el caso de que sea posible, fabricando las placas con unas condiciones de geometría impuestas previamente.

1.3.2 Objetivos secundarios

Los objetivos secundarios que se han ido realizando durante el proyecto han sido:

- Fabricación de las placas.
- Realización de los ensayos experimentales.
- Estudio de los resultados obtenidos.

1.3.3 Objetivo personal

El objetivo personal del proyecto ha sido el de continuar con mi formación académica, haciendo hincapié en procesos experimentales que me pudiesen enriquecer y aportar nuevos conocimientos, más en un área capital en la ingeniería actual como son los materiales compuestos. Estos procesos de fabricación y ensayo me han permitido por un lado asentar los conocimientos sobre materiales compuestos obtenidos durante la realización del Grado, y por otro aumentar dichos conocimientos a unas cotas mayores.

1.4 Organización del proyecto

Los capítulos en los que se ha dividido el proyecto son:

❖ Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se hace una primera aproximación al trabajo que se ha realizado, mediante los antecedentes, la motivación previa y los objetivos de este proyecto.

❖ Capítulo 2: Planificación

Aquí se detalla la configuración decidida para las probetas, el estado del arte, el plan de trabajo que se ha llevado a cabo para la realización del proyecto y la organización de este.

❖ Capítulo 3: Descripción y limpieza del molde

El tercer capítulo muestra las características del molde de fabricación usado y como se realizó su limpieza previa a la fabricación de las probetas.

❖ Capítulo 4: Fabricación de las probetas

Este capítulo expone el proceso de fabricación de las probetas de ensayo. Trata el material utilizado, el proceso de corte, el apilado, la creación de las bolsas de vacío, el curado y los procesos de acabado de las probetas.

❖ Capítulo 5: Útil de ensayo

Aquí se describe el útil utilizado para los ensayos, la limpieza previa de este y las modificaciones introducidas para la mejora de los resultados.

❖ Capítulo 6: Preparación de las probetas

En el sexto se muestra la comprobación numérica y visual de las probetas, la preparación de estas para el uso del sistema ARAMIS y el proceso de colocación de las galgas extensométricas.

❖ Capítulo 7: Realización de los ensayos

Se expone en este capítulo todo lo relacionado con la realización de cada uno de los 12 ensayos realizados.

❖ Capítulo 8: Resultados de los ensayos

En el octavo capítulo se muestran fotografías de las probetas tras ser ensayadas y se realiza un estudio de los datos obtenidos mediante la máquina de ensayo, sistema ARAMIS y galgas extensométricas, realizando una comparación entre todos ellos.

❖ Capítulo 9: Conclusiones y desarrollos futuros

Se resume el proceso seguido y se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo de todo el proyecto. Además, se proponen ideas sobre proyectos futuros que puedan mejorar y/o complementar este trabajo.

2 PLANIFICACIÓN

Se detalla en este capítulo la planificación del trabajo que se hizo para poder llevar a cabo el objetivo del proyecto, así como las distintas soluciones adoptadas ante las muchas opciones que se podían llevar a cabo.

2.1 Configuración de las placas

El material utilizado es la fibra de carbono-epoxy disponible en el LERM, la cual detallaremos en el apartado de fabricación de las placas.

La geometría de las placas consistió en un cuadrado de 20 cm de lado en todas sus configuraciones ya que esta geometría es la que mejor se adaptaba al útil de ensayo y a los experimentos que se querían realizar.

Para la realización de los ensayos se decidió fabricar con ayuda del molde fabricado en el *Fablab* por D. Rafael A. Roig Ortega, sin llevar a cabo ninguna modificación en dicho molde. Este molde será detallado más adelante, pero permite obtener una configuración deformada al tener una dirección con tres ondas en una dirección y una onda en la dirección perpendicular.

Gracias a este molde se pueden realizar dos superficies deformadas inicialmente distintas para cada uno de las configuraciones elegidas.

Debido a las características del molde, para cada configuración elegida se han fabricado dos placas con distintas geometrías iniciales impuestas cada una. Además de las dos placas deformadas se decidió realizar una placa plana sin deformadas iniciales impuestas por el molde con el fin de poder realizar una comparación entre las tres.

Las configuraciones elegidas fueron dos unidireccionales e isotropas y otras dos láminas combinadas, pero siempre manteniendo una configuración de simetría. Con ello se consiguió que la matriz de acoplamiento B_{ij} fuera siempre nula, evitando los acoplamientos laja-placa que podían haber creado complicaciones durante la fabricación. Por tanto, obtuvimos una cantidad total de 12 laminados que se describen a continuación. A su vez, se decidió que cada uno de ellos cuente con 12 capas de espesor.

La dirección x es la dirección en la que se aplicó la carga de compresión durante los ensayos. Las dos direcciones del molde serán tratadas como 1 y 2, siendo la dirección 1 aquella que reproduce 3 ondas y la dirección 2 aquella que reproduce una sola onda, se pueden observar en la figura 2.1. Como todos los laminados que se realizaron son simétricos en la representación se limita solo a las 6 primeras láminas, para hacerla más sencilla.

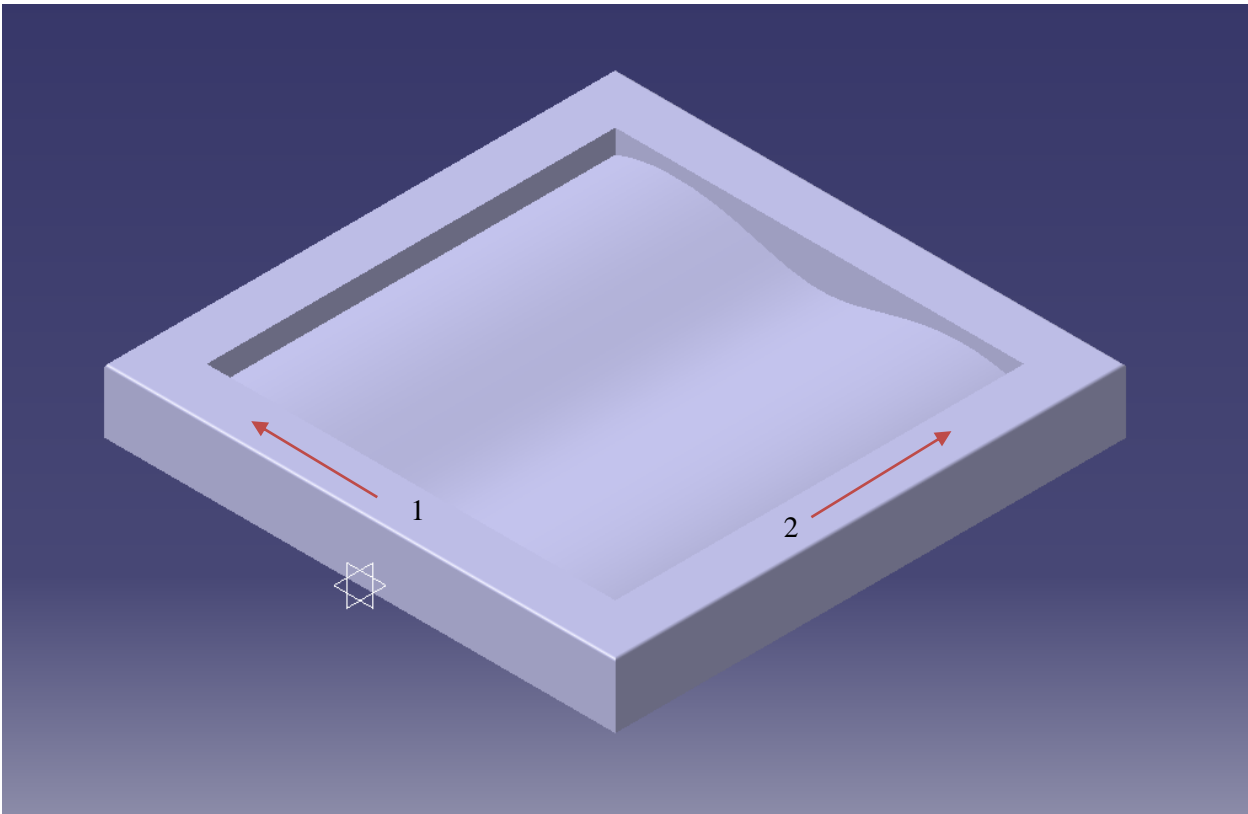


Figura 2.1: Esquema del molde con las direcciones.

2.1.1 Laminado 1 – Placa plana unidireccional a 0°

Este primer laminado consiste en 12 láminas unidireccionales donde la dirección x coincide con la dirección de las fibras. No existe situación deformada de inicio. Con ello se obtiene una placa ortótropa en ejes principales. Esquemáticamente podría representarse como en la figura 2.2:

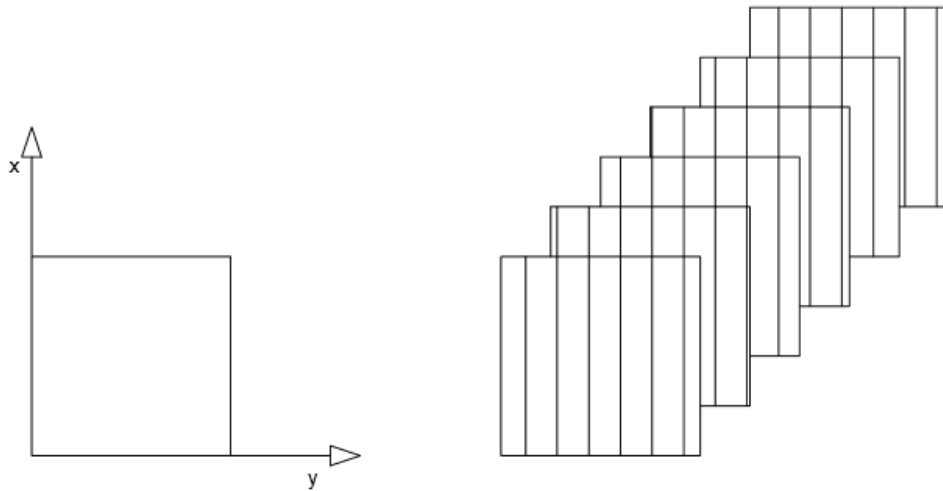


Figura 2.2: Configuración del laminado 1 (6 primeras láminas).

2.1.2 Laminado 2 – Placa unidireccional a 0° , dirección x y 1 coincidentes.

En el segundo laminado se colocan 12 láminas unidireccionales donde la dirección x coincide con la dirección de las fibras. Además, se fabrica sobre el molde haciendo que la dirección 1 coincida con la dirección x . Así, se tiene 3 ondas en el eje de aplicación de la carga de compresión y 1 onda en el eje transversal. Esquemáticamente podría representarse como en la figura 2.3:

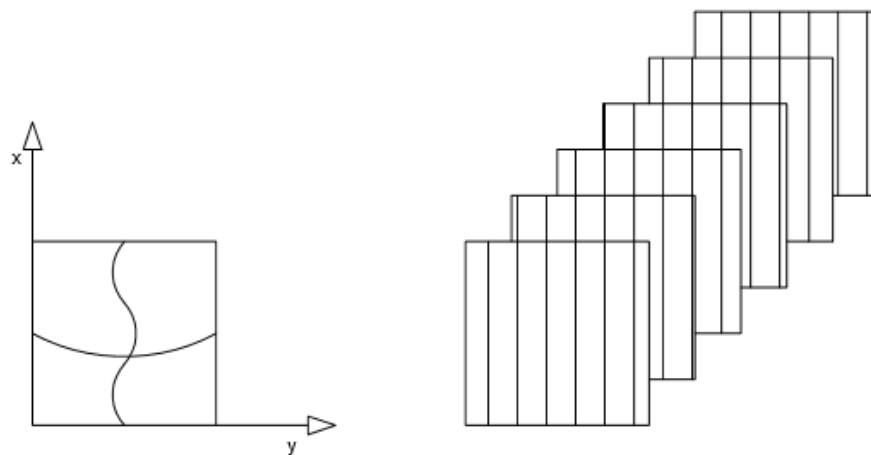


Figura 2.3: Configuración del laminado 2 (6 primeras láminas).

2.1.3 Laminado 3 – Placa unidireccional a 0°, dirección x y 2 coincidentes.

En el tercer laminado se colocan 12 láminas unidireccionales donde la dirección x coincide con la dirección de las fibras. Además, se fabrica sobre el molde haciendo que la dirección 2 coincida con la dirección x . Así, se tiene 1 onda en el eje de aplicación de la carga de compresión y 3 ondas en el eje transversal. Esquemáticamente se representa en la figura 2.4:

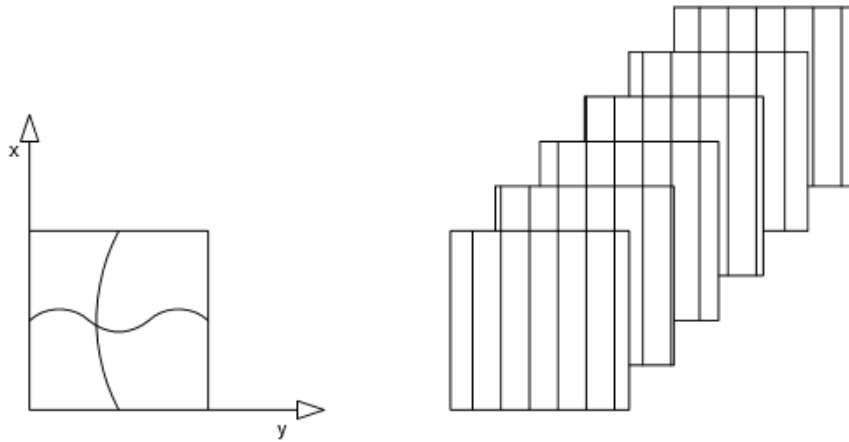


Figura 2.4: Configuración del laminado 3 (6 primeras láminas).

2.1.4 Laminado 4 – Placa plana unidireccional a 90°

Este cuarto laminado consiste en 12 láminas unidireccionales donde la dirección x coincide con la dirección transversal a las fibras. No se tiene situación deformada de inicio. Con ello se obtiene una placa ortótropa en ejes principales. El esquema del laminado podría representarse como en la figura 2.5:

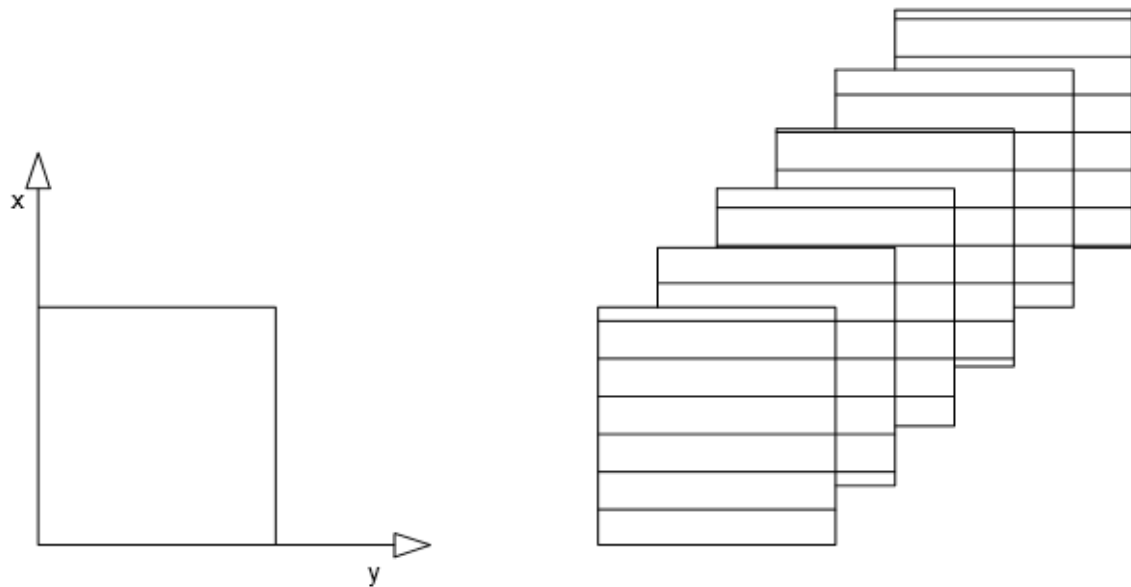


Figura 2.5: Configuración del laminado 4 (6 primeras láminas).

2.1.5 Laminado 5 – Placa unidireccional a 90° , dirección x y 1 coincidentes.

En el laminado 5 se colocan 12 láminas unidireccionales donde la dirección x coincide con la dirección transversal a las fibras. Se posiciona el molde de manera que la dirección 1 coincida con la dirección x de dirección de la carga. Así, hay 3 ondas en el eje de aplicación de la carga de compresión y 1 onda en el eje transversal. Esquemáticamente podría representarse como en la figura 2.6:

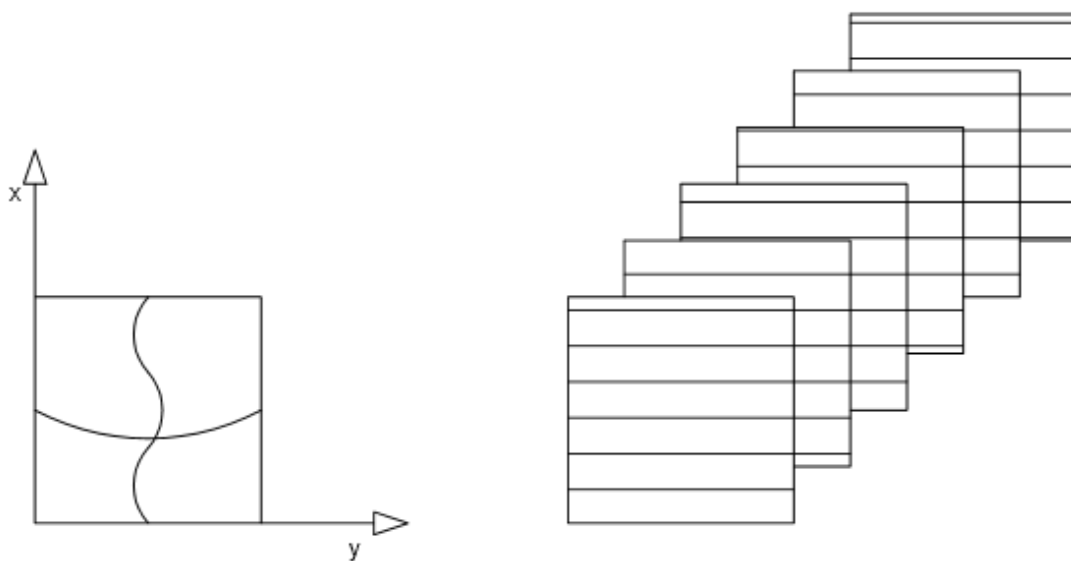


Figura 2.6: Configuración del laminado 5 (6 primeras láminas).

2.1.6 Laminado 6 – Placa unidireccional a 90° , dirección x y 2 coincidentes.

En el laminado número 6 se colocan 12 láminas unidireccionales donde la dirección x coincide con la dirección transversal a las fibras. Se prepara el molde de manera que la dirección 2 coincide con la dirección x de dirección de la carga. Así, se tiene 1 onda en el eje de aplicación de la carga de compresión y 3 ondas en el eje transversal. Se representa en la figura 2.7:

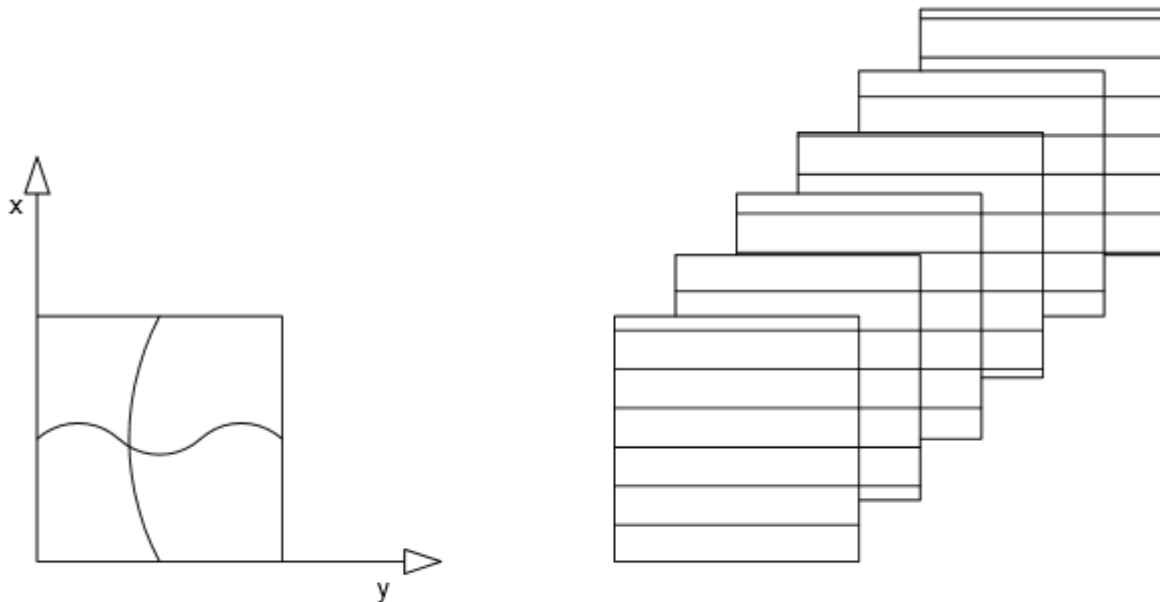


Figura 2.7: Configuración del laminado 6 (6 primeras láminas)

2.1.7 Laminado 7 – Placa plana mixta $[45/-45/0/45/-45/90]_s$

Este séptimo laminado consiste en 12 láminas donde la dirección x coincide con la dirección de las fibras de la lámina a 0° . No se tiene situación deformada de inicio. Con esta configuración se obtiene una placa cuasi-isótropa. El esquema del laminado podría representarse como en la figura 2.8:

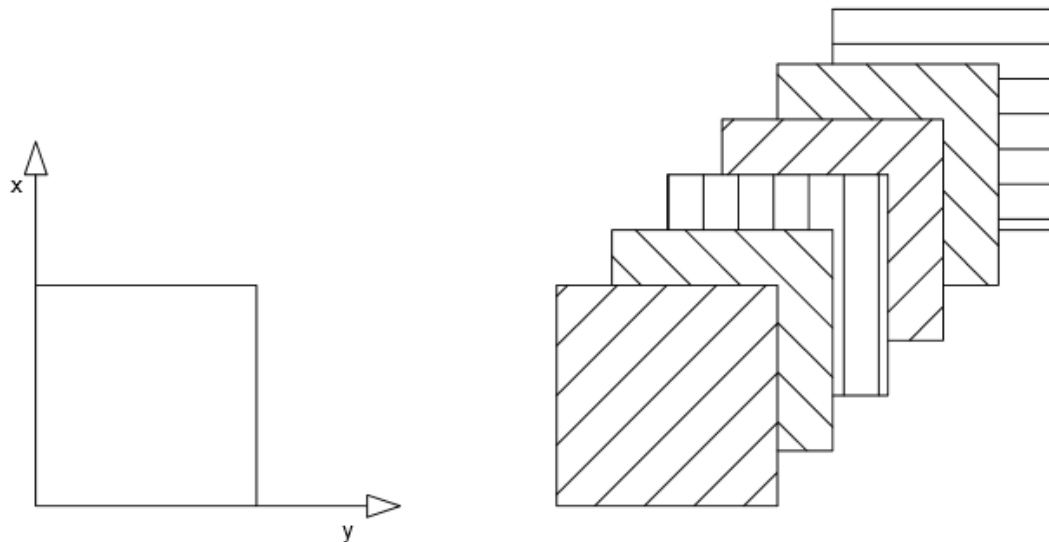


Figura 2.8: Configuración del laminado 7 (6 primeras láminas).

2.1.8 Laminado 8 – Placa mixta $[45/-45/0/45/-45/90]_s$, dirección x y 1 coincidentes.

El octavo laminado consiste en 12 láminas donde la dirección x coincide con la dirección de las fibras de la lámina a 0° . El molde se sitúa de forma que la dirección 1 es la misma que la dirección x , por lo que se conseguirán 3 ondas en el eje de aplicación de la carga y 1 en el transversal. Esquemáticamente podría representarse como en la figura 2.9:

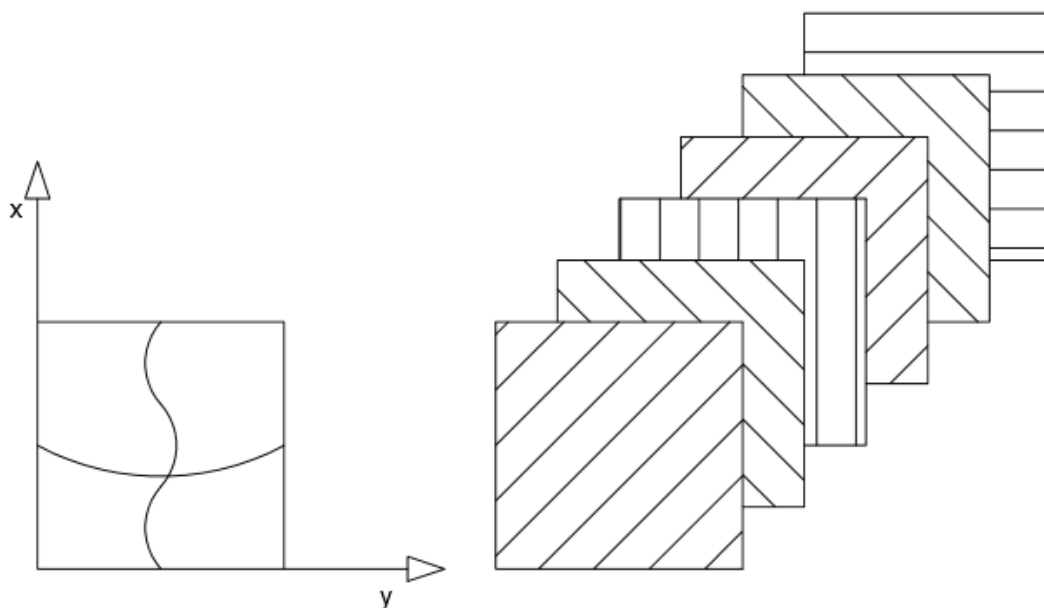


Figura 2.9: Configuración del laminado 8 (6 primeras láminas).

2.1.9 Laminado 9 – Placa mixta $[45/-45/0/45/-45/90]_s$, dirección x y 2 coincidentes.

El laminado 9 consiste en 12 láminas donde la dirección x coincide con la dirección de las fibras de la lámina a 0° . El molde se sitúa de forma que la dirección 2 es la misma que la dirección x , por lo que se conseguirán 1 onda en el eje de aplicación de la carga y 3 ondas en el transversal. Esquemáticamente podría representarse como en la figura 2.10:

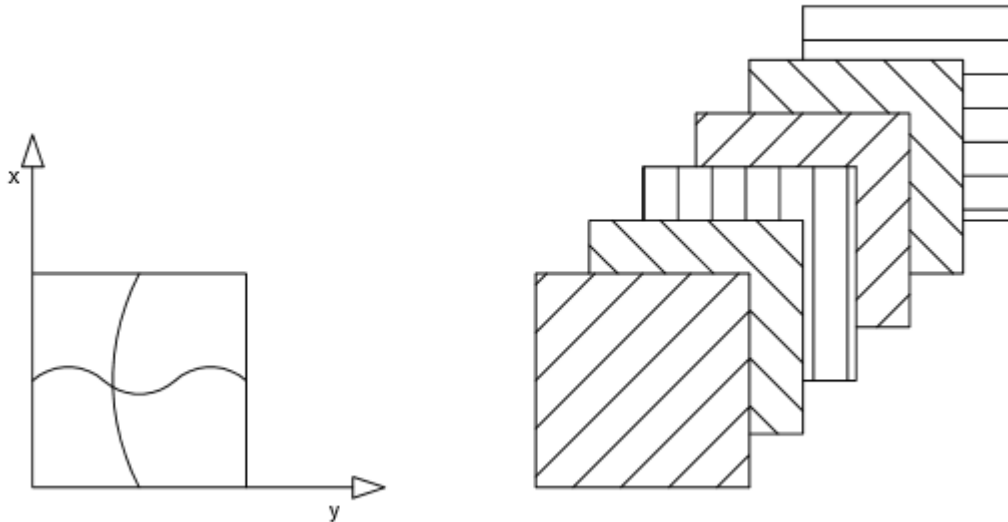


Figura 2.10: Configuración del laminado 9 (6 primeras láminas).

2.1.10 Laminado 10 – Placa plana $45^\circ/-45^\circ - [45/-45/45/-45/45/-45]_s$

Este décimo laminado consiste en 12 láminas donde la dirección x coincide con la supuesta dirección de las fibras que tendría una lámina a 0° . No se tiene situación deformada de inicio. Con esta configuración se obtiene una placa generalmente ortótropa. El esquema del laminado podría representarse como en la figura 2.11:

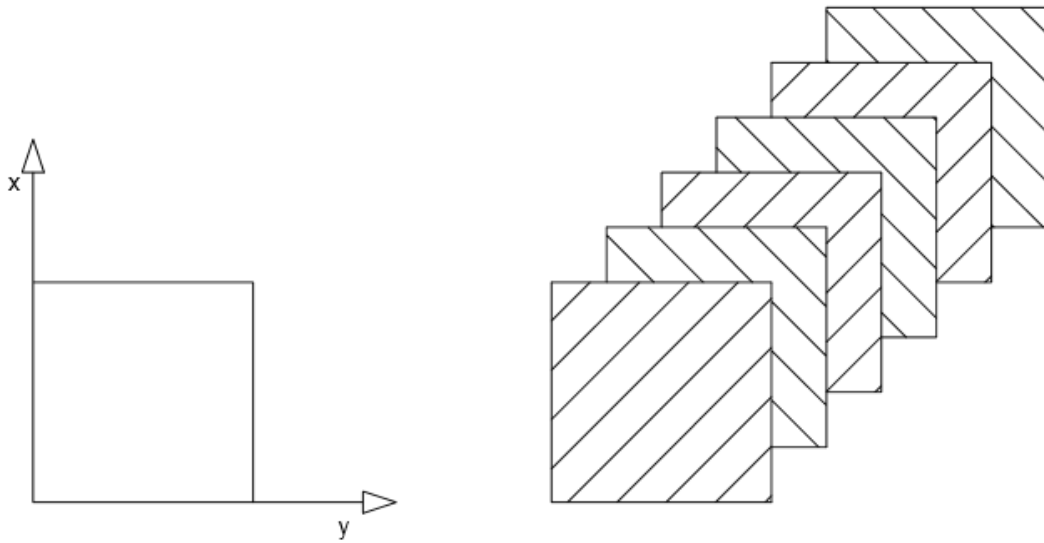


Figura 2.11: Configuración del laminado 10 (6 primeras láminas).

2.1.11 Laminado 11 – Placa $45^\circ/-45^\circ - [45/-45/45/-45/45/-45]_s$, dirección x y 1 coincidentes.

El laminado número 11 consiste en 12 láminas donde la dirección x coincide con la supuesta dirección de las fibras que tendría una lámina a 0° . La colocación del molde se hará de forma que las direcciones 1 y x sean la misma, con lo que habrá 3 ondas en la dirección x y 1 onda en la transversal. El esquema del laminado podría representarse como en la figura 2.12:

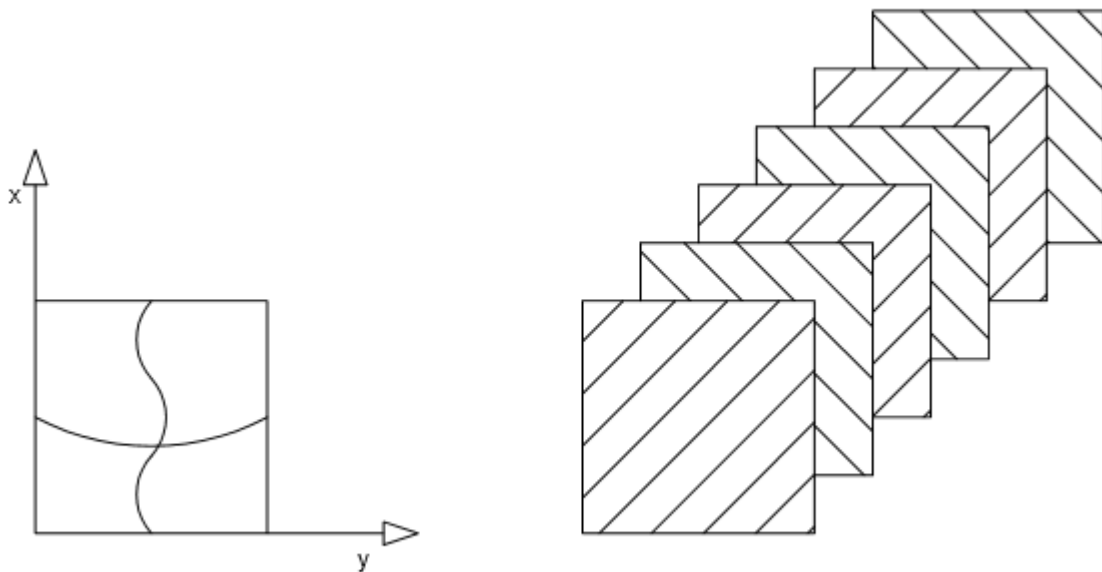


Figura 2.12: Configuración del laminado 11 (6 primeras láminas).

2.1.12 Laminado 12 – Placa 45°/-45° - [45/-45/45/-45/45/-45]_s, dirección x y 2 coincidentes.

El laminado número 12 consiste en 12 láminas donde la dirección x coincide con la supuesta dirección de las fibras que tendría una lámina a 0° . La colocación del molde se hará de forma que las direcciones 2 y x sean coincidentes, con lo que habrá 1 onda en la dirección x y 3 ondas en la transversal. Esquemáticamente podría representarse como en la figura 2.13:

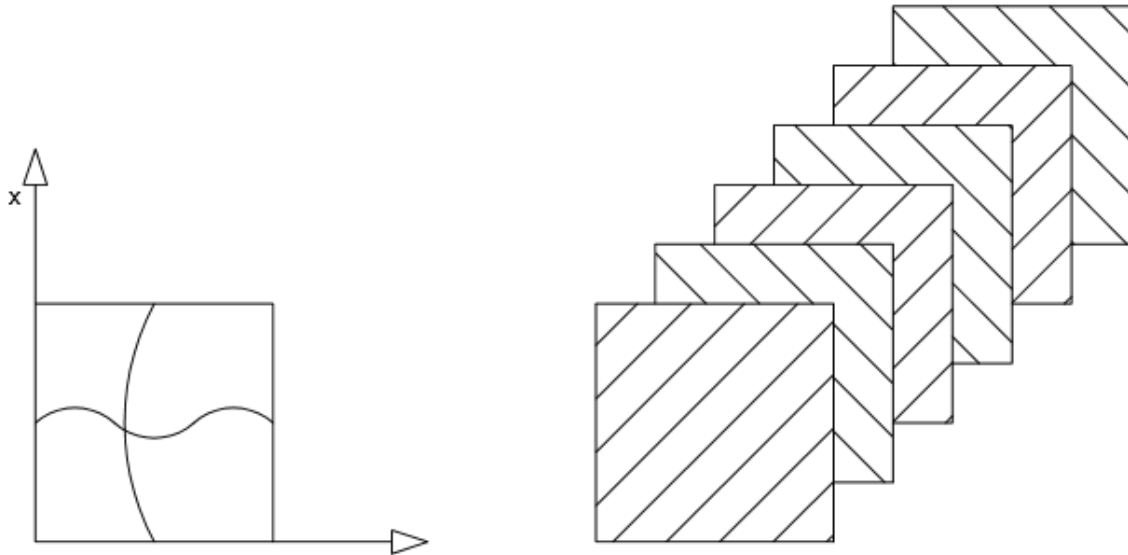


Figura 2.13: Configuración del laminado 11 (6 primeras láminas).

2.2 Estado del arte

Debido al estudio y aplicación durante años de materiales compuestos se sabe que, al llegar al régimen de postpandeo, una placa de dicho material sigue manifestando una capacidad portante considerable, cosa que no ocurre en los elementos tipo barra. Dicha capacidad portante no se encuentra aprovechada hoy día en la mayoría de aplicaciones a la hora de realizar su diseño, por lo que no se está aprovechando toda la capacidad que el material puede dar. Un estudio y aplicación de esta capacidad portante de reserva ayudaría a una mejor comprensión de los materiales compuestos y a permitir aligerar y disminuir los espesores de piezas tipo placa utilizadas en la industria en la actualidad.

Cuando se realizan estudios en postpandeo de las placas de material compuesto se requiere de modelos de grandes desplazamientos, por lo que la complejidad para afrontarlos es muy grande. Otra forma es el estudio mediante métodos numéricos, pero la mayoría de las veces requieren unos recursos muy grandes para obtener resultados. Otra forma de acercar los cálculos es mediante métodos analíticos, aunque esta alternativa solo se puede utilizar para problemas simples, pero sí dan buenos resultados sobre la respuesta a postpandeo e incluso se puede hallar una fórmula que muestre la influencia de distintos parámetros sobre nuestro problema.

Este proyecto se ha basado en el Proyecto Fin de Carrera de D. Rafael A. Roig Ortega, que a su vez se basó en el modelo teórico de placas de Von Karman [3], estudiando a su vez los artículos de Chandra y Raju (1973) [4] y los de D. Antonio Blázquez y D. Rafael Picón (2010) [5] que se basan en dicho modelo.

En casi todos los ensayos publicados sobre el postpandeo de placas rectangulares se utilizan configuraciones simétricas desde el plano medio de la placa, haciendo que los ejes x e y sean ejes principales de ortotropía, con las facilidades de cálculo que esto implica al desaparecer la submatriz B de los cálculos numéricos.

Los ensayos realizados en el Proyecto Fin de Carrera antes mencionado se quieren acompañar de una base experimental que permita profundizar en el estudio de las placas a postpandeo, que es en el marco que se encuentra este proyecto.

2.3 Plan de Trabajo

La organización del plan de trabajo llevada a cabo ha tenido como consecuencia los siguientes procesos, siendo algunos de ellos secuenciales respecto de otros y otros independientes, los cuales se han podido ir desarrollando conjuntamente:

- **Limpieza del útil y del molde:** Consistió en realizar una limpieza exhaustiva del molde de fabricación (que se encontraba en muy buenas condiciones) y del útil de ensayo. Este último tendría más problemas como se detallará más adelante.
- **Organización y corte del material:** Fundamental una buena organización previa para evitar utilizar más material del necesario. Una vez llevada a cabo se procedió al corte de los pre-preg para comenzar con la fabricación de los laminados.
- **Laminado y curado del material:** El siguiente proceso consistió en ir laminando y curando a medida que fuera posible para así obtener las placas de material compuesto necesarias.
- **Modificación y mejora del útil de ensayo:** Debido a su utilización previa en el proyecto mencionado anteriormente sabíamos los problemas que podía acarrear el útil de ensayo tal y como se encontraba en el momento de iniciar este trabajo. Por ello se realizó un estudio y se llevaron a cabo importantes modificaciones que permitiesen mejorar el rendimiento del útil de ensayo.
- **Comprobación de los laminados y preparación de los laminados para los ensayos:** Se realizó una comprobación de los laminados basada en la observación y en la medición de distintos parámetros. Para prepararlo de cara a los ensayos se procedió a resanar y limpiar todas las placas y a la colocación de numerosas galgas extensométricas para la obtención de datos.
- **Preparación final para los ensayos:** Comprendió toda la parte previa de aprendizaje de utilización de las máquinas de los ensayos, colocación y preparación final del útil de ensayo y de la máquina, así como del sistema ARAMIS.
- **Realización de ensayos:** Consistió en los 12 ensayos a compresión que conforman el eje principal del proyecto.
- **Obtención y tratamiento de resultados:** Tras los ensayos obtuvimos los datos de la máquina de ensayo, de las galgas extensométricas y del sistema ARAMIS, con los que se trabajó conjuntamente.
- **Extracción de conclusiones y mejoras futuras:** Gracias a los datos obtenidos pudimos llegar a unas conclusiones finales sobre el trabajo y en un futuro poder continuar la línea de trabajo y mejorar las condiciones de este proyecto.

3 DESCRIPCIÓN Y LIMPIEZA DEL MOLDE

El molde utilizado para conseguir las deformaciones de las placas durante el proceso de fabricación es el molde fabricado en su proyecto por D. Rafael A. Roig Ortega. Está realizado en aluminio 2024-T4 y su fabricación se produjo mediante mecanizado. Para más detalles del proceso de fabricación se recomienda consultar dicho Proyecto Fin de Carrera.

Las dimensiones del molde son 250x250 milímetros, si bien tiene un margen de 50 milímetros por cada uno de sus lados en los que su superficie es plana. Por tanto, las ondas quedan restringidas a un cuadrado de 200x200 milímetros. Como se ha explicado con anterioridad, las ondas deformadas se encuentran en dos direcciones, la dirección 1 con tres ondas longitudinales y la dirección 2, con solo una onda longitudinal. En la figura 3.1 podemos observar el molde.



Figura 3.1: Molde de fabricación.

Para utilizar el molde se le realizó una limpieza con acetona y diclorometano, que dejaron el molde en condiciones de utilización. No se le aplicó ningún lijado ni método de desbaste por las inconveniencias que podría haber tenido si hubiese rebajado la altura de las ondas. En la figura 3.2 y la figura 3.3 se pueden ver más imágenes del molde donde se aprecia su curvatura.



Figura 3.2: Limpieza del molde.



Figura 3.3: Imagen en perspectiva del molde.

4 FABRICACIÓN DE LAS PLACAS

4.1 Descripción del material de trabajo

El material utilizado para la realización del ensayo es fibra de carbono, concretamente de la denominación *AS4/8552 grafito/epoxi*, material fabricado por la empresa *Hexcel* y aportado para este TFG por parte del *LERM*.

Las propiedades físicas de dicho material son las presentes en la tabla 4.1, mientras que las propiedades mecánicas a 25°C y condiciones secas del material se especifican en la tabla 4.2:

Densidad de fibra	1.79 g/cm ³
Densidad de resina	1.30 g/cm ³
Espesor nominal del apilado una vez curado	0.130 mm
Volumen nominal de la fibra	57.42 %
Densidad nominal del laminado	1.58 g/cm ³

Tabla 4.1: Propiedades físicas del material de trabajo

Tensión de rotura en la dirección de la fibra	2207 MPa
Tensión de rotura en dirección transversal a la fibra	81 MPa
Módulo de Young E_x	141 GPa
Módulo de Young E_y	10 GPa
Tensión de rotura a compresión en dirección de fibra	1531 MPa

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas del material de trabajo, a 25°C y condiciones secas.

El material, como se observa, tiene un alto rendimiento a tracción en la dirección de la fibra, además de una buena resistencia al impacto y una alta tolerancia al daño en muchas aplicaciones. Además, la mínima viscosidad del material se da para una temperatura de 135°C, para la cual el tiempo de gelificación es de media hora.

4.2 Corte del material

El primer paso para la fabricación de las placas de material compuesto es el cortado del material, pues los pre-pregs se almacenan enrollados en forma de cilindro. En el utilizado en este proyecto, la anchura de dicho cilindro era de 150 mm y una longitud suficientemente grande como para considerarla infinita a efectos del cálculo del corte. Como ya se ha reseñado, era de suma importancia tener una buena organización al cortar para intentar no desaprovechar material.

En este proyecto las placas elegidas son de 200x200 mm, lo que obligaba a realizar más de un corte para obtener cada una de las láminas de pre-preg que conformarán las placas. En total, para la configuración de los laminados detallados en el plan de trabajo se necesitó:

- 84 láminas de 0°/90° (42 de cada una de las configuraciones, pero a efectos de corte eran idénticas).
- 60 láminas de 45°/-45° (idénticas también en el corte)

Para conseguir la optimización del proceso de corte, se realizó de la manera detallada en la figura 4.1:

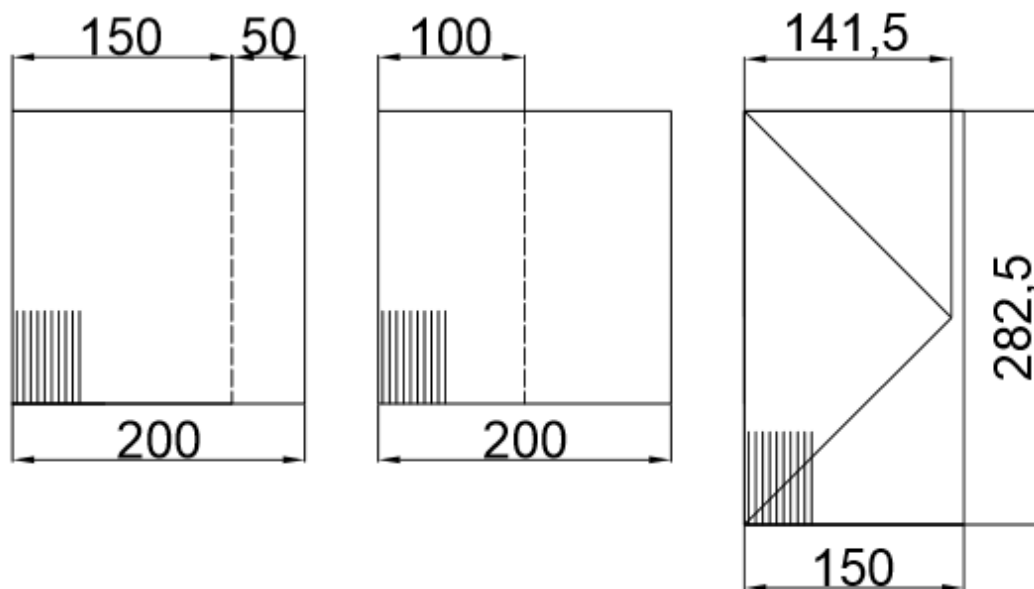


Figura 4.1: Patrones de corte y unión de las láminas. Del caso A se necesitan 56, del B 28 y del C 120.

Una vez realizada la organización de cómo se iba a realizar el corte se comenzó dicho proceso. Para ello, lo primero que se realizó es una extracción del cilindro de material compuesto del congelador en el que se guarda a fin de conservar sus propiedades más tiempo y que no sufriese un proceso de curado involuntario. Con dicha extracción se llevó el rollo a la sala limpia del LERM para así evitar en la medida de lo posible la deposición de partículas en el material de trabajo, que podían originar pequeñas pero importantes imperfecciones en los laminados. Se esperó un tiempo prudencial en el que se dejó que el material se atemperara, hasta que fuera flexible y no existiera condensación sobre el pre-preg, un tiempo de una hora suele ser suficiente.

Una vez que el material se ha atemperado el proceso de corte puede empezar. Para ello lo primero es tener en cuenta las medidas de trabajo de la sala limpia del LERM, donde se debe trabajar siempre con una bata de laboratorio, guantes, protectores de zapatos y procurar entrar en grupos reducidos, de 2 a 3 personas a lo sumo.

Para realizar los cortes se utilizó una herramienta cúter con cuchilla retráctil, con la ayuda de diversos instrumentos de medida como pueden ser reglas, cartabones y escuadras, intentando ser lo más preciso posible y trabajando siempre con la cuchilla afilada. Para realizar el corte es necesario situarse sobre las mesas con una superficie de vidrio destinadas a ello. Con ayuda de las reglas y un marcador se señala el corte y se utiliza el cúter para realizar la separación. El corte es en la misma dirección de la fibra suele ser muy limpio y rápido, mientras que en dirección transversal puede que sea un poco más complicado, por ello la necesidad de cambiar la cuchilla cada cierto tiempo buscando que siempre esté afilada.

En las dos figuras siguientes se puede observar una mesa de y proceso de corte (figura 3.2) y algunas láminas ya cortadas (figura 3.3) en las cuales se puede apreciar la gran flexibilidad que toman los pre-pregs una vez se han atemperado.

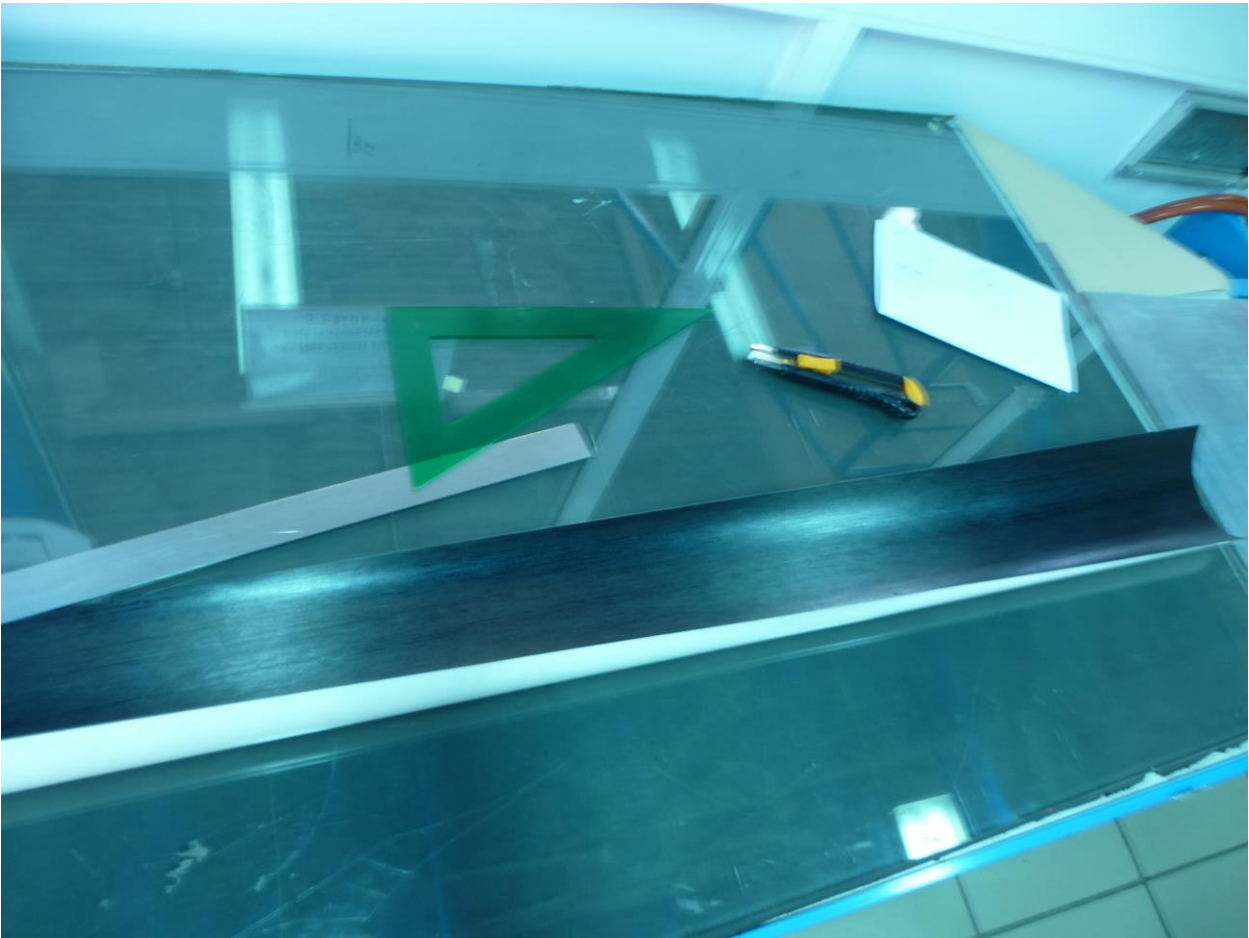


Figura 4.2: Proceso de corte.

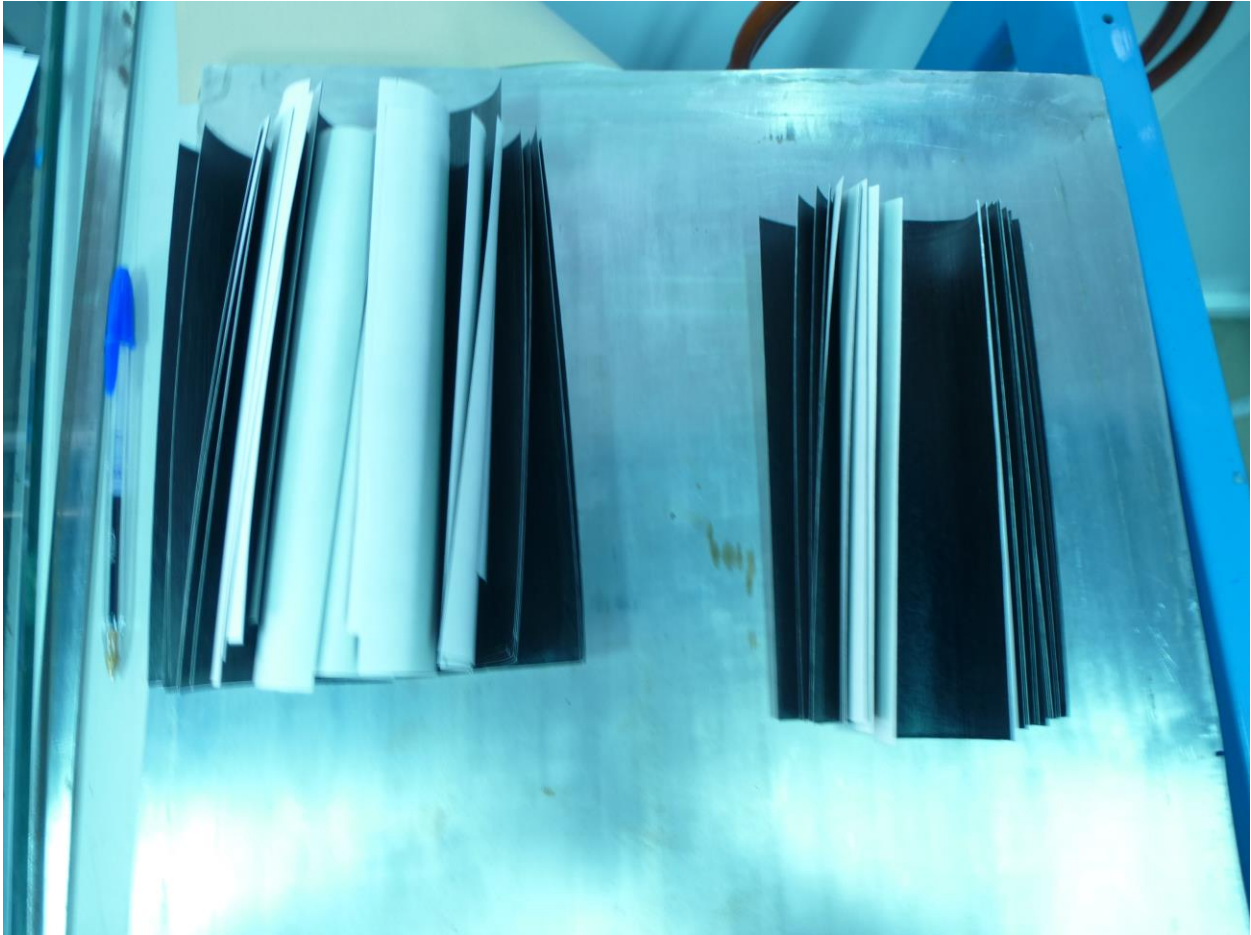


Figura 4.3: Láminas cortadas antes de proceder a su almacenaje o laminación.

Durante este proceso se tomó la decisión de realizar todos los cortes necesarios y una vez se terminara ese proceso comenzar con la laminación. Esto duró varios días de trabajo, por lo que los cortes que se iban realizando se almacenaban por lotes en bolsas selladas térmicamente que se introdujeron en el congelador, con el fin de mantener sus propiedades lo más intactas posible.

4.3 Proceso de apilado

El proceso de apilado es un apartado muy importante de la fabricación, pues la importancia de la interfase es capital para obtener unas buenas características mecánicas finales de las placas. Es importante hacer uso de la sala limpia y procurar una intersección limpia de partículas y otros elementos entre lámina y lámina.

Además, no solo hay que tener cuidado de apilar en la dirección correcta, si no que deberá tener una buena compactación, para lo cual se le aplicó una presión al ir colocando las láminas sucesivamente, sin ser esta excesiva. Para ello se utilizó una espátula de plástico con la que se fue aplicando dicha presión, preferentemente en la dirección de las fibras y siempre teniendo especial cuidado en las esquinas y los bordes de cada lámina. A la presión manual se le añadió un precompactado realizado con una bolsa de vacío cada cuatro láminas, durante unos diez minutos, con el fin de que la interfase fuera lo más correcta posible.

Así, las placas planas no tenían excesiva complicación, se iba retirando el plástico protector y tras situarlas en la configuración correcta, se presionó en la dirección apropiada hasta que se observaba una buena compactación. Tras añadir varias láminas al conjunto se podía observar que iba adquiriendo cierta rigidez, más aún tras compactarla en la bolsa de vacío. Con todo, era muy importante a lo largo del proceso llevar una buena organización y seguimiento, pues una distracción puede arruinar el trabajo en este punto.

Para laminar las placas con una situación deformada previa era necesario hacer desde este punto uso del molde. Esto era debido a que si se laminase por un lado y después se colocara en el molde para su curado la rigidez que ya habría adquirido el conjunto no le permitiría amoldarse de forma correcta. Para poder realizar este trabajo se le aplicaron varias capas de desmoldeante sobre la superficie del molde en la que vamos a laminar, para evitar problemas de extracción de las placas tras el curado. En nuestro trabajo, se comenzó aplicando hasta diez capas en las primeras placas, si bien en las siguientes fuimos bajando de número y funcionó de forma correcta. El desmoldeante utilizado es Frekote © B-15 de Loctite ©, un sellador para moldes de metal con microporos, pequeños arañazos y defectos superficiales que posee una alta estabilidad térmica. Su aplicación con brocha y posterior secado se realizó al aire libre debido a su fuerte olor, como se puede ver en la figura 4.4.



Figura 4.4: Aplicación del desmoldeante previa al apilado.

Por tanto, una vez aplicado el desmoldeante, se realizó el mismo trabajo explicado en las placas planas, pero actuando siempre sobre el molde, con un mayor cuidado si cabe a la hora de presionar e intentando que no quedasen oquedades en el conjunto molde-placa. Se realizó un pequeño conjunto con las dos primeras láminas y se retiró el plástico protector para adherir el conjunto al molde. Al igual que en las planas, también se hizo uso de la bolsa de vacío preparada para la compactación cada cuatro láminas. Este proceso lo podemos ver en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7.

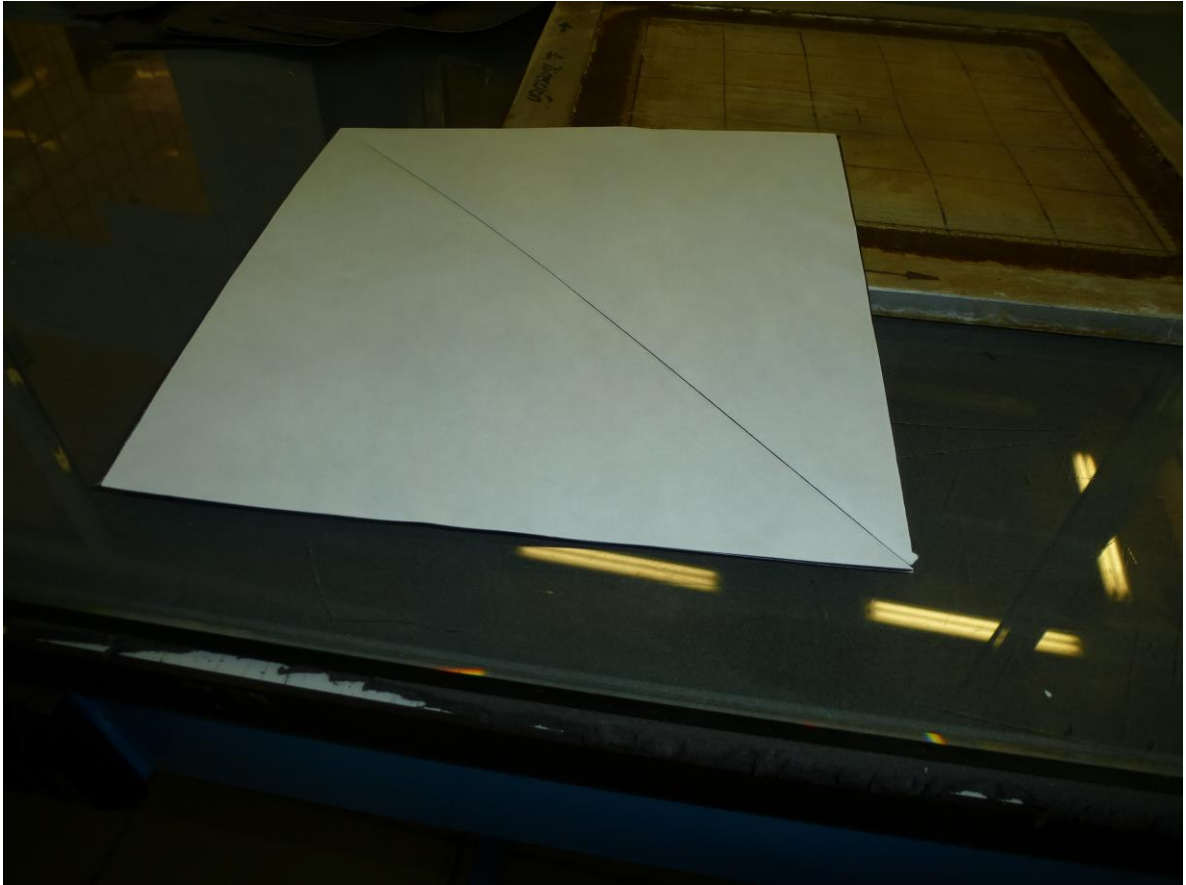


Figura 4.5: Unión de las primeras dos láminas para su colocación en el molde.

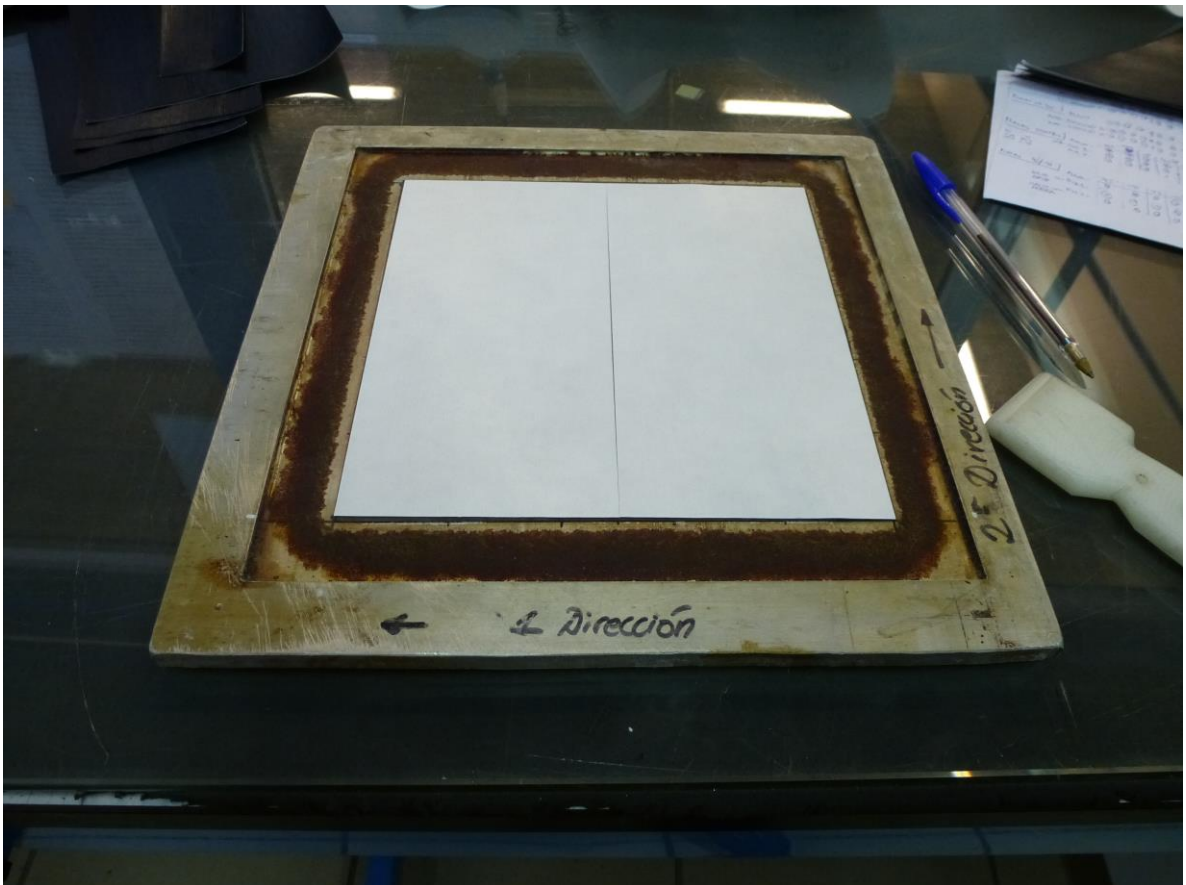


Figura 4.6: Apilamiento sobre el molde. Se observa la espátula de plástico con la que se presiona el apilado.

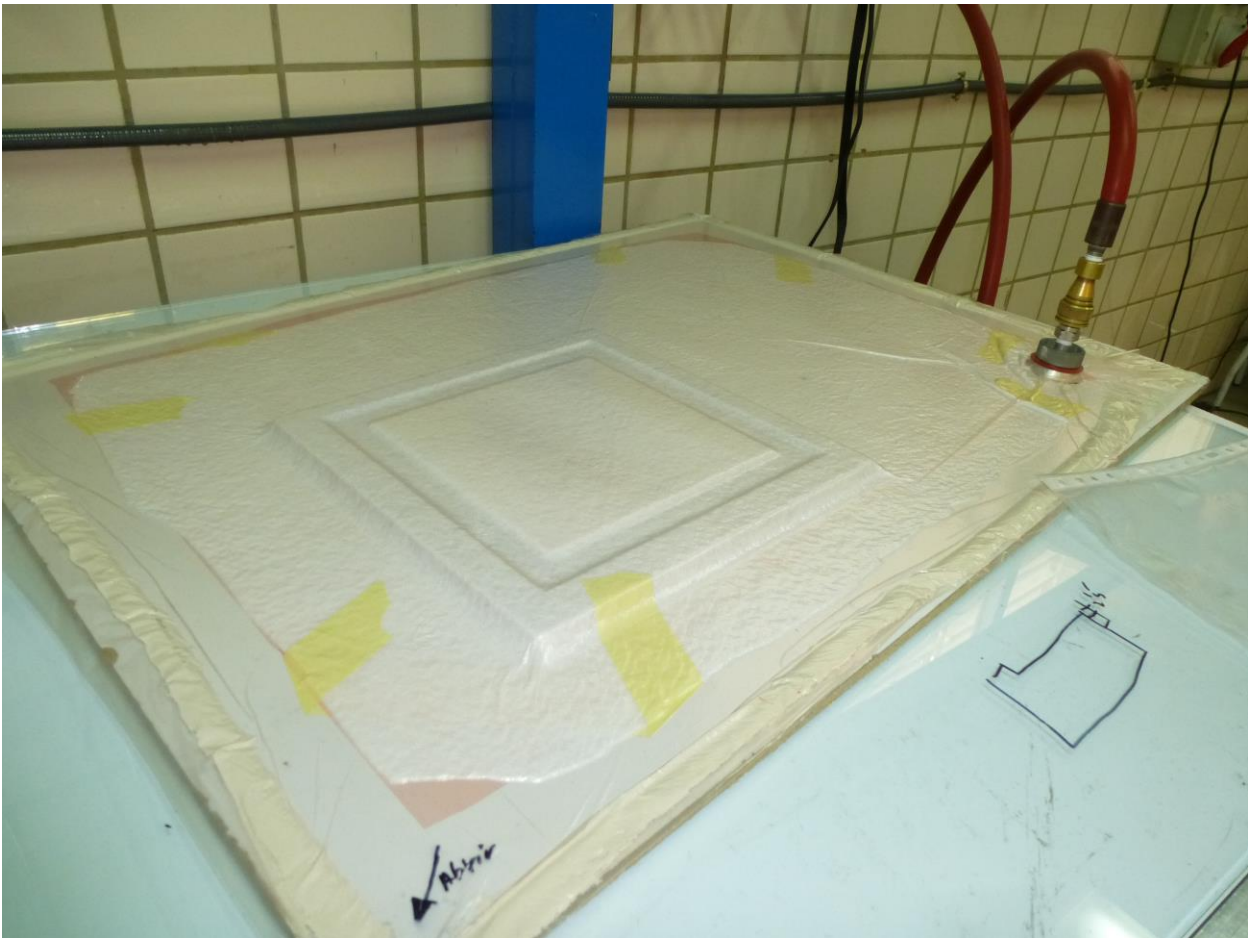


Figura 4.7: Bolsa de vacío destinada a compactar el laminado.

4.4 Fabricación de la bolsa de vacío

Una vez realizado el apilado de las placas, se procedió a la creación de la bolsa de vacío para su posterior curado. Cabe destacar que, si bien en las placas planas había cierta libertad organizativa a la hora de realizarlas, el trabajo con las placas que necesitaban molde tuvo que ser completamente secuencial, ya que hasta el momento de extracción de una placa del autoclave y desmoldeo de la misma, no existía posibilidad de empezar el siguiente apilado, lo cual retrasaba la producción ya que el proceso normal hubiera sido curar varias placas a la vez.

La bolsa de vacío utilizada es una bolsa de vacío estándar. Consta de varios materiales con los que se debe que trabajar con sumo cuidado pues un pequeño orificio en la bolsa o un mal sellado equivale a tener que rehacer el trabajo, con la consecuente pérdida de material y tiempo. En nuestro caso, era especialmente crítico el transporte de la bolsa pues esto podía hacer que se moviera el molde, que al contener filos y esquinas (aunque estén limadas para disminuir estos problemas) podía originar agujeros o incluso un desgarramiento de la bolsa.

Para preparar una bolsa de vacío, lo primero que se tuvo que hacer es encontrar una base que se adecue al tamaño que vamos a utilizar. El procedimiento habitual es utilizar planchas de aluminio o de acero. El uso de las planchas de acero es necesario cuando se utiliza un ciclo de curado con presiones muy elevadas que puedan llegar a producir deformaciones en la plancha de aluminio. Como el ciclo de curado que se usó en el proyecto no tiene presiones muy elevadas y el trabajo con las planchas de acero es más engorroso debido a su alto peso, se decidió utilizar planchas de aluminio.

Una vez elegida la plancha de aluminio, se procedió a la limpieza. Normalmente se encuentran limpias pues al acabar el trabajo se deben limpiar, pero siempre es posible que quede algún resto de cromato de su utilización anterior. Para ello se utilizó una cuchilla de cúter con el fin de retirar estos restos sin realizarle ningún perjuicio a la plancha que pudiera crear oquedades luego durante el sellado. Tras retirar todos los restos posibles se realizó una limpieza final con diclorometano en un lugar ventilado. Este proceso se detalla en las figuras 4.8 y 4.9.



Figura 4.8: Limpieza de las planchas de aluminio.



Figura 4.9: Plancha de aluminio limpia y lista para su utilización.

Tras la limpieza de la plancha, se cortó y colocó una lámina de teflón de tamaño un poco mayor de la pieza a curar (un poco mayor que el molde). Esta lámina actuaba como antiadherente permitiendo que tras el curado se puedan separar los diferentes elementos sin mayor esfuerzo. Tras colocar el teflón se situó encima el molde, como se observa en la figura 4.10.

Una vez colocado, se retiró el plástico protector superior restante en la placa de material compuesto y se volvió a colocar una lámina de teflón encima, con cuidado de que quedase lo más lisa posible. Este proceso se detalla en las figuras 4.11 y 4.12.

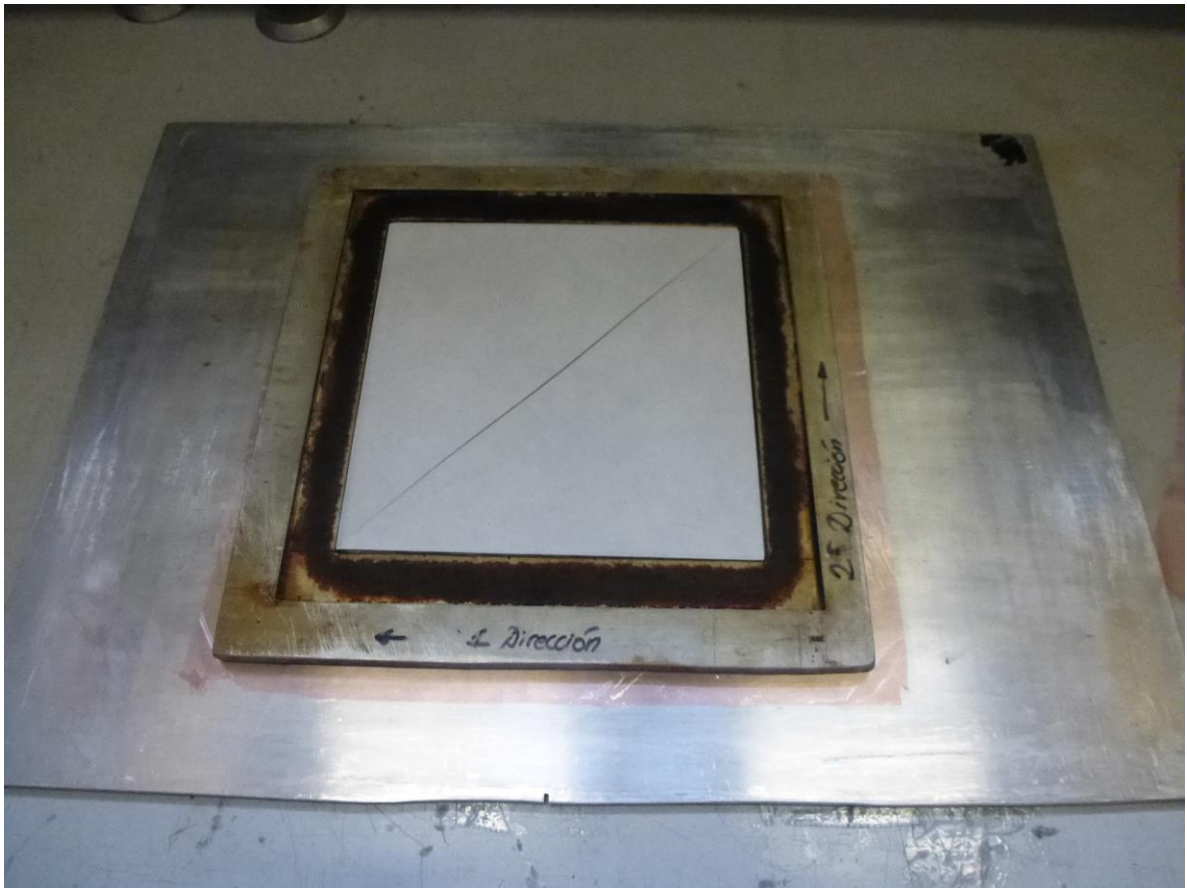


Figura 4.10: Primera capa de teflón y colocación del molde.

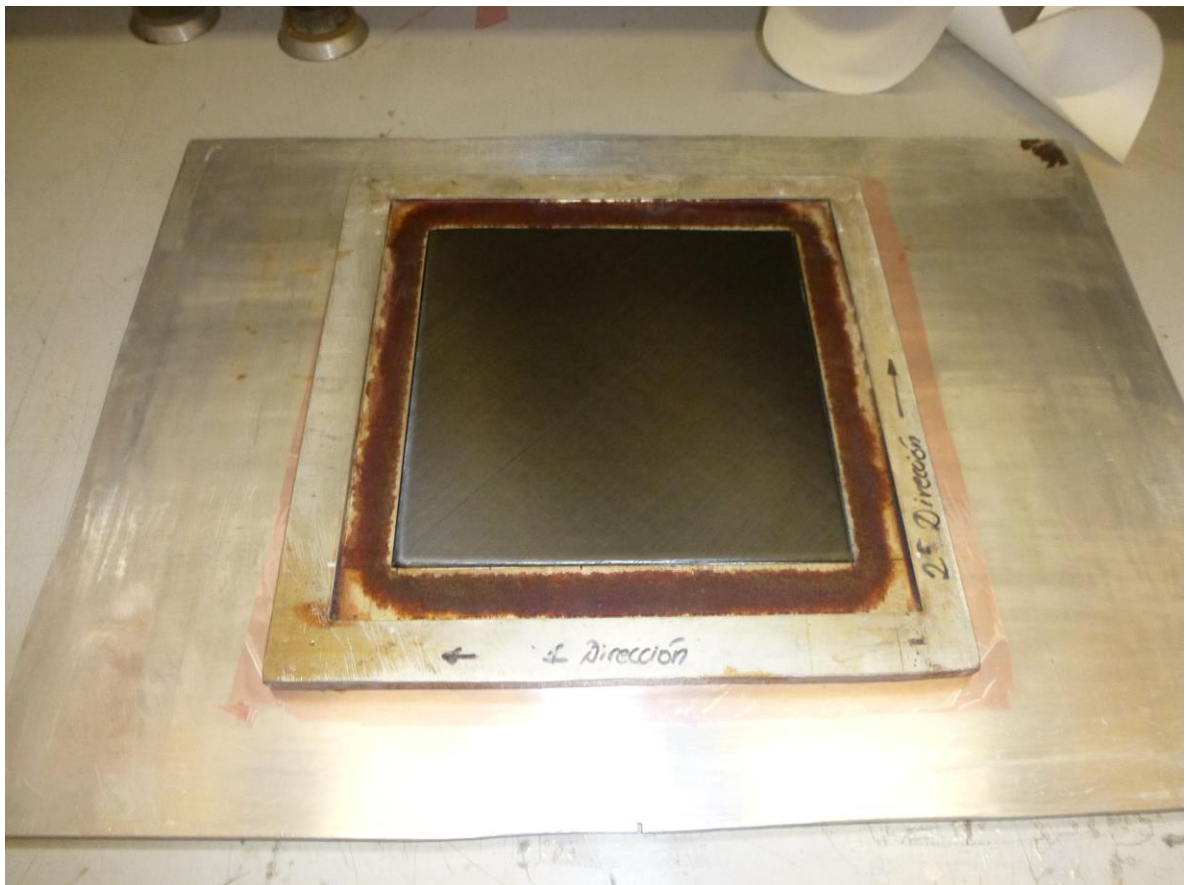


Figura 4.11: Retirada del plástico protector.

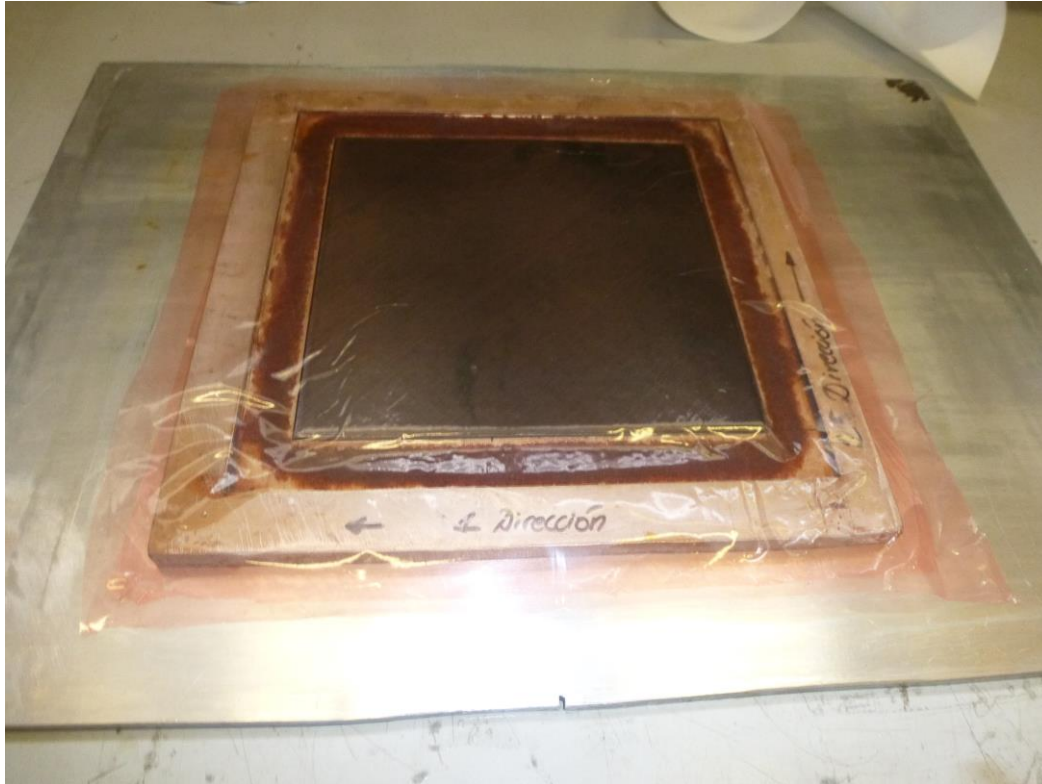


Figura 4.12: Colocación de la lámina superior de teflón.

El siguiente material a colocar era el *Airwave*, un tejido blanco protector que ayuda al reparto homogéneo del vacío en la bolsa. Para su corte y colocación se tuvo cuidado de cubrir todas las esquinas del molde con suficiente holgura para que no produzcan un problema. Además, se debía dejar una zona con tejido *Airwave* exterior al molde lo suficientemente grande para poder colocar las dos válvulas de vacío sobre este. El corte y colocación del susodicho tejido se encuentra presente en la figura 4.13.



Figura 4.13: Colocación del *Airwave* y comprobación del lugar de las válvulas de vacío.

El siguiente paso era el corte y posicionamiento de las bandas de cromato. Dicho material no poroso es el que sella la bolsa por la zona lateral, uniendo el plástico que cubrirá la bolsa por la parte superior a la base de aluminio, por lo que su buena colocación es muy importante. Se utilizó en bandas de la forma más recta y uniforme posible hasta rodear por completo la zona donde hemos colocado el *Airwave*, teniendo un cuidado especial en la zona de las esquinas para evitar los huecos que se podían formar en la superposición de bandas. Para evitarlos, se utilizó una espátula de plástico buscando la uniformidad de las bandas.

Antes de pasar al paso de la colocación del plástico superior se separó la parte principal de las válvulas de vacío de sus bases, puesto que la unión de estas se realiza a posteriori. En la figura 4.14 se observan las bandas de cromato en su posición habitual y las bases de las válvulas de vacío ya desenroscadas.



Figura 4.14: Bandas de cromato recién colocadas y las bases de las válvulas de vacío.

A continuación, se cortó un trozo de plástico transparente en un tamaño superior al recuadro formado por las bandas de cromato. Este plástico conformaba la parte superior de la bolsa de vacío por lo que se debía tener un especial cuidado en su trato evitando cualquier pequeña imperfección ya que esta se traduciría en una fuga que nos hubiera estropeado el vacío de la bolsa completa. Una vez cortado se retiraron las coberturas de plástico de las bandas de cromato y se procedió a la colocación del plástico superior, volviendo a utilizar la espátula con el fin de eliminar oquedades. En la figura 4.15 se ve el resultado de esta operación.



Figura 4.15: Pegado del plástico superior.

Una vez realizada la colocación del plástico se introdujeron de nuevo los cuerpos principales de las válvulas de vacío en sus respectivas bases. Para ello primero se enroscaron realizando así el orificio necesario en el plástico de cobertura y se extrajeron de nuevo, recortando la rebaba de plástico sobrante. Cuando los orificios se encontraron libres de trozos del plástico se introdujeron con fuerza a fin de fijarlas y evitar posibles fugas de aire. El resultado se ve en la figura 4.16.



Figura 4.16: Válvulas de vacío colocadas en su posición final.

Por último, se conectó la bolsa de vacío a un compresor que le aplicaba vacío con el objetivo de comprobar que estuviese bien realizada. Para ello en este proyecto se ha utilizado la ayuda de un vacuómetro manual con el que se puede observar si la bolsa pierde vacío, si bien la comprobación final se realizó al conectarla al autoclave, que es mucho más preciso a la hora de realizar mediciones de vacío. La comprobación con el vacuómetro se observa en las figuras 4.17 y 4.18.



Figura 4.17: Aplicación de vacío a la bolsa y medida del vacuómetro.



Figura 4.18: Comprobación del vacío mediante medida estable del vacuómetro.

4.5 Curado en el autoclave

Una vez realizada la bolsa de vacío se acercaba el final del proceso productivo de las placas en sí. Solo restaba la introducción en el autoclave para proceder al curado de las placas de fibra de carbono y por último darles un acabado final.

El autoclave es una máquina estanca capaz de aplicar ciclos de alta presión y temperatura durante tiempos prolongados. Se pueden aplicar distintos ciclos tanto de presión como de temperatura con el fin de obtener distintos resultados. En este proyecto, utilizamos el autoclave con el fin de aplicarle un proceso de curado a las placas de material compuesto y obtener así unas buenas propiedades finales. El autoclave utilizado es el presente en la figura 4.19.



Figura 4.19: Autoclave de la Universidad de Sevilla ubicado en el *LERM*.

El ciclo utilizado es un ciclo típico a la hora de curar fibra de carbono que fue recomendado por los responsables del *LERM*. En la figura 4.20 se pueden apreciar las características técnicas del ciclo aplicado.

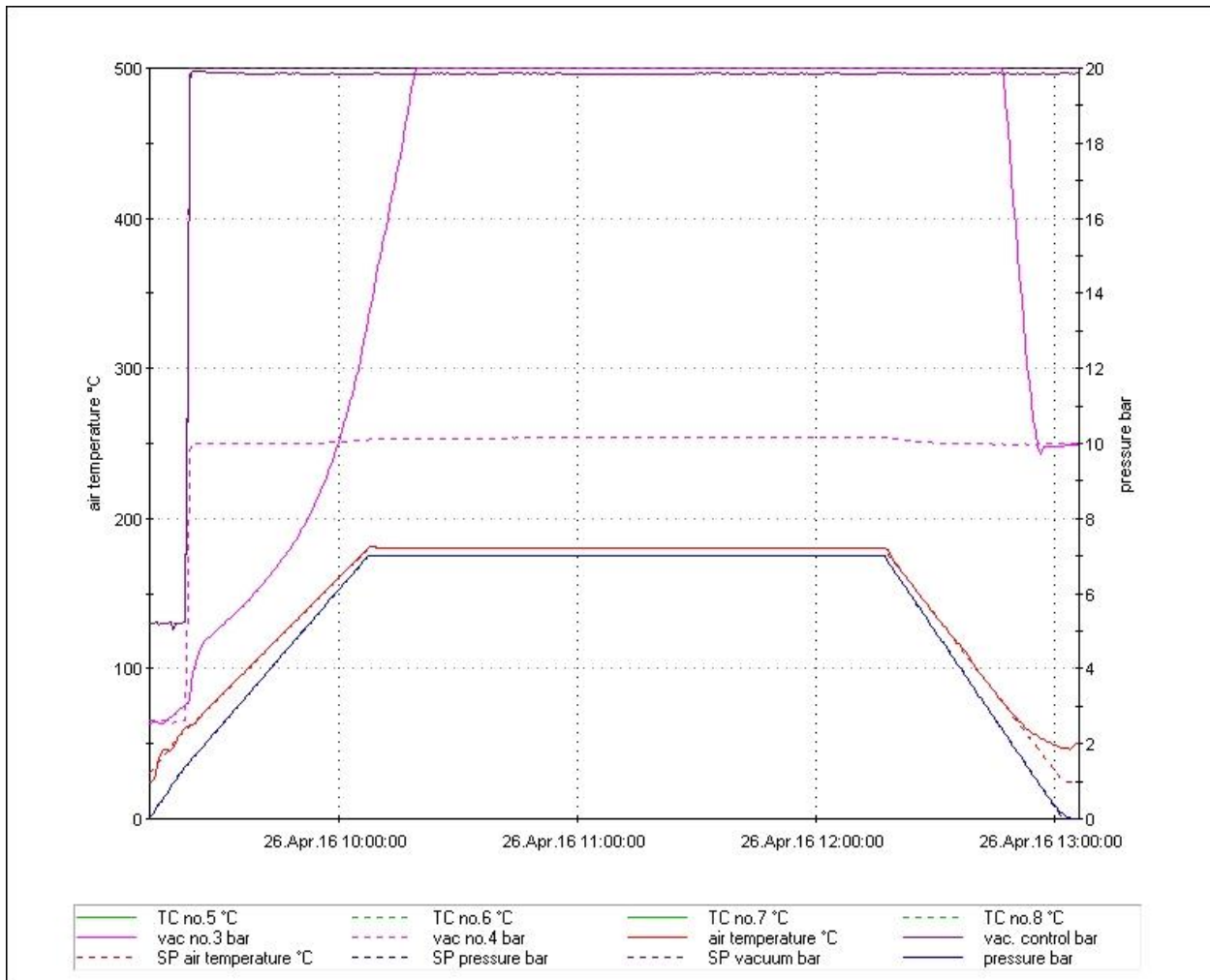


Figura 4.20: Ciclo de curado en el autoclave.

Tras la aplicación del ciclo se procedió a la extracción de las probetas. Para ello se le volvieron a extraer las mangueras de las válvulas de vacío y se desplazó la bolsa de vacío con la probeta ya curada a una mesa de trabajo. Una vez en esta, se extrajeron las válvulas de vacío y se procedió a retirar las bandas de cromato hasta poder extraer nuestra probeta. Por último, pero no por ello menos importante, se procedió a la limpieza de todos los útiles para dejarlos en perfecto estado para su siguiente utilización. En la figura 4.21 se observa la extracción de una probeta.

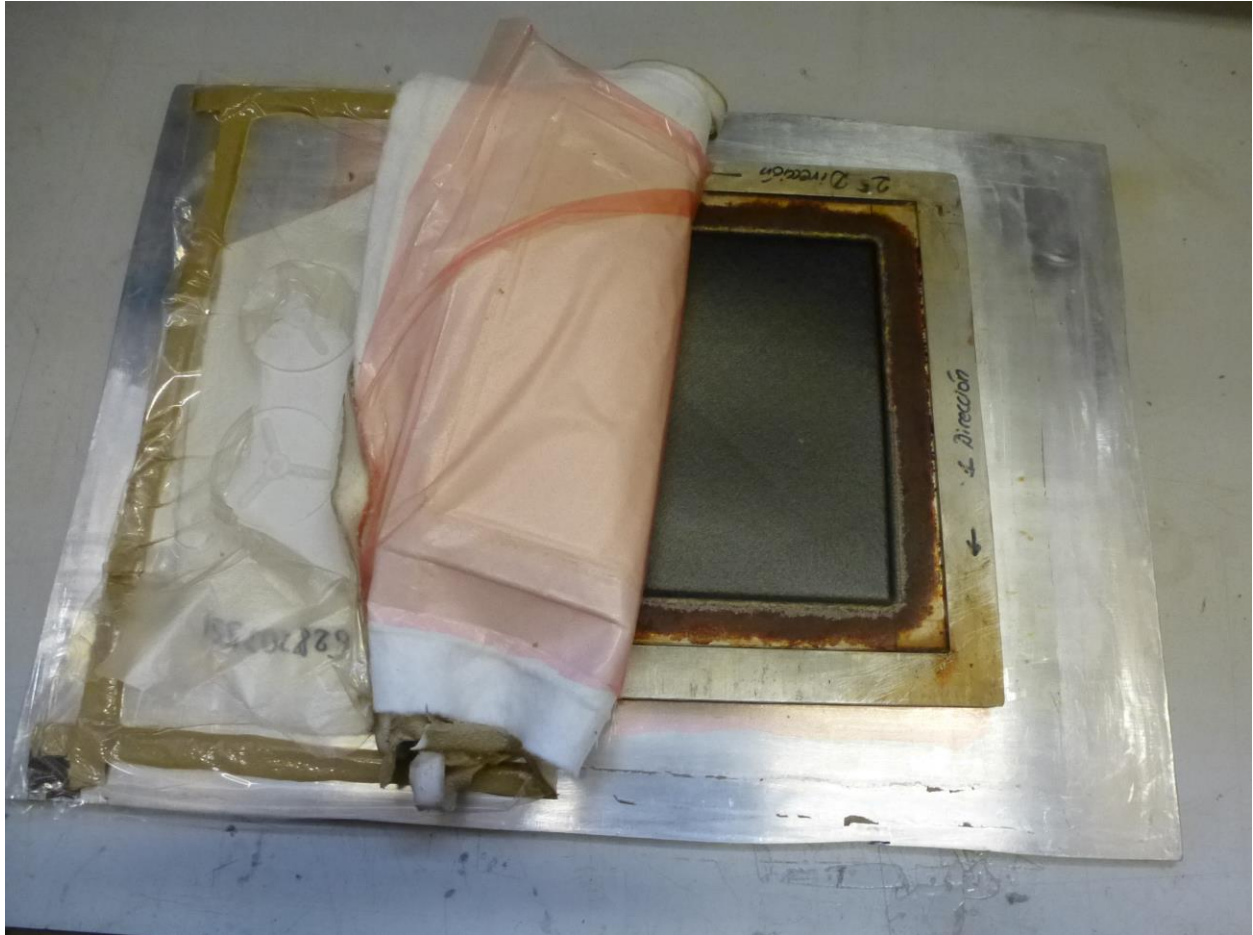


Figura 4.21: Extracción de probeta curada.

4.6 Acabado de las probetas

Cuando se extraen las probetas del curado se observa una rebaba de resina de pocos milímetros en los exteriores de la placa (figura 4.22). Esto es un resultado normal y esperado en cualquier fabricación de un material compuesto en el autoclave, si bien en este proyecto era un inconveniente importante debido a que, como se explicará más adelante, en los ensayos se necesitaba apoyar los lados de nuestra probeta en las acanaladuras del útil, por lo que el perfil irregular introducido por la rebaba debía ser eliminado.

Para eliminarlo, lo primero fue marcar de forma precisa las probetas para que quedasen lo más cuadradas posible con ayuda de una escuadra y un cartabón. Una vez bien delimitados los bordes se trasladaron a la zona de taller. Para entrar en la zona de taller se utilizaron las protecciones adecuadas (gafas protectoras, bata de taller, calzado de seguridad) y se procedió a cortar las placas en una sierra con disco de diamante mientras eran refrigeradas con agua.

Con este paso se daba por concluido el proceso de fabricación de las placas, obteniendo las 12 probetas ya dispuestas para ser preparadas para ensayar.

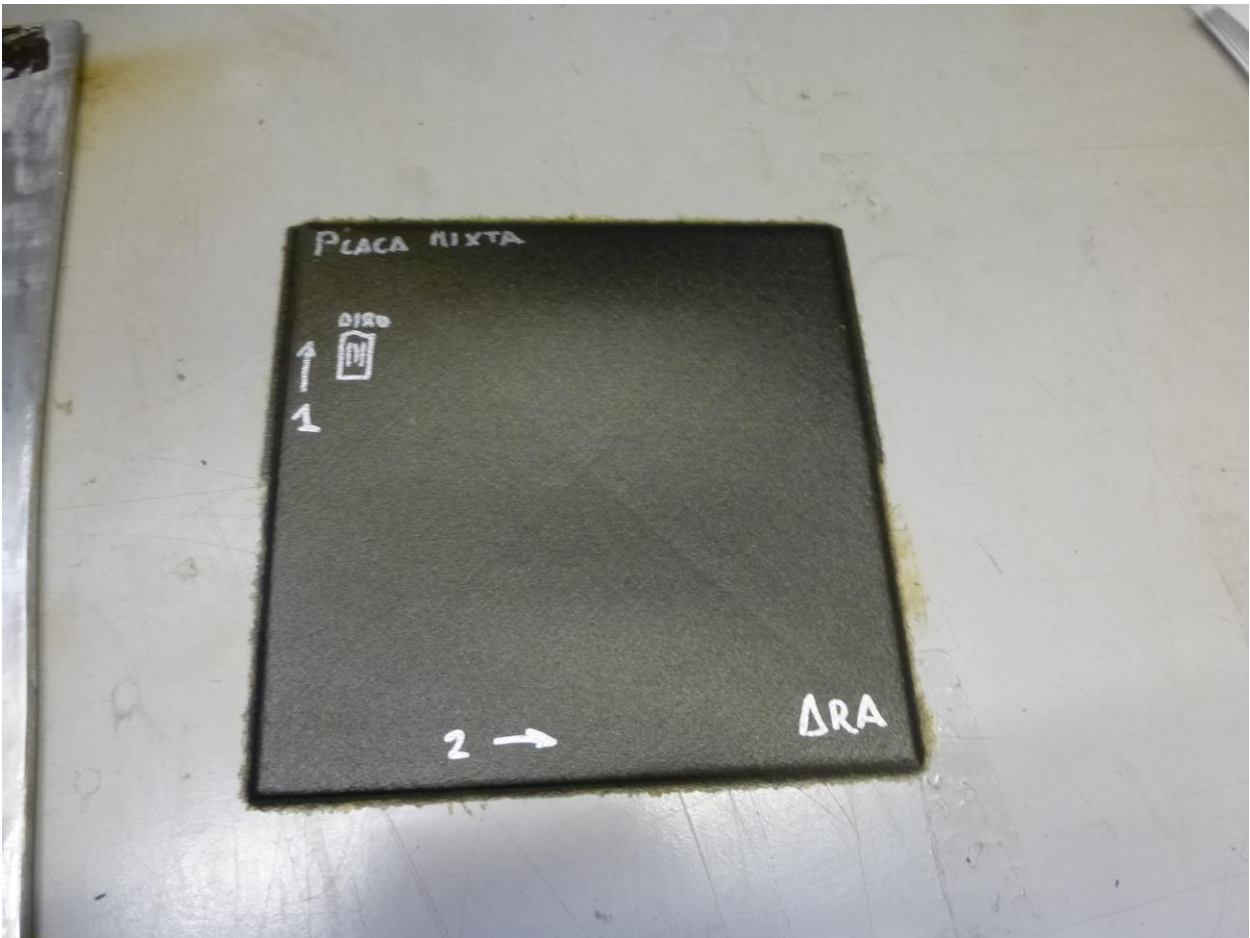


Figura 4.22: Placa curada con la rebaba de resina en todo su perímetro.

5 ÚTIL DE ENSAYO

Debido a las características de este ensayo experimental era necesaria la utilización de un útil para poder llevar a cabo los ensayos de forma satisfactoria. En el proyecto de D. Rafael A. Roig Ortega ya se fabricó un útil que le permitió realizar los ensayos, por lo que se procedió a utilizar dicho útil si bien se ha procedido a una serie de modificaciones sustanciales para mejorar el funcionamiento de este.

5.1 Diseño y limpieza del útil original

El útil original estaba realizado en su mayoría en aluminio. Constaba de tres listones de 300 mm que conformaban una U en la que iba integrada la probeta a ensayar. Para ayudar a su fijación, estos listones fueron dotados en uno de sus perfiles de una gran acanaladura (15 mm de altura) en forma de V. Estaba diseñado de forma que el tamaño de ensayo interior a la U pudiera ser variable para poder ser usado con diferentes tamaños de panel. Esto se conseguía mediante una guía presente en el listón inferior de la U, que a su vez llevaba asociado dos tacos de aluminio con agujeros roscados en las posiciones necesarias, para permitir el movimiento del listón superior. Además, lo completaban un listón de aluminio más corto para colocar en la parte superior de la probeta que llevaba a su vez una acanaladura idéntica a la de los otros listones, una guía de acero que se colocaba en la parte superior de la U e impedía los movimientos de esta fuera del plano de aplicación de la carga y la tornillería necesaria para su fijación. Para los planos del útil original puede consultarse el Proyecto Fin de Carrera de D. Rafael A. Roig Ortega.

El estado en el que se encontraba el útil al comienzo del proyecto era bueno (figura 5.1), sin embargo, en un intento de reproducir las condiciones de contorno buscadas se aplicó silicona en las acanaladuras del útil, como se observa en la figura 5.2. Los resultados de esto no fueron los esperados, ya que en los ensayos fijó las probetas y el útil se llevó parte de la carga destinada a la probeta, por lo que se decidió que las probetas en los ensayos de este proyecto deberían estar lo más libre posible dentro de la acanaladura. Por ello hubo que realizar un proceso de limpieza.



Figura 5.1: Partes del útil en su estado original.

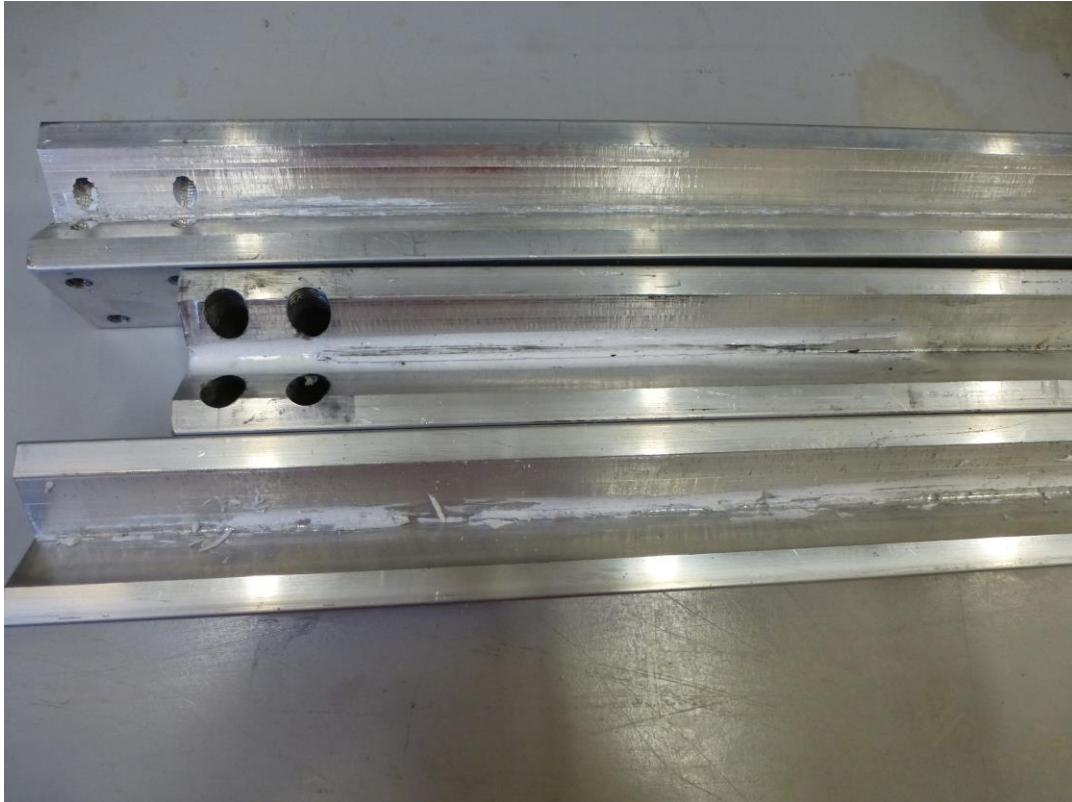


Figura 5.2: Detalle de la silicona en las acanaladuras.

Para realizar esta limpieza se ha utilizado acetona, diclorometano, un destornillador y un disco de púas de metal. Se intentó en la medida de lo posible no rayar la superficie para evitar que pudiesen quedar encajadas las probetas. Esta limpieza se puede ver en las figuras 5.3 y 5.4 y su acabado final en la 5.5.

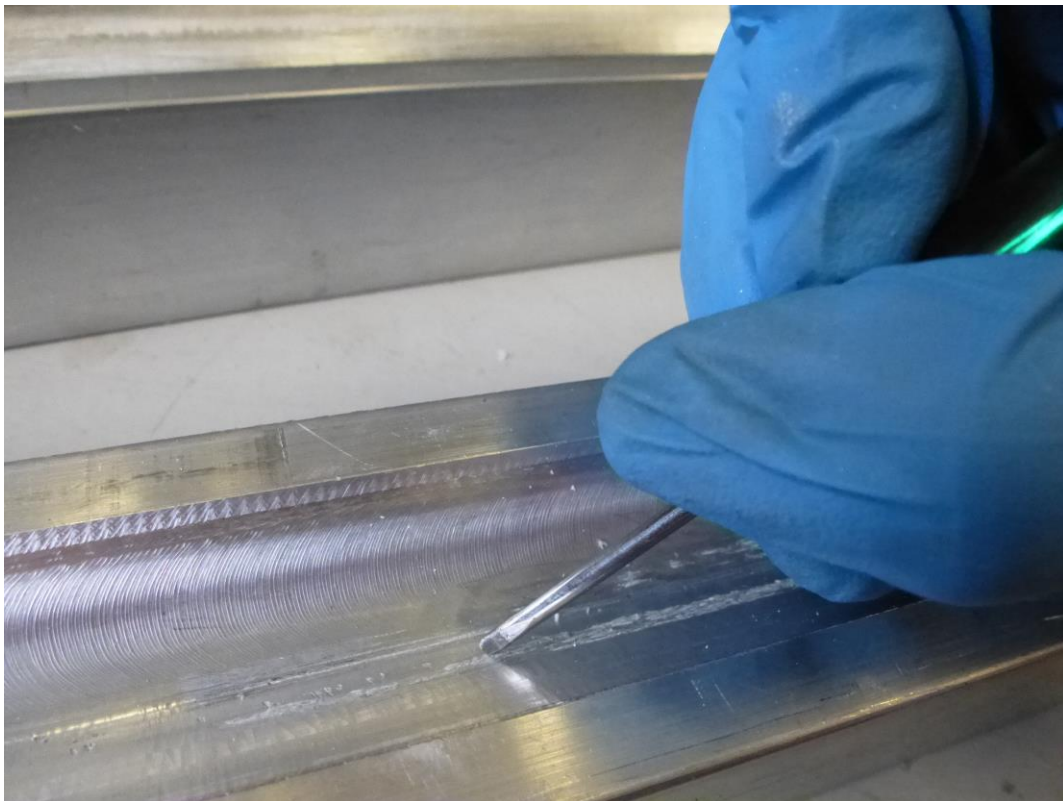


Figura 5.3: Detalle de la limpieza de una de las acanaladuras.

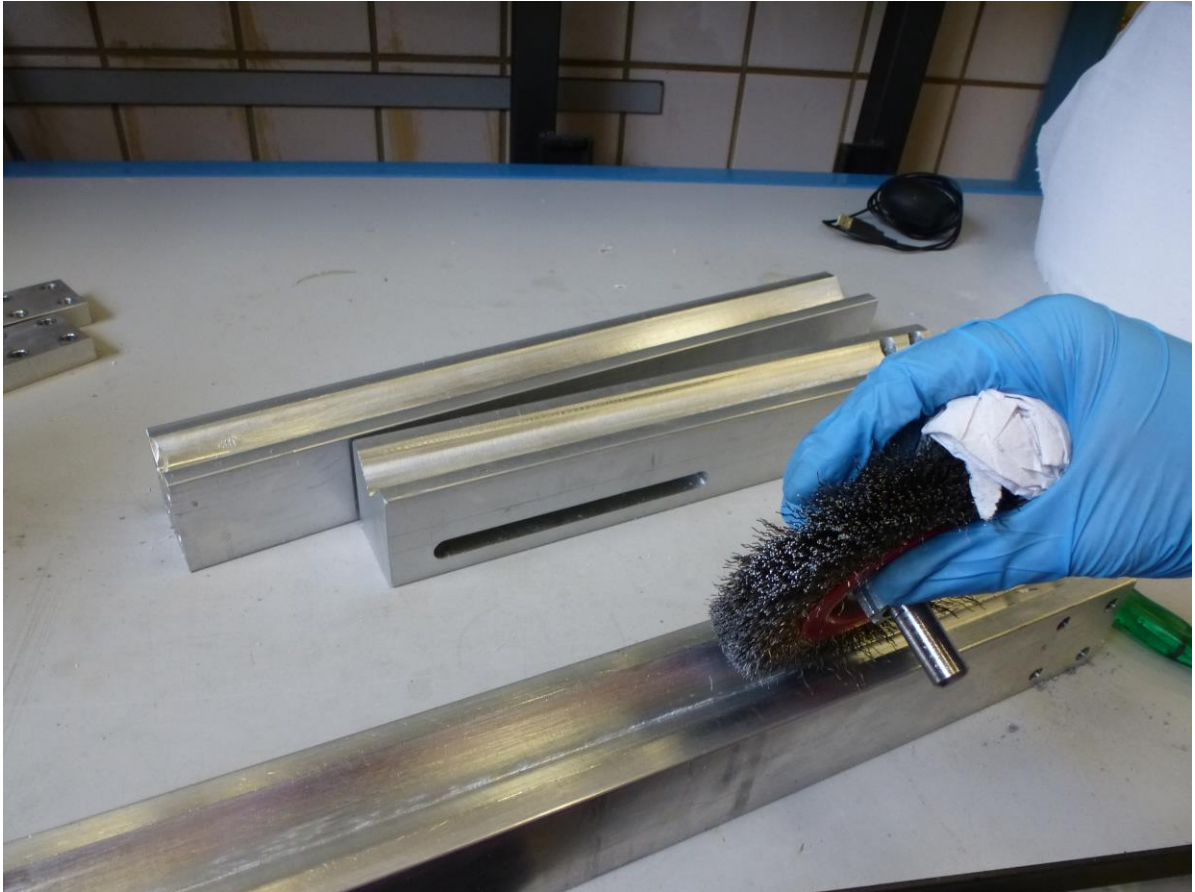


Figura 5.4: Limpieza de una acanaladura con el rodillo de púas.

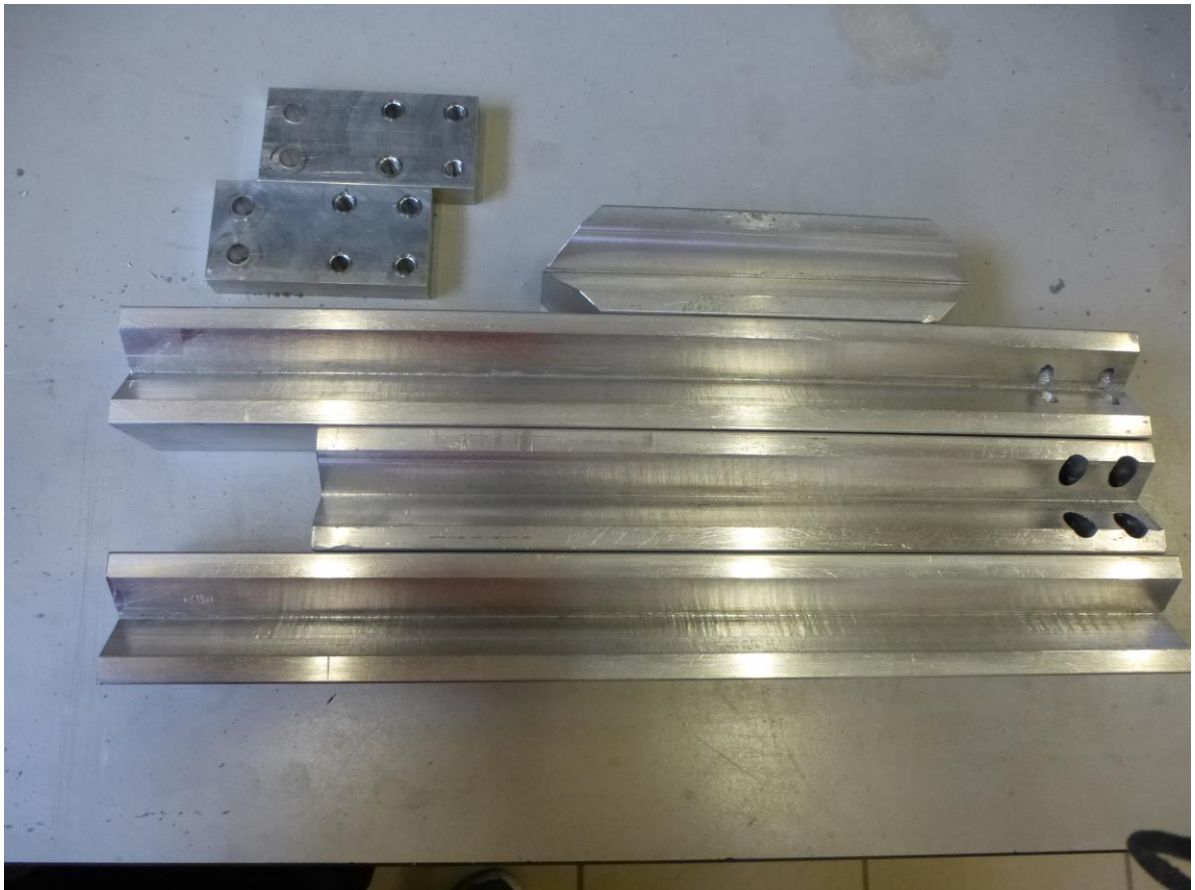


Figura 5.5: Piezas de aluminio del útil tras la limpieza.

5.2 Modificaciones del útil

El útil original produjo tres problemas durante los ensayos:

El primero de ellos era el asociado a las condiciones de contorno, que debido a la silicona mostraba condiciones de empotramiento en los bordes de las placas cuando tendría que ser un apoyo libre. Con la limpieza y la aplicación previa a los ensayos de un lubricante de taller se solucionó sin mayores problemas.

El segundo problema estaba asociado al sistema ARAMIS. Este sistema de cámaras (que será explicado más adelante) precisa de una superficie de grabación diáfana y las acanaladuras del útil original producían sombras en las probetas en la cara de grabación del ARAMIS, lo que perjudicaba la toma de datos en los bordes de la probeta. No era posible la supresión de las acanaladuras debido a que se necesitaban para sujetar la probeta, por lo que se decidió resanar uno de los lados de la V en la cara de grabación hasta dejar las acanaladuras en 5 mm de profundidad, suficiente para sujetar la probeta, pero con una sombra para el ARAMIS mucho más pequeña y que permitía la grabación casi completa de la cara frontal.

El tercer problema venía asociado a las esquinas interiores de la U y la unión de los distintos listones. Debido a que el listón inferior tiene realizada la V y la base de los listones laterales era plana, al realizar los ensayos la zona de la esquina de las placas no quedaba apoyada. Este problema es capital y no por la falta de apoyo, si no porque en el lugar que comenzaba el apoyo del listón lateral se creaba en el sistema una esquina reentrante, creando un concentrador de tensiones que, como se observó en los resultados, llegaba a ser crítico en muchos de los ensayos, pues algunas de las probetas iniciaron el fallo mediante grietas en superficies cercanas a esas esquinas. Para darle solución a este problema había dos formas de enfocarlo: se podía actuar sobre las probetas eliminando la esquina de estas, haciendo que donde acabara el apoyo acabara ese lado de la probeta, o actuar sobre el útil, de forma que el lado de la probeta estuviera apoyado en todo momento. Se optó por la segunda solución.

Así, las modificaciones finales que se adoptaron en el útil fueron las siguientes:

- Resanar a lo largo los listones inferior y superior, fijando el límite en que la acanaladura final fuera de 5mm de altura. Figuras 5.6 y 5.7.
- Resanar el lado frontal de cada una de las Vs de los listones laterales, siendo la altura de dicha acanaladura igualmente de 5mm de altura. Figura 5.8.
- Corte de la pieza auxiliar frontal en la que se atornilla la guía. Figura 5.9.
- Creación de dos topes prismáticos de aluminio de base triangular y poca altura, de igual tamaño que la acanaladura del listón inferior para introducirlos en esta durante los ensayos y así rellenar el hueco, evitando así que una zona de las probetas quede sin apoyo. Figura 5.10 y 5.11.
- Creación de un tope de aluminio de la altura resanada en el listón inferior, sobre el que se apoyará el listón lateral derecho permitiendo su atornillado a las piezas auxiliares sin necesidad de modificar las alturas de los agujeros roscados. Figura 5.12.

Para la realización de todas estas modificaciones se necesitó de la inestimable ayuda del maestro de taller D. Antonio Cañas Delgado que realizó las operaciones necesarias de mecanizado y fabricación que se habían precisado. Toda vez que se realizaron el útil quedó listo para realizar los ensayos necesarios, como se detalla en la figura 5.13.

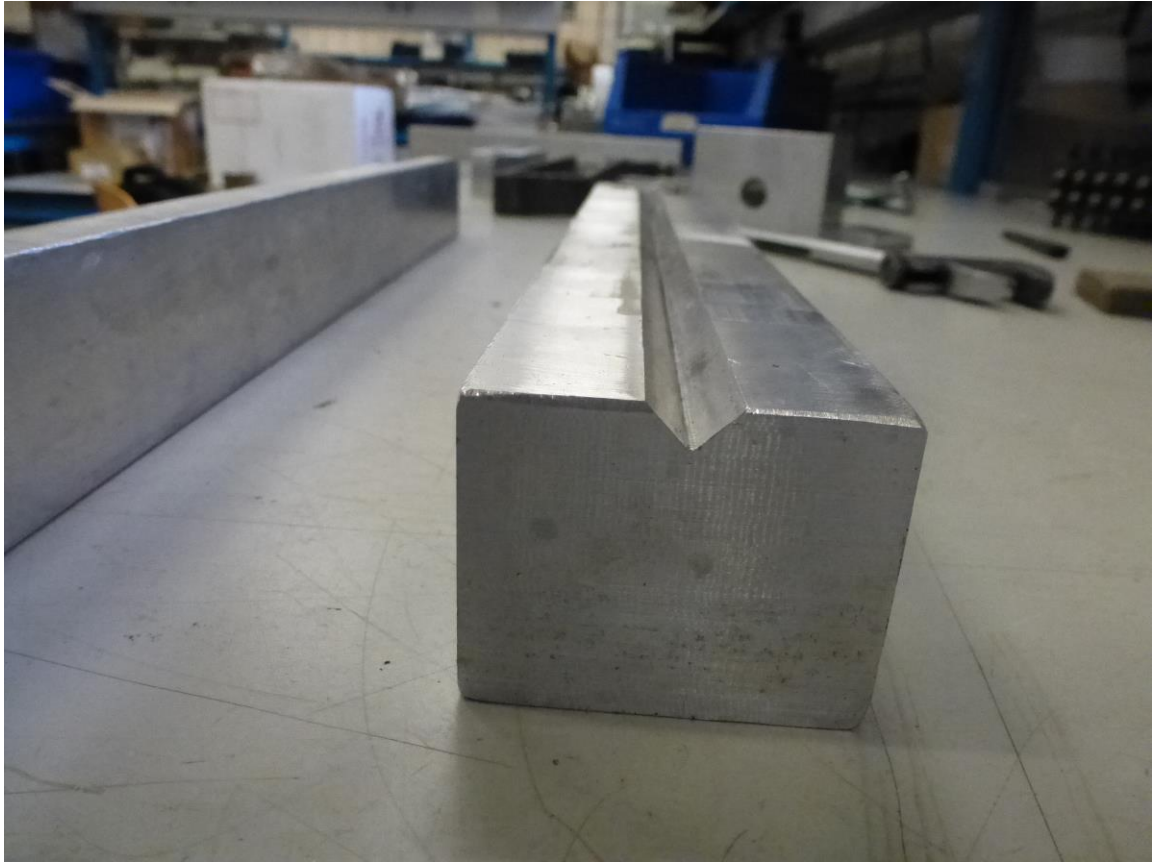


Figura 5.6: Detalle del resanamiento de la acanaladura del listón superior.

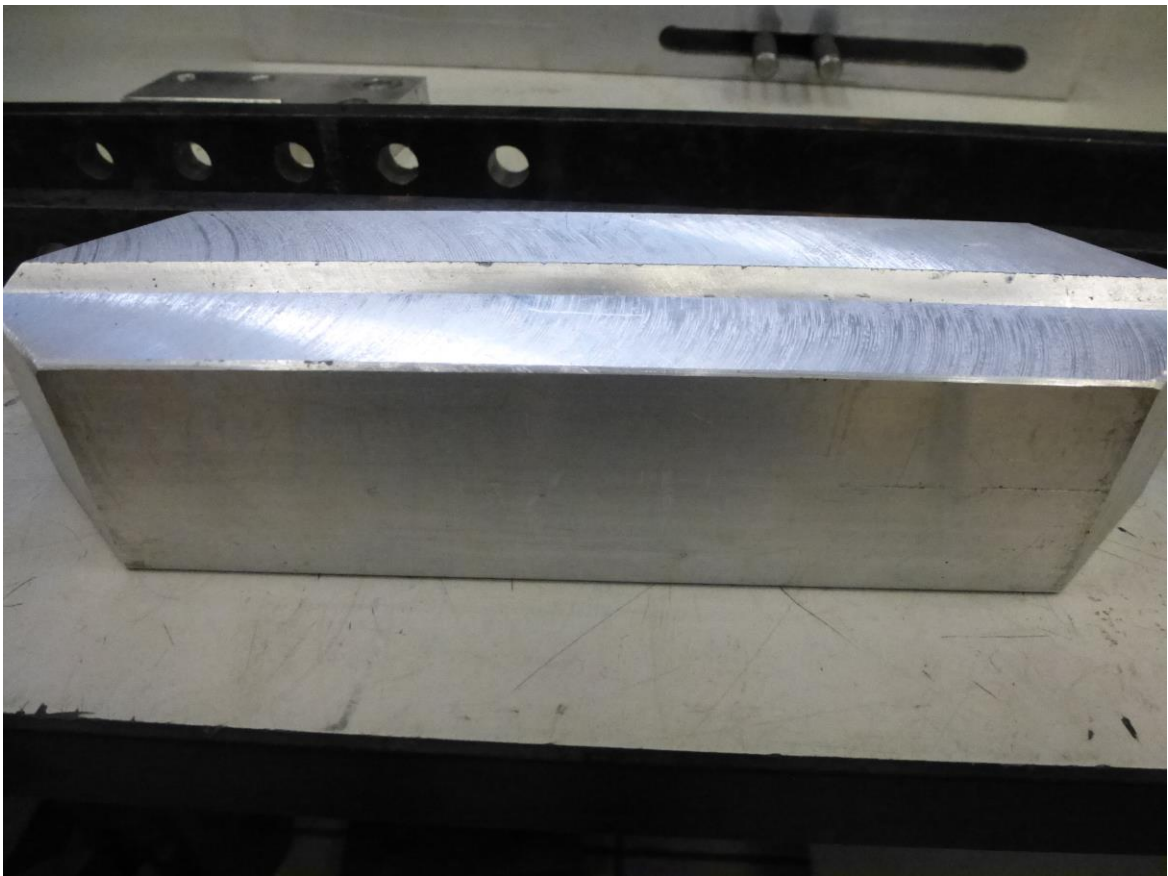


Figura 5.7: Resanamiento del listón superior del útil.

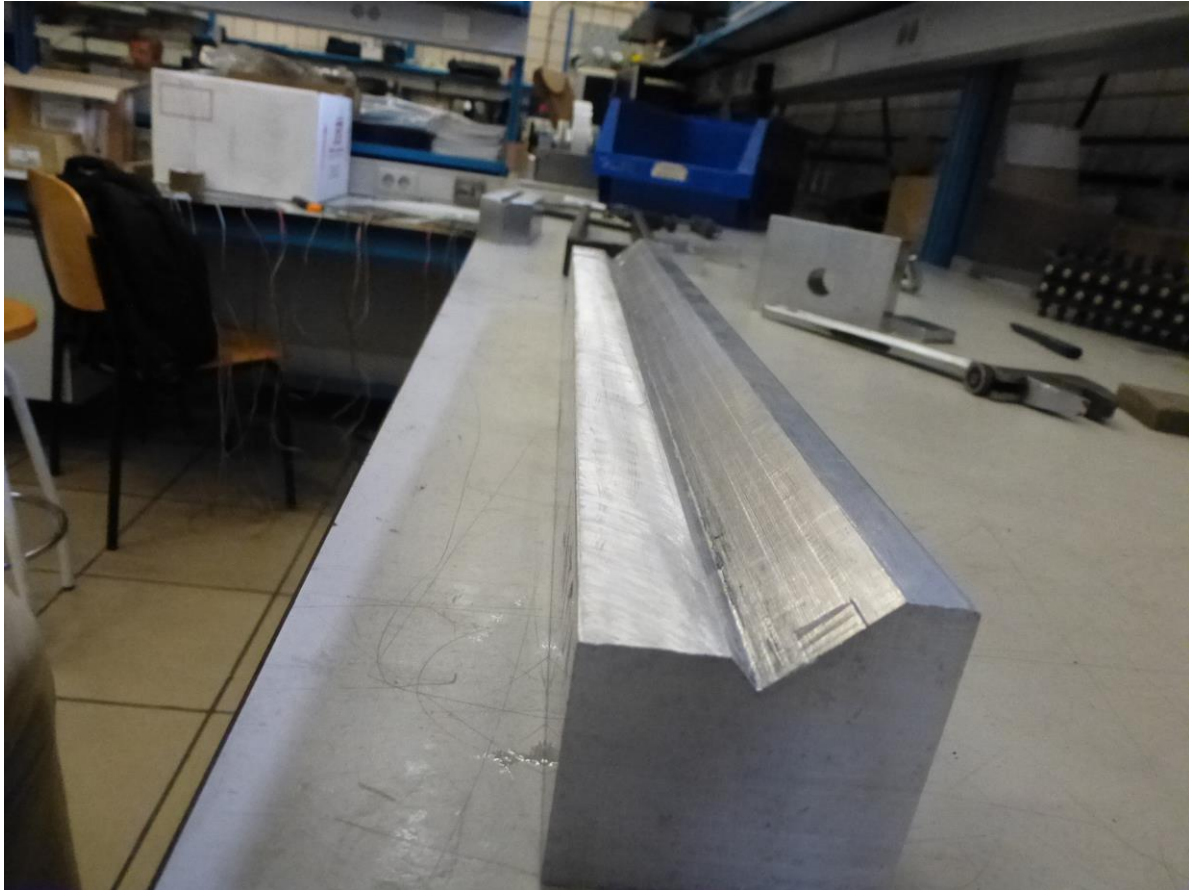


Figura 5.8: Uno de los listones laterales con el lateral frontal de la acanaladura resanado.



Figura 5.9: Pieza auxiliar delantera de agujeros roscados cortada y pieza posterior.



Figura 5.10: Prismas triangulares destinados a evitar esquinas reentrantes.

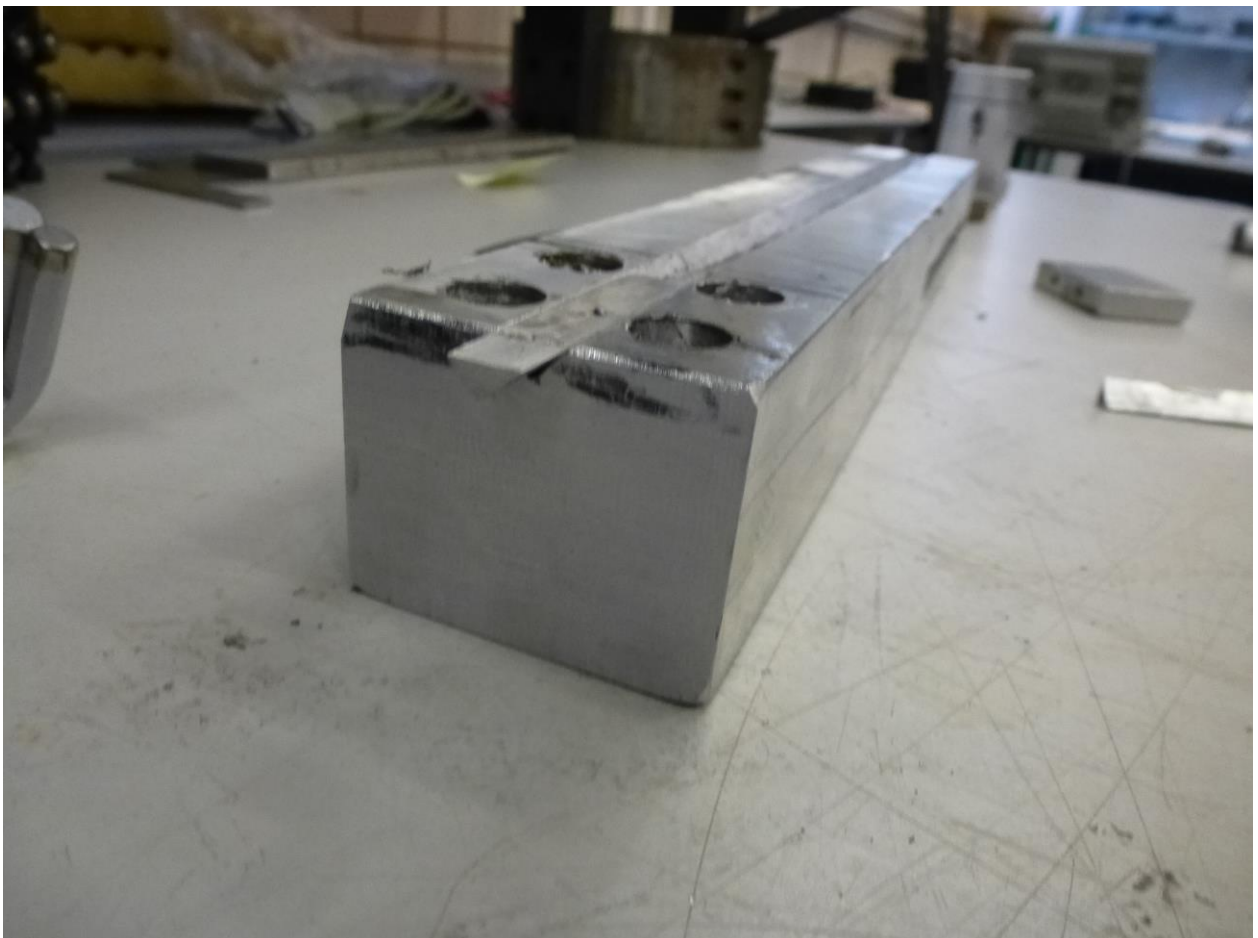


Figura 5.11: Acople de uno de los prismas triangulares en la posición que ocupará durante los ensayos.



Figura 5.12: Tope de aluminio de la altura resanada al listón inferior.



Figura 5.13: Ejemplo del montaje final del útil.

6 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

Una vez fabricadas las probetas y modificado el útil se encontraban a punto los elementos principales del ensayo, pero se creyó conveniente realizar una comprobación de las probetas, además de tener que realizar la preparación que nos permitiese recabar datos más allá de los proporcionados por la máquina de ensayos, que se antojaban escasos dado el carácter de este proyecto.

6.1 Comprobación visual y experimental de las probetas finales

Durante las distintas etapas del proceso de fabricación se han ido realizando comprobaciones visuales de las 12 probetas fabricadas, además un buen acabado del proceso de curado es garantía de que, como mínimo, existe la simetría que se había proyectado, ya que un curado de una placa asimétrica nos hubiera modificado sustancialmente la morfología de esta.

Pero además de las comprobaciones visuales se tomó la consideración de que era importante medir la curvatura que se le imprimía a las probetas en comparación con la curvatura del molde, para poder determinar si la fabricación se adecuaba a nuestro diseño o por el contrario tras el proceso de laminado y curado con el molde no se había sido capaz de reproducir dicho diseño. Para realizar esta comprobación se realizó una medida de niveles de altura tanto en el molde como en cada una de las probetas, con el sistema que podemos ver en la figura 6.1.

Este sistema consiste en un triple apoyo para obtener un plano nivelado y un reloj comparador que se va desplazando sobre la superficie que se mide. Se le dibujó un cuadrícula al molde y se midió en los puntos de intersección, haciendo luego lo mismo con las placas fabricadas, con el fin de comparar las alturas relativas entre los distintos puntos.

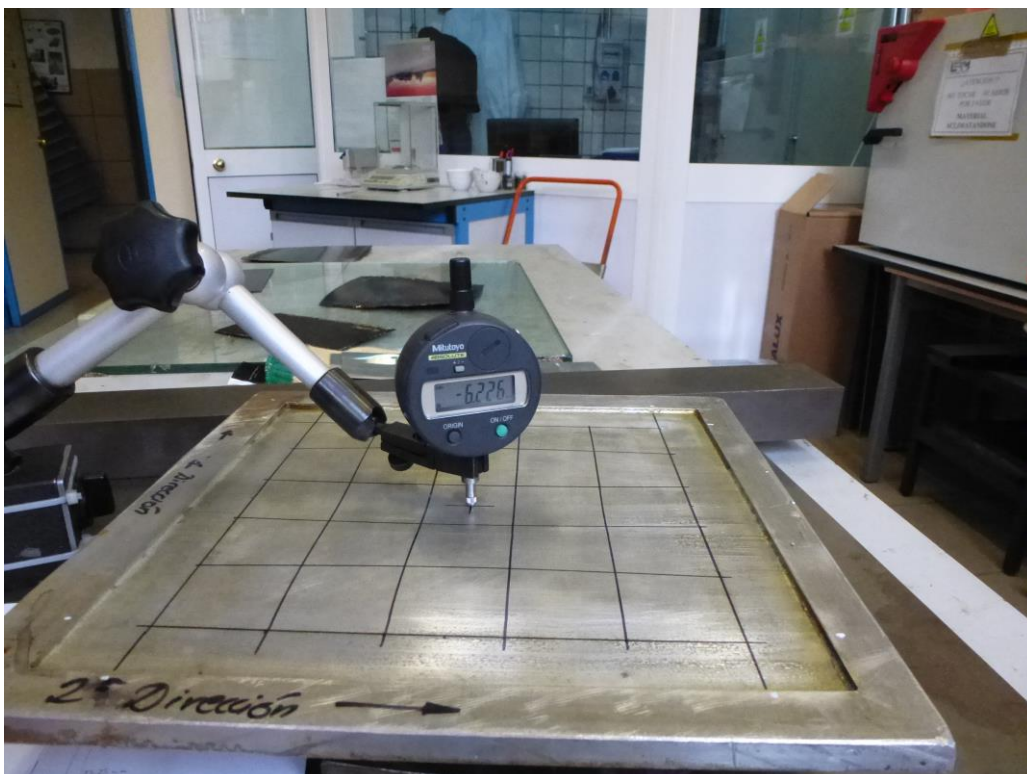


Figura 6.1: Sistema de medición de alturas sobre el molde cuadrículado.

La tabla de alturas medidas la podemos observar en la tabla 6.1, donde se encuentran los datos en bruto. En la tabla 6.2 se ha realizado ya la diferencia respecto a la altura de la medida en el punto central de cada lista para así obtener la altura relativa de cada punto que es el dato relevante en este caso. Por último, en la tabla 6.3 nos detalla las diferencias respecto a la altura relativa de cada punto medida en el molde, en valor absoluto, para ilustrar las verdaderas diferencias obtenidas en la fabricación. Los puntos (del 1 al 36) siguen el esquema de la figura 6.2:

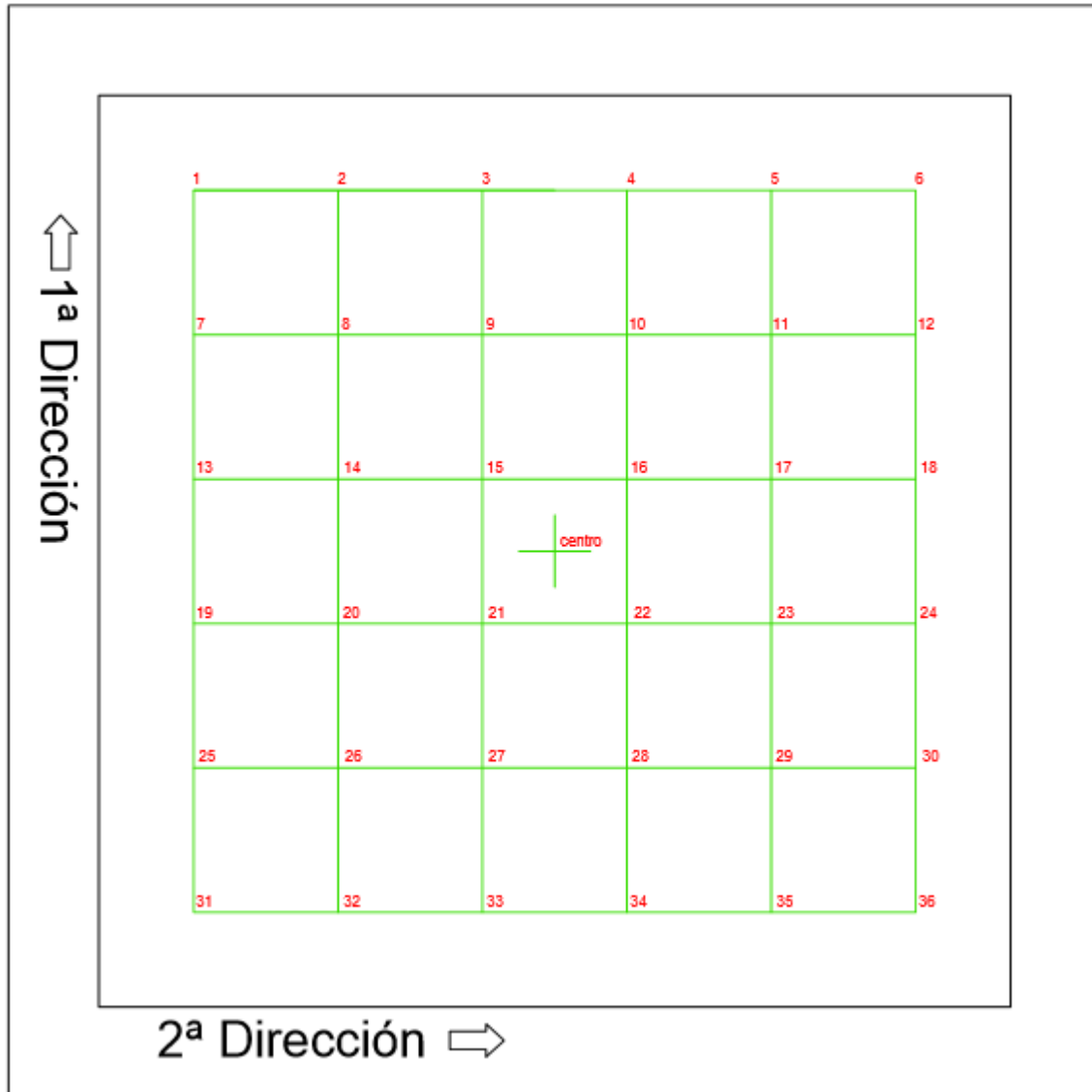


Figura 6.2: Esquema del molde.

mm	molde	0°1	0°2	90°1	90°2	Mixta1	Mixta2	45°1	45°2
1	-7,503	-1,668	-1,906	-1,823	-1,894	-1,732	-1,793	-1,84	-1,896
2	-7,505	-2,116	-2,125	-2,176	-2,185	-2,255	-2,024	-2,314	-2,191
3	-7,548	-2,247	-2,385	-2,37	-2,311	-2,356	-2,403	-2,402	-2,336
4	-7,625	-2,189	-2,818	-2,457	-2,577	-2,596	-2,603	-2,529	-2,87
5	-7,79	-2,122	-2,507	-2,277	-2,51	-2,371	-2,391	-2,572	-2,481
6	-7,935	-2,08	-2,095	-1,929	-1,825	-1,786	-1,813	-1,771	-1,992
7	-7,656	-2,324	-2,358	-2,524	-2,261	-2,674	-2,496	-2,638	-2,601
8	-8,737	-3,454	-3,797	-3,636	-3,541	-3,888	-3,955	-3,946	-3,885
9	-9,46	-4,159	-4,684	-4,375	-4,377	-4,636	-4,648	-4,817	-4,809
10	-9,541	-4,236	-4,719	-4,392	-4,557	-4,607	-4,661	-4,83	-5,002
11	-8,894	-3,547	-3,889	-3,732	-3,697	-3,764	-3,826	-4,04	-4,361
12	-7,956	-2,269	-2,402	-2,458	-2,183	-2,327	-2,482	-2,664	-3,213
13	-8,152	-2,465	-2,595	-2,722	-2,254	-2,87	-2,759	-2,958	-2,786
14	-7,506	-2,042	-2,518	-2,28	-2,031	-2,604	-2,528	-2,752	-2,837
15	-7,05	-1,618	-2,222	-1,789	-1,84	-2,229	-2,263	-2,534	-2,848
16	-7,045	-1,518	-2,158	-1,846	-1,671	-2,13	-2,163	-2,52	-2,963
17	-7,453	-1,967	-2,401	-2,261	-1,903	-2,285	-2,465	-2,768	-3,508
18	-8,134	-2,02	-2,334	-2,557	-2,055	-2,153	-2,559	-2,753	-3,881
19	-8,308	-2,573	-2,786	-2,912	-2,326	-2,952	-2,866	-3,13	-2,846
20	-7,616	-2,16	-2,47	-2,306	-2,017	-2,459	-2,465	-2,778	-2,761
21	-7,136	-1,74	-2,251	-1,866	-1,704	-2,155	-2,151	-2,563	-2,75
22	-7,184	-1,617	-2,288	-1,888	-1,735	-1,945	-2,22	-2,558	-2,282
23	-7,611	-1,924	-2,472	-2,274	-1,999	-2,295	-2,58	-2,635	-2,395
24	-8,285	-2,415	-2,521	-2,564	-2,368	-2,605	-2,737	-2,925	-2,598
25	-8,228	-2,645	-2,859	-2,856	-2,643	-3,059	-2,894	-3,182	-2,879
26	-9,322	-3,806	-4,27	-3,976	-3,757	-4,096	-4,023	-4,437	-4,424
27	-10,005	-4,19	-5,012	-4,666	-4,59	-4,748	-4,71	-5,184	-4,882
28	-10,041	-4,388	-5,039	-4,601	-4,682	-4,704	-4,811	-4,986	-4,732
29	-9,415	-3,656	-4,145	-3,903	-3,935	-3,798	-4,15	-4,101	-3,915
30	-8,362	-2,38	-2,668	-2,584	-2,686	-2,668	-2,419	-2,556	-2,623
31	-8,221	-2,47	-2,894	-2,557	-2,425	-2,751	-2,618	-2,537	-2,455
32	-8,224	-2,596	-3,292	-2,711	-2,994	-2,949	-2,712	-2,823	-2,64
33	-8,223	-2,538	-3,138	-2,77	-2,91	-2,932	-3,087	-2,803	-2,865
34	-8,245	-2,654	-3,366	-2,827	-2,964	-2,856	-2,934	-2,986	-2,957
35	-8,257	-2,544	-3,016	-2,695	-2,796	-2,549	-2,737	-2,88	-2,83
36	-8,28	-2,414	-2,429	-2,424	-2,313	-2,201	-2,143	-2,395	-2,338
centro	-6,289	-0,721	-1,378	-1,139	-0,896	-1,226	-1,346	-1,692	-2,055

Tabla 6.1: Alturas (en milímetros) medidas para cada punto en todas las placas.

diferencia respecto centro	molde	0º1	0º2	90º1	90º2	Mixta1	Mixta2	45º1	45º2
1	-1,214	-0,947	-0,528	-0,684	-0,998	-0,506	-0,447	-0,148	0,159
2	-1,216	-1,395	-0,747	-1,037	-1,289	-1,029	-0,678	-0,622	-0,136
3	-1,259	-1,526	-1,007	-1,231	-1,415	-1,13	-1,057	-0,71	-0,281
4	-1,336	-1,468	-1,44	-1,318	-1,681	-1,37	-1,257	-0,837	-0,815
5	-1,501	-1,401	-1,129	-1,138	-1,614	-1,145	-1,045	-0,88	-0,426
6	-1,646	-1,359	-0,717	-0,79	-0,929	-0,56	-0,467	-0,079	0,063
7	-1,367	-1,603	-0,98	-1,385	-1,365	-1,448	-1,15	-0,946	-0,546
8	-2,448	-2,733	-2,419	-2,497	-2,645	-2,662	-2,609	-2,254	-1,83
9	-3,171	-3,438	-3,306	-3,236	-3,481	-3,41	-3,302	-3,125	-2,754
10	-3,252	-3,515	-3,341	-3,253	-3,661	-3,381	-3,315	-3,138	-2,947
11	-2,605	-2,826	-2,511	-2,593	-2,801	-2,538	-2,48	-2,348	-2,306
12	-1,667	-1,548	-1,024	-1,319	-1,287	-1,101	-1,136	-0,972	-1,158
13	-1,863	-1,744	-1,217	-1,583	-1,358	-1,644	-1,413	-1,266	-0,731
14	-1,217	-1,321	-1,14	-1,141	-1,135	-1,378	-1,182	-1,06	-0,782
15	-0,761	-0,897	-0,844	-0,65	-0,944	-1,003	-0,917	-0,842	-0,793
16	-0,756	-0,797	-0,78	-0,707	-0,775	-0,904	-0,817	-0,828	-0,908
17	-1,164	-1,246	-1,023	-1,122	-1,007	-1,059	-1,119	-1,076	-1,453
18	-1,845	-1,299	-0,956	-1,418	-1,159	-0,927	-1,213	-1,061	-1,826
19	-2,019	-1,852	-1,408	-1,773	-1,43	-1,726	-1,52	-1,438	-0,791
20	-1,327	-1,439	-1,092	-1,167	-1,121	-1,233	-1,119	-1,086	-0,706
21	-0,847	-1,019	-0,873	-0,727	-0,808	-0,929	-0,805	-0,871	-0,695
22	-0,895	-0,896	-0,91	-0,749	-0,839	-0,719	-0,874	-0,866	-0,227
23	-1,322	-1,203	-1,094	-1,135	-1,103	-1,069	-1,234	-0,943	-0,34
24	-1,996	-1,694	-1,143	-1,425	-1,472	-1,379	-1,391	-1,233	-0,543
25	-1,939	-1,924	-1,481	-1,717	-1,747	-1,833	-1,548	-1,49	-0,824
26	-3,033	-3,085	-2,892	-2,837	-2,861	-2,87	-2,677	-2,745	-2,369
27	-3,716	-3,469	-3,634	-3,527	-3,694	-3,522	-3,364	-3,492	-2,827
28	-3,752	-3,667	-3,661	-3,462	-3,786	-3,478	-3,465	-3,294	-2,677
29	-3,126	-2,935	-2,767	-2,764	-3,039	-2,572	-2,804	-2,409	-1,86
30	-2,073	-1,659	-1,29	-1,445	-1,79	-1,442	-1,073	-0,864	-0,568
31	-1,932	-1,749	-1,516	-1,418	-1,529	-1,525	-1,272	-0,845	-0,4
32	-1,935	-1,875	-1,914	-1,572	-2,098	-1,723	-1,366	-1,131	-0,585
33	-1,934	-1,817	-1,76	-1,631	-2,014	-1,706	-1,741	-1,111	-0,81
34	-1,956	-1,933	-1,988	-1,688	-2,068	-1,63	-1,588	-1,294	-0,902
35	-1,968	-1,823	-1,638	-1,556	-1,9	-1,323	-1,391	-1,188	-0,775
36	-1,991	-1,693	-1,051	-1,285	-1,417	-0,975	-0,797	-0,703	-0,283
centro	-6,289	-0,721	-1,378	-1,139	-0,896	-1,226	-1,346	-1,692	-2,055

Tabla 6.2: Alturas relativas (en milímetros) de cada punto respecto a la altura del punto central de la placa.

diferencia con molde (ABS)	0º1	0º2	90º1	90º2	Mixta1	Mixta2	45º1	45º2
1	0,267	0,686	0,53	0,216	0,708	0,767	1,066	1,373
2	0,179	0,469	0,179	0,073	0,187	0,538	0,594	1,08
3	0,267	0,252	0,028	0,156	0,129	0,202	0,549	0,978
4	0,132	0,104	0,018	0,345	0,034	0,079	0,499	0,521
5	0,1	0,372	0,363	0,113	0,356	0,456	0,621	1,075
6	0,287	0,929	0,856	0,717	1,086	1,179	1,567	1,709
7	0,236	0,387	0,018	0,002	0,081	0,217	0,421	0,821
8	0,285	0,029	0,049	0,197	0,214	0,161	0,194	0,618
9	0,267	0,135	0,065	0,31	0,239	0,131	0,046	0,417
10	0,263	0,089	0,001	0,409	0,129	0,063	0,114	0,305
11	0,221	0,094	0,012	0,196	0,067	0,125	0,257	0,299
12	0,119	0,643	0,348	0,38	0,566	0,531	0,695	0,509
13	0,119	0,646	0,28	0,505	0,219	0,45	0,597	1,132
14	0,104	0,077	0,076	0,082	0,161	0,035	0,157	0,435
15	0,136	0,083	0,111	0,183	0,242	0,156	0,081	0,032
16	0,041	0,024	0,049	0,019	0,148	0,061	0,072	0,152
17	0,082	0,141	0,042	0,157	0,105	0,045	0,088	0,289
18	0,546	0,889	0,427	0,686	0,918	0,632	0,784	0,019
19	0,167	0,611	0,246	0,589	0,293	0,499	0,581	1,228
20	0,112	0,235	0,16	0,206	0,094	0,208	0,241	0,621
21	0,172	0,026	0,12	0,039	0,082	0,042	0,024	0,152
22	0,001	0,015	0,146	0,056	0,176	0,021	0,029	0,668
23	0,119	0,228	0,187	0,219	0,253	0,088	0,379	0,982
24	0,302	0,853	0,571	0,524	0,617	0,605	0,763	1,453
25	0,015	0,458	0,222	0,192	0,106	0,391	0,449	1,115
26	0,052	0,141	0,196	0,172	0,163	0,356	0,288	0,664
27	0,247	0,082	0,189	0,022	0,194	0,352	0,224	0,889
28	0,085	0,091	0,29	0,034	0,274	0,287	0,458	1,075
29	0,191	0,359	0,362	0,087	0,554	0,322	0,717	1,266
30	0,414	0,783	0,628	0,283	0,631	1	1,209	1,505
31	0,183	0,416	0,514	0,403	0,407	0,66	1,087	1,532
32	0,06	0,021	0,363	0,163	0,212	0,569	0,804	1,35
33	0,117	0,174	0,303	0,08	0,228	0,193	0,823	1,124
34	0,023	0,032	0,268	0,112	0,326	0,368	0,662	1,054
35	0,145	0,33	0,412	0,068	0,645	0,577	0,78	1,193
36	0,298	0,94	0,706	0,574	1,016	1,194	1,288	1,708

Tabla 6.3: Diferencias entre las alturas relativas (medidas desde el centro) de cada punto y las del molde.

Como se observa en la última tabla las diferencias son pequeñas, siendo la mayor de 1.7 milímetros, pero en general casi todos los puntos tienen una diferencia menor a 1 milímetro, siendo la placa del laminado 12 la que mayores diferencias presenta. Debido a que estas diferencias (que provienen en su mayoría del proceso de curado) no son muy grandes se dio por válido el proceso de fabricación de las láminas, pues presenta las geometrías buscadas, si bien lo ideal hubiese sido que no hubiera diferencia alguna con la curvatura del molde, pero eso es un extremo prácticamente imposible técnicamente hablando para las condiciones del proyecto.

6.2 Preparación de los sistemas de recopilación de datos

Por el tipo de ensayos que se iban a realizar los datos que se recopilan en la máquina de ensayo INSTRON 4482 se antojaron insuficientes. Por ello se instalaron sistemas auxiliares de recopilación de datos buscando una mayor precisión y dimensión de los resultados. Para llevar a cabo esto, se utilizaron dos sistemas que procedemos a explicar a continuación, como fueron el sistema ARAMIS y la colocación de numerosas galgas extensométricas en las probetas de ensayo.

6.2.1 Sistema ARAMIS

El sistema ARAMIS fue cedido de forma desinteresada por la empresa TEAMS y manejado por el ingeniero D. Rafael Cabrera Melgar. Dicho sistema consiste en un conjunto de cámaras que graban y fotografían en tiempo real durante el experimento y nos entregan información muy valiosa tanto de desplazamientos como de cargas o tensiones. Para este proyecto en concreto se busca la información en tiempo real del desplazamiento fuera del plano producido por las cargas durante el postpandeo. Dicho desplazamiento nos da una idea de las deformaciones de la placa y la evolución de estas durante la aplicación de la carga, pudiendo darnos información sobre el modo de pandeo que ha seguido la probeta.

Para la utilización de esta tecnología se necesitaba un paso previo de marcado de las probetas, consistente en la aplicación de una pintura base (en este caso de color blanco) y una pintura de otro color que haga un buen contraste con el de base (aquí se utiliza pintura negra) aplicada solo de forma residual de forma que deje solo pequeñas marcas disgregadas por toda la superficie en forma de puntos. Estos puntos de gran contraste que se distribuyen por toda la placa ensayada son los que se utilizan para el seguimiento de las cámaras y la entrega de información del ARAMIS. Además, se realiza una marca también en el punto medio de cada probeta a fin de centrar el sistema de cámaras. En la figura 6.3 se puede observar la aplicación de la pintura sobre una de las probetas, mientras que en las figuras 6.4 y 6.5 la instalación del sistema ARAMIS antes de la realización de uno de los ensayos.



Figura 6.3: Aplicación de pintura en una de las probetas durante el marcado necesario para el sistema

ARAMIS.



Figura 6.4: Sistema ARAMIS antes de uno de los ensayos.

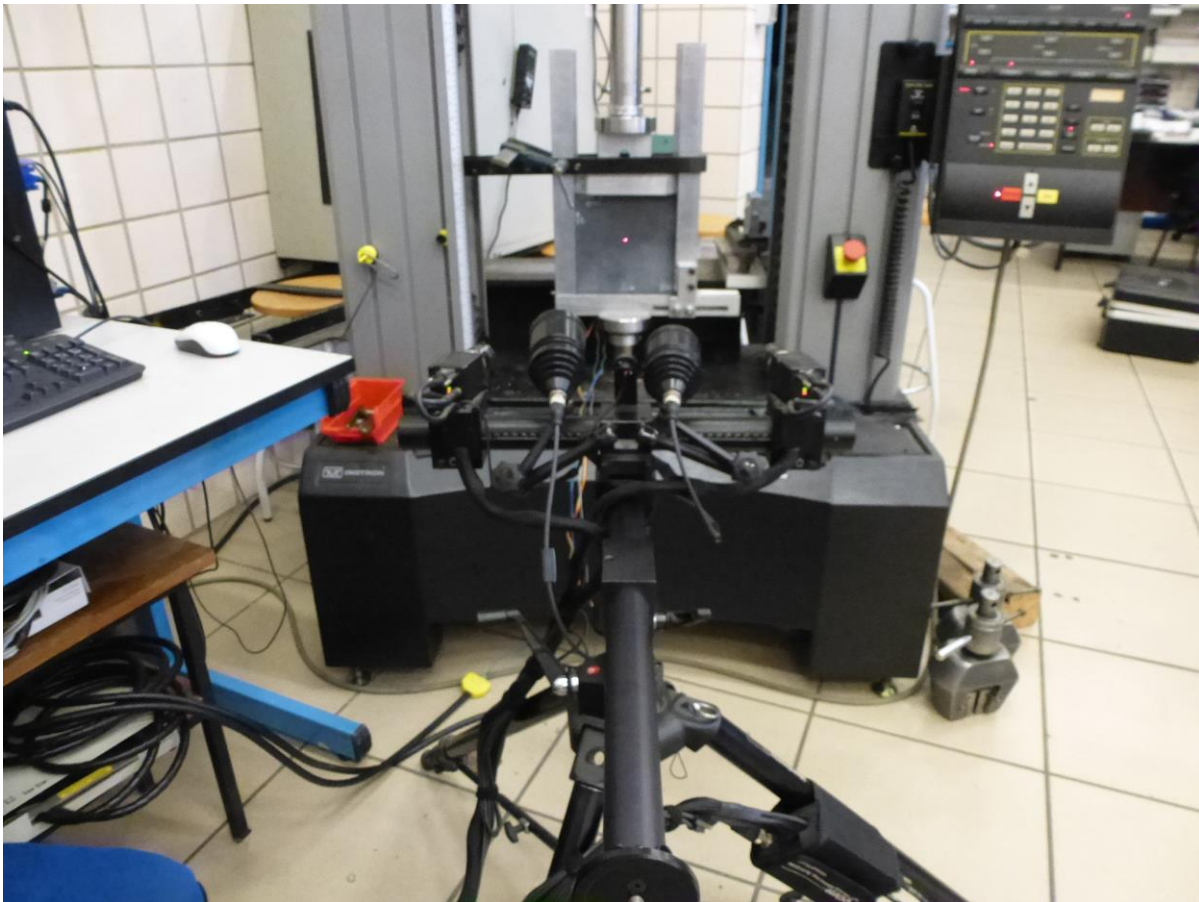


Figura 6.5: Sistema ARAMIS calibrado al centro de una de las placas de ensayo.

6.2.2 Colocación de las galgas extensométricas

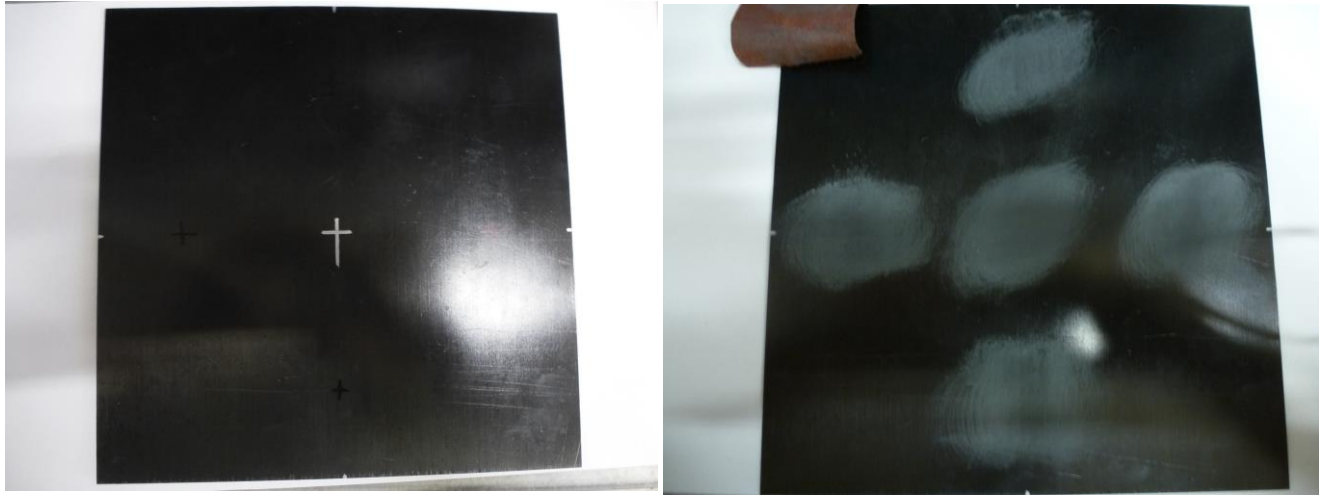
Para la obtención de un conjunto mayor de resultados se optó por la instalación de galgas extensométricas en las probetas. Dichas galgas se basan en el efecto piezorresistivo, gracias al cual cuando reciben una excitación de carácter mecánico (tracción, compresión) varía su resistencia, haciendo que varíe también la medida de voltaje que nos ofrece la galga permitiendo que se conozca el valor del esfuerzo mecánico aplicado.

Ante el dilema del número de galgas a utilizar se decidió instalar más de una galga por probeta debido a los diversos puntos de interés en estas y a la fragilidad de las galgas, así si alguna fallaba durante la duración de los ensayos tendríamos más que nos ofrecerían resultados. Por ello, se decidió colocar las galgas en el punto central y en los puntos donde la altura alcanzada debido a la curvatura aplicada por el molde era mayor en la dirección de las 3 ondas. Esto hace un total de 3 galgas extensométricas en las probetas predeformadas. Para las placas planas debido a su carácter comparativo utilizamos 5 galgas, en las mismas posiciones en las que se colocarían en las curvas, para poder realizar una comparación de resultados entre ellas. En total, se instalaron un total de 44 galgas extensométricas en las placas de ensayo con el procedimiento que se describe a continuación.

Las galgas escogidas para ser colocadas son el modelo 1-LY41-6/120 del distribuidor *HBM*. Su resistencia es de $120 \Omega \pm 30 \%$ con un factor de galga k de $2.04 \pm 1.0 \%$. Las galgas de este proyecto son todas unidireccionales y se van a colocar en la dirección de aplicación de la carga.

Se va a tomar el ejemplo de una placa plana para mostrar el proceso de colocación de las galgas. El primer paso fue realizar el marcado del lugar donde se colocarán y lijar la superficie de esos puntos. El lijado inicial es

importante pues permite una adherencia mayor. Esto se muestra en las figuras 6.6 y 6.7.



Figuras 6.6 y 6.7: Marcado y lijado de las posiciones de las galgas extensométricas.

Una vez lijada la superficie se realizó una limpieza con alcohol de 96°, ya que incluso la acetona podía llegar a afectar las galgas debido a su sensibilidad frente a cualquier impureza. El siguiente paso consistió en marcar mediante un rayado muy superficial una cruz en cada punto donde iba colocada una galga. Este marcado debía ser lo más preciso posible ya que sería el que se utilizaría más adelante para situar la galga, por lo tanto es el que nos marcará la posición y dirección de estas.

Para marcar de forma precisa se utilizó un artilugio del fabricante *Mitutoyo* que consiste en una guía vertical con una cuchilla en su pieza móvil. Además, incorpora un medidor de altura para establecer con precisión la altura a la que se encuentra la cuchilla. Se puede ver el instrumento en la figura 6.8 y el resultado de una de sus marcas en la 6.9.

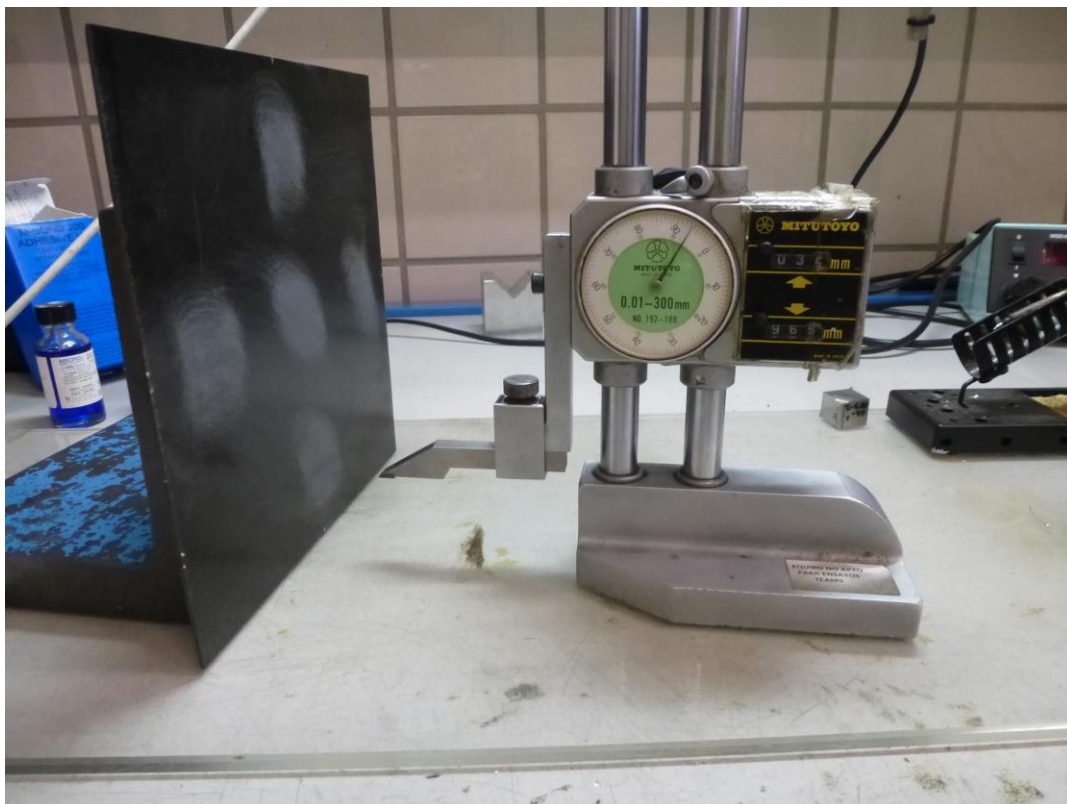


Figura 6.8: Instrumento utilizado para realizar las marcas guía de las galgas.



Figura 6.9: Ejemplo del marcado superficial realizado en cada uno de los puntos de instalación.

A partir de este momento comenzaba la manipulación de las galgas. Para ello, no se debían coger bajo ningún concepto con las manos, por lo que se utilizaron siempre unas pinzas como instrumento. La galga siempre debe tener la superficie brillante hacia arriba. Se utilizó una pequeña porción de cinta adhesiva que se colocaba sobre la banda y, con ayuda de unas lentes de aumento, se realizó la colocación de la galga en su posición, utilizando las marcas que se encuentran en la propia galga y las realizadas en la probeta para que la posición de esta fuera la convenida. Este proceso se observa en las figuras 6.10 y 6.11.

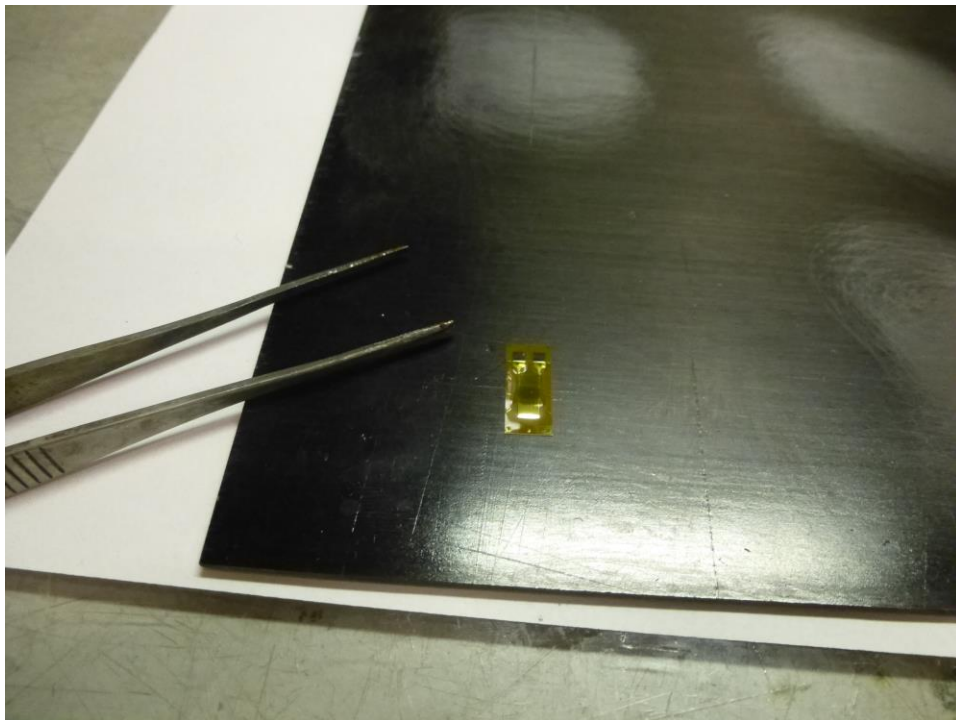


Figura 6.10: Manipulación de la galga con unas pinzas.



Figura 6.11: Galgas dispuestas en su posición con ayuda de la cinta adhesiva.

Una vez colocadas en su posición se levantó el celo por un extremo hasta que la galga quedase expuesta. Sobre la superficie de la probeta se aplicó un catalizador especial para galgas extensométricas. Dicho catalizador se debía haber dejado a temperatura ambiente durante una media hora antes de su aplicación, pues se suele almacenar a baja temperatura. Cuando el catalizador aplicado se secó por completo se extendió un pegamento especial sobre la propia superficie de la galga y se volvió a situar sobre su posición. Una vez colocada se le aplicó presión durante un minuto aproximadamente. Este proceso se muestra en las figuras 6.12, 6.13, 6.14 y 6.15.

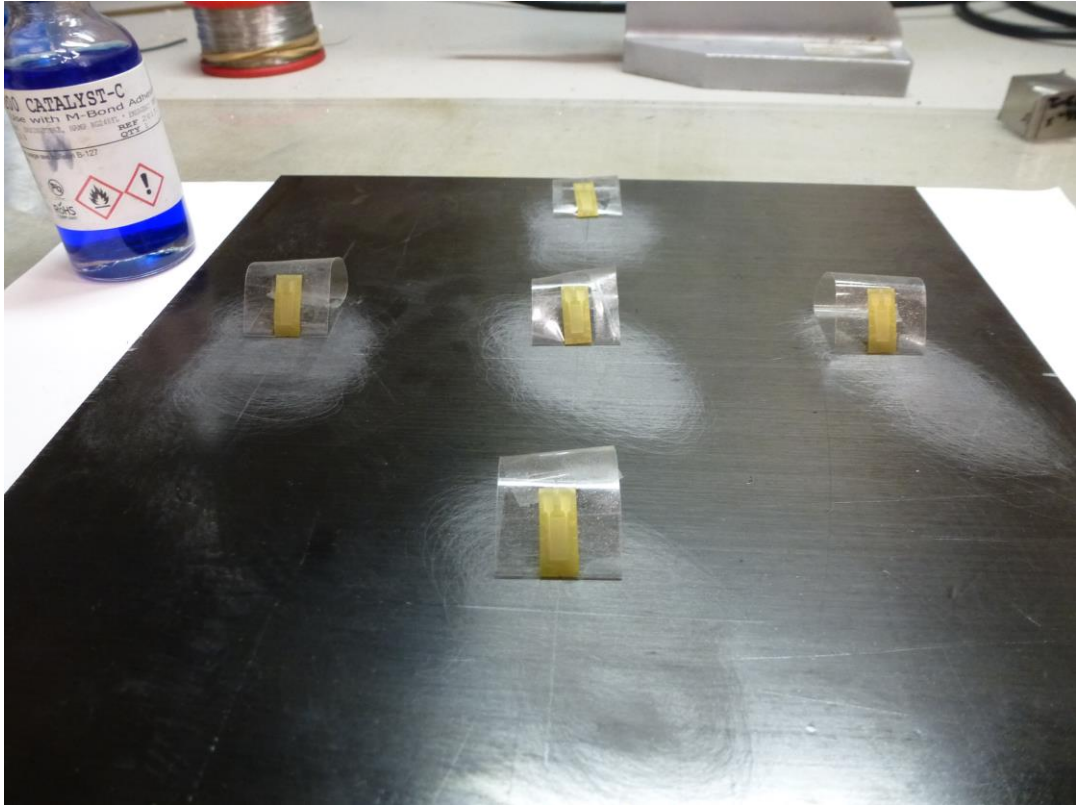


Figura 6.12: Exposición al aire de las galgas para aplicarles el adhesivo.

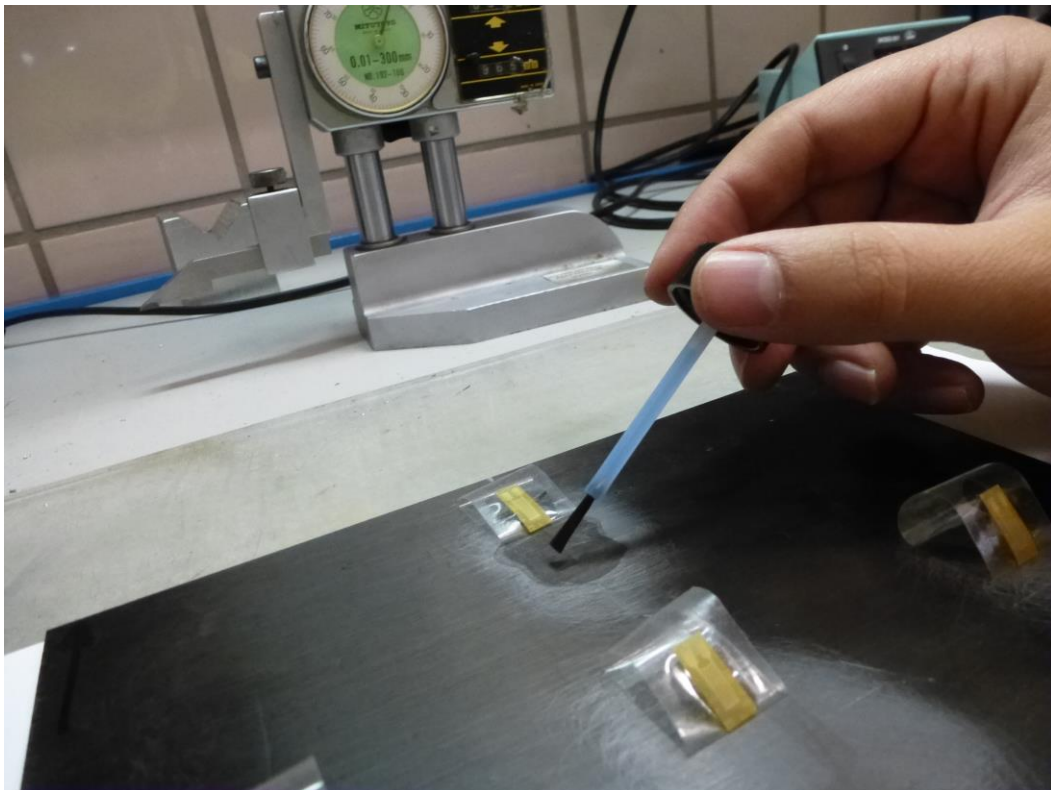


Figura 6.13: Aplicación del catalizador sobre la superficie de la placa.



Figura 6.14: Aplicación del adhesivo sobre la superficie de la galga.

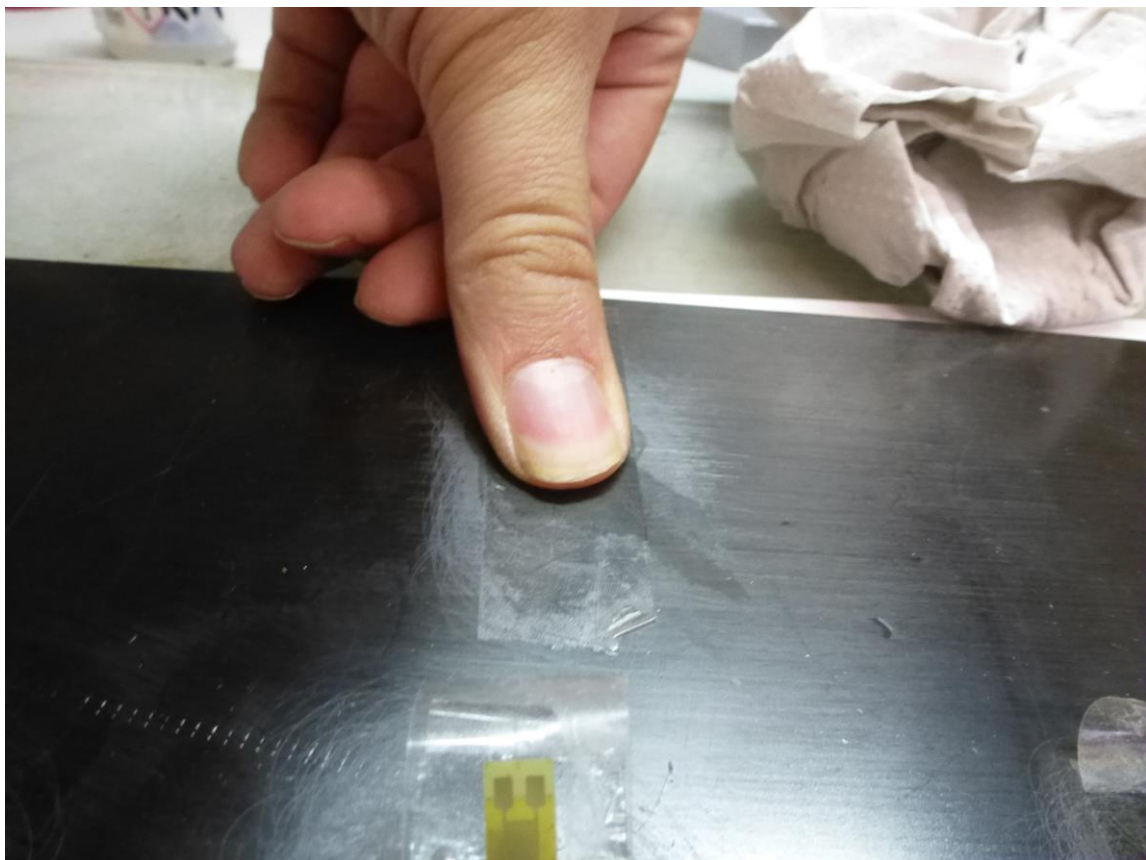


Figura 6.15: Presión realizada sobre la galga.

Mientras se dejaba tiempo para que el adhesivo hiciese efecto se procedió a tratar el cableado que se iba a conectar a las galgas. Para cada galga se necesitaron tres cables, para mayor comodidad se utilizaron cables con el plástico adherido entre sí. Se pelaron los extremos de los cables y en uno de los extremos se eliminó la mitad de los hilos de dos de ellos para a continuación entrelazarlos (figura 6.16).

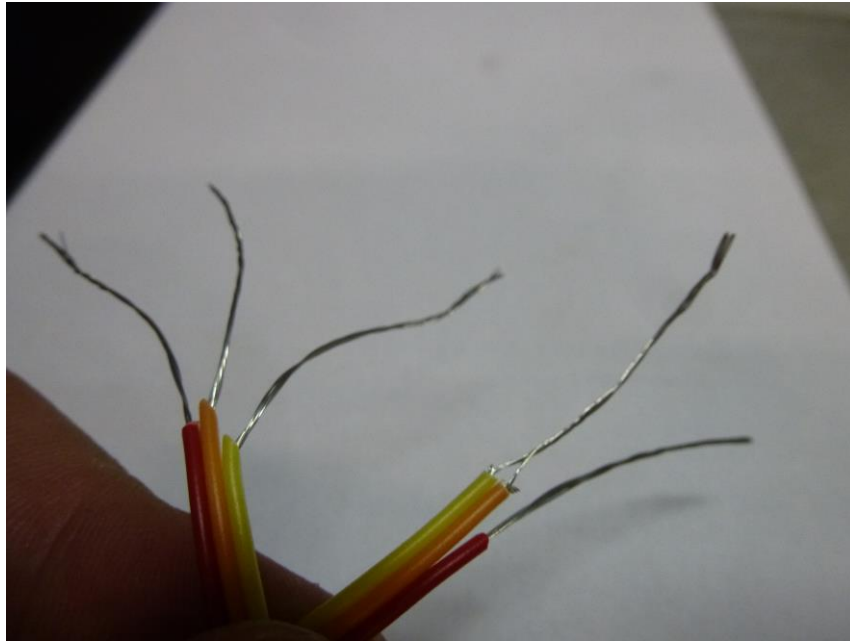


Figura 6.16: Configuración del cableado.

A continuación, se le aplicó una capa de decapante (figura 6.17) y se procedió a depositar estaño sobre la superficie de los cables pelados. Para ello se utilizó un soldador a una temperatura de 300°C y una bobina de filamento de estaño de la que tomamos material para ir depositándolo. Los cables quedaron con la superficie brillante como se aprecia en la figura 6.18.



Figura 6.17: Aplicación del decapante sobre el extremo de los cables.

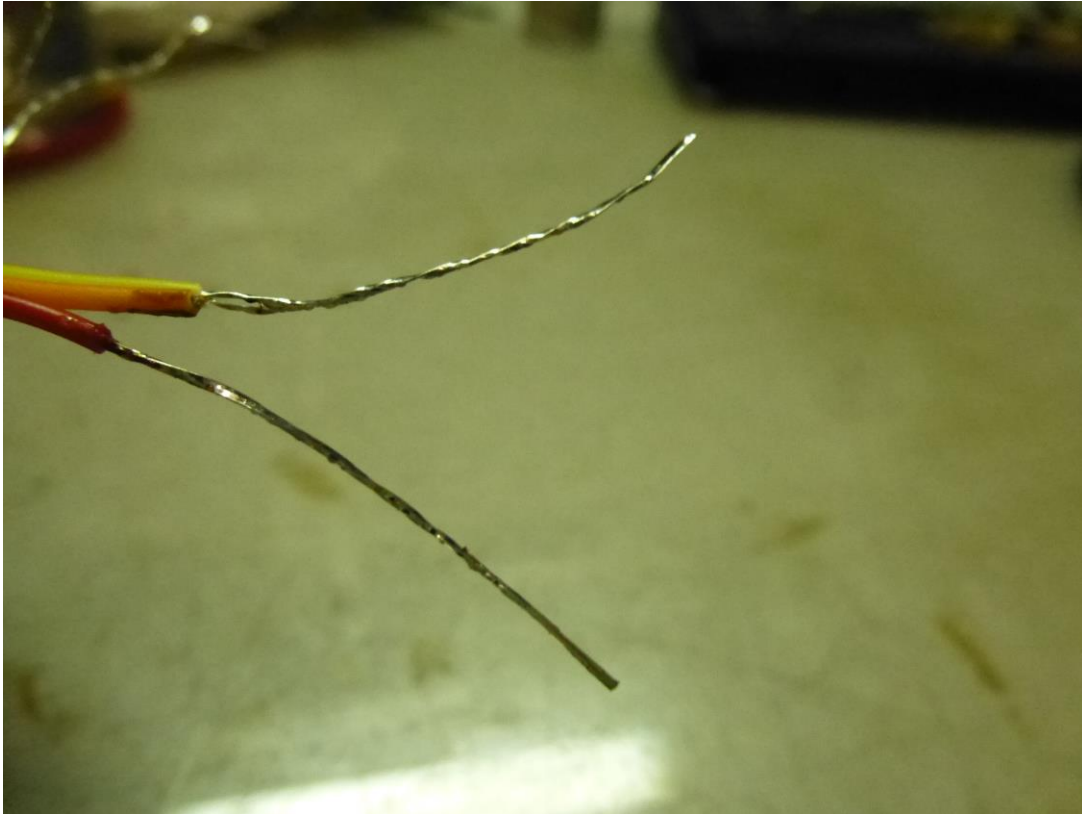


Figura 6.18: Extremo de un cable con el estaño depositado.

Realizado este paso se procedió a levantar con sumo cuidado la cinta adhesiva que reposaba sobre las galgas extensométricas, comprobando que habían quedado bien adheridas a la probeta (figura 6.19). Solo restaba unir el cableado con sus correspondientes terminales de las galgas.



Figura 6.19: Placa tras haber retirado la cinta adhesiva.

La unión de los cables a los terminales de las galgas vino precedida de algunos pasos previos. Se empezó por

raspar los terminales de las galgas con un bolígrafo de fibra de vidrio, como el que aparece en la figura 6.20. A posteriori, se le aplicó decapante a la zona raspada (figura 6.21).

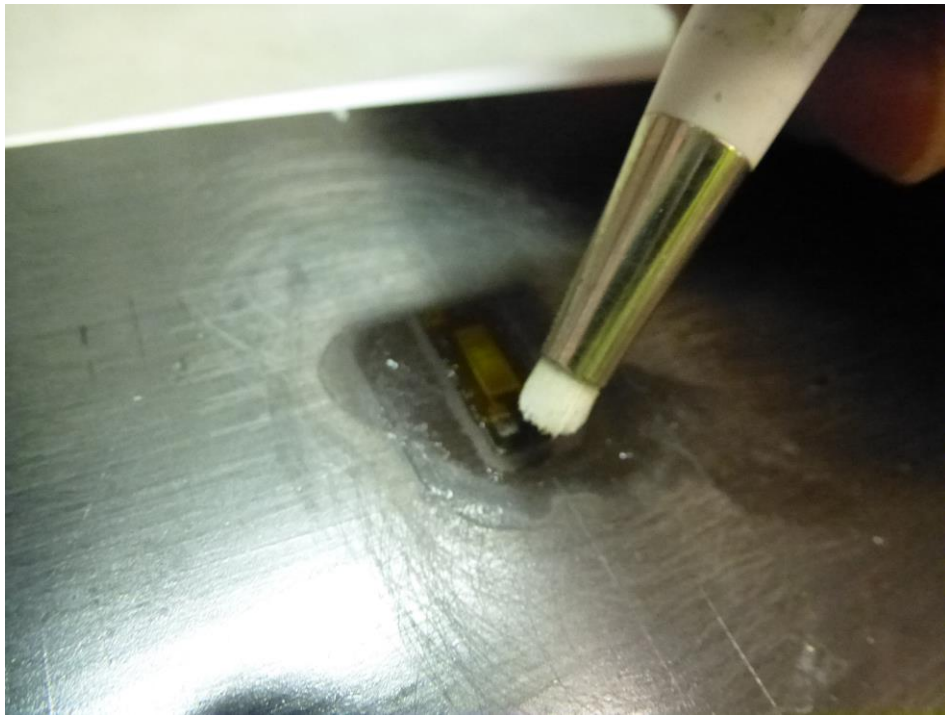


Figura 6.20: Raspado de los terminales con el bolígrafo de fibra de vidrio.

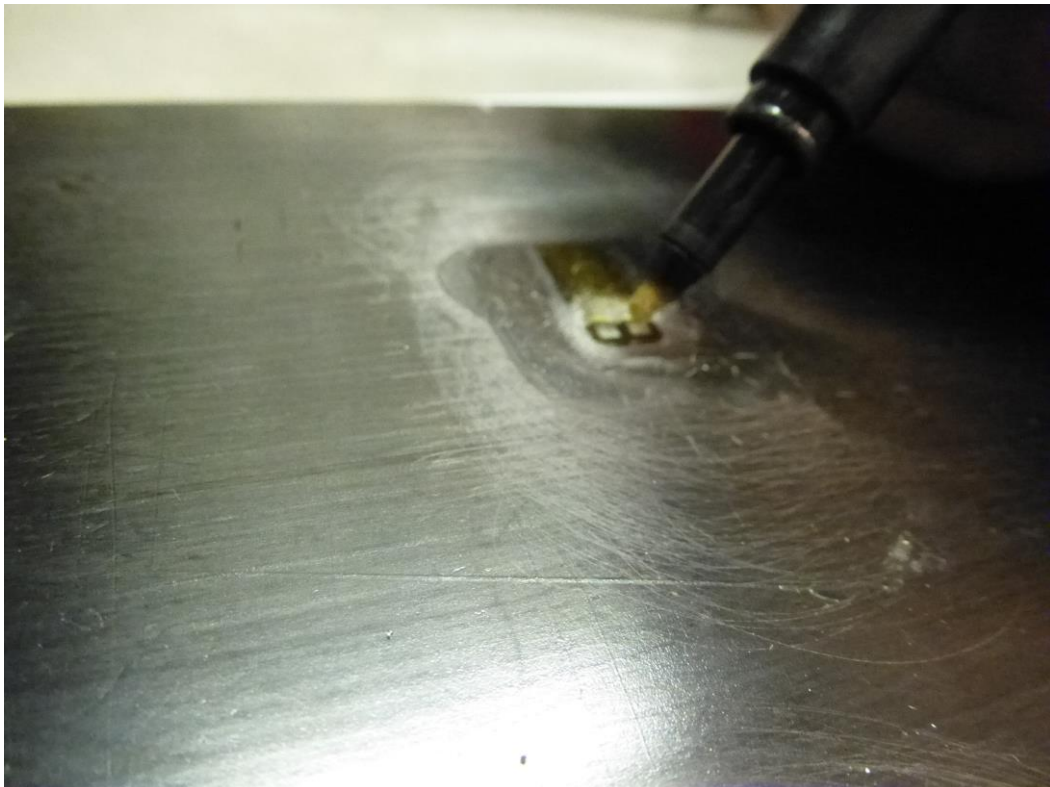


Figura 6.21: Aplicación de decapante a la zona raspada.

El siguiente paso consistió en la deposición de una pequeña cantidad de estaño en cada uno de los terminales. Había que tener mucho cuidado de que el estaño no estuviera en contacto con la superficie de la fibra de carbono por el carácter conductor de esta. Una deposición correcta la podemos ver en la figura 6.22.

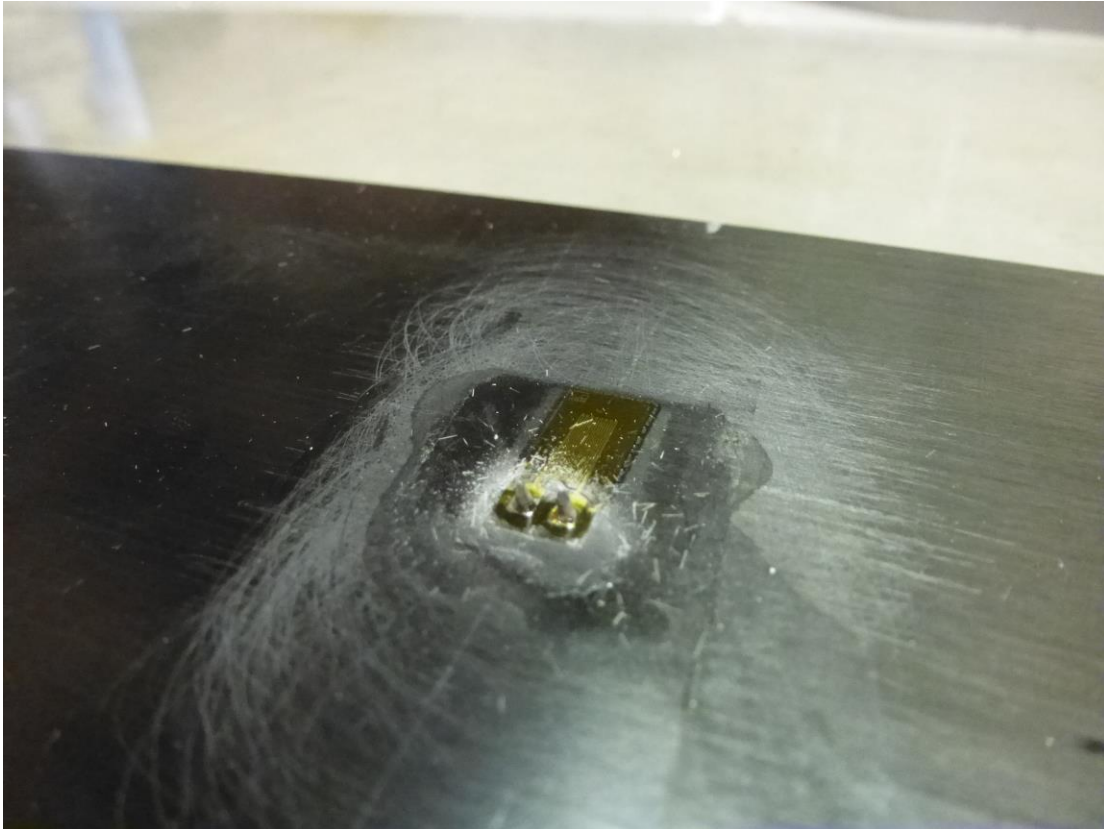


Figura 6.22: Terminales de una galga extensométrica con estaño depositado en su superficie.

Llegaba el momento de unir el cableado a las galgas. Para ello se colocó en la parte inferior de la galga una banda de cinta adhesiva (para evitar cualquier tipo de contacto entre la fibra y la parte pelada de los cables) y se posicionaron los cables en una situación lo más estable posible fijándolos con más cinta adhesiva. Una vez establecidos procedimos a unir el extremo de los cables con las deposiciones de estaño presentes en los terminales de las galgas. El resultado se puede observar en la figura 6.23.

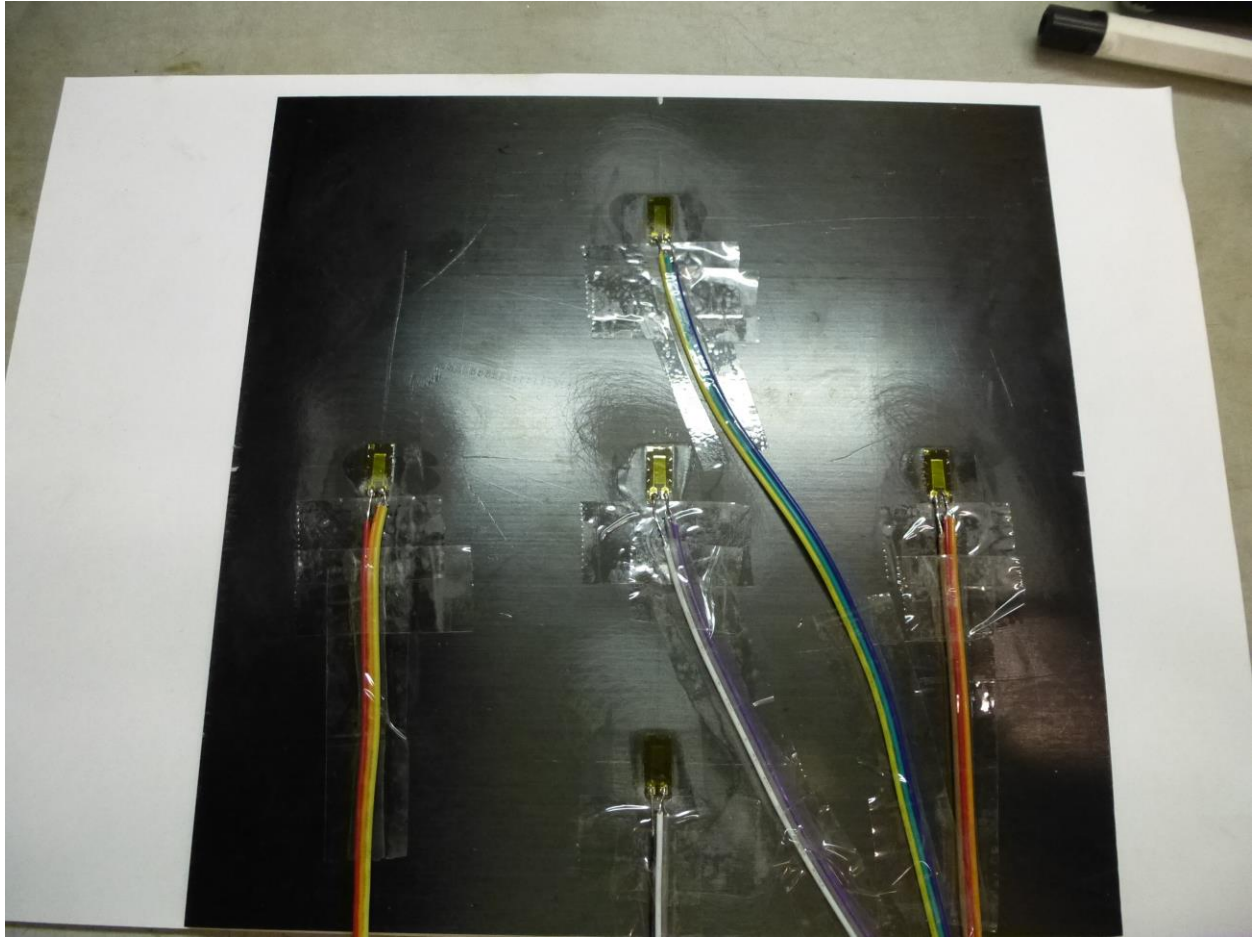


Figura 6.23: Galgas extensométricas completamente instaladas.

Con este último paso se terminó la instalación propiamente dicha, si bien convenía comprobar que el trabajo estaba bien realizado. Para ello se utilizó un polímetro en el que había que colocar en su lectura de Ohmios y en continuidad. Si se había realizado correctamente, al tocar los dos extremos del cable que habíamos unido se debía escuchar un pitido continuo, mientras que al aplicar los terminales a cualquier otra combinación (siempre dentro de los cables de una misma galga) debía mostrar una lectura de 120 Ohmios. Una vez completada la comprobación se podía dar por terminada la preparación de los ensayos y se procedió a su realización.

7 REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Se llevaron a cabo un total de 12 ensayos de compresión, uno por cada probeta fabricada. Estos se realizaron en el *LERM* en la máquina de ensayos INSTRON 4482 y con la ayuda del ingeniero D. Rafael Cabrera Melgar, que manejó el sistema ARAMIS, y de los tutores del proyecto D. Jesús Justo Estebaranz y D. Antonio Blázquez Gámez.

Para la recopilación y comprobación de datos se contó con un total de cuatro sistemas. Un reloj comparador sobre la parte posterior del útil que ayudaba a comprobar que la medida de altura de la máquina INSTRON estaba siendo correcta, la propia medida de la máquina de compresión, el sistema de vídeo ARAMIS y los datos entregados por las galgas extensométricas de cada una de las probetas.

En la figura 7.1 está presente la máquina de compresión que se utilizó y en la figura 7.2 se observan las 12 probetas ya preparadas para su colocación en el útil de ensayo.



Figura 7.1: Máquina de ensayo INSTRON 4482 en el *LERM*.

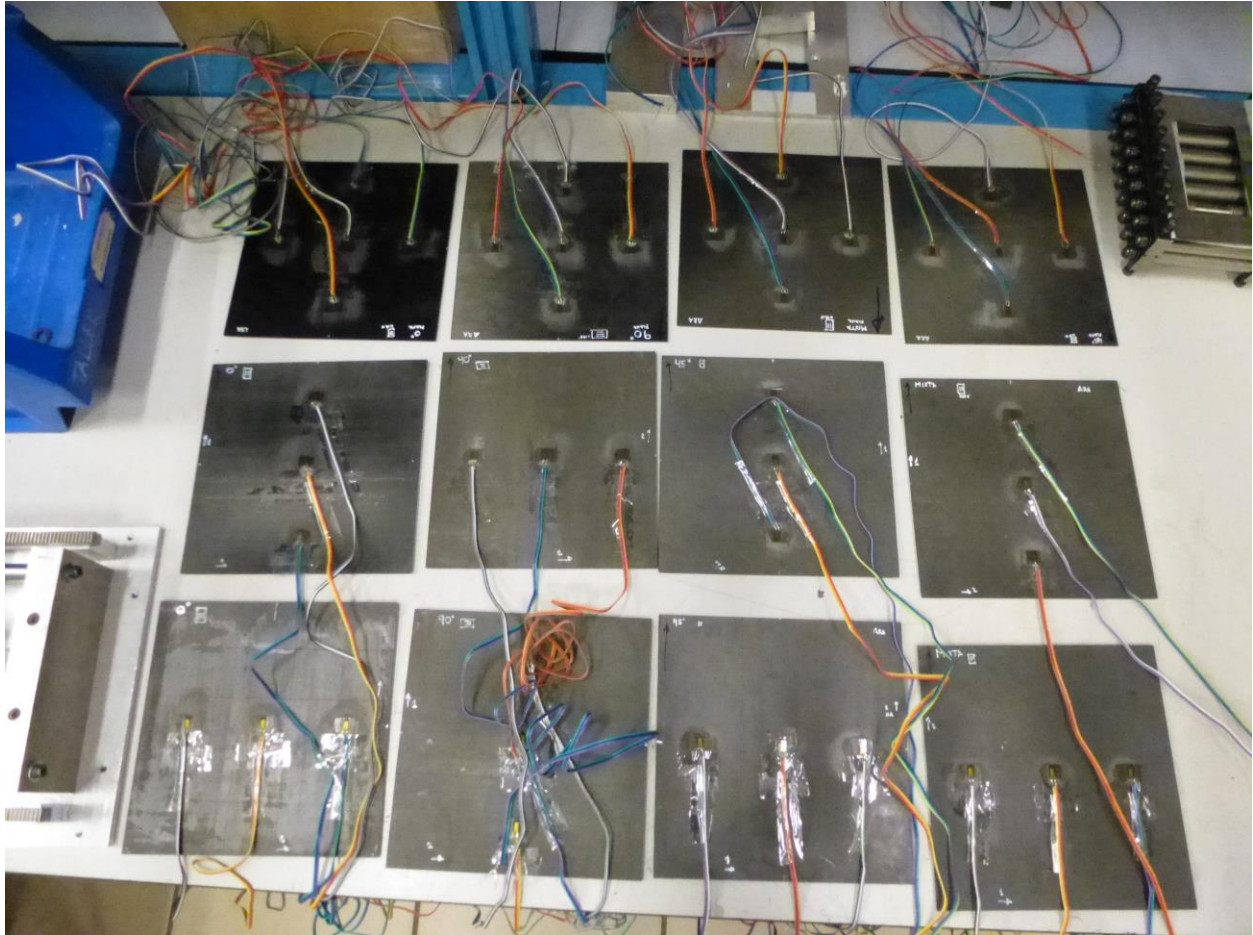


Figura 7.2: Las 12 probetas de fibra de carbono preparadas para ser ensayadas.

Debido a las características de los ensayos no existía mucha referencia de magnitud de la carga última a aplicar, por ello se tomaron referencias del Proyecto Fin de Carrera de D. Antonio A. Roig Ortega. La idea inicial era de parar a una distancia prudencial de la carga que rompió las probetas de ese proyecto, por lo que se utilizó como carga última un porcentaje (en los primeros ensayos se utilizó el 90%, bajándolo en posteriores) de la carga de rotura que se dio en las configuraciones análogas de ese proyecto. Como se verá más adelante, esto no tuvo el resultado esperado pues como ya se ha comentado el útil sin modificar del proyecto mencionado se llevaba parte de la carga aplicada, haciendo que la probeta estuviera menos cargada de lo que marcaban los ensayos, por lo que la referencia tomada no fue del todo correcta y en la mayoría de los ensayos las probetas rompieron a una carga inferior a la prevista.

Se varió la carga entre cuatro puntos a los que se llegaba cargando y descargando las probetas, si bien se podrían tomar como 5 puntos pues dos veces descargamos al mismo nivel de carga. Para dichos puntos se tomaron en cuenta los datos de un análisis en elementos finitos realizado por el tutor D. Antonio Blázquez Gálvez sobre los ensayos en postpandeo, además de los datos de carga última ya mencionados. En los ensayos de elementos finitos se aprecia la aparición del primer modo de pandeo en una primera carga crítica teórica. Se tiene la intención de ver cómo se comportan las placas en dicho modo 1 de pandeo por lo que se toma dicha primera carga crítica como carga de referencia.

Así, los cuatro puntos de variación de carga en cada ensayo fueron:

- P1: 20÷30% de la carga de referencia.
- P2: 5÷10% de la carga de referencia.
- P3: 1.5 veces la carga de referencia.
- P4: 80% en los dos primeros ensayos y 60% en los restantes de la carga última.

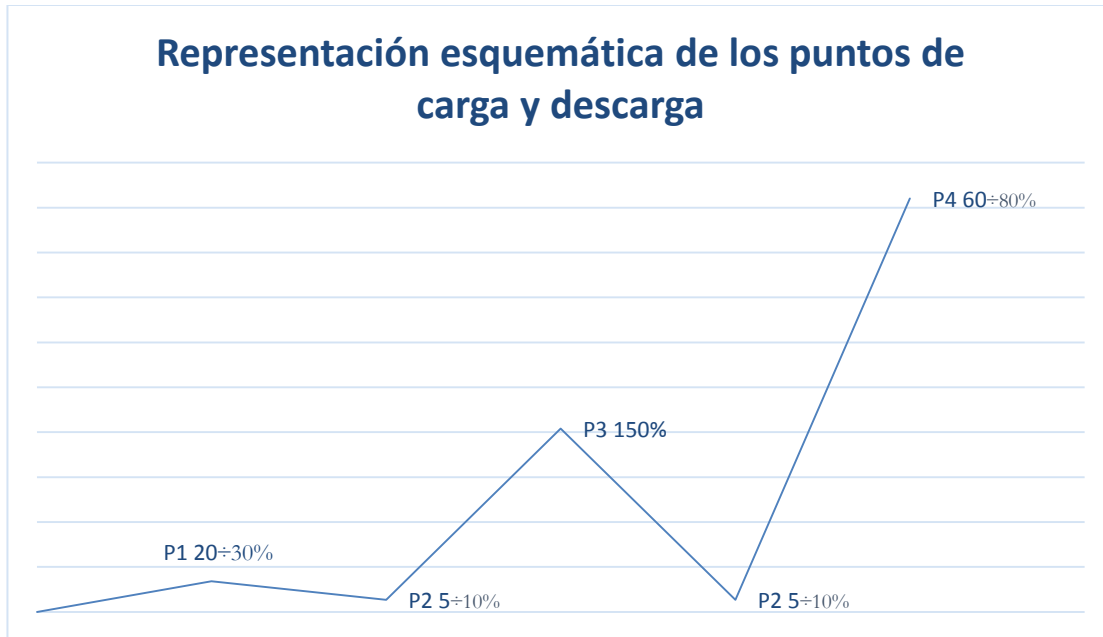


Figura 7.3: Representación esquemática de los puntos de carga y descarga utilizados durante los ensayos.

La secuencia de trabajo en los ensayos fue cargar hasta P1, comenzar una descarga hasta el punto P2, volver a aplicar compresión hasta llegar al nivel de carga P3 para a continuación volver a descargar de nuevo hasta P2 y acabar realizando una carga que acabe en P4 o hasta que la probeta falle, lo que ocurriese primero. Estos cuatro puntos se traducen en los datos expresados en la tabla 7.1.

Carga (N)	P1	P2	P3	P4
Laminado 1	680	270	4078	19200
Laminado 2				18400
Laminado 3				19200
Laminado 4	300	149	2239	9600
Laminado 5				9600
Laminado 6				7200
Laminado 7	597	298	4475	16800
Laminado 8				16800
Laminado 9				15600
Laminado 10	490	209	3158	11700
Laminado 11				11700
Laminado 12				10800

Tabla 7.1: Valores aproximados de la carga en Newton adoptados en los ensayos.

Obtenidos los valores de carga se procedió a comenzar los ensayos. Tras la preparación del ARAMIS se colocó una probeta en el útil de ensayo. Se necesitó de un sargento para aplicar una presión sobre la guía superior del útil que evitaba los desplazamientos del útil fuera del plano, ya que el sistema utilizado anteriormente consistía en un tope desplazado por un tornillo dentro de la propia guía y al apretarlo para evitar su desplazamiento se bloqueaba la probeta evitando así su libertad de movimientos previa a la aplicación de la carga. En la figura 7.3 se encuentra la probeta en el útil antes de ser montada en la máquina de ensayo y se puede apreciar la presencia del sargento sobre la guía.



Figura 7.4: Colocación de la probeta dentro del útil de ensayo (vista trasera).

Para la conexión de las galgas en la máquina de ensayo era necesaria la inserción de los cables en unas tomas específicas para ello. Con ayuda de un destornillador se procedió a introducir los cables de la probeta a ensayar en estas, como se aprecia en la figura 7.4.

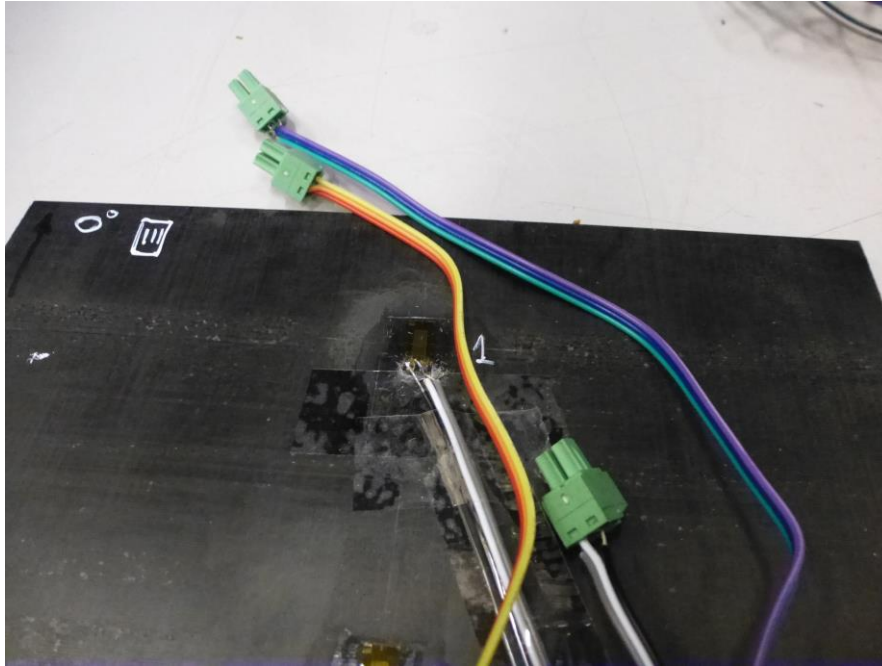


Figura 7.5: Tomas para la conexión del cableado a la máquina de ensayo.

Debido a que la máquina de ensayo INSTRON 2024 tiene cuatro entradas para tomas de galgas extensométricas durante la realización de los ensayos de las placas planas se utilizó otro equipo de forma auxiliar para poder tomar los datos de las cinco galgas instaladas.

Se situó el útil de ensayo con la probeta insertada en la máquina de ensayo, la cual se encendió o reseteó para poner los datos a cero. Tras colocarlo, se inició el movimiento hasta que se empezó a aplicar un mínimo de carga y se comprobó que el contacto era satisfactorio, no quedando oquedades en el contacto útil-máquina de ensayo. Se puede observar una probeta en la posición de comienzo de ensayo en la figura 7.6 y en la 7.7 un ensayo en funcionamiento. Además, se colocó el reloj comparador en la parte posterior (para que no interfiera con las medidas del sistema ARAMIS) y se fue comprobando las medidas de este cada vez que llegamos a un punto de carga reseñable (puntos P1, P2, P3 y P4). Dicho reloj se aprecia en la figura 7.7.



Figura 7.6: Útil con probeta situado en la posición inicial de los ensayos.

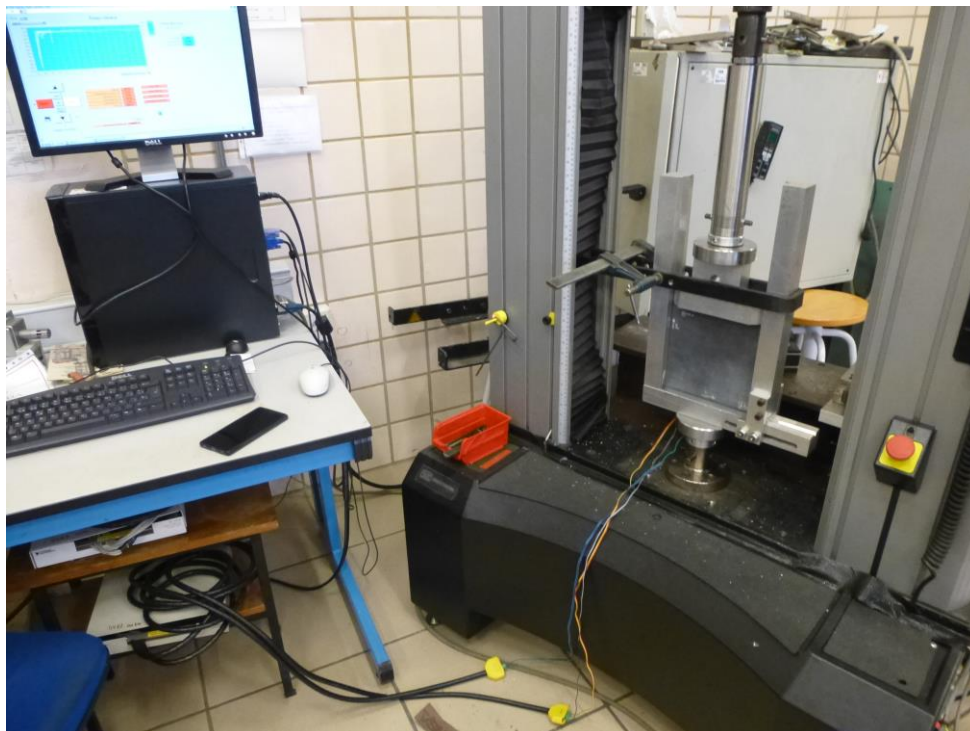


Figura 7.7: Realización de un ensayo. Se puede apreciar la conexión de las galgas y la toma de datos.



Figura 7.8: Reloj comparador instalado en la parte posterior.

Los ensayos se realizaron sin mayores complicaciones de forma secuencial. Se produjo la rotura en la mitad de las probetas y la toma de datos tanto por parte del ARAMIS como por las galgas extensométricas fue satisfactoria, como se analizará en el apartado de resultados.

8 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Tras la realización de los ensayos de compresión y la toma de datos resultante de ellos se procede a realizar un análisis exhaustivo de los datos obtenidos, con el fin de extraer las conclusiones pertinentes.

Se muestran a continuación las fotos finales de las probetas tras los ensayos e inmediatamente después comienza el análisis exhaustivo de los datos. Resaltar primero que los datos del reloj comparador no serán necesarios, puesto que se tomaron como medida de comprobación ante el posible fallo que podría haber dado la máquina de ensayo al ir tomando medidas de altura, pero se pudo comprobar durante los ensayos y con los datos a posteriori que las mediciones de la máquina de ensayo eran de acuerdo a las mostradas por el reloj comparador, por lo que se tomaran las ofrecidas por la máquina.

Para el estudio de los datos procedentes de la máquina de ensayo, las galgas extensométricas y el sistema ARAMIS se realiza un análisis conjunto, puesto que ofrece un grado mucho mayor de información que realizándolo por separado. A su vez, se analiza cada una de las 4 distintas configuraciones de laminados por separado con el fin de poder comparar la incidencia de las ondas en el resultado obtenido.

En las placas planas se tiene un tratamiento distinto al de resto de las placas debido a la utilización de dos equipos distintos en la medición, ya que la máquina de ensayo no tenía 5 puertos de entrada para galgas extensométricas. Como se vio al analizar los datos, la medida de deformación tomada en las dos galgas conectadas al segundo equipo era tomada con un lapso de tiempo mucho menor, por lo que nos entregó un número mucho mayor de datos de deformaciones que en las galgas originales, pero sin medida de carga asociada. Para poder trabajar con estos datos se le aplicaron distintos tratamientos con Excel que han permitido hacer una media cada cierto número de valores de estos datos pudiéndolos así asociar a sus niveles de carga medidos por la máquina de ensayo.

8.1.1 Placas de fibra a 0°

El laminado plano con todas las láminas a 0° no sufrió imperfecciones visibles durante lo que duró el ensayo, quedando en un estado inalterado a simple vista como se observa en la figura 8.1.

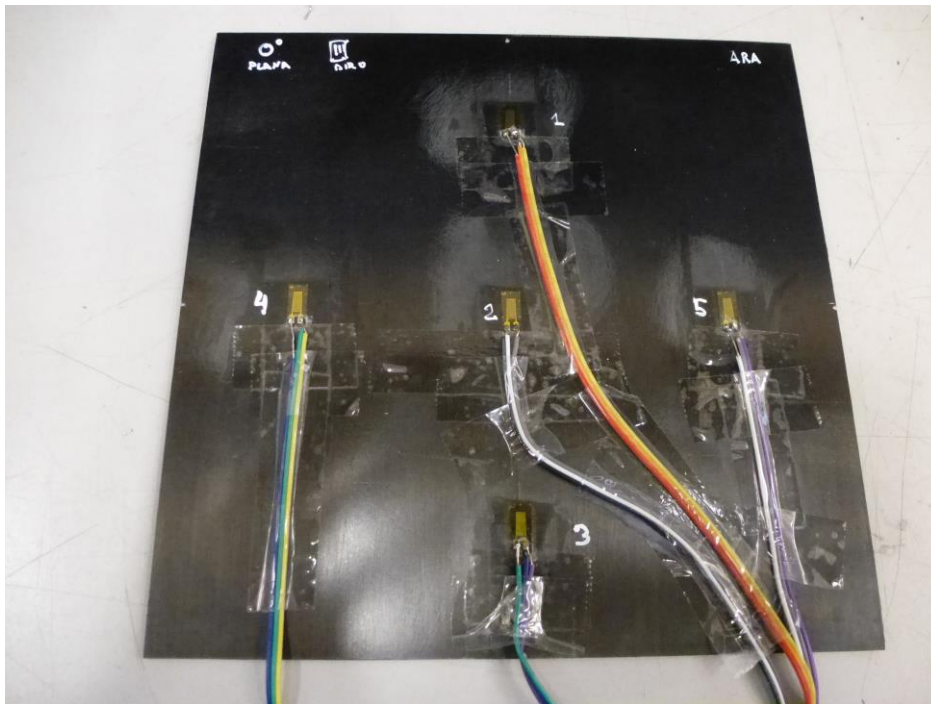


Figura 8.1: Laminado 1 tras el ensayo.

El segundo laminado (fibra a 0° con 3 ondas en la dirección de la carga) fue el primero en ser ensayado (por razones logísticas se dejaron los laminados planos al final en el orden de ensayo) y sufrió una rotura crítica en torno a 17800 Newton que se aprecia en la figura 8.2. Hay que tener en cuenta que en este ensayo el punto de carga P4 usado es al 80% de la carga última que tomamos como referencia y no al 60% como ensayos posteriores, ya que de haber tomado 60% habría resistido sin llegar a perder toda su carga portante.

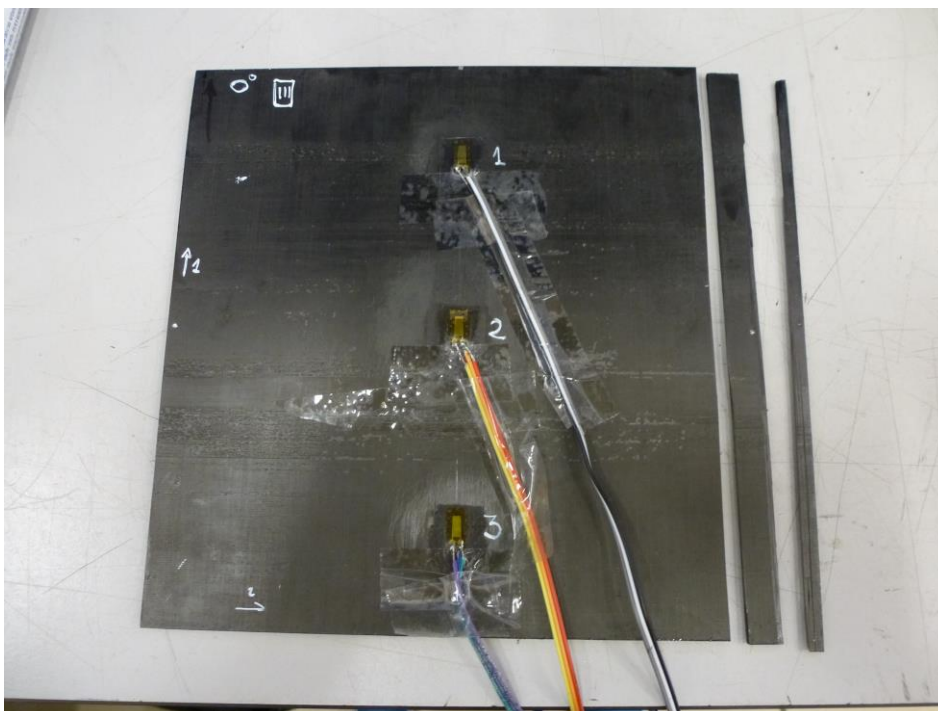


Figura 8.2: Rotura crítica del laminado 2.

Al igual que en el caso anterior, el P4 utilizado ha sido del 80% y se ha producido también una rotura crítica. Esta vez la carga soportada ha llegado hasta unos 17000 Newton. A raíz de los resultados de los laminados 2 y 3 y por considerar que los laminados a 0° van a ser los que tengan un mejor comportamiento a priori, se decide disminuir el límite de P4 hasta el 60% para los siguientes ensayos.

En la figura 8.3 se observa la rotura del laminado 3 correspondiente a la placa de 0° con tres ondas en dirección perpendicular a la carga.

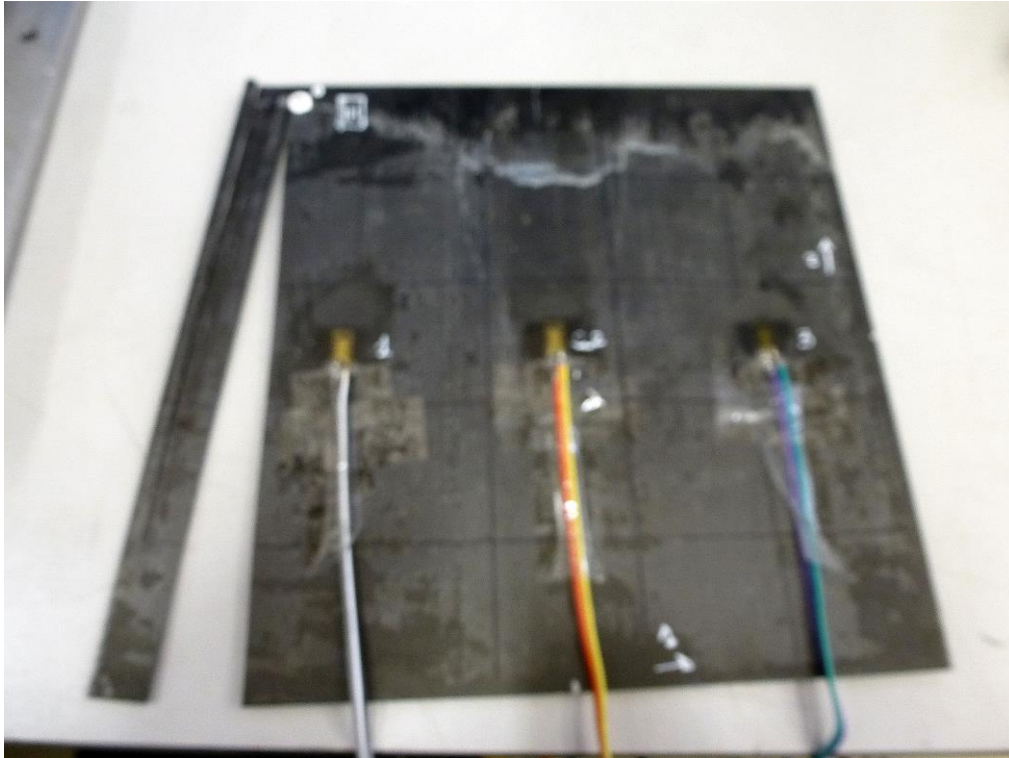


Figura 8.3: Rotura del laminado 3.

A continuación, se muestran los resultados de los datos obtenidos para estos 3 laminados. Así, lo primero es mostrar la gráfica obtenida de Carga (en Newton) frente a desplazamientos (en milímetros). Se debe tener en cuenta que para que la muestra de datos sea más intuitiva y fácil de analizar se ha trabajado para todas las gráficas con los valores absolutos tanto de carga como de desplazamiento, ya que al ser un ensayo de compresión los valores obtenidos eran negativos. Por tanto, en las figuras 8.4, 8.5 y 8.6 se exhiben dichas gráficas para los laminados 1 (placa plana), 2 (placa con tres ondas en el eje vertical) y 3 (placa con 3 ondas en el eje horizontal). Además, en las gráficas de carga frente a desplazamiento se muestra con una línea constante roja la carga crítica teórica asociada al primer modo de pandeo.

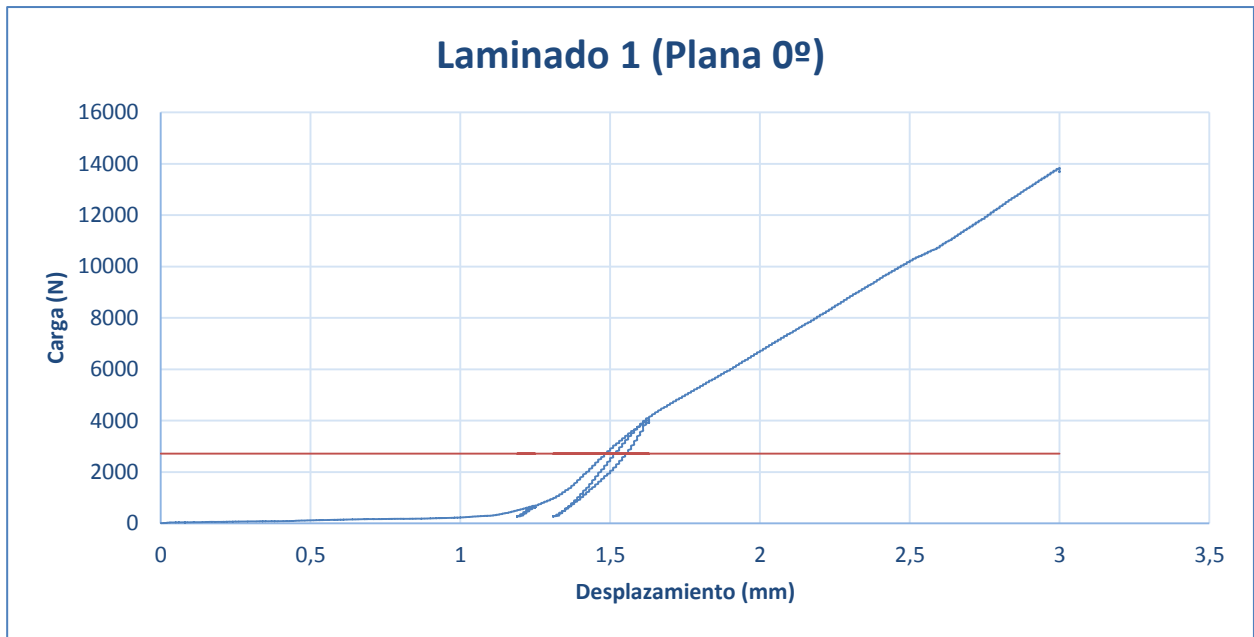


Figura 8.4: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa plana de 0°.

Se observa en la gráfica que al inicio del ensayo su rigidez ha sido baja, puesto que la pendiente del primer tramo es muy pequeña. Esto podría ser debido a los ajustes mientras la probeta se va recolocando en su posición final. Una vez se ha estabilizado se puede ver el cambio a una rigidez mayor que se mantiene hasta pasada la carga crítica teórica del modo 1 de pandeo. Poca carga después de atravesar dicha barrera teórica se muestra otro claro cambio de pendiente por lo que todo indica que ha entrado en el primer modo de pandeo. No se aprecia rotura crítica al final puesto que aguantó sin tenerla.

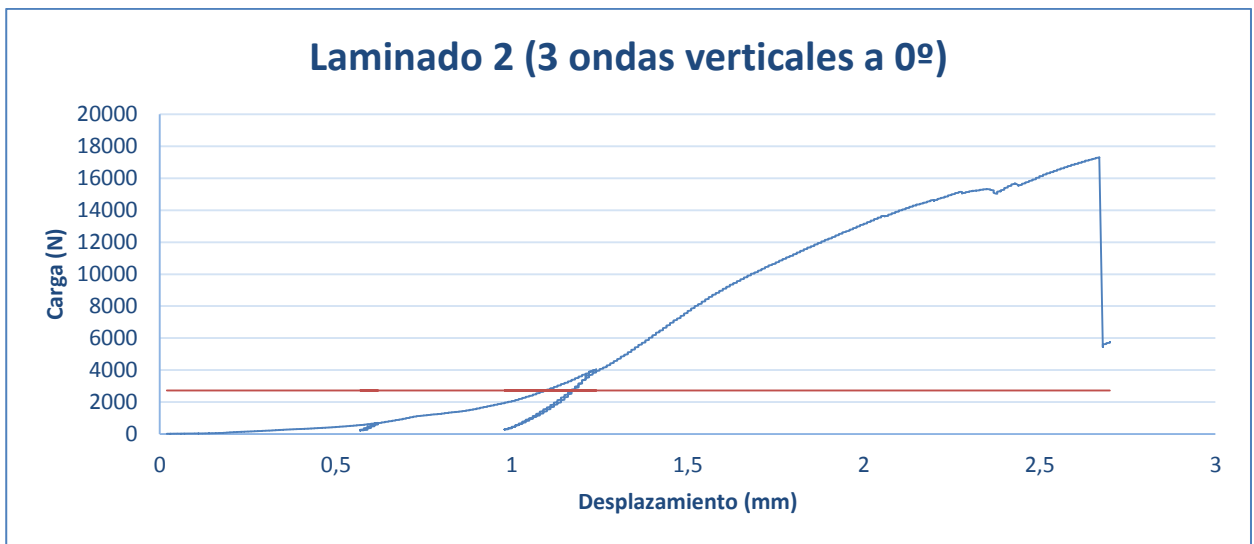


Figura 8.5: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas verticales de 0°.

Al igual que en la gráfica anterior se observa una primera zona de ajuste con una rigidez baja, si bien es más alta que en el caso anterior y hay que esperar hasta cerca de que lleve un milímetro desplazado para ver un cambio de pendiente relevante. Tras pasar la carga crítica teórica del primer modo de pandeo continúa con la misma tónica hasta el entorno de 1,5 milímetros y 9000 Newton donde sufre otro cambio de pendiente muy suave. Sigue con una pendiente constante hasta unos 15000 N donde se puede ver claramente el primer fallo de la placa en el que pierde parte de la resistencia. Tras eso consigue aguantar más carga aplicada hasta que finalmente en torno a 17200 N falla de forma crítica.

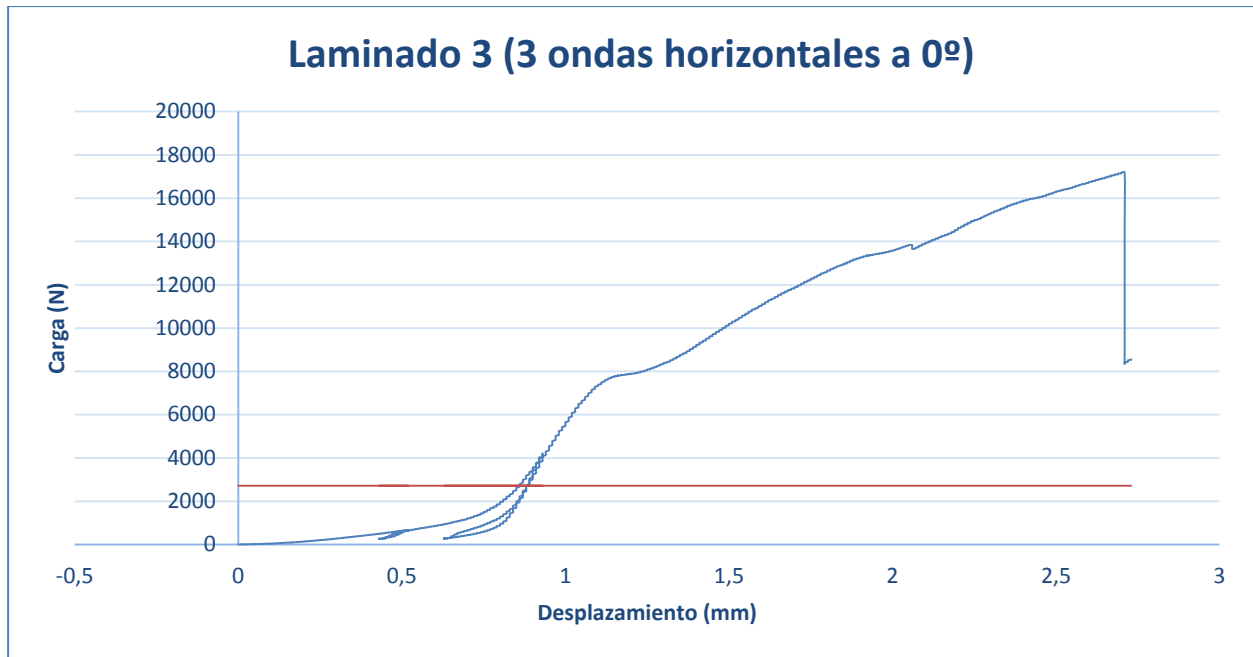


Figura 8.6: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas horizontales a 0°.

En esta tercera gráfica se observa un periodo de ajuste con una pendiente muy parecida al de la gráfica anterior. El primer cambio de pendiente se observa cuando lleva desplazados 0.75 mm y dura hasta un nivel de carga muy superior al nivel crítico de la carga del primer modo de pandeo (del orden del triple). Una vez en dicho nivel se produce un punto de inflexión hacia otra pendiente menos acusada que dura hasta el final del ensayo. Debido a ser un cambio muy brusco puede venir asociado a un cambio en el modo de pandeo de la placa. Cuando alcanza un nivel de carga de 13800 N se observa un pico en lo que parece ser el primer fallo de la placa. En el entorno de los 17000 N sufre la rotura y por tanto pérdida de carga portante total.

El siguiente conjunto de datos a analizar proviene de las medidas de las galgas extensométricas. Para ello se mostrarán en las figuras 8.7, 8.8 y 8.9 las gráficas obtenidas en los tres ensayos a 0° respectivamente. Estas gráficas muestran los valores de la carga en Newton frente a los valores medidos en las galgas en microdeformaciones.

La nomenclatura de las galgas utilizado en todo el proyecto es el siguiente: En las placas de 5 galgas (placas planas) la galga 1 es la superior, la 2 la central, la 3 la inferior, la 4 la de la izquierda y la 5 la de la derecha. En las de 3 galgas verticales la 1 es la superior, 2 la central y 3 la inferior y en las placas con 3 galgas horizontales la 1 la de la izquierda, 2 la central y 3 la de la derecha.

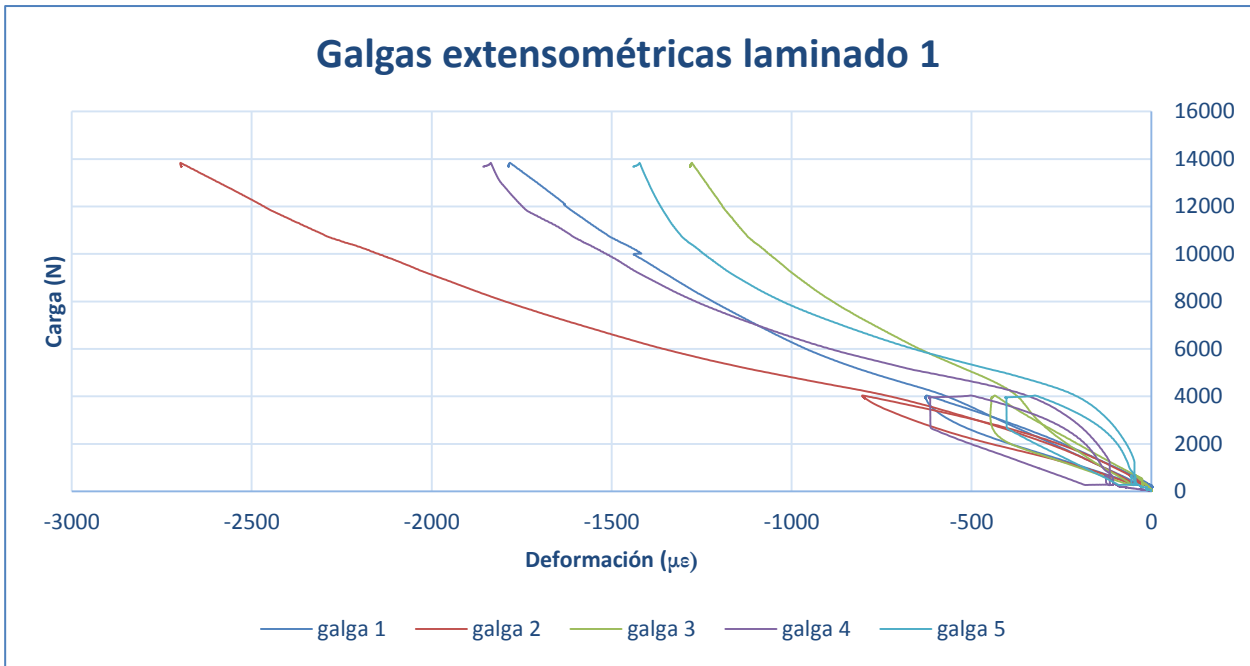


Figura 8.7: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa plana de 0°.

Se observa una primera zona con una recirculación un poco confusa debido a las cargas y descargas realizadas a esos niveles de carga, situación que tendremos en todas las gráficas. Una vez se estabilizan van todas aumentando las deformaciones de compresión a medida que aumenta la carga como era de esperar si bien parece que progresivamente a su vez va aumentando la pendiente de todas y cada una de ellas, aunque no en igual medida. La galga central que es la número 2 es la que muestra un nivel más alto de deformaciones a lo largo de todo el ensayo mientras que es la galga inferior (número 3) la que lleva un nivel de deformaciones más pequeño. Se puede observar un pico en la galga 1 en torno a los 10000 Newton.

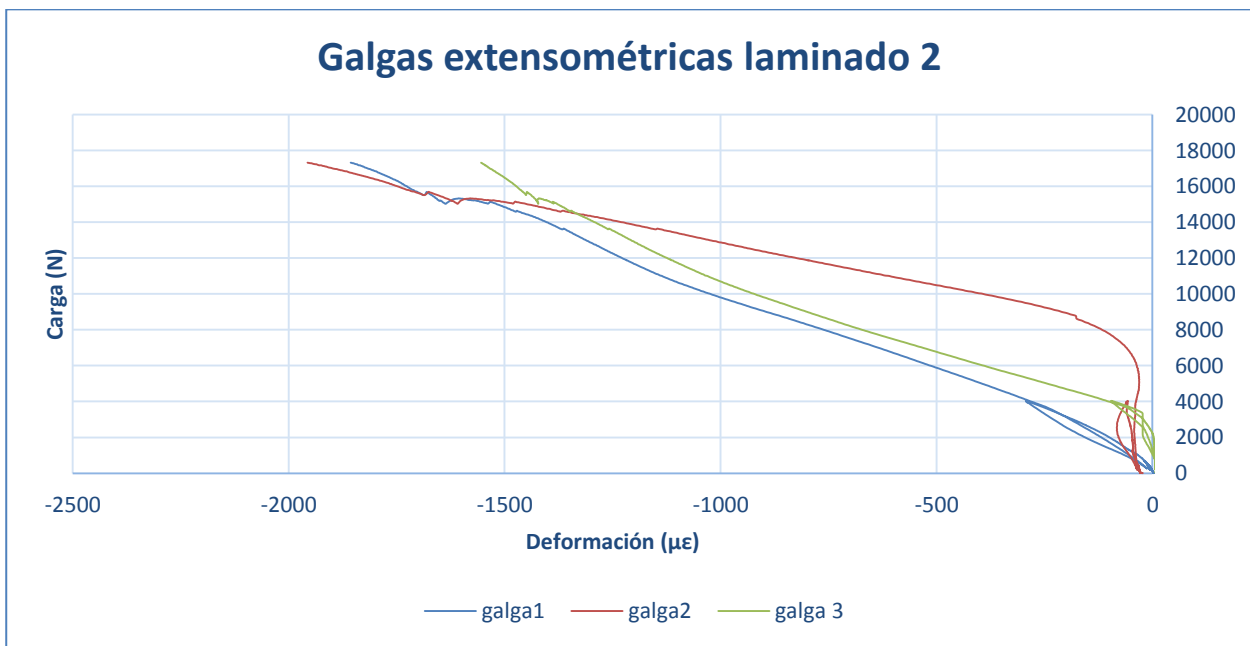


Figura 8.8: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas verticales de 0°.

Para un análisis más sencillo a simple vista se ha recortado de la gráfica el tramo después de la rotura final pues no aportaba mucha información y descuadraba el resto de la gráfica. Esto se hará también en el resto de gráficas de galgas extensométricas restantes.

Al igual que en el caso anterior se observa un primer tramo enmarañado debido a las subidas y bajadas de

carga. Una vez se ha estabilizado se puede observar una evolución a pendiente más o menos constante de las galgas 1 y 3 (superior e inferior) mientras que la galga central en los primeros instantes del ensayo muestra un nivel de deformaciones muy bajo con una pendiente casi vertical hasta que llega a los 6000 N donde se produce un importante punto de inflexión que le cambia la pendiente convirtiéndola en la más acusada de las tres. Tanto es así, que a niveles de carga muy altos (sobre el final del ensayo) es la que mayores deformaciones presenta. Este cambio de pendiente tan acusado sea probablemente debido a un cambio en el modo de pandeo, si bien llama la atención que no afecte a las otras dos galgas. Cerca del final también se observan los picos en las tres medidas debidos a los primeros fallos de la placa, antes de que colapse totalmente.

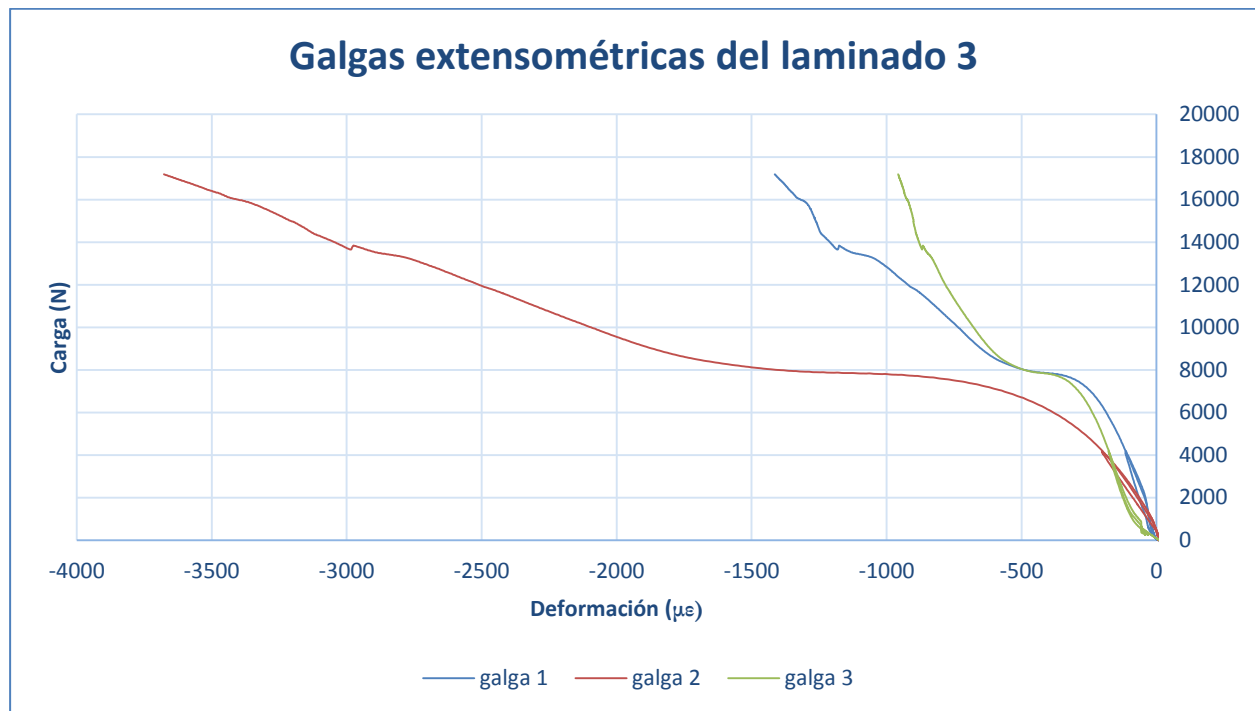


Figura 8.9: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas horizontales de 0°.

Tras una primera zona parecida a la de las gráficas anteriores observamos un inicio de las tres galgas con una pendiente bastante vertical. Se produce un punto de inflexión que puede ser asociado también a un cambio de modo de pandeo en torno 7000-8000 N si bien al contrario que en el caso anterior este sí se produce en las tres galgas de estudio. Tras este cambio de pendiente es la galga central la que se lleva la mayor cantidad de deformaciones con mucha diferencia de las otras dos. Además, se observa alrededor de los 13800 N el primer fallo de la placa visible en las tres galgas.

Por último, dentro de este subapartado, se muestran imágenes proporcionadas por el sistema ARAMIS en ciertos puntos de interés. Se tomará un punto previo a la carga crítica de pandeo, otro del orden de 30% superior a la carga crítica de pandeo (antes de iniciar la tercera descarga) y un último a un nivel de carga alto siempre lo suficientemente alejado de la carga última del ensayo. No hay que tener en cuenta el número del laminado marcado en la imagen del ARAMIS pues está en el orden que se realizaron los ensayos no en el orden de los laminados utilizado durante el proyecto.

Las imágenes asociadas a la placa plana de 0° son las figuras 8.10, 8.11 y 8.12.

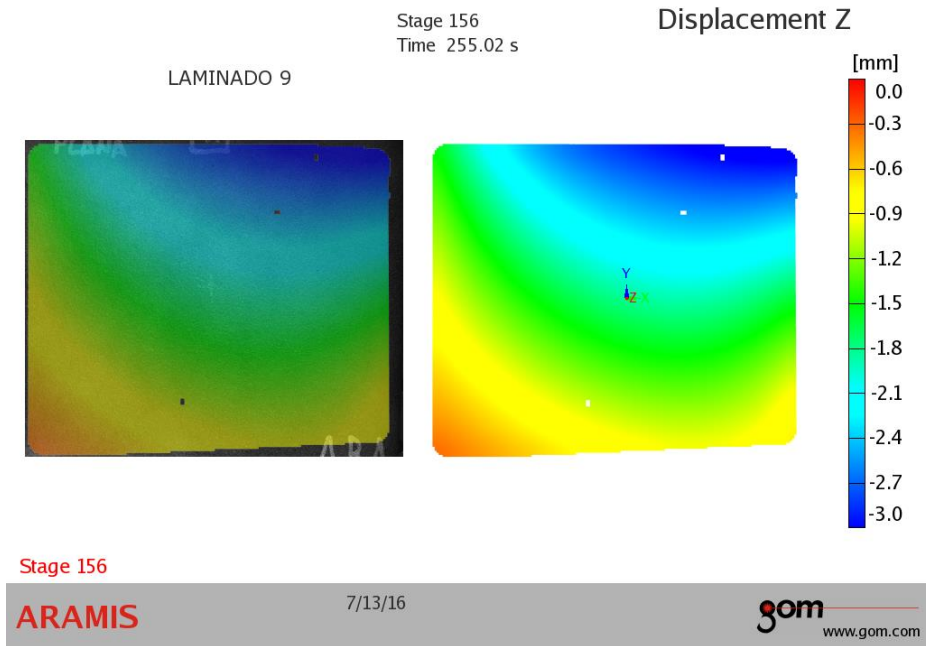


Figura 8.10: Desplazamiento en Z del laminado 1 a 2000 N de carga.

Se observa un panel con poco desplazamiento aun (3 milímetros de máximo), si bien se aprecia con claridad que es la zona superior derecha del panel la que sufre el mayor desplazamiento, estando la zona inferior en una posición parecida a la inicial.

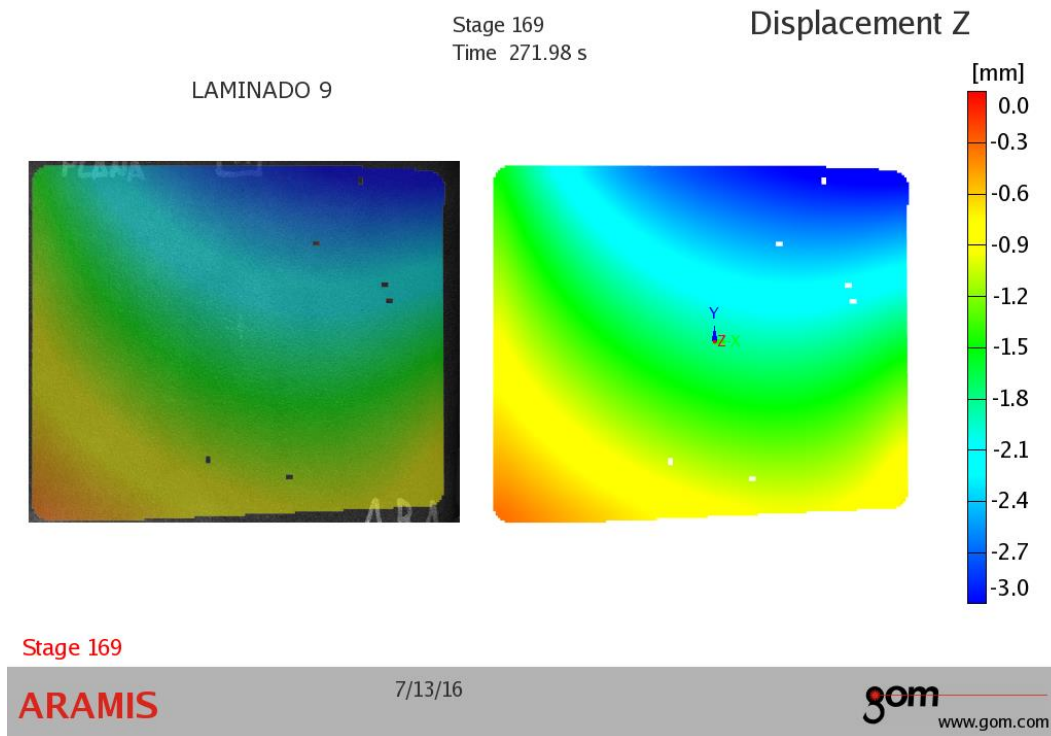


Figura 8.11: Desplazamiento en Z del laminado 1 a 3500 N de carga.

Al igual que en el caso anterior es la zona superior derecha la que mantiene un mayor desplazamiento. A pesar de haber rebasado la carga crítica teórica del cambio de primer modo de pandeo no se aprecian cambios importantes aún.

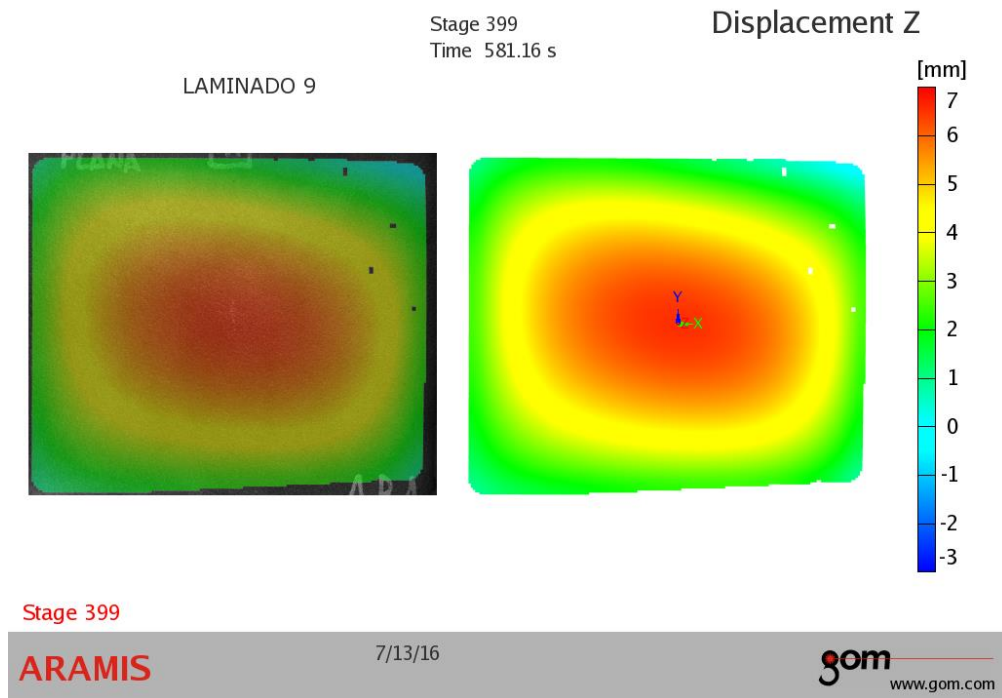


Figura 8.12: Desplazamiento en Z del laminado 1 a 13500 N de carga.

Al llegar a valores de carga superiores se aprecia claramente la aparición del modo 1 de pandeo. Este es el aspecto que tiene en el resto de imágenes de este ensayo acusando más a medida que se aumenta la carga, pero no se aprecia un claro cambio del modo de pandeo. La planta de la zona desplazada no es perfectamente circular debido a que se ve afectada por la dirección del laminado.

El laminado 2 nos deja las imágenes de las figuras 8.13, 8.14 y 8.15.

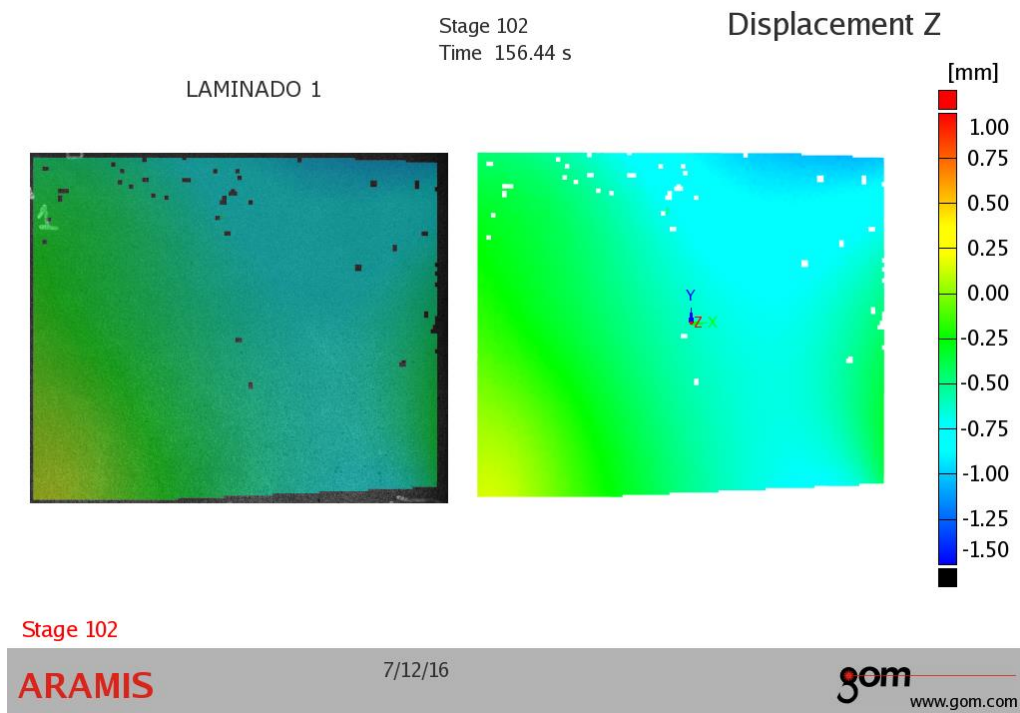


Figura 8.13: Desplazamiento en Z del laminado 2 a 2000 N de carga.

Se aprecia un desplazamiento todavía menor que en el caso anterior si bien ahora tenemos tanto desplazamiento negativo (en el centro de la placa y en la esquina superior derecha) como positivo (lados de la placa, especialmente en el izquierdo).

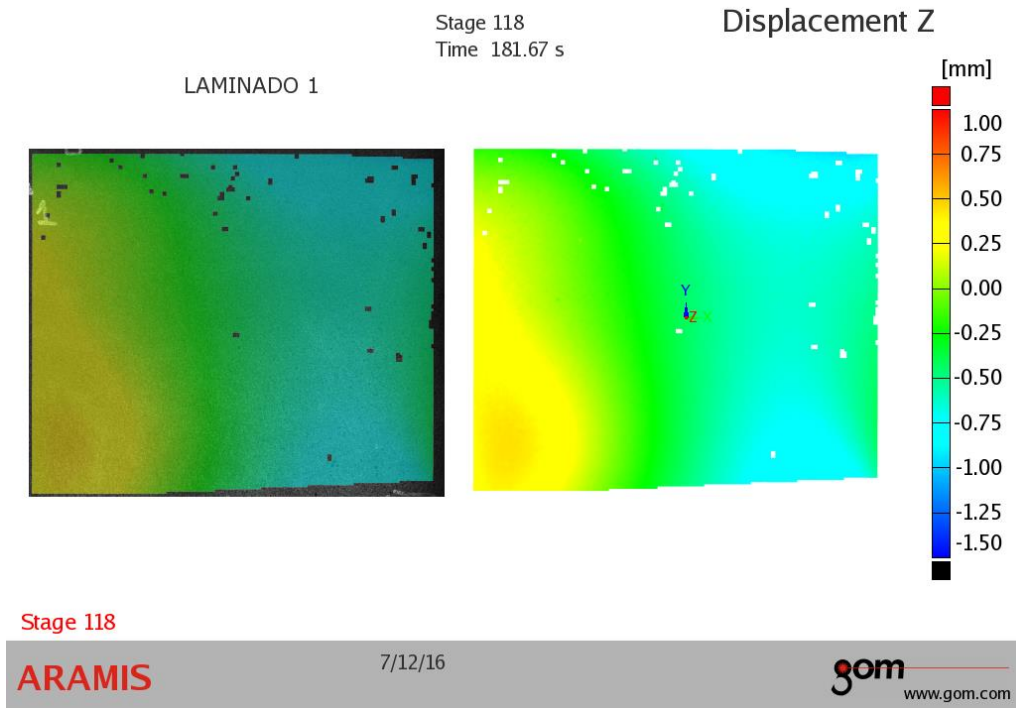


Figura 8.14: Desplazamiento en Z del laminado 2 a 3500 N de carga.

Se observa como la zona de desplazamiento positivo de la parte izquierda de la placa va aumentando de tamaño y además el desplazamiento es cada vez mayor. El desplazamiento negativo comienza a desaparecer en favor del positivo.

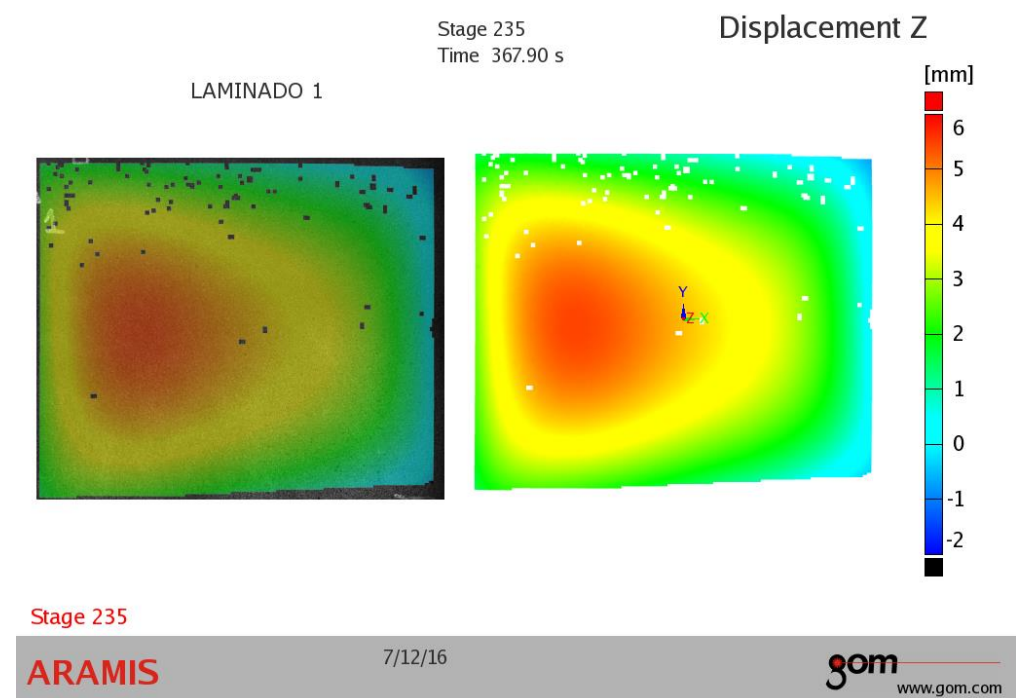


Figura 8.15: Desplazamiento en Z del laminado 2 a 14000 N de carga.

En la imagen se puede ver con claridad que el desplazamiento más acusado no se encuentra en el centro de la placa. Se asemeja a un modo 1 fuera del eje central de la placa, visiblemente desplazado hacia la izquierda. A medida que aumenta la carga aumenta también el tamaño de la zona pandeada.

Las fotos correspondientes al tercer laminado son las figuras 8.16, 8.17 y 8.18.

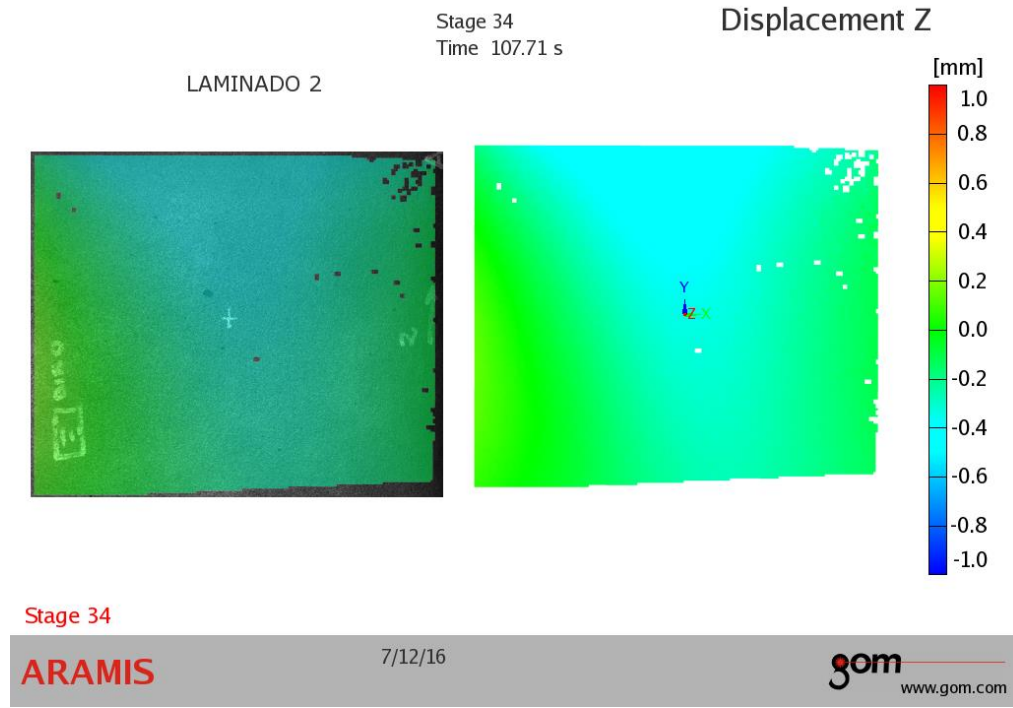


Figura 8.16: Desplazamiento en Z del laminado 3 a 2000 N de carga.

No presenta un gran desplazamiento, pues llega en su máximo valor al medio centímetro. El patrón es similar al del caso anterior a este mismo nivel de carga.

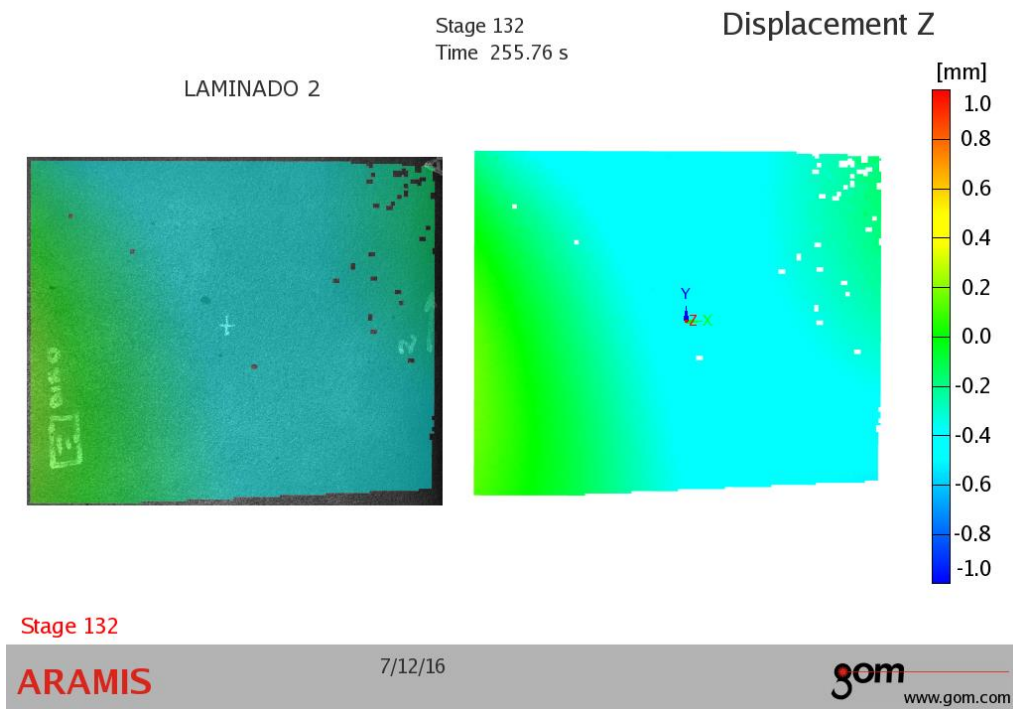


Figura 8.17: Desplazamiento en Z del laminado 3 a 6000 N de carga.

Subiendo hasta 6000 N de carga presenta algunos cambios, siendo la zona central la que toma mayor importancia aumentando la zona afectada por un desplazamiento negativo, tomando casi tres cuartas partes de la placa, si bien el valor de este desplazamiento es pequeño.

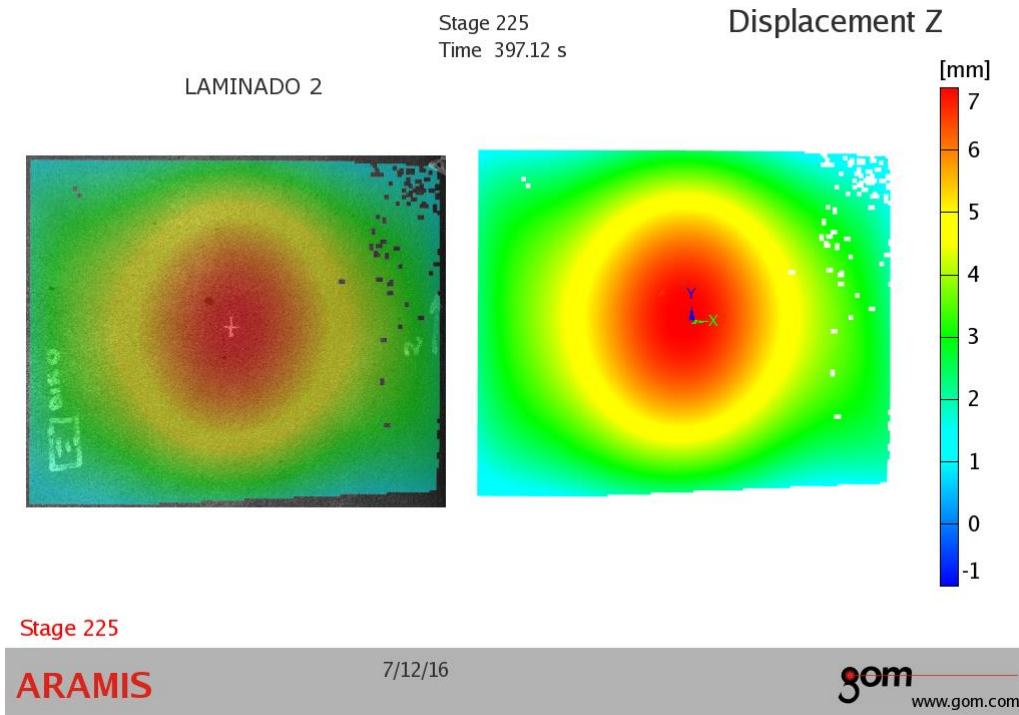


Figura 8.18: Desplazamiento en Z del laminado 3 a 14500 N de carga.

La imagen que se muestra y las sucesivas se pueden asociar de forma bastante clara a uno modo 1 de pandeo, con el mayor nivel de desplazamiento en el centro de la placa. Continúa así hasta prácticamente el final del ensayo.

8.1.1.1 Comparación entre las placas a 0°

En las gráficas de carga frente a desplazamiento se observa que la primera parte del ensayo la pendiente en el laminado plano es mucho menor que en los otros dos, lo cual tiene sentido pues ante las primeras cargas el laminado plano se va ajustando y tiene un desplazamiento mayor pues no tiene una configuración preformada que ayude a resistir esas primeras cargas. Además, en el caso del laminado 1 se puede ver como tiene un comportamiento mucho más lineal a lo largo de casi la totalidad del ensayo, mientras que los cambios de pendiente son más comunes en los laminados 2 y sobre todo 3. Por último, reseñar los primeros fallos y las roturas sufridas que se dan en los laminados 2 y 3 que no ocurren en el primero, y que como era de esperar por su configuración se dan a menor carga en el segundo que en el tercero.

Para comparar el comportamiento de los datos aportados por las galgas se grafican los datos correspondientes a las galgas del laminado plano y de cada uno de los otros dos que se encuentran en la misma posición, así en la figura 8.19 se muestran los datos de las galgas 1, 2 y 3 del laminado plano y las galgas del laminado 2. En la figura 8.20 en cambio, las galgas del laminado 1 son las 4, 2 y 5 y se comparan con las galgas del laminado 3.

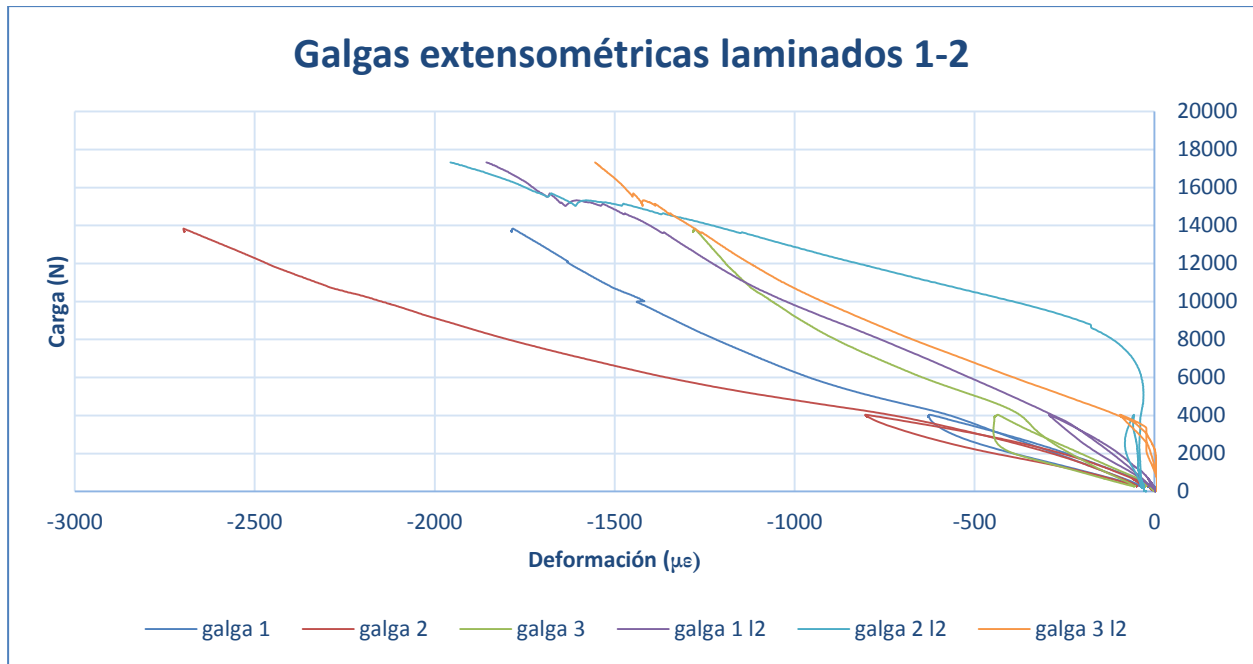


Figura 8.19: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 1 y 2.

Se observa que los valores de carga asumidos para una misma deformación son siempre mayores en el caso de la placa deformada, variando el comportamiento sensiblemente en los primeros niveles de carga, donde la placa plana mantiene una pendiente parecida a la de todo el ensayo y la placa 2 tiene una pendiente muy vertical.

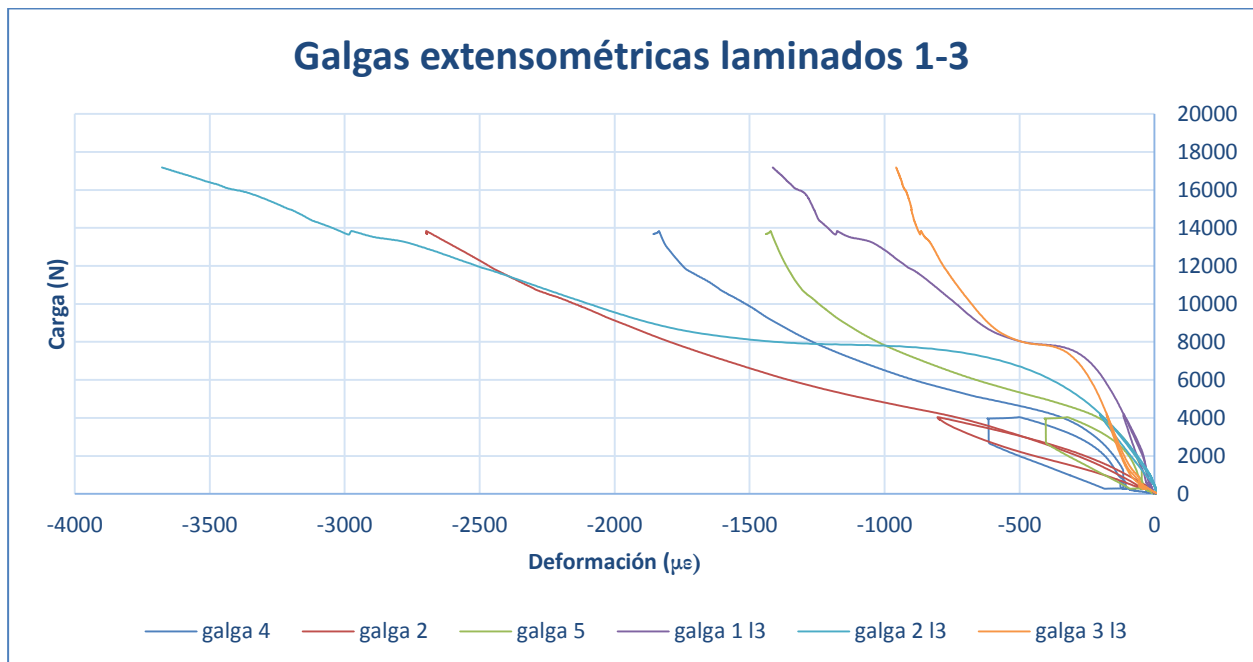


Figura 8.20: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 1 y 3.

Al igual que en el caso anterior las deformaciones a un mismo nivel de carga son superiores en el caso de la placa plana. Se observa también la misma distinción de pendiente en la zona de ajuste del principio del ensayo, pero sí que se ve de forma clara un punto de inflexión en la placa deformada que afecta sobre todo a la galga central. Este cambio de pendiente se da también en la placa plana, pero de forma mucho más suave.

8.1.2 Placas de fibra a 90°

El laminado plano de láminas a 90° fue el único de los laminados sin curvatura previa que perdió toda su capacidad portante. Esto ocurrió a 5100 Newton y su resultado queda expuesto en la figura 8.21.

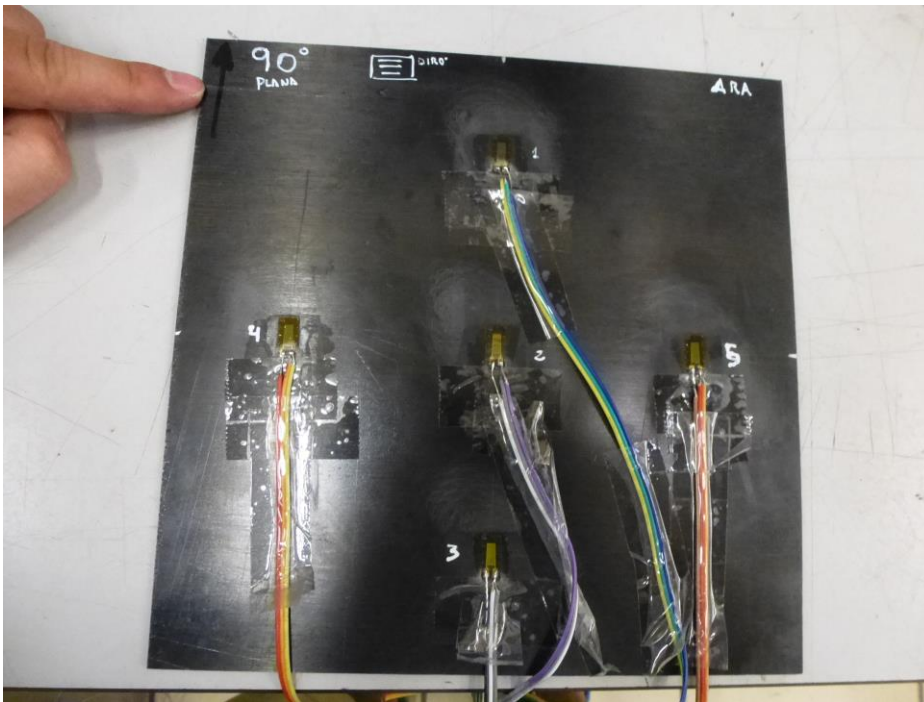


Figura 8.21: Laminado 4 después de ser ensayado.

El quinto laminado (laminado a 90° con 3 ondas en la dirección de la carga) sufrió también la pérdida de toda su carga portante, cosa que se dio a una carga del orden de 5400 Newton. En la figura 8.22 se aprecia su final.

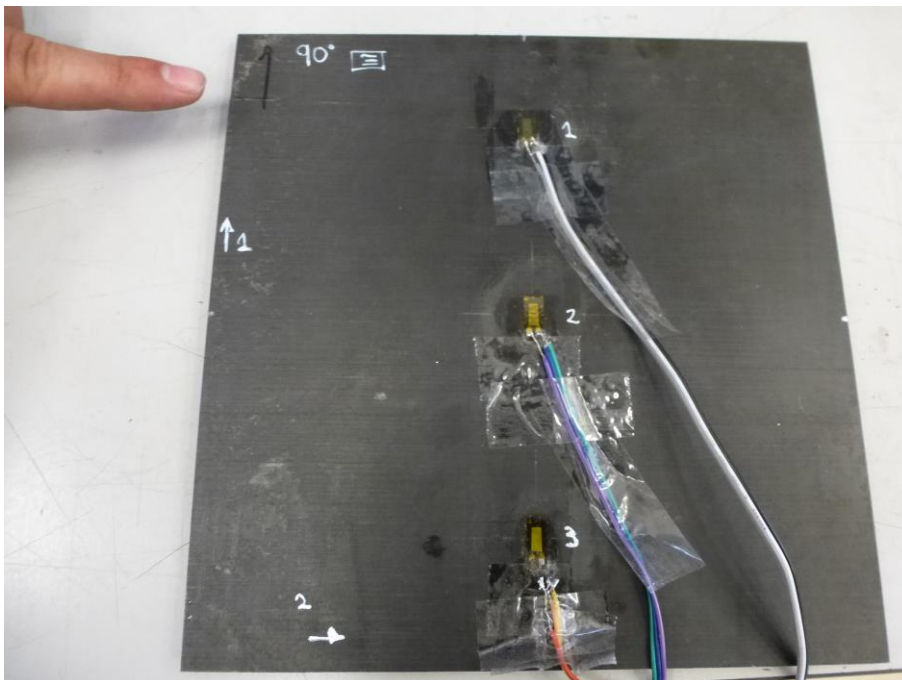


Figura 8.22: Resultado del ensayo del laminado 5.

En el laminado 6 (láminas de 90° y dirección 2 en la dirección de la carga) se vuelve a producir una rotura crítica, a 5200 Newton. El resultado de la probeta se aprecia en la figura 8.23.

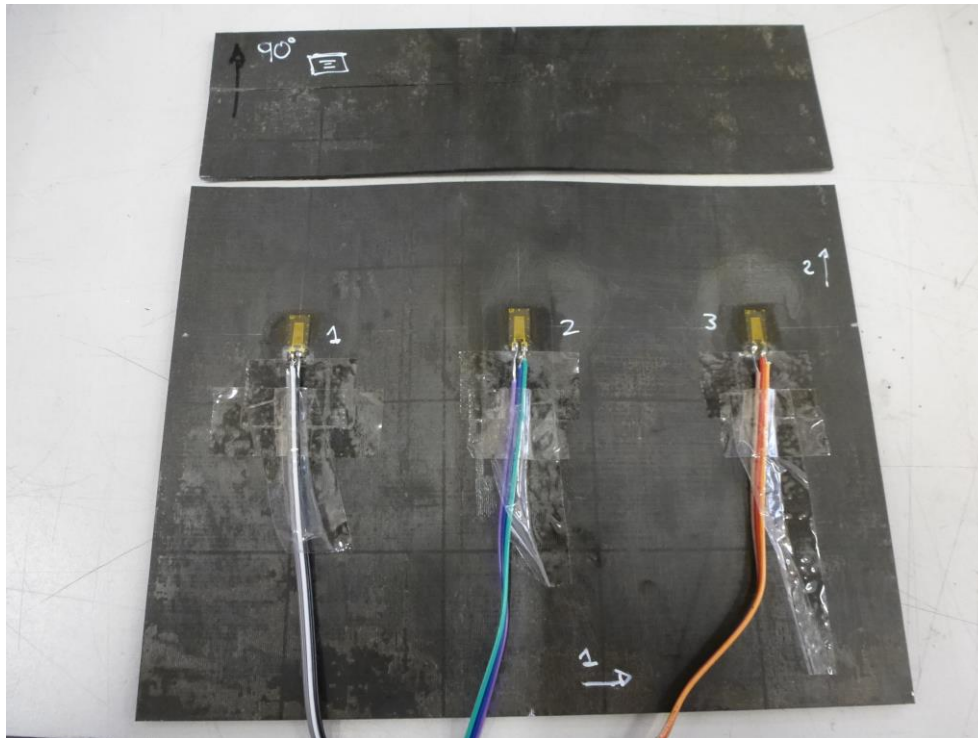


Figura 8.23: Rotura del sexto laminado producida durante el ensayo.

Se expondrán a continuación los datos de las placas de 90° en el mismo orden. Así, lo primero son las gráficas de carga frente a desplazamiento, que son las figuras 8.24, 8.25 y 8.26.

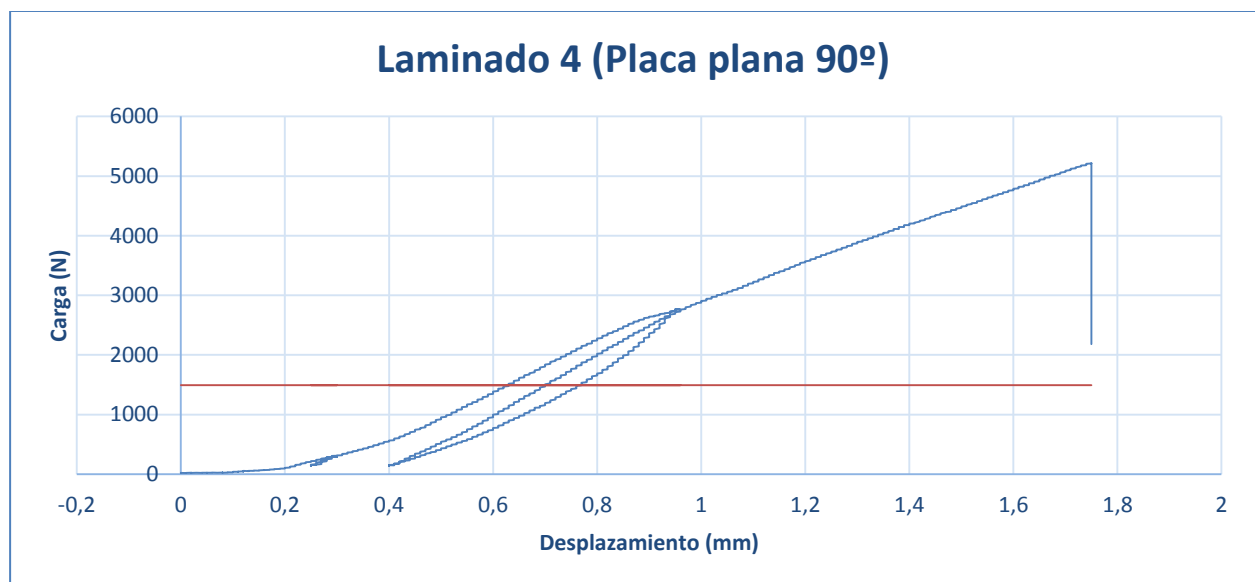


Figura 8.24: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa plana de 90° .

Lo primero que se observa en la gráfica es el rango mucho más pequeño de carga que se da en este ensayo en comparación con el anterior debido a la configuración del laminado. En el inicio se vuelve a observar una pendiente muy pequeña, aunque no dura demasiado en crecer y estabilizarse, puesto que el resto del ensayo es prácticamente lineal. A destacar que a pesar de la rotura crítica de la placa no se observa en la gráfica ningún pico que avise de que la placa está fallando, si no que se produce un colapso.

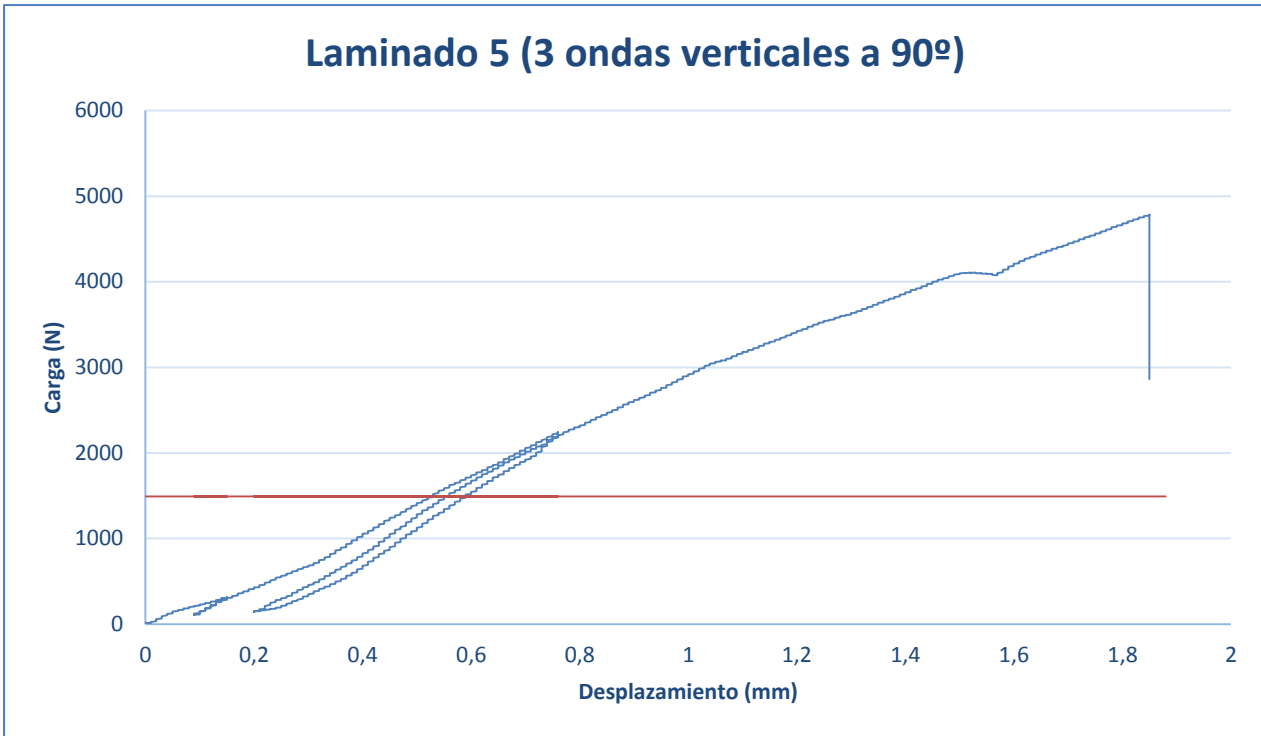


Figura 8.25: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas verticales de 90°.

En esta gráfica no se observa una clara zona de ajuste al principio, llama la atención lo lineal que se comporta a lo largo de todo el ensayo, sin que afecte el hecho de pasar la carga crítica de pandeo teórica. Sin embargo, aquí sí se puede ver un pico sobre los 1,5 mm correspondiente al primer fallo de la placa.

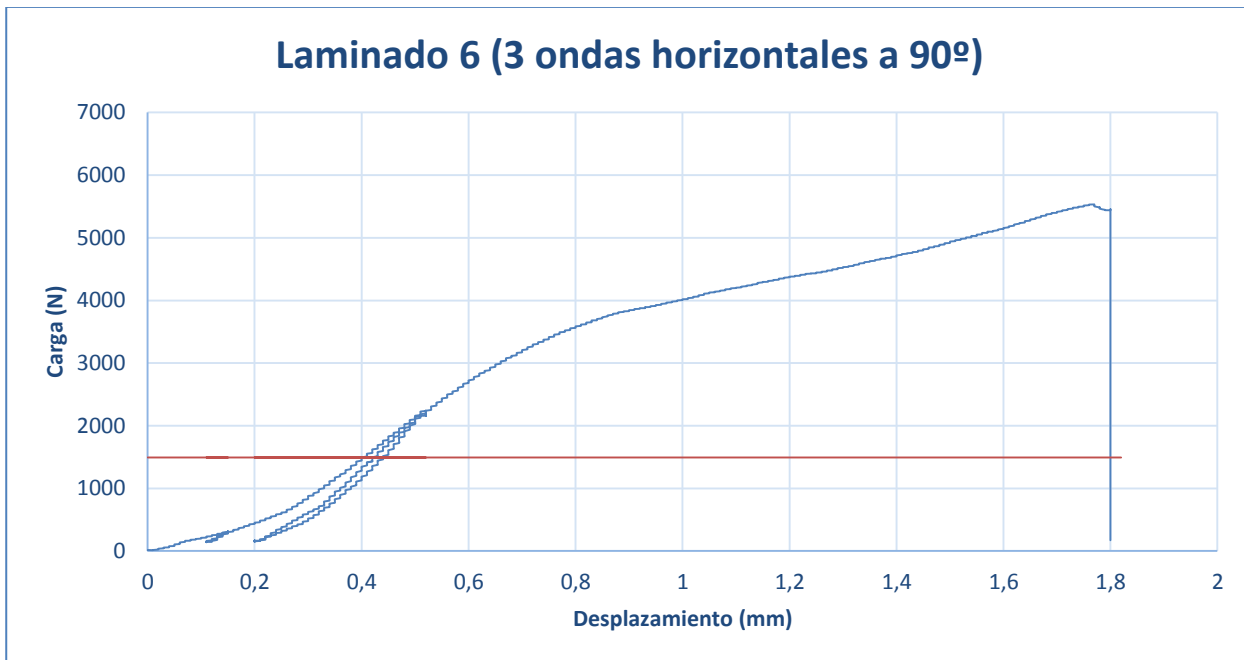


Figura 8.26: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas horizontales a 90°.

En la placa correspondiente al laminado 6 sí que observamos un punto de inflexión a los 0,3 mm que podemos considerar tras la zona de ajuste cuando la probeta está completamente fijada. Además, se observa otro claro punto de inflexión sobre los 3500 N de carga que, al observar la carga crítica de pandeo teórica, se puede asociar a un cambio del modo de pandeo. Por último, el primer fallo de la placa se observa muy cerca del colapso.

Se continuará con el estudio de los datos de las galgas extensométricas correspondientes a estas tres configuraciones. Las gráficas se muestran en las figuras 8.27, 8.28 y 8.29. La nomenclatura de las galgas sigue siendo la misma que en el apartado anterior.

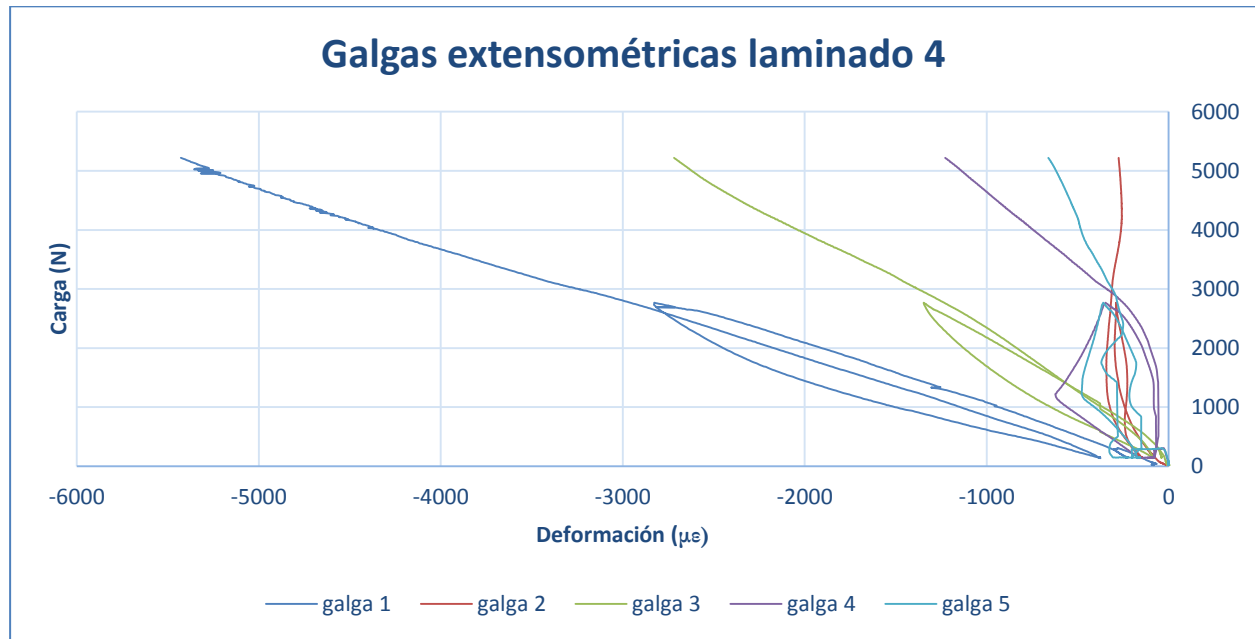


Figura 8.27: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa plana de 90°.

En esta gráfica se observa una dispersión muy grande, puesto que los niveles de deformación a los que llegan las galgas 1 y 3 (galgas superior e inferior) son mucho mayores que los de las otras tres galgas que se encuentran en el rango de las 1000 $\mu\epsilon$. A pesar de estas diferencias no se aprecian grandes cambios de pendiente durante el ensayo en cada una de ellas, salvo en la galga 4 (galga de la izquierda) que sí tiene un punto de inflexión en los 2500 N donde deja de tener una pendiente casi vertical.

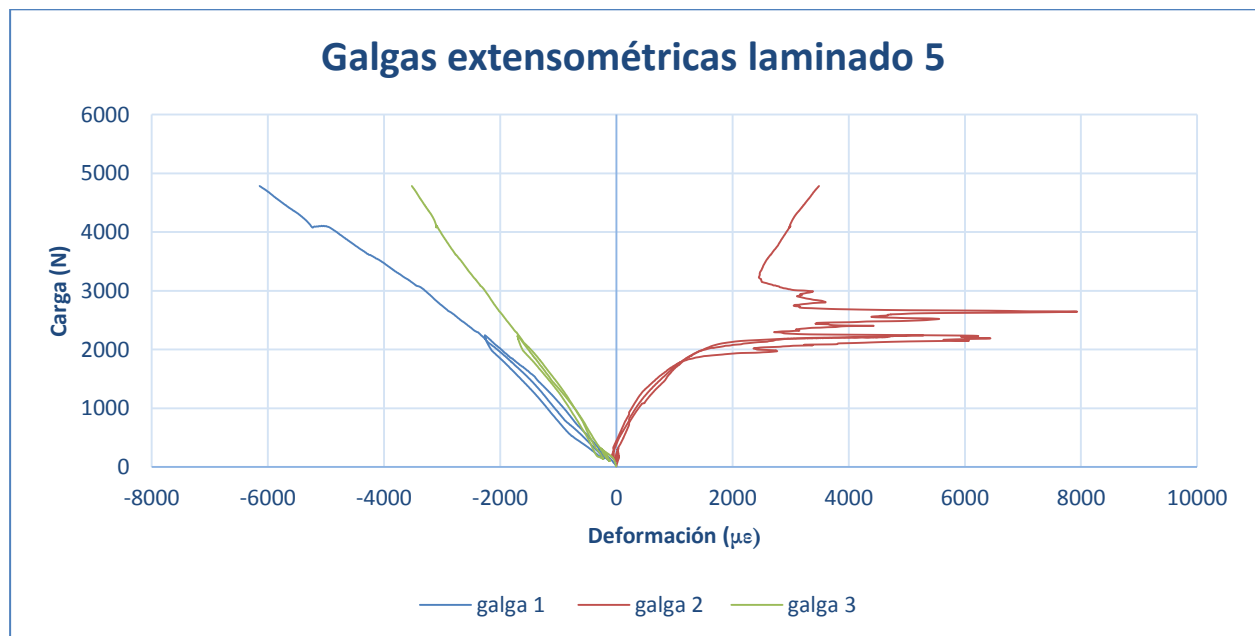


Figura 8.28: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas verticales de 90°.

En esta gráfica la galga central ha sufrido una tracción, al contrario que las otras dos galgas de la placa. Esto es posible debido a la configuración y el modo de pandeo que sufre, como se aprecia en las imágenes posteriores del ARAMIS. Aún así, la dispersión de los datos hace pensar que esta galga en concreto ha podido tener algún tipo de problema, pues es la única galga de todos los ensayos con una configuración de datos parecida. En cambio, los valores que nos muestran las galgas 1 y 3 si se parecen más a los de probetas anteriores, con una pequeña pendiente de ajuste en el inicio y a partir de ese momento un comportamiento bastante lineal que no muestra ningún cambio de pendiente importante que se deba destacar. Reseñar también que en los datos de la

galga 1 se observa un pico en torno a 4000 N que no tiene su reflejo correspondiente en los datos de la galga 3, situación que no había ocurrido en los anteriores datos estudiados que si mostraban un pico de fallo lo hacían en todas las galgas del ensayo.

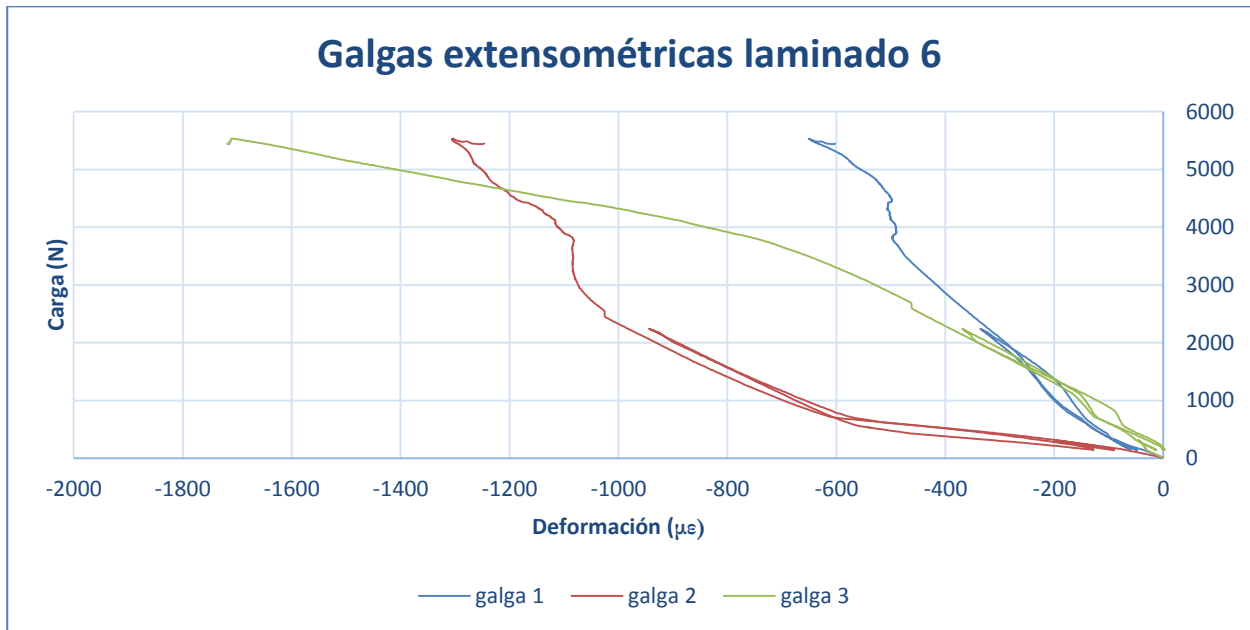


Figura 8.29: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas horizontales de 90°.

Las tres galgas de esta gráfica muestran un comportamiento muy diverso. La galga 1 (izquierda) tiene una subida bastante lineal hasta los 3500 N, donde empieza una zona irregular que llega hasta los 4500 N. Esta zona irregular también se ve en la galga 2 (central) pero no así en la 3 y puede asociarse al punto de inflexión que se encontraba en ese rango de carga como se vio en la gráfica de la figura 8.32. Aparte de dicha zona, la galga central muestra un inicio con una pendiente pequeña cambiando a los 800 N a una pendiente mayor. Por último, la galga 3 (derecha) comienza con una pendiente moderada y tiene un punto de inflexión hacia una pendiente menor sobre los 3500 N, si bien dicho cambio es suave y no presenta ninguna irregularidad como si hacen las otras dos.

La última sección del apartado consiste también en las imágenes proporcionadas por el sistema ARAMIS. Los puntos de carga que se tomarán para mostrar las imágenes serán los análogos a los mostrados en el apartado anterior (previo a carga crítica teórica de pandeo, 30% superior a dicha carga crítica y a un porcentaje elevado de la carga última).

Las imágenes asociadas a la placa plana de 90° son las figuras 8.30, 8.31 y 8.32.

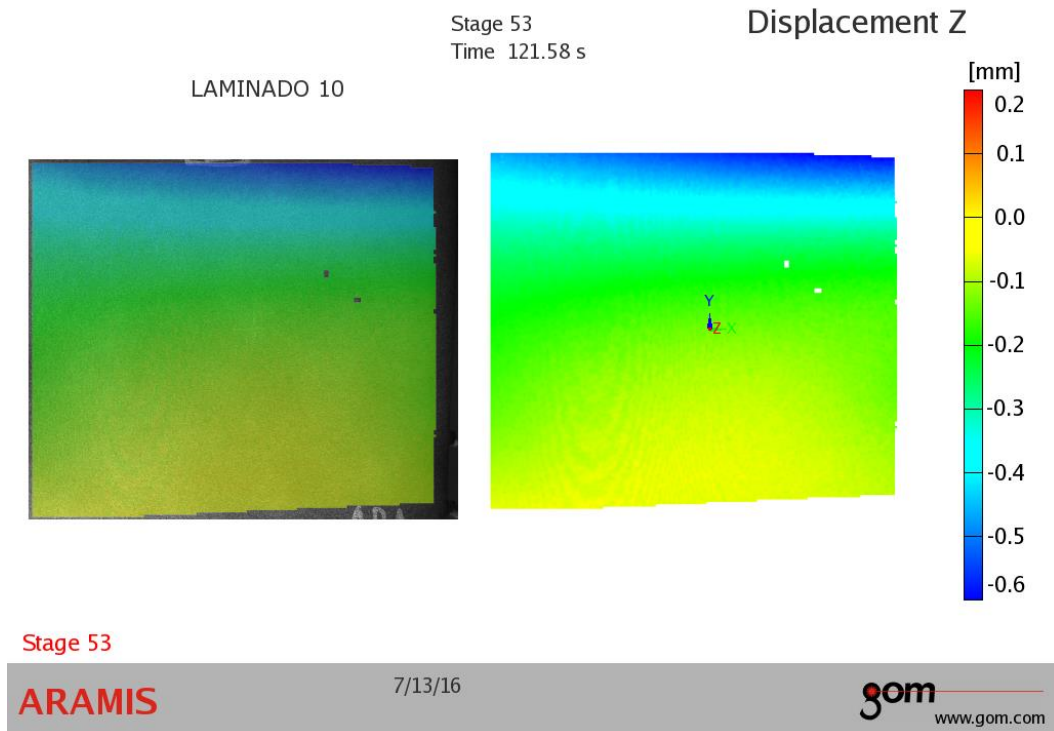


Figura 8.30: Desplazamiento en Z del laminado 4 a 1200 N de carga.

A unos 1200 N de carga observamos un valor de desplazamiento negativo en torno a 0.6 milímetros restringido a una franja estrecha en la parte superior, mientras que en el resto de la placa tenemos un valor negativo, pero mucho más moderado.

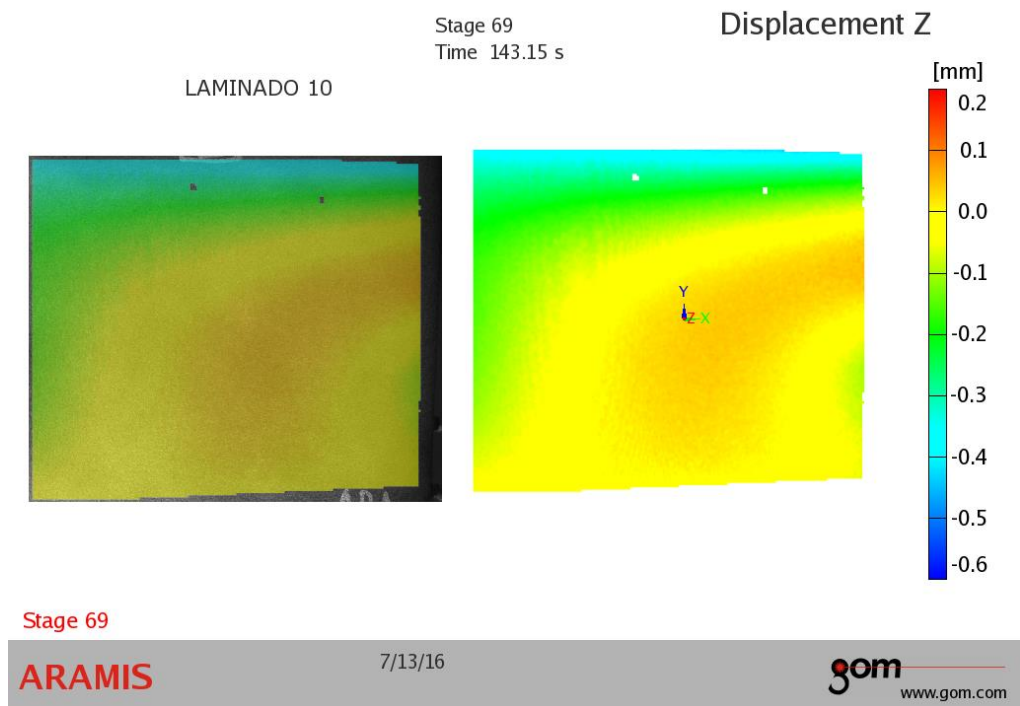
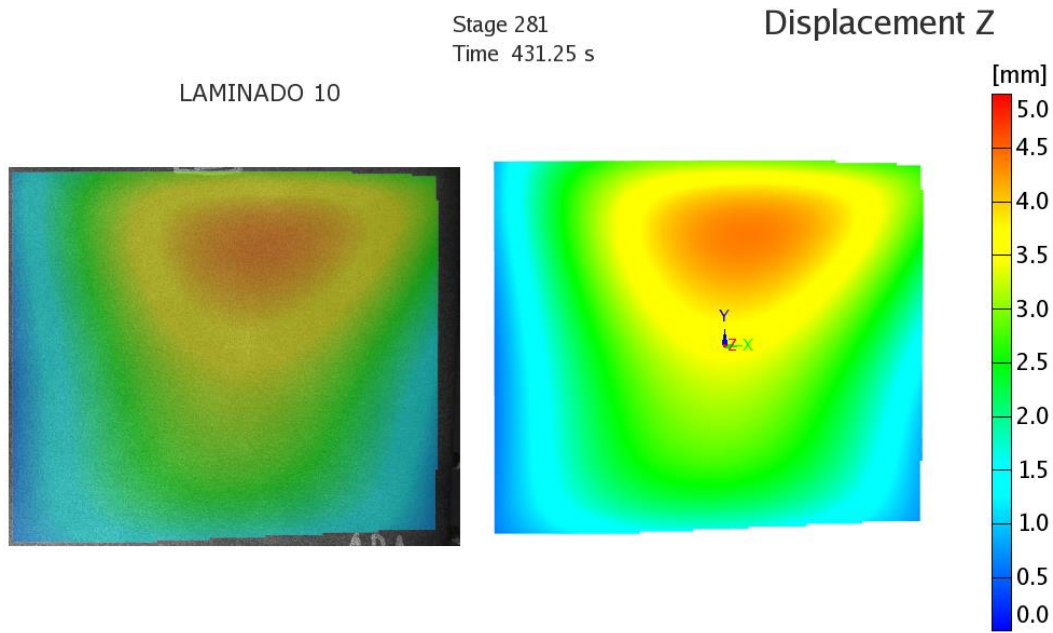


Figura 8.31: Desplazamiento en Z del laminado 4 a 2000 N de carga.

Al aumentar la carga comienza a aparecer desplazamiento positivo haciendo que las zonas en las que todavía se mantiene desplazamiento negativo sea menos acusado, especialmente en la franja superior.



Stage 281

ARAMIS

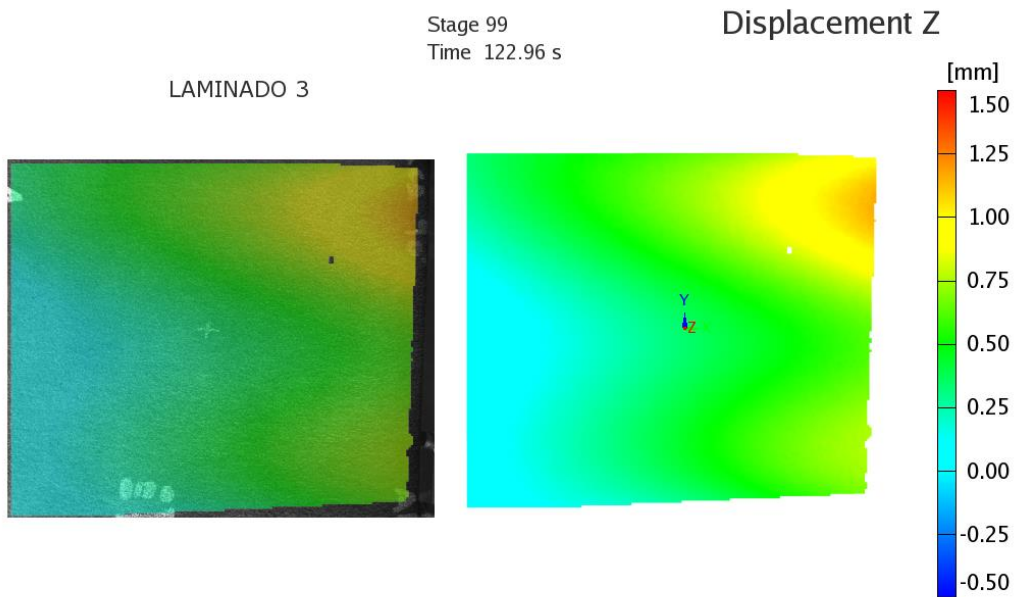
7/13/16

gom
www.gom.com

Figura 8.32: Desplazamiento en Z del laminado 4 a 5000 N de carga.

En esta imagen sí se puede apreciar el desplazamiento en Z y es parecido al modo 3 de pandeo de las placas a 90°, ya que se observa la deformación típica de este modo si bien se encuentra desplazada completamente hacia la parte superior de la probeta.

El laminado 5 nos deja las imágenes de las figuras 8.33, 8.34 y 8.35.



Stage 99

ARAMIS

7/12/16

gom
www.gom.com

Figura 8.33: Desplazamiento en Z del laminado 5 a 1200 N de carga.

A 1200 N se puede vislumbrar que en la zona de la derecha comienza a aparecer un desplazamiento positivo importante, en el que se aprecian dos puntos, uno en la parte superior y otro en la inferior, donde este desplazamiento es mayor que en el resto de la placa.

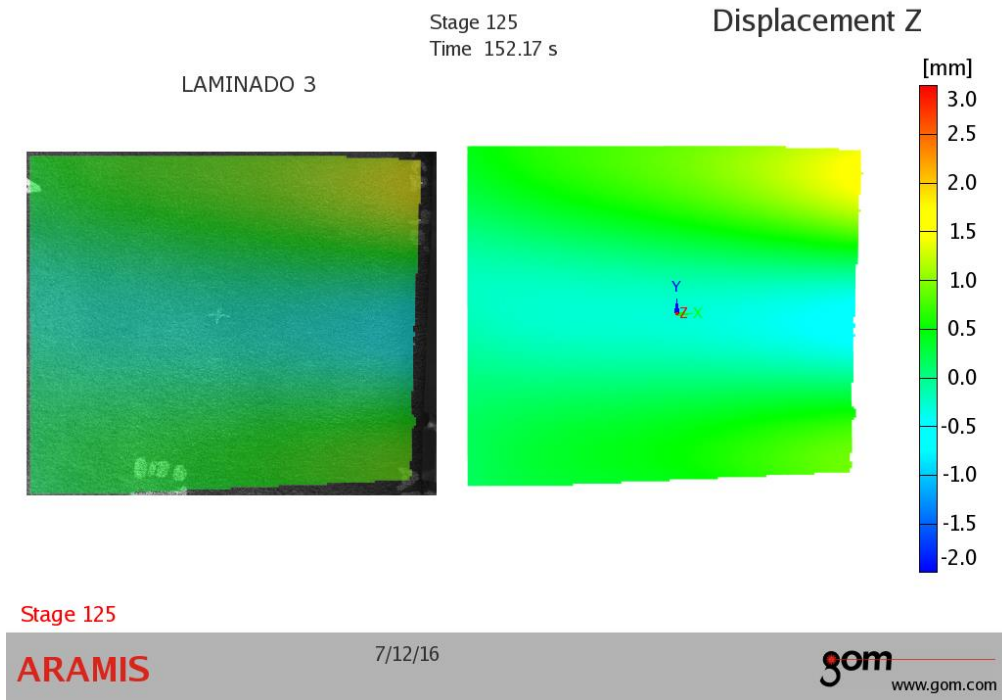


Figura 8.34: Desplazamiento en Z del laminado 5 a 2000 N de carga.

En esta imagen vemos una banda central horizontal en la que se ha producido un desplazamiento negativo del orden de 1 mm y en la esquina superior derecha empieza a tomar fuerza el desplazamiento positivo que ya se podía ver en la fotografía anterior. Claramente se va asociando a un modo 2 de pandeo a 90° teórico.

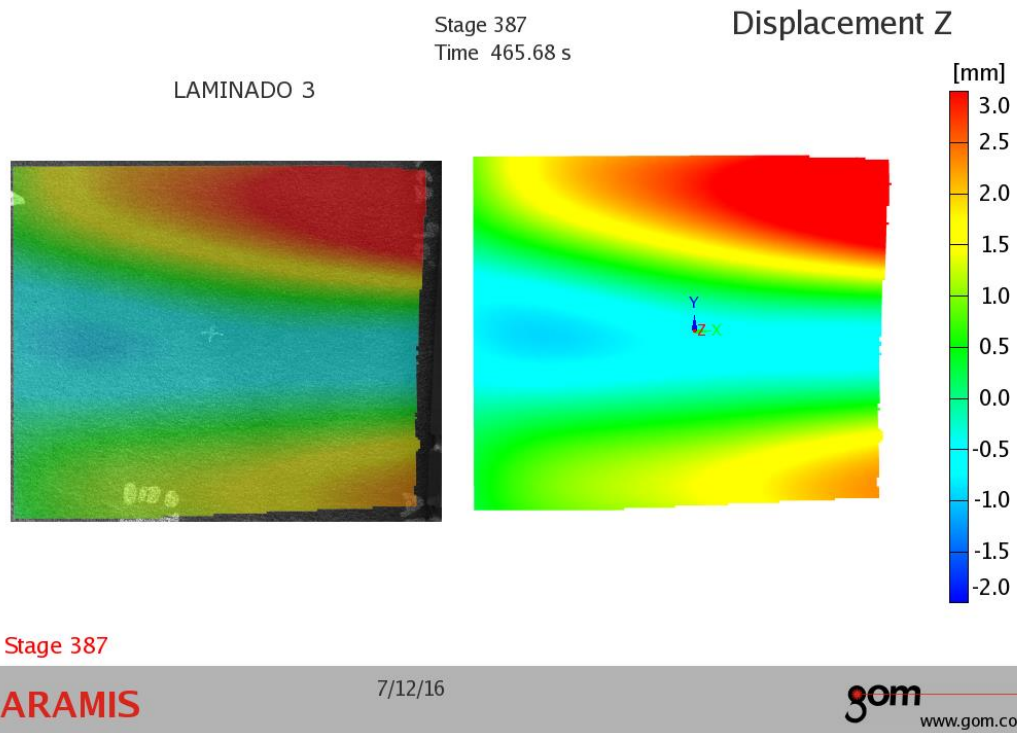


Figura 8.35: Desplazamiento en Z del laminado 5 a 4500 N de carga.

En esta última figura correspondiente a esta configuración se aumenta más todavía lo que ya empezaba a ocurrir en la foto anterior. Se han formado 3 bandas, una superior e inferior con desplazamiento positivo y una central con desplazamiento negativo, lo que se encuentra claramente asociado al modo 2 de pandeo teórico.

Las fotos correspondientes al sexto laminado son las figuras 8.36, 8.37 y 8.38.

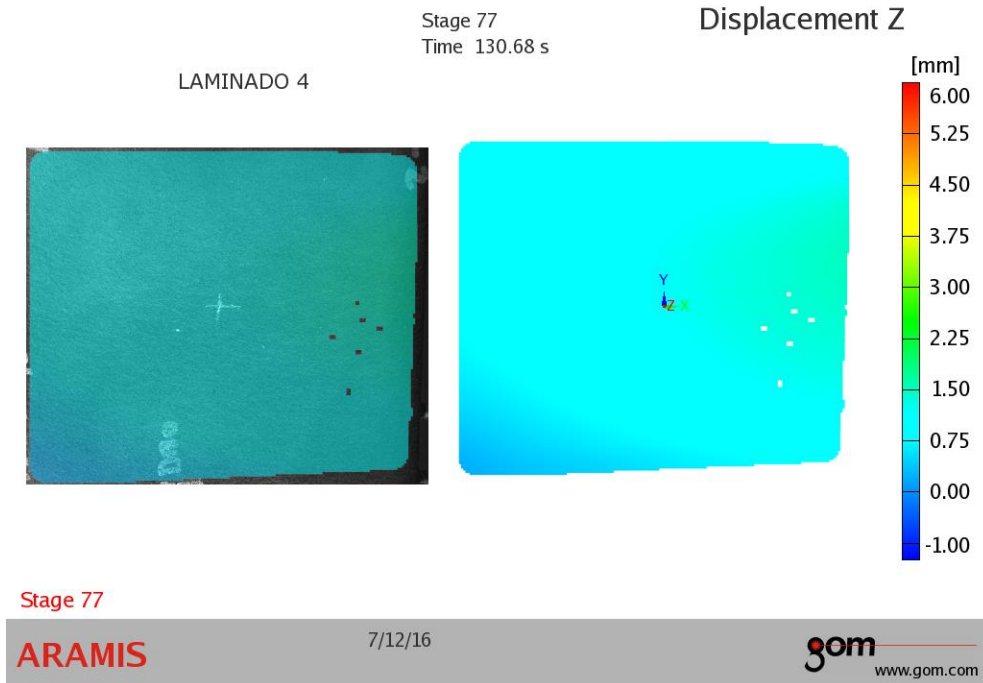


Figura 8.36: Desplazamiento en Z del laminado 6 a 1200 N de carga.

Comienza a destacar un mayor desplazamiento en Z en la zona superior derecha, mientras que el resto de la probeta ya presenta un pequeño desplazamiento en torno a 1 mm.

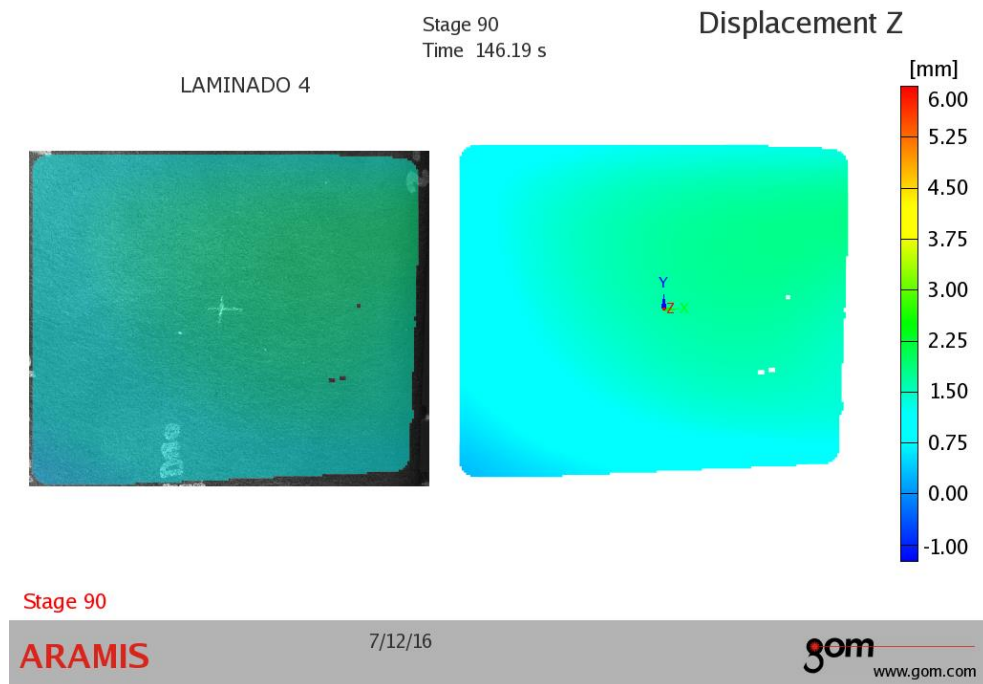


Figura 8.37: Desplazamiento en Z del laminado 6 a 2000 N de carga.

Una vez pasada la carga crítica la zona desplazada se ha ensanchado, si bien se vislumbra que no está centrada en la probeta si no que afecta más a la parte superior de esta.

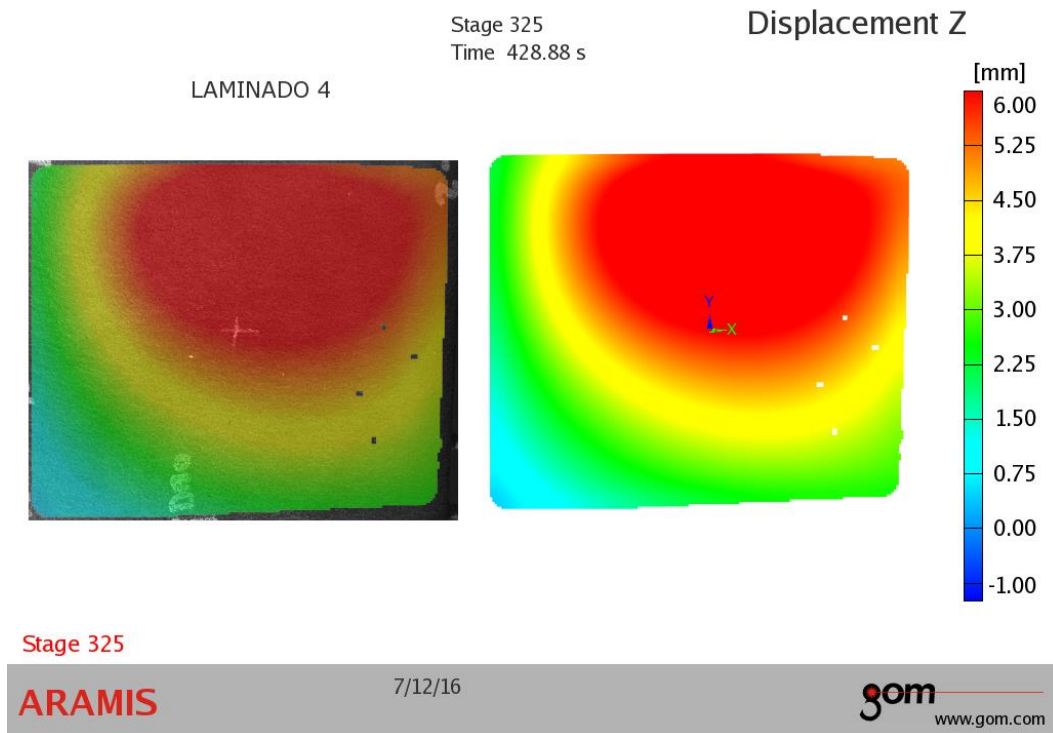


Figura 8.38: Desplazamiento en Z del laminado 6 a 5500 N de carga.

A estas alturas del ensayo el desplazamiento de toda la parte superior de la probeta es masivo llegando a los 6 mm en casi todos sus puntos. Se asemeja al modo 3 de pandeo teórico en una placa de 90° , si bien la zona de mayor desplazamiento que en el caso teórico se encuentra centrada en la placa en nuestro ensayo se ha desplazado a una zona superior.

8.1.2.1 Comparación entre las placas a 90°

Tomamos en consideración las gráficas de carga frente a desplazamiento. Llama la atención sobre todo en los laminados 4 y 5 la linealidad que muestran a lo largo de todo el ensayo, lo cual quizás es debido al bajo nivel de carga al que rompió la probeta, si bien por el valor teórico de la carga crítica de modo 1 de pandeo deberían haber sufrido algún cambio de modo pues se supera con creces, pero esto no parece estar ocurriendo. En cambio, en el laminado 6 sí se observa un cambio de pendiente acusado. En la primera parte de dichas gráficas tenemos una zona de ajuste, mayor en el caso de la placa plana, pero en ningún caso tan extensa como la placa plana de 0° . También es de destacar que tanto los laminados 5 como 6 la placa “avisa” antes de colapsar (aunque en el caso del laminado 6 es muy cercano a la carga última) mientras que en la placa plana la rotura se produce sin que se tenga ningún comportamiento anómalo hasta que llega el fallo crítico.

Al igual que en el caso de las placas de 0° para comparar los datos provenientes de las galgas utilizaremos una comparación gráfica entre las galgas en la misma posición. En este caso las galgas verticales del laminado 4 con las del laminado 5 y las horizontales del 4 con las galgas del laminado 6. Estas gráficas son las figuras 8.39 y 8.40.

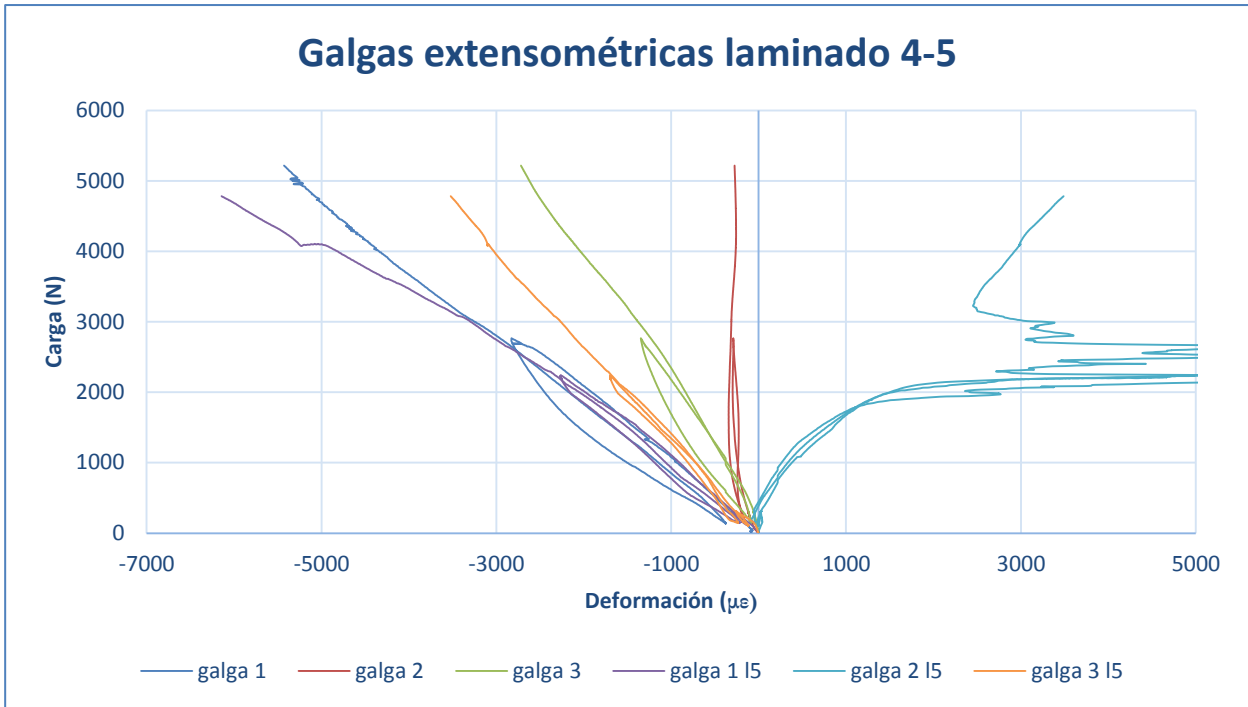


Figura 8.39: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 4 y 5.

La información de la galga 2 del laminado 5 es difícil de comparar con otra galga debido a que ha sufrido un tipo de deformación completamente distinto al resto. Como se observa en la gráfica, las galgas que se encuentran en la misma posición actúan de manera parecida, si bien siempre sufre una deformación mayor en el caso del laminado 5 (deformado) pero las pendientes son semejantes entre las dos galgas en la posición 1 y las dos galgas en la posición 3, con lo que se observa que no han tenido un comportamiento muy diferente. La galga central del laminado plano no la podemos comparar con su análoga, pero si llama mucho la atención la poca deformación que asume en comparación con el resto de galgas, puesto que mantiene una pendiente prácticamente vertical de inicio a fin.

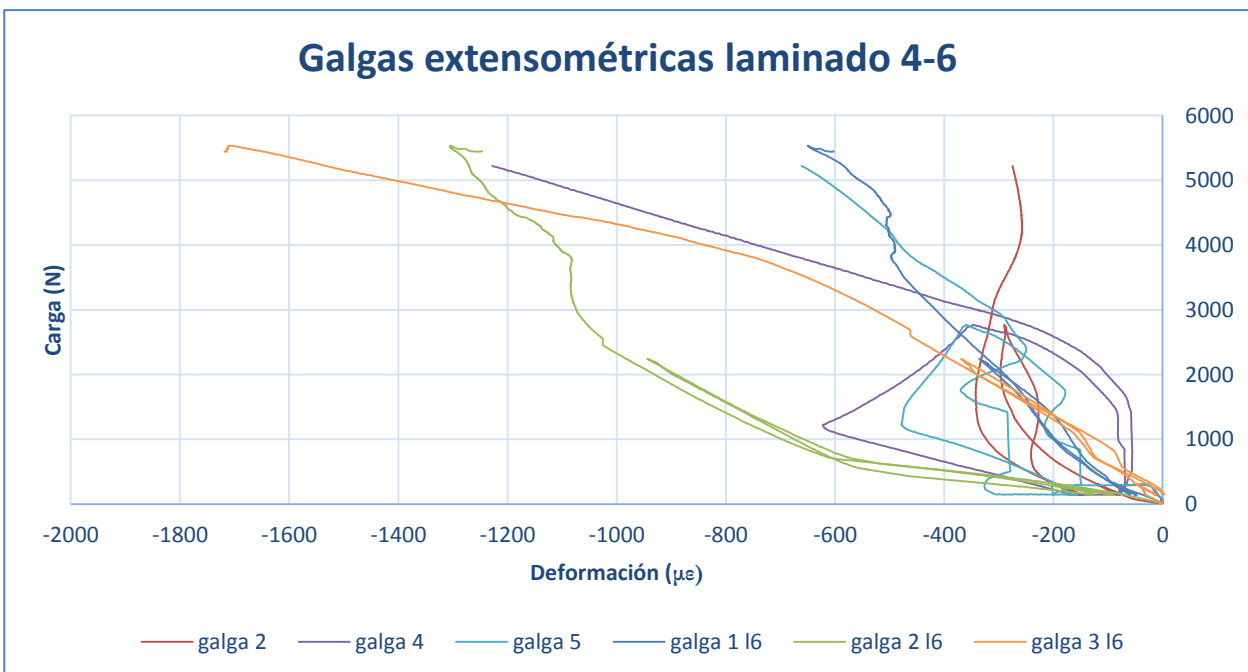


Figura 8.40: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 4 y 6.

En esta gráfica no se aprecia un patrón comparativo a simple vista, en el caso de las galgas centrales (galga 2 y 2 16) sufren comportamientos completamente opuestos, mientras que la galga central de la placa plana apenas sufre deformación, la galga central del laminado 6 es una de las que mayor deformación sufre durante todo el ensayo, especialmente en la primera parte de este. Las galgas de la izquierda (galga 4 y galga 1 16) solo se parecen en la deformación última a la que llegan, puesto que la de la probeta plana al principio tiene una pendiente grande y sufre un punto de inflexión tras el cual sufre mucha deformación con poco aumento de la carga mientras que la galga del laminado 6 es mucho más lineal manteniendo una pendiente más o menos estable. Algo muy parecido les pasa a las galgas de la derecha, cuyo comportamiento también dista mucho de ser parecido. Por ello, podemos afirmar que el comportamiento de estas probetas ha sido muy distinto a lo largo de todo el ensayo, lo cual también se observaba en la comparación de las gráficas de carga frente a desplazamiento.

8.1.3 Placas de fibra Mixtas [45/-45/0/45/-45/90]s

El ensayo del laminado 7 se desarrolló con normalidad y la probeta mantuvo carga portante durante todo el ensayo, no llegando a romper de forma crítica, lo que se puede ver en la figura 8.41.

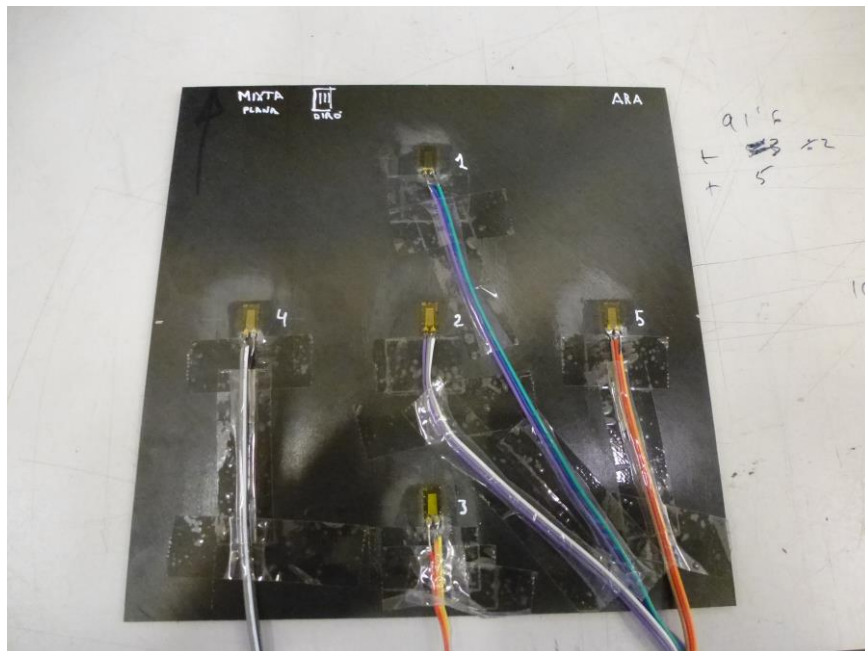


Figura 8.41: Resultado del laminado 7 tras el ensayo de compresión.

El octavo laminado corresponde a aquel en el que la dirección 1 y la dirección de aplicación de la carga son coincidentes y rompe a un nivel de carga bastante elevado, pues consigue aguantar hasta que llega alrededor de los 16000 Newton. En ese punto pierde la carga portante, si bien en la figura 8.42 no se aprecia tan bien como en las anteriores por no haberse producido una separación total de las fibras.

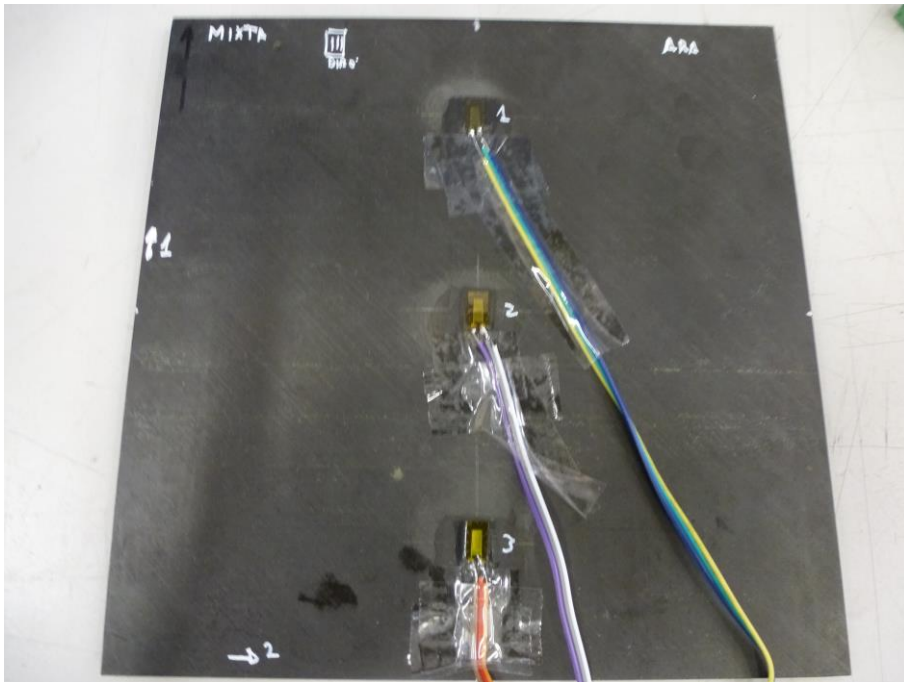


Figura 8.42: Aspecto del octavo laminado después de su ensayo.

El laminado 9 (dirección 2 en dirección de la carga) aguanta la carga del punto 4 sin perder la capacidad de resistir carga. Por tanto, como se aprecia en la figura 8.43, no sufre una rotura crítica.

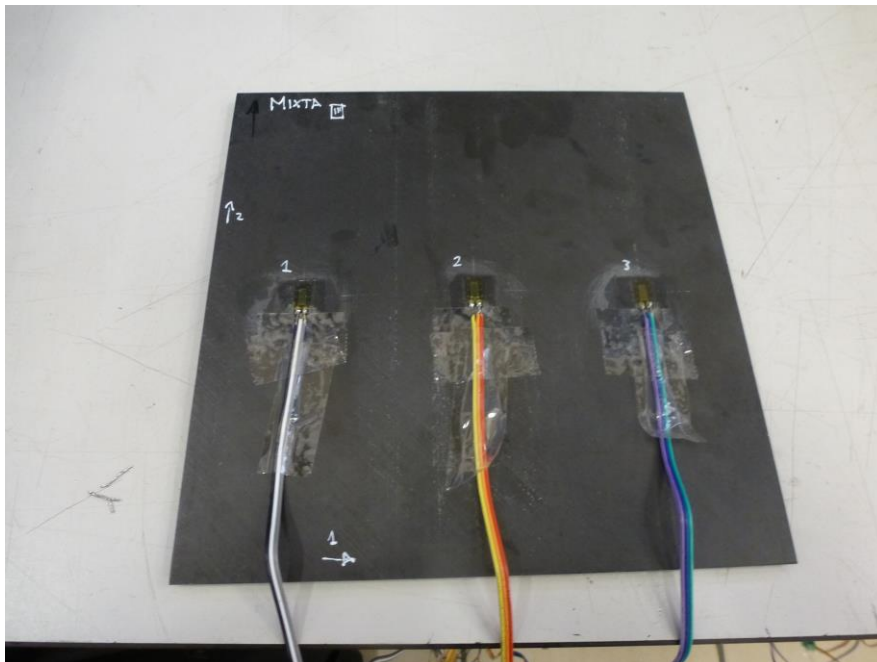


Figura 8.43: Noveno laminado tras pasar por la máquina de ensayo.

Se muestran ahora los datos de las placas Mixta. Al igual que en apartados anteriores se comenzará con las gráficas de carga frente a desplazamiento, que corresponden a las figuras 8.44, 8.45 y 8.46.

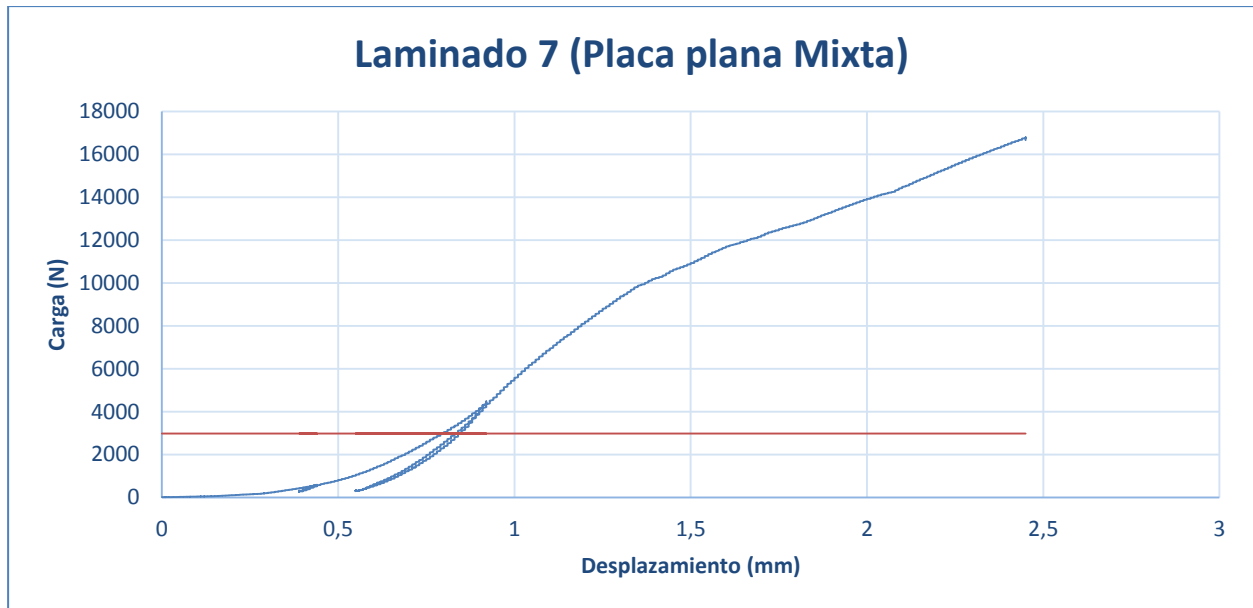


Figura 8.44: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa plana Mixta.

Tras la primera zona de ajuste se puede observar un primer tramo que llega hasta aproximadamente los 10000 N de carga. En ese punto se da un cambio de pendiente que se mantiene hasta el valor final del ensayo. La carga última en este caso es la carga última a la que se decidió llegar pues la placa no llegó a una rotura crítica, tanto es así que en la gráfica no se aprecian picos de importancia que nos dieran idea de fallos en el laminado.

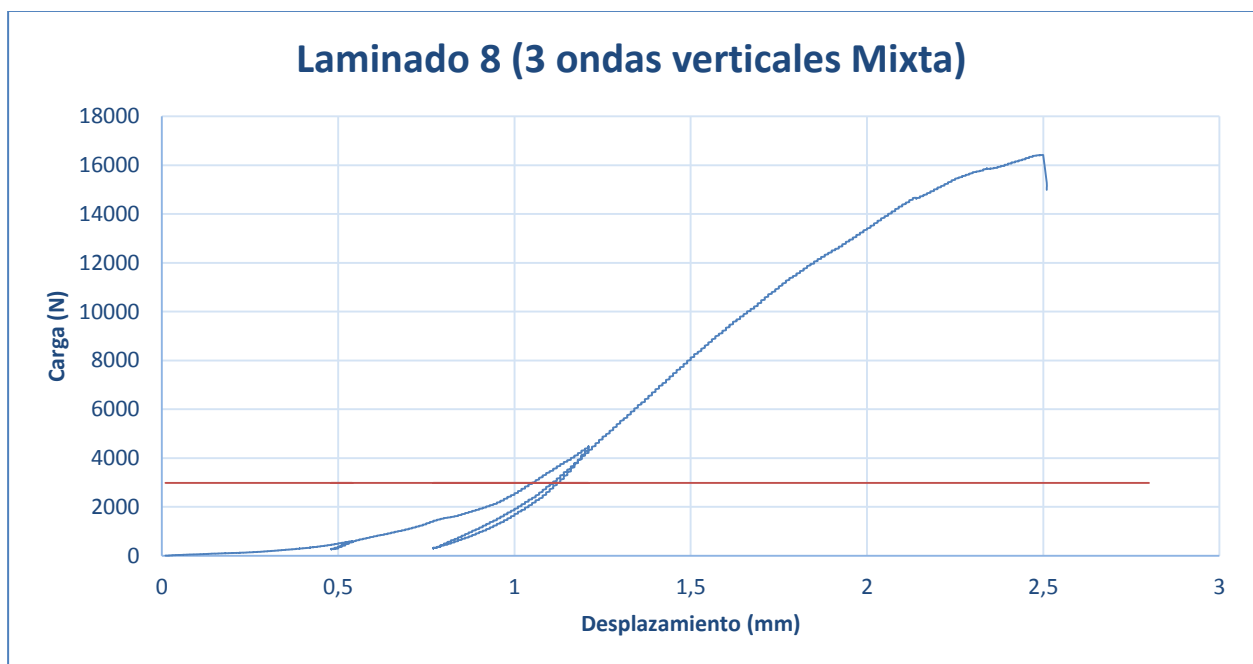


Figura 8.45: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas verticales Mixta.

Al igual que en el resto de ensayos este inicia con un periodo de ajuste tras el cual comienza una zona que se desarrolla de forma bastante lineal hasta el entorno de los 2 mm. Una vez ahí la pendiente cae progresivamente hasta que la probeta falla de forma crítica. Reseñar el hecho de que no se produzcan picos previos a la rotura final en la gráfica.

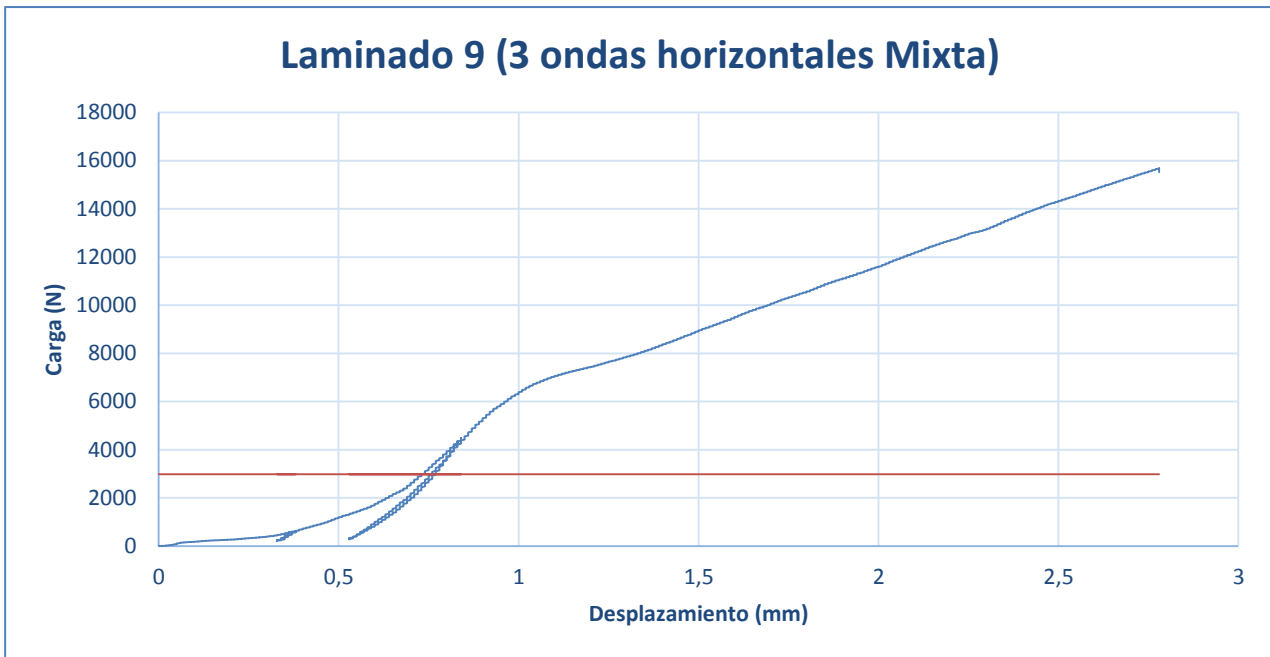


Figura 8.46: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas horizontales Mixta.

Comienza con una zona de pendiente baja hasta que ya empieza el ensayo a funcionar. Se puede observar una pendiente bastante acusada hasta que lleva 1 mm desplazado, en el que se produce un punto de inflexión hacia otra pendiente menor, con la que continúa linealmente hasta el final del ensayo. Como se comentó con anterioridad el ensayo no llega romper la probeta.

Tras estas gráficas a continuación se estudia la información que nos dan las galgas extensométricas. En este caso las figuras en las que se mostrará la información son la 8.47, 8.48 y 8.49.

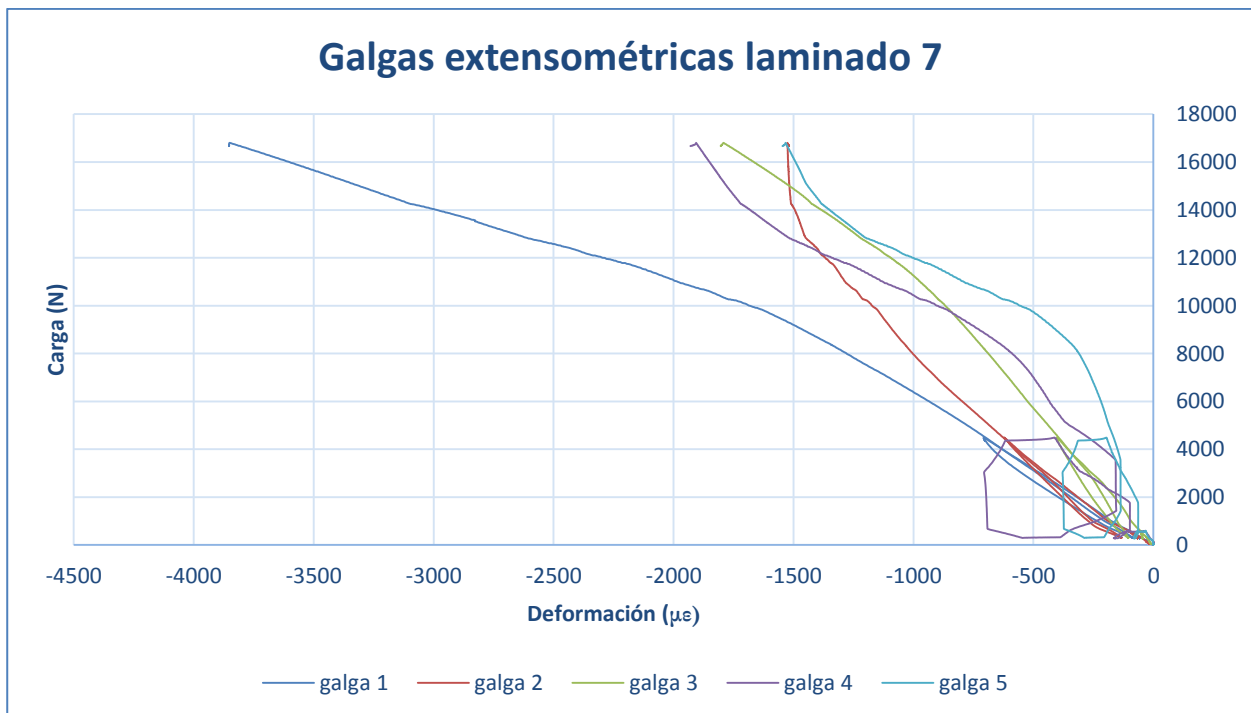


Figura 8.47: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa plana Mixta.

En este caso se puede observar como todas las gráficas excepto la número 1 (galga superior) trabajan en un rango acotado no demasiado extenso. La galga 1 llega a niveles mucho mayores de deformación que el resto de galgas de esta probeta. Las galgas 1, 4 y 5 sufren un cambio de pendiente en el entorno de los 9000 N.

Además, sobre los 13000 N también se puede observar otro cambio de pendiente en las galgas 2, 4 y 5.

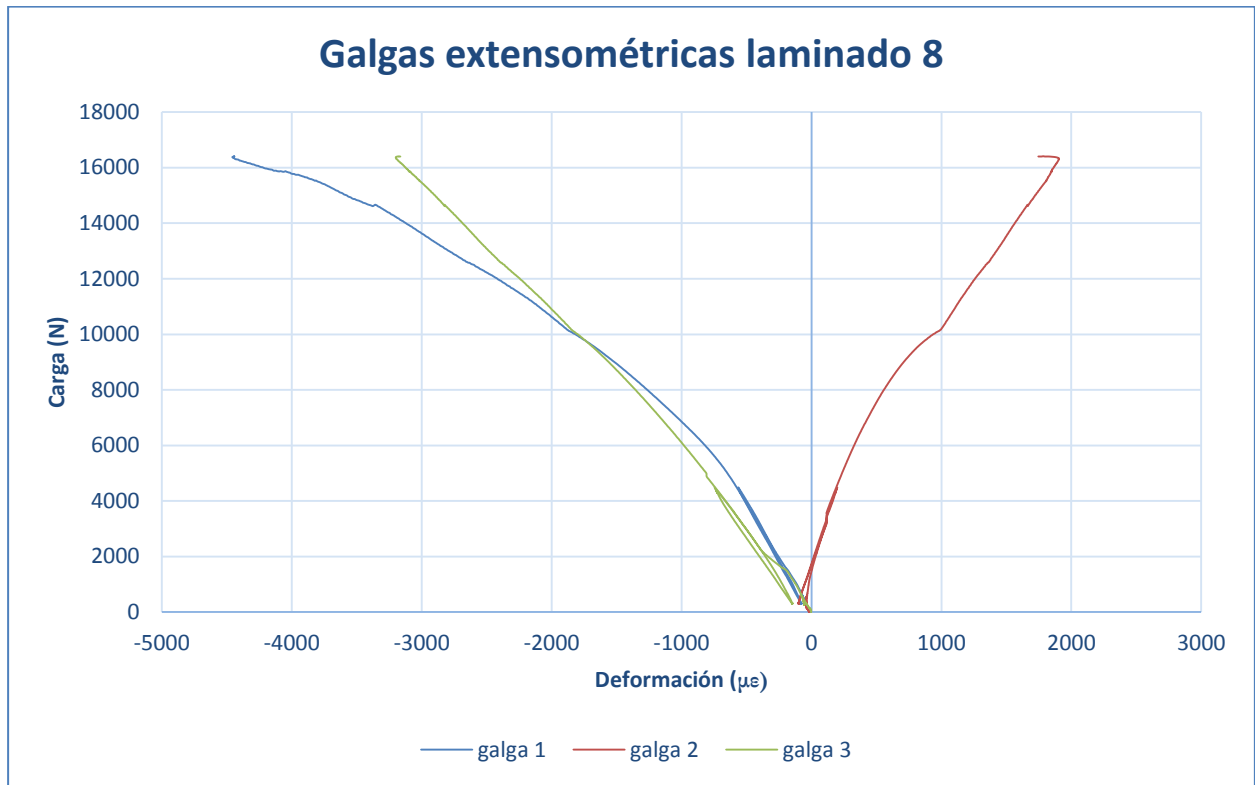


Figura 8.48: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas verticales Mixta.

Al igual que en el ensayo del laminado 5, la galga central muestra un estado de tracción a lo largo de todo el ensayo, debido al modo de pandeo sufrido.

En cuanto a las otras dos galgas se comportan de manera parecida durante todo el ensayo, aunque la galga 3 correspondiente al lado derecho trabaja de forma mucho más lineal, mientras que la 1 sí que va decreciendo su pendiente debido a que a medida que aumenta la carga se va deformando un poco más.

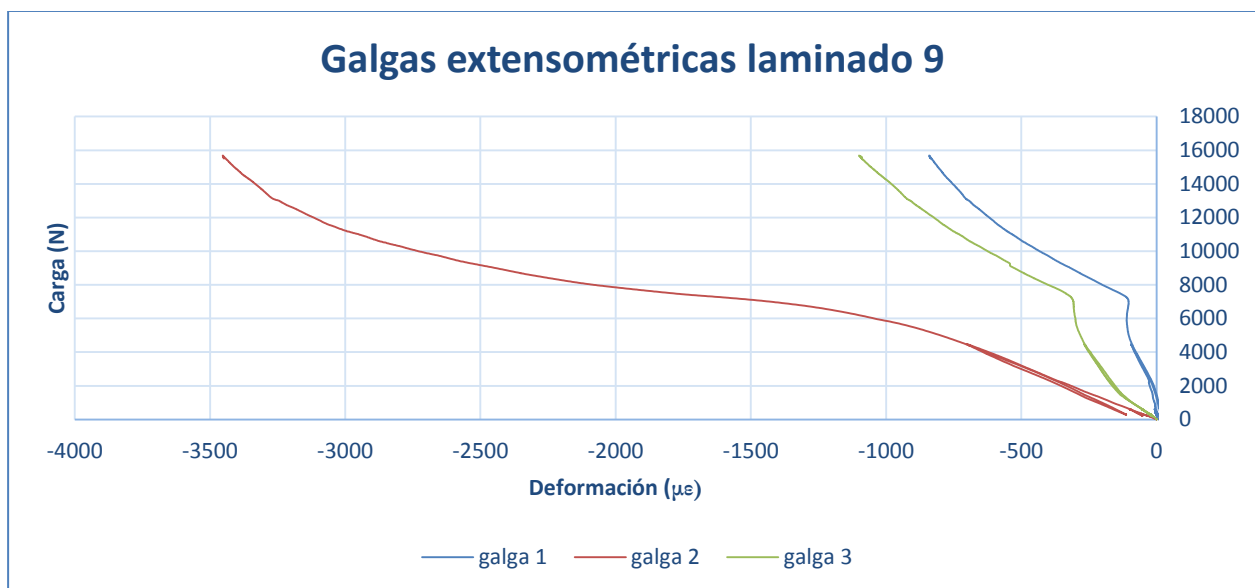


Figura 8.49: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas horizontales Mixta.

En este ensayo tenemos dos comportamientos muy diferenciados. Por un lado, la galga central en la que se aprecia la mayor deformación durante todo el ensayo. Comienza con un tramo lineal y a partir de los 6000 N la pendiente va creciendo hasta el final del ensayo. Por el otro lado, las galgas 1 y 3 se comportan de forma casi idéntica, aunque con una diferencia de magnitud de unos 400 μe en casi todo su rango, siendo la galga de la derecha (galga 3) la que más deformación presenta. Se puede observar con mucha claridad el cambio brusco de pendiente que sufren ambas a los 7000 Newton.

De nuevo se muestran a continuación las imágenes del ARAMIS para los mismos puntos dados (previo a carga crítica teórica de pandeo, 30% superior a dicha carga crítica y a un porcentaje elevado de la carga última). En este caso las fotografías de la placa plana Mixta son las figuras 8.50, 8.51 y 8.52.

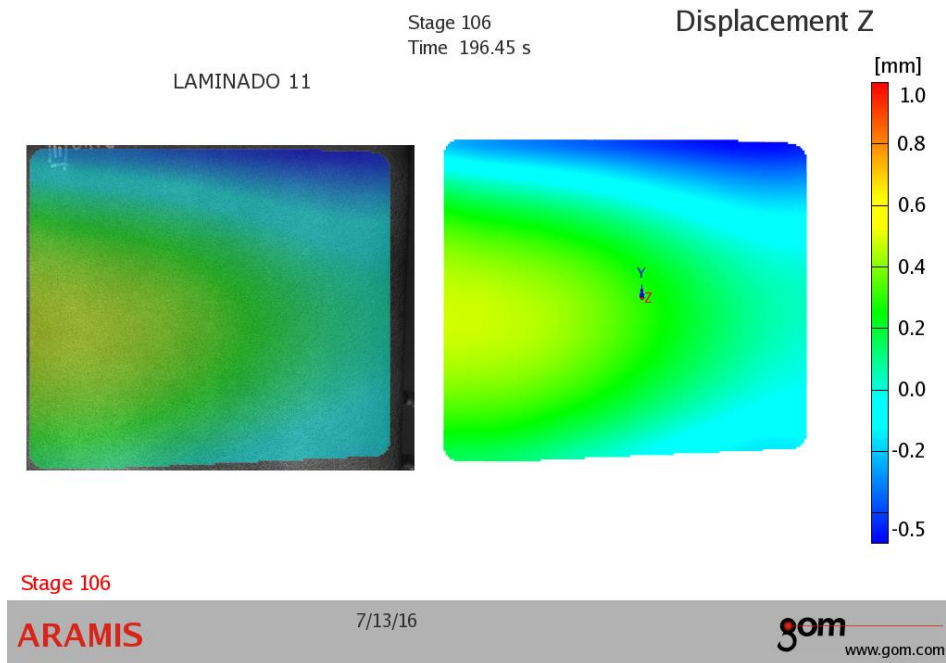


Figura 8.50: Desplazamiento en Z del laminado 7 a 2500 N de carga.

En la zonas izquierda y central de la placa existe un desplazamiento positivo de pequeño orden, mientras que tanto en la franja inferior como superior se puede ver un desplazamiento negativo de medio milímetro.

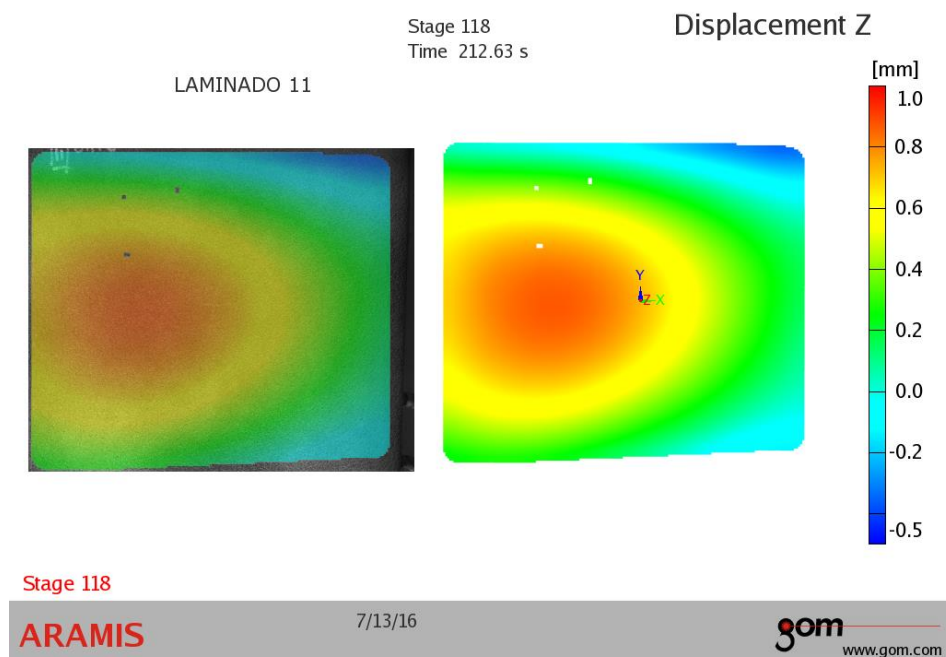
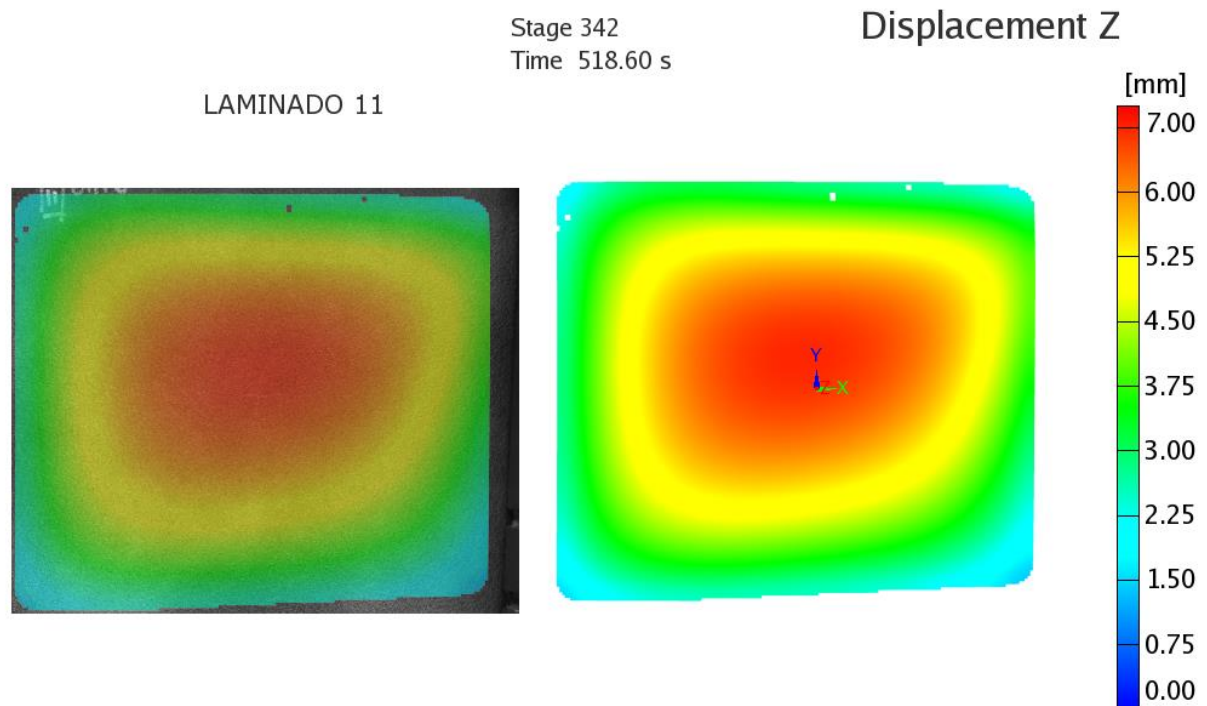


Figura 8.51: Desplazamiento en Z del laminado 7 a 3900 N de carga.

Se puede apreciar como la zona de la izquierda con desplazamiento positivo ha ido aumentando y centrándose, asemejándose claramente a un modo 1 de pandeo teórico para la placa mixta. En las esquinas superior e inferior derecha aún se vislumbra desplazamiento negativo.



Stage 342

ARAMIS

7/13/16

gom
www.gom.com

Figura 8.52: Desplazamiento en Z del laminado 7 a 16000 N de carga.

Se aprecia claramente un desplazamiento muy acusado en el centro de la placa mostrando claramente el primer modo de pandeo. Este primer modo no muestra una forma tan circular como en el caso teórico debido a que la disposición de las láminas afecta en la práctica.

El laminado 8 nos deja las imágenes de las figuras 8.53, 8.54 y 8.55.



Figura 8.53: Desplazamiento en Z del laminado 8 a 2500 N de carga.

Se aprecia un desplazamiento negativo en el eje Z distribuido por toda la placa excepto en el borde izquierdo donde en las zonas superior e inferior se puede observar que comienza a producirse un desplazamiento positivo.

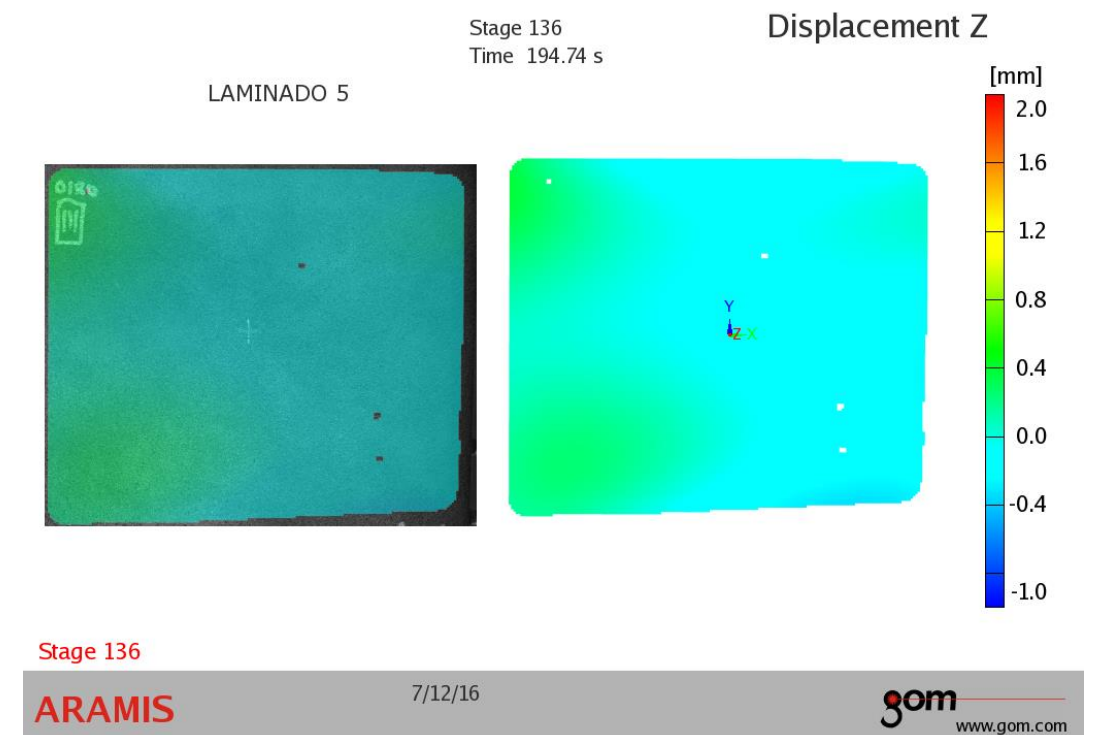


Figura 8.54: Desplazamiento en Z del laminado 8 a 3900 N de carga.

Se agranda la zona pegada al borde izquierdo que presenta el desplazamiento positivo (por ahora de menos de 1 mm) y también comienza a vislumbrarse otra zona de desplazamiento positivo en la parte superior del borde derecho.

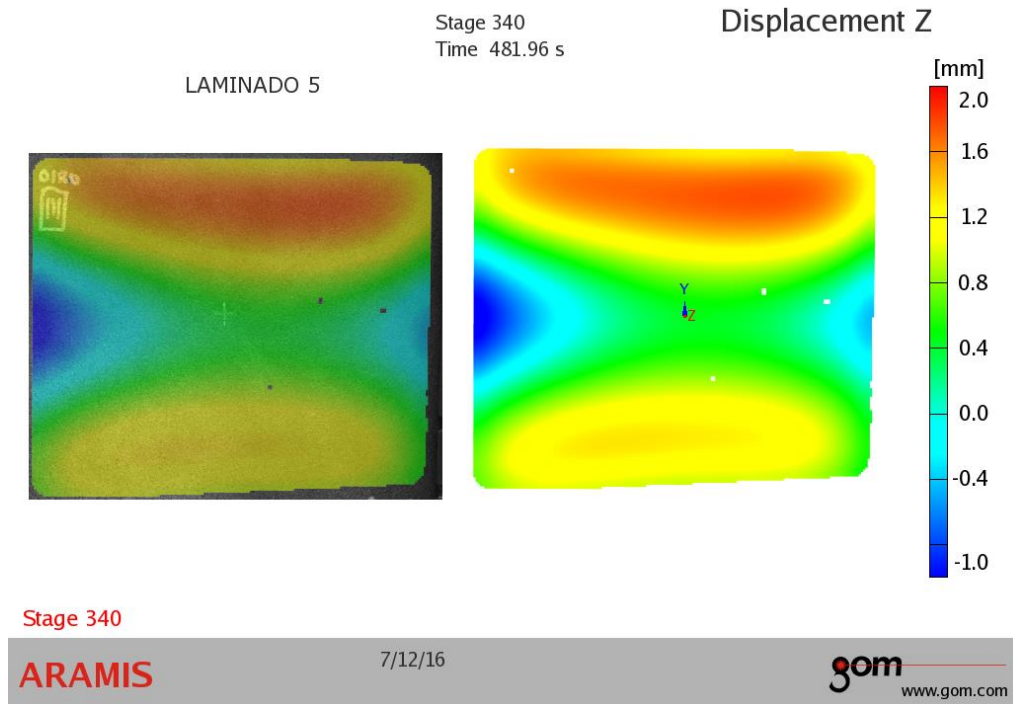


Figura 8.55: Desplazamiento en Z del laminado 8 a 16000 N de carga.

En esta figura se aprecian tres zonas claramente diferenciadas, una que ocupa toda la banda superior y con un desplazamiento positivo de hasta 2 mm, otra inferior casi simétrica a esta, pero con un desplazamiento menor y por último una banda central que tenía desplazamiento negativo pero que está sufriendo un cambio hacia desplazamiento positivo, de la que solo se aprecian ya en la imagen dos zonas laterales con desplazamiento negativo. En las imágenes posteriores se impone el desplazamiento positivo en toda la probeta.

Las fotos correspondientes al noveno laminado son las figuras 8.56, 8.57 y 8.58.

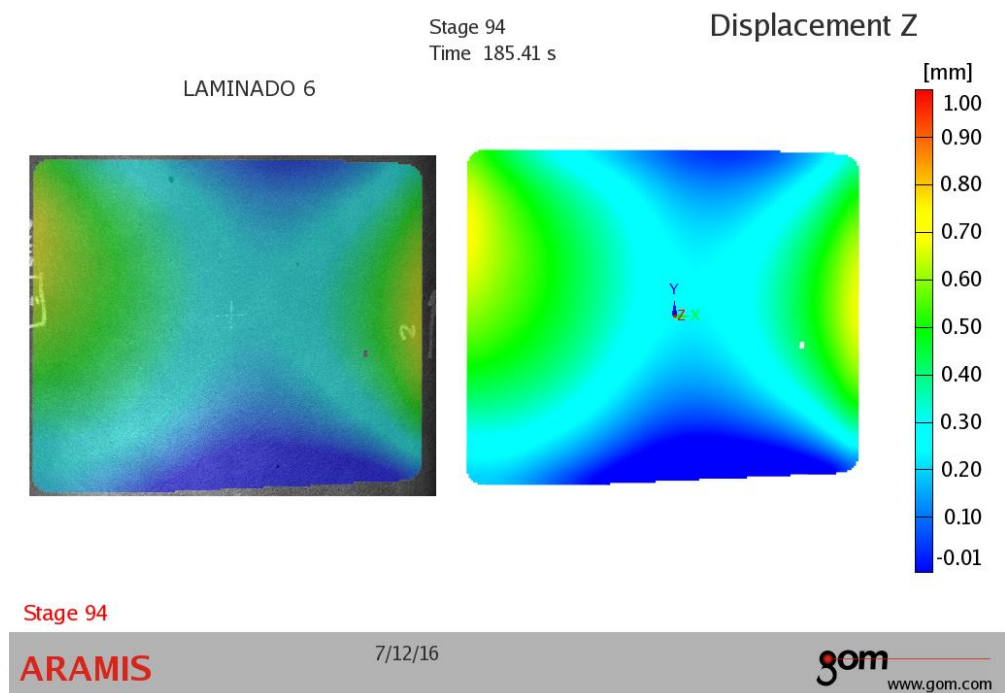


Figura 8.56: Desplazamiento en Z del laminado 9 a 2500 N de carga.

A este nivel de carga se aprecian dos zonas a la izquierda y derecha con desplazamiento positivo y una zona central en la que hay un desplazamiento negativo o prácticamente nulo.

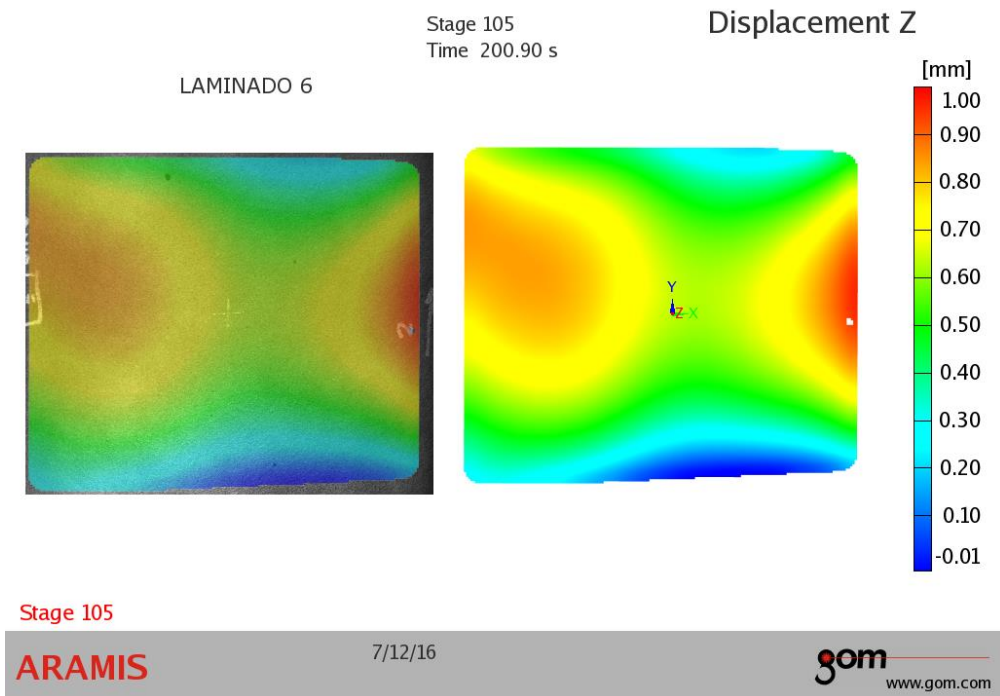


Figura 8.57: Desplazamiento en Z del laminado 9 a 3900 N de carga.

Sigue aumentando la zona de desplazamiento positivo a ambos lados de la placa, con una zona central que también muestra un desplazamiento positivo, pero de menor valor. En los extremos superior e inferior seguimos con un desplazamiento prácticamente nulo.

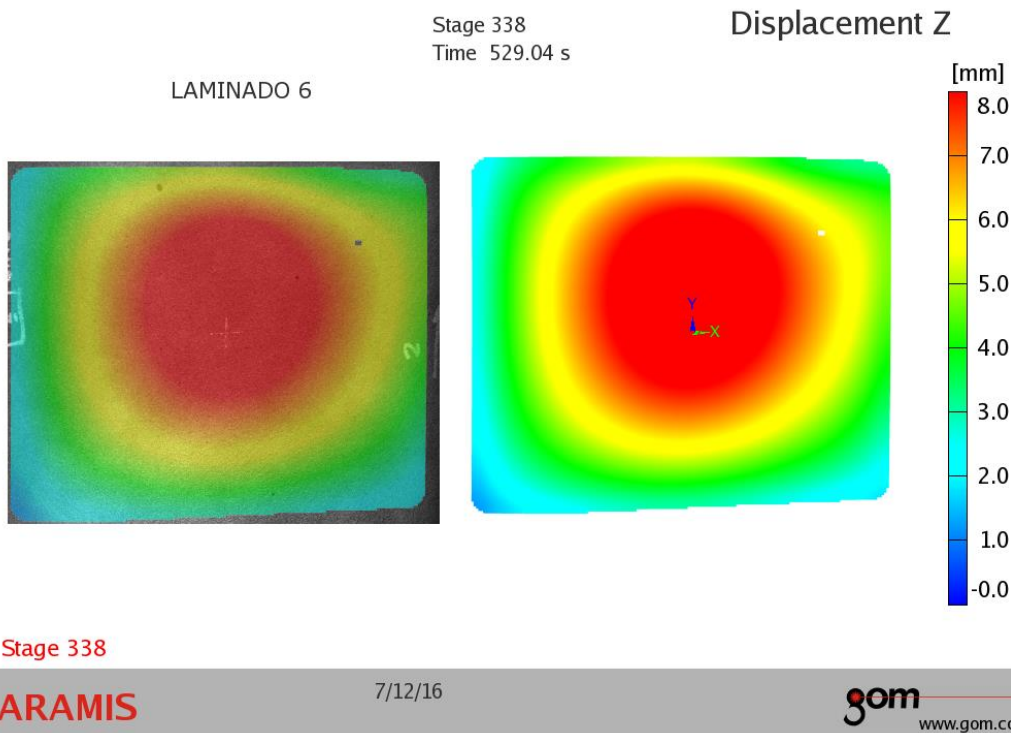


Figura 8.58: Desplazamiento en Z del laminado 9 a 15000 N de carga.

La fotografía muestra un gran desplazamiento (de hasta 8 mm) positivo en el eje Z centrado en la placa, si bien prácticamente toda la superficie presenta ya valores de desplazamientos positivos importantes. Se observa con facilidad que estamos ante el primer modo de pandeo y además en este caso muestra una forma muy parecida a la teórica.

8.1.3.1 Comparación entre las placas Mixtas

Lo primero que se toma en consideración para comparar son las gráficas de carga frente a desplazamiento. En el caso de estos tres laminados, la zona de ajuste que vemos al inicio no tiene grandes diferencias entre la placa plana y las deformadas, cosa que si ocurría en otras comparativas anteriores. Si nos fijamos en el laminado 7, tiene un cambio de pendiente brusco en torno a 10000 Newton. Este cambio de pendiente brusco no se da en el ensayo del laminado 8 en el que el cambio de pendiente es mucho más progresivo, sin embargo sí lo tenemos presente en el laminado 9, aunque a un nivel de carga menor, puesto que se da sobre los 6500 Newton. En los dos laminados que se da el cambio brusco de pendiente (7 y 9) el resto del ensayo a partir de dicho cambio es muy lineal, prolongándose hasta el final del ensayo.

Se procede a continuación a comparar los resultados de las galgas extensométricas por posición como se realizó en las dos comparativas anteriores. Así, compararemos las tres galgas en posición vertical del laminado 7 con las galgas del laminado 8 (figura 8.59) y las tres galgas en posición horizontal del laminado 7 con las galgas del laminado 9 (figura 8.60).

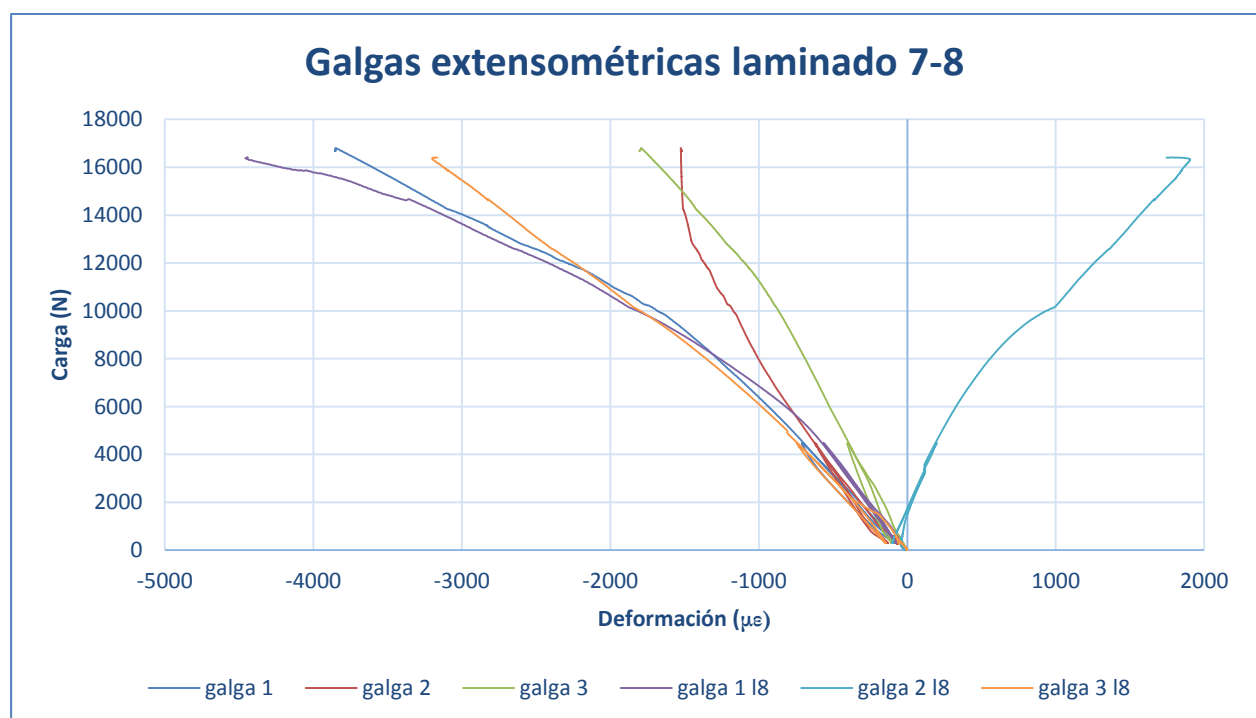


Figura 8.59: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 7 y 8.

Como ya se ha explicado antes la galga central del laminado ha sufrido una tracción, por lo que es difícilmente comparable con las demás galgas. Esta sufre un cambio de pendiente notable a los 10000 Newton. Se observa en la gráfica que las galgas situadas en la parte superior (galgas 1 de ambos laminados) se han comportado de forma muy parecida a lo largo de todo el ensayo. Además, se ve que la galga 3 del laminado 8 también ha tenido un comportamiento similar a estas, más similar incluso que a la galga del laminado 7 que se encuentra en la misma posición, que ha sufrido unas deformaciones menores durante el proceso. Todas excepto la galga central del laminado 7 tienen un comportamiento análogo, en el sentido de que a medida que aumentamos la carga, las deformaciones sufridas cada vez van aumentando más, teniendo siempre una evolución de su pendiente decreciente. En cambio, la galga 2 del laminado 7 llegada a un punto sufre un cambio de pendiente a partir del cual las deformaciones se mantienen casi constantes.

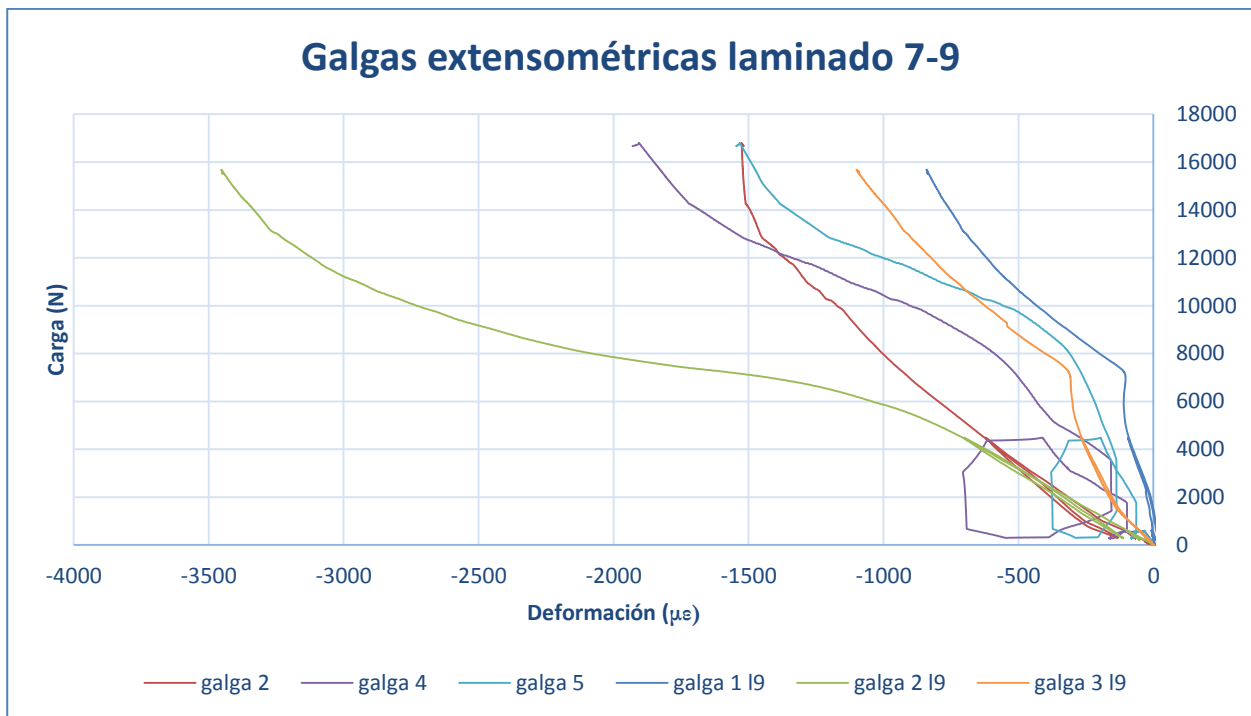


Figura 8.60: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 7 y 9.

En esta gráfica no se tiene una asociación tan clara como ocurría en la anterior. Las galgas centrales (galga 2 en ambos laminados) tienen un comportamiento parecido a niveles de carga bajos, pero una vez superados los 4000 N el nivel de deformaciones que sufre la perteneciente al laminado deformado es muy superior al que sufre su homóloga de la placa plana. En las galgas situadas en la izquierda (galgas 4 y 1 I9) tienen una evolución de su pendiente parecida, toda vez que ambas sufren un cambio de pendiente en el entorno de los 8000 N y siguen con pendiente creciente hasta el final del ensayo, si bien la correspondiente al laminado plano tiene mayores deformaciones a todos los niveles de carga. Por último, las galgas de la derecha son las que tienen un comportamiento más parecido a lo largo de todo el ensayo pues se mueven en niveles de deformación parecidos. En este caso no hay una que predomine en deformaciones sobre la otra ya que desde el inicio del ensayo hasta unos 10300 N es la galga de la placa deformada la que sufre mayor deformación, mientras que a partir de esa carga la galga de la placa plana sufre unas deformaciones superiores.

8.1.4 Placas de fibra a 45°/-45°

El laminado plano de las láminas a 45°/-45° ha sido capaz de aguantar la carga solicitada sin observarse ninguna rotura de importancia. Así, podemos observar su aspecto final en la figura 8.61.

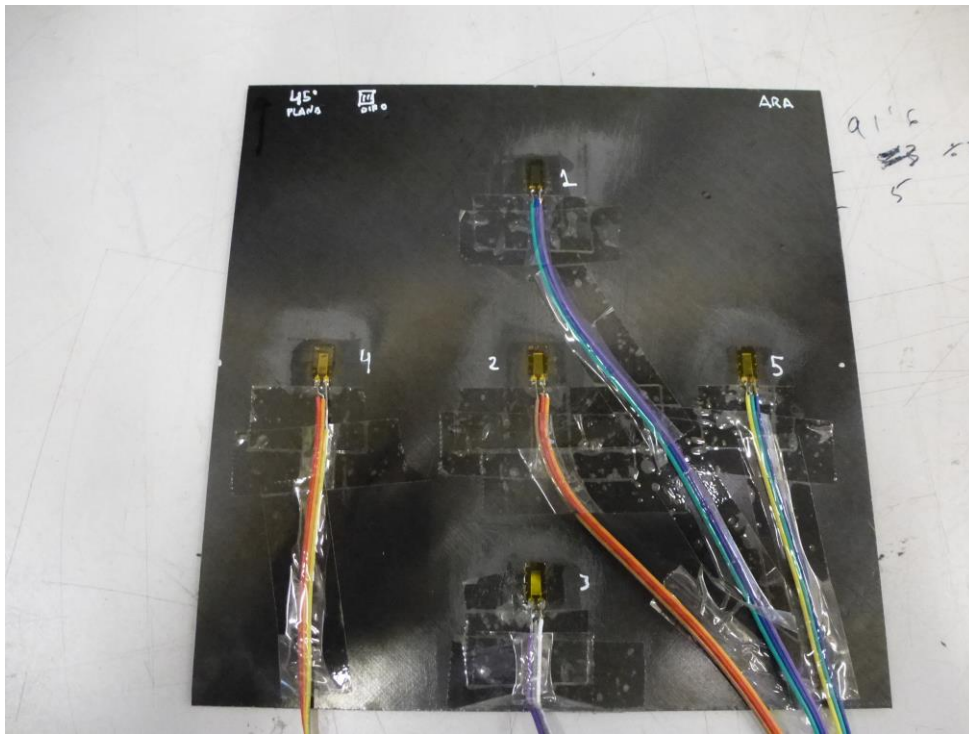


Figura 8.61: Laminado 10 tras haber sido ensayado.

El laminado con las direcciones 1 y de la carga coincidentes no muestra tampoco signo alguno de perder su capacidad portante, resistiendo las cargas que le hemos incidido. Esto se observa en la figura 8.62.

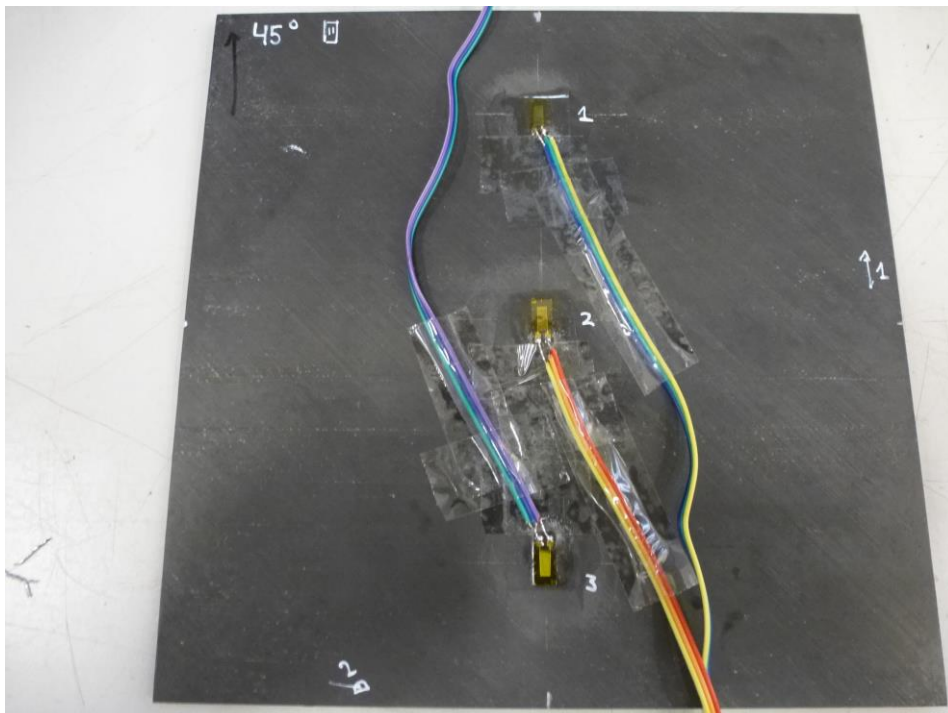


Figura 8.62: Resultado del laminado 11.

Al igual que las otras dos placas con configuraciones análogas, el laminado 12 (una onda en la dirección de la carga) ha sido capaz de aguantar el ensayo sin sufrir ninguna rotura crítica. Se muestra su resultado final en la figura 8.63.

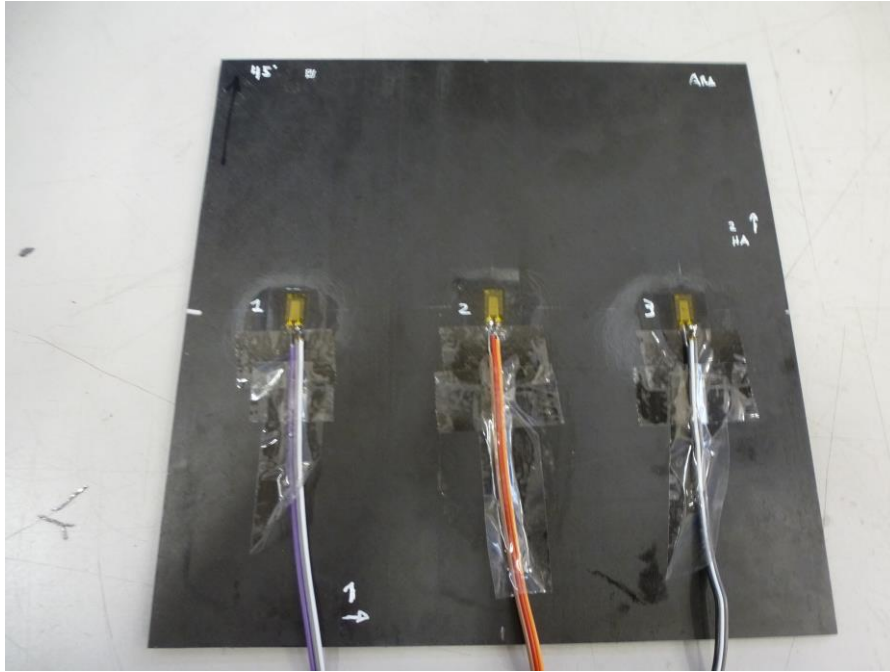


Figura 8.63: Aspecto del laminado duodécimo tras su ensayo.

Se muestran a continuación los datos correspondientes a las placas cuyas configuraciones estaban basadas en laminados a 45 y a menos 45 grados. Se procede de la misma forma que en los casos anteriores, comenzando con las gráficas de carga frente a desplazamiento, correspondiendo al laminado 10 la figura 8.64, al 11 la 8.65 y al 12 la figura 8.66.

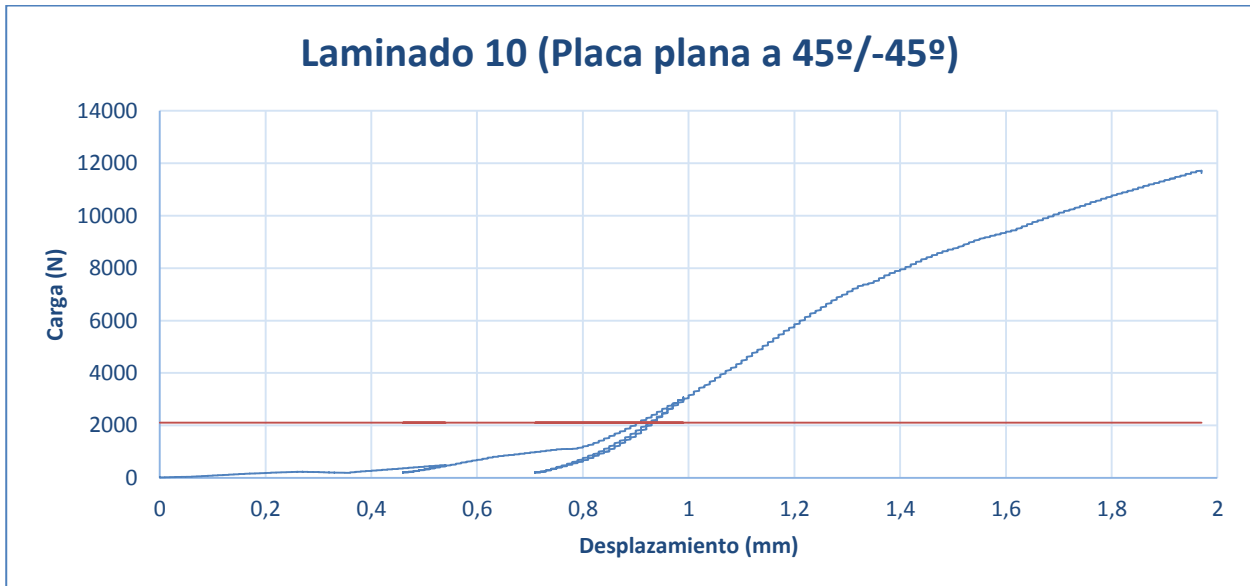


Figura 8.64: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa plana 45°/-45°.

En esta gráfica se observa una primera zona con una pendiente muy baja, se puede ver que la placa sufre bastante desplazamiento con unos niveles de carga muy bajos. Cuando lleva 0.8 milímetros desplazados sufre un cambio en la pendiente y la gráfica se mantiene lineal con dicha pendiente hasta los 7000 Newton, donde otra vez cambia a una pendiente más reducida que se mantiene hasta el final del ensayo.

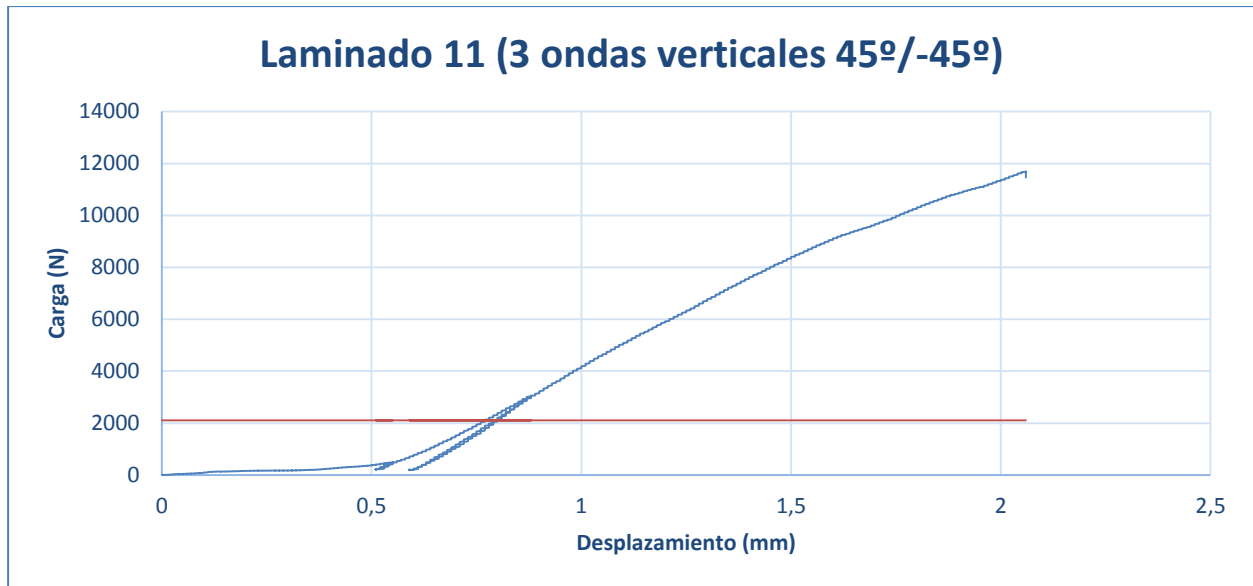


Figura 8.65: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas verticales 45°/-45°.

El ensayo del laminado 11 tiene una zona de ajuste al inicio al igual que el resto, pero menor que la del laminado plano. Tras esta, cambia de pendiente sobre los 600 N de carga y a partir de ahí tiene un desarrollo bastante lineal, con pequeñas modificaciones de pendiente, pero sin puntos de inflexión claros, lo que se mantiene hasta el final.

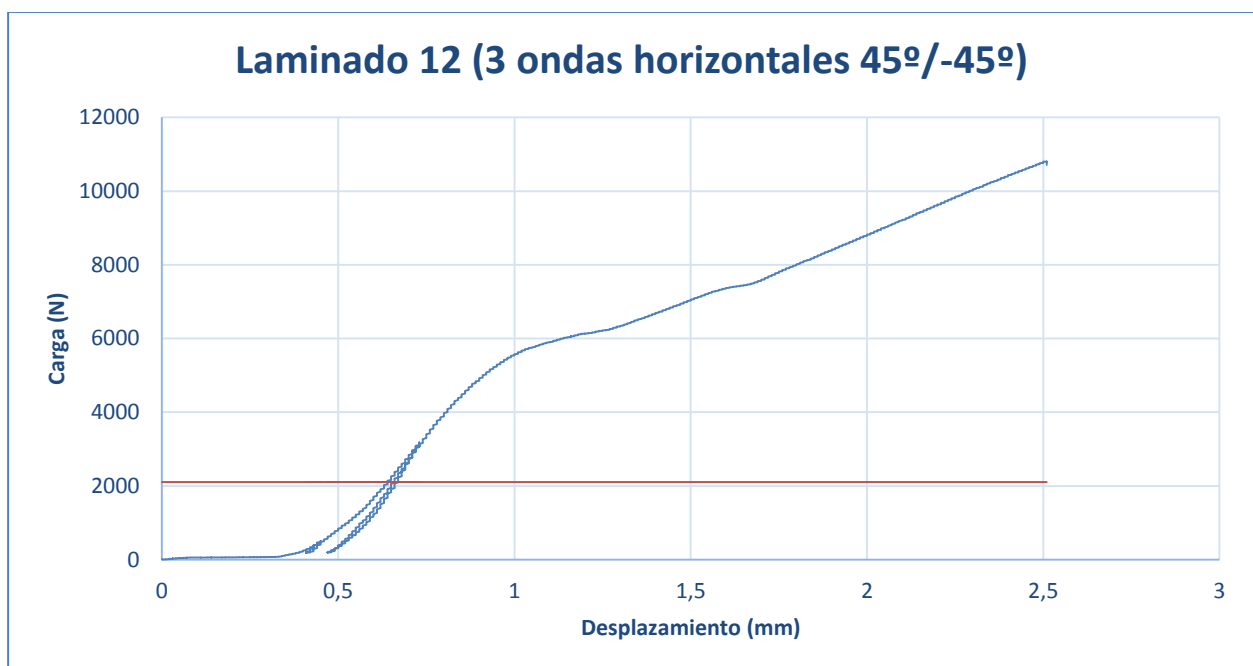


Figura 8.66: Gráfica Carga vs Desplazamiento en la placa de 3 ondas horizontales 45°/-45°.

En esta gráfica la zona de ajuste es mucho menor que en las dos anteriores y sufre mucho antes el primer cambio de pendiente. Además, aquí se puede observar un importante punto de inflexión sobre los 5500 Newton en el que la pendiente cambia de manera importante.

El siguiente paso es mostrar las gráficas obtenidas con los datos extraídos de las galgas extensométricas, lo que se muestra en las figuras 8.66, 8.67 y 8.68.

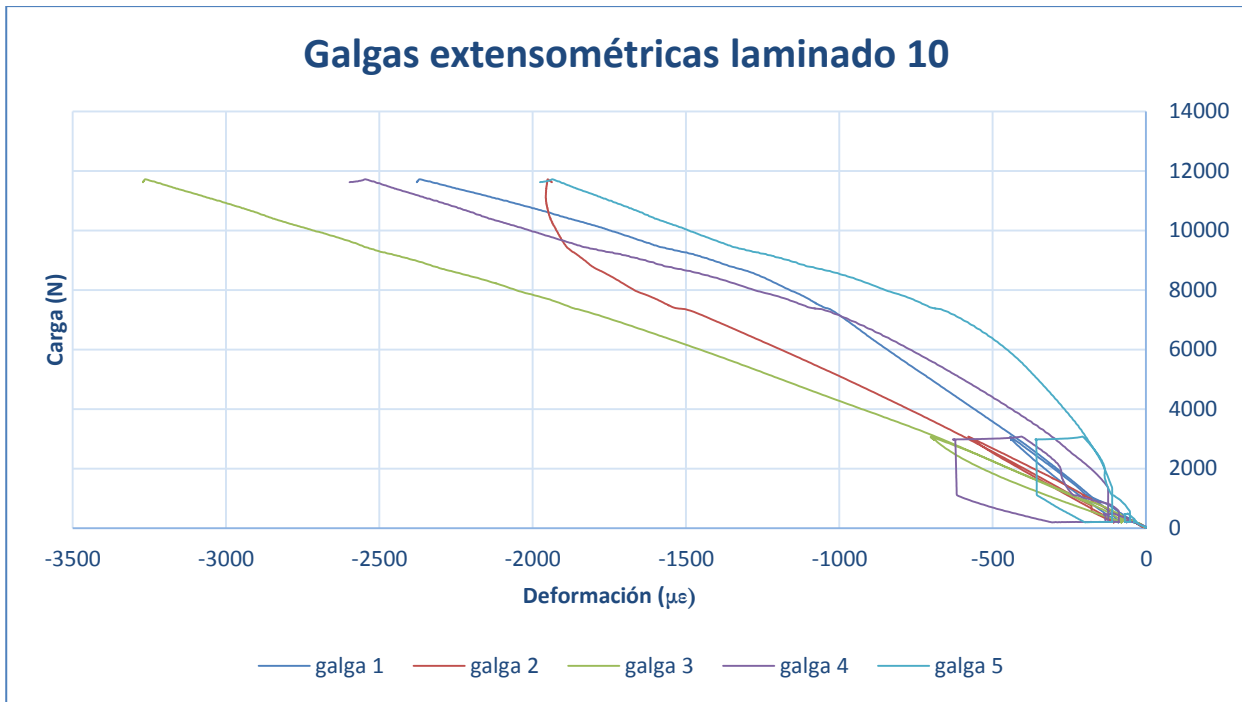


Figura 8.66: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa plana 45°/-45°.

Las galgas extensométricas en este ensayo han tenido un comportamiento bastante semejante entre ellas excepto quizás la galga de la posición central (galga número 2) ya que todas tienen un rango grande en el que se comportan de forma lineal y su pendiente es decreciente en todo el rango. Aún así, las galgas 1 y 5 si sufren un cambio de pendiente acusado, mientras que el de las otras es más suave o casi inexistente. Por su parte la galga central se encuentra en el mismo rango que el resto, pero cerca del final del ensayo sufre un cambio de pendiente hacia una prácticamente vertical con lo que deja de aumentar la deformación que está soportando.

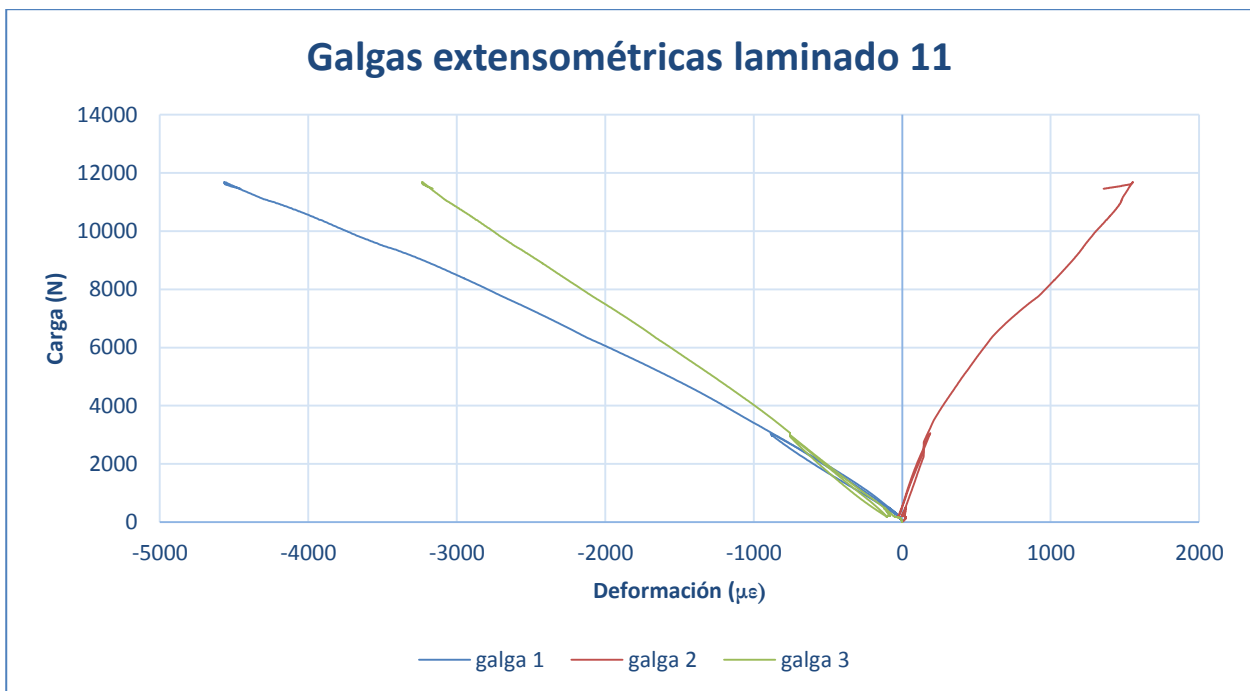


Figura 8.67: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas verticales 45°/-45°.

Al igual que en los ensayos anteriores en los que se da esta configuración, la placa vuelve a tener un modo de pandeo que lleva a la galga central a una deformación positiva. Se puede observar que las galgas en este ensayo han sufrido una deformación muy lineal durante todo el ensayo, sin tener variaciones importantes en la pendiente a medida que aumentaba la carga.

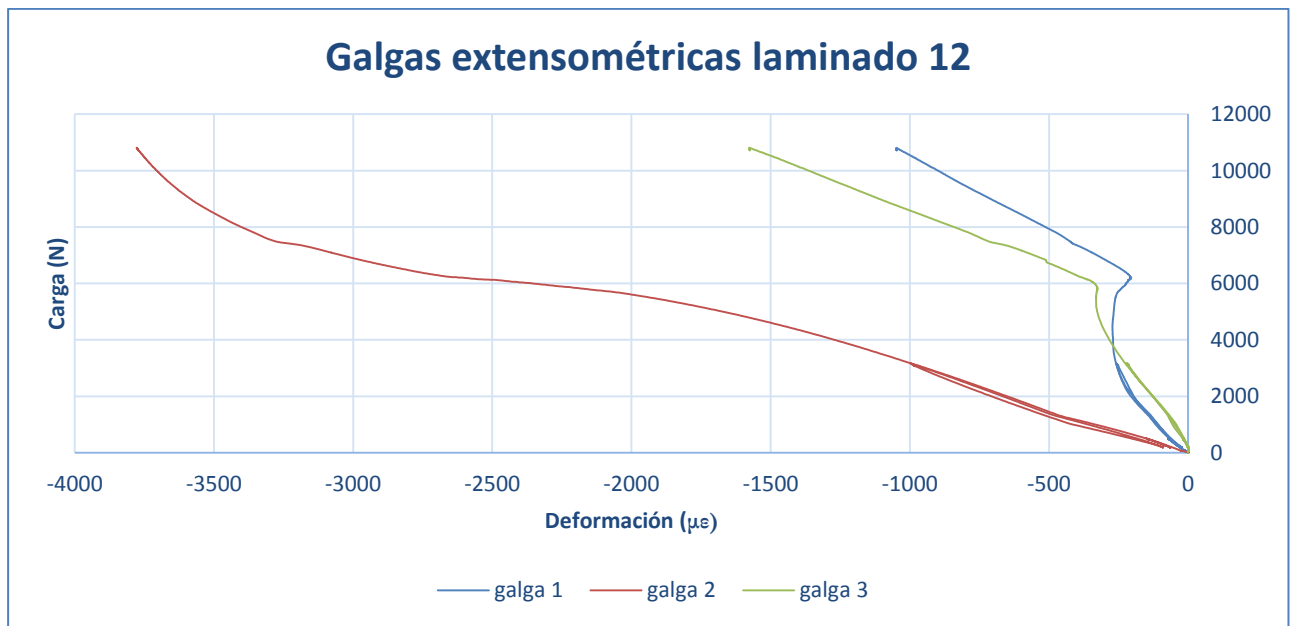


Figura 8.68: Gráfica de las galgas extensométricas de la placa con tres ondas horizontales 45°/-45°.

El comportamiento de las galgas durante este ensayo es muy similar al de las galgas del ensayo 9. Se tiene por un lado la galga central que sufre una gran deformación y con una pendiente que varía de forma muy progresiva a lo largo de todo el ensayo, generando una gráfica suave. Por el otro lado se encuentran las galgas de los lados (1 y 3) que tienen primero una pendiente muy acusada, hasta que sufren un punto de inflexión alrededor de los 6000 Newton, a partir del cual tienen un comportamiento lineal hasta que el ensayo acaba. En este caso, comienza con una deformación mayor la galga de la izquierda, si bien a partir de los 4000 Newton los papeles se invierten y es la galga de la derecha la que experimenta mayores deformaciones (de esas dos se entiende, la galga central es la que mayores deformaciones soporta durante todo el ensayo).

Se procede ahora a mostrar las fotografías procesadas por el sistema ARAMIS para estos 3 laminados. Como siempre, se muestran un punto de carga inferior a la crítica teórica del primer modo de pandeo, otro con una carga un 30% mayor que dicha carga crítica y uno más cerca del final del ensayo, pero sin llegar a la carga última. Las imágenes correspondientes al laminado 10 son las figuras 8.69, 8.70 y 8.71.

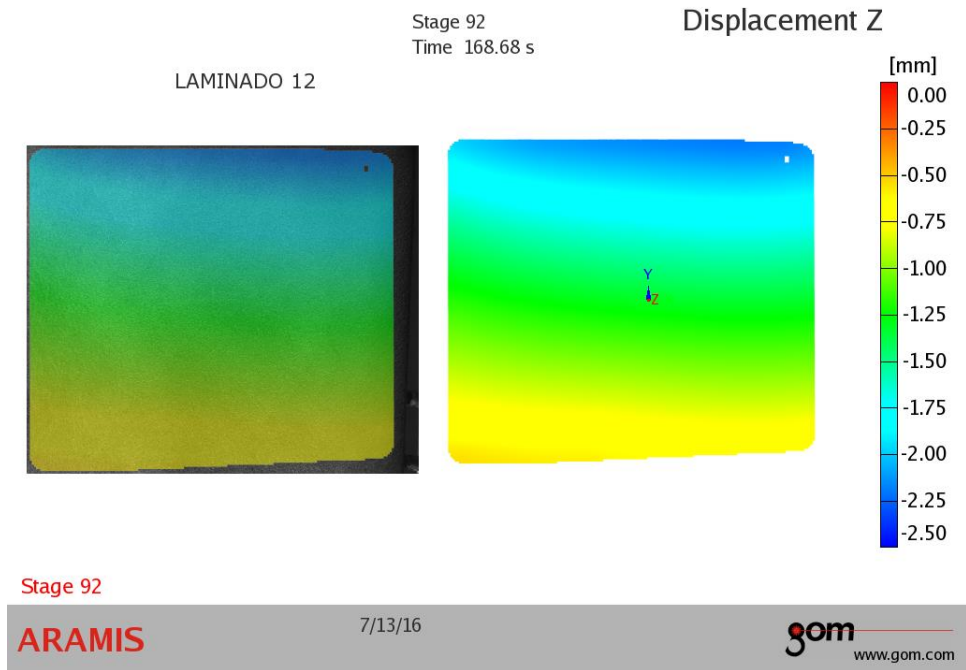


Figura 8.69: Desplazamiento en Z del laminado 10 a 1800 N de carga.

Se observa un desplazamiento negativo en toda la placa, siendo más acusado en la franja superior, llegando a superar dos milímetros de magnitud.

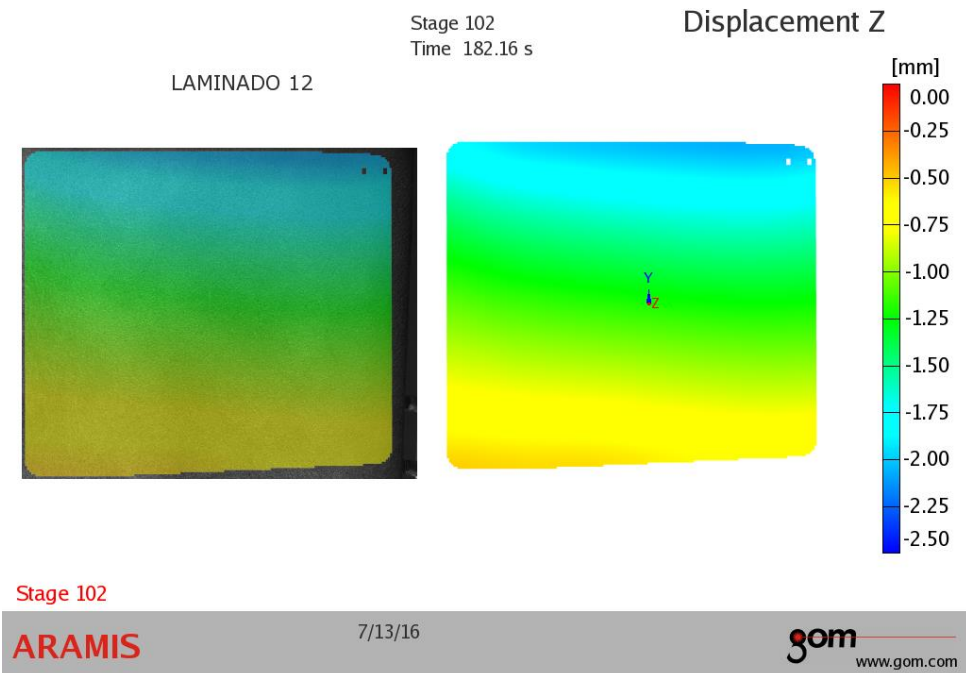
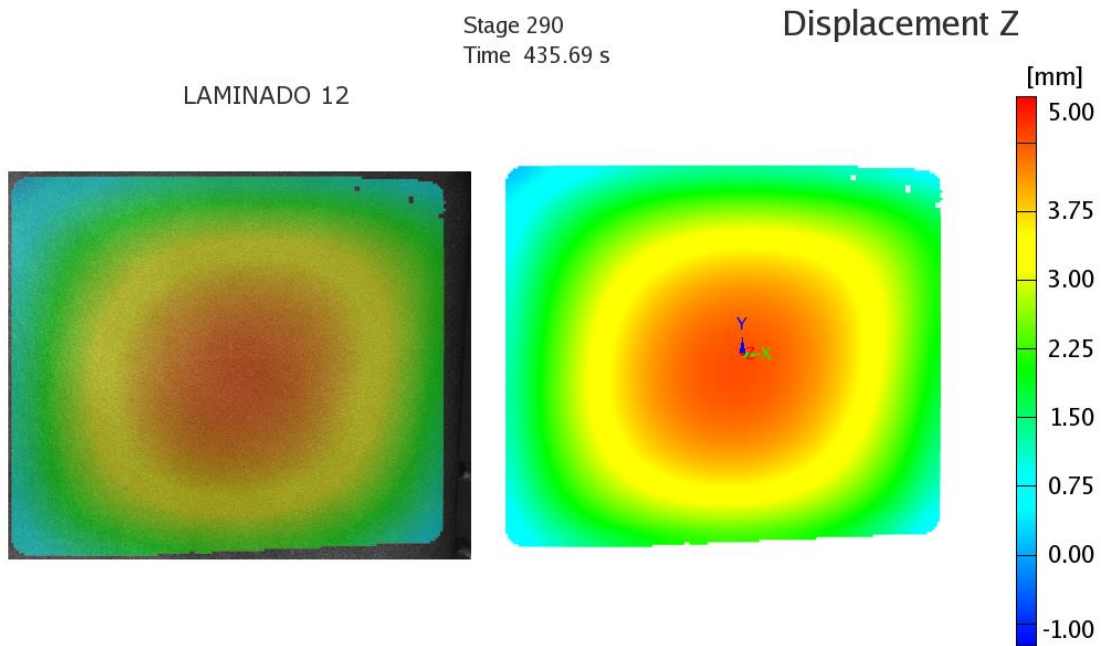


Figura 8.70: Desplazamiento en Z del laminado 10 a 2750 N de carga.

No se aprecian cambios sustanciales desde la fotografía anterior más allá de un pequeño decremento de los valores del desplazamiento, a pesar de haber superado la carga crítica teórica.



Stage 290

ARAMIS

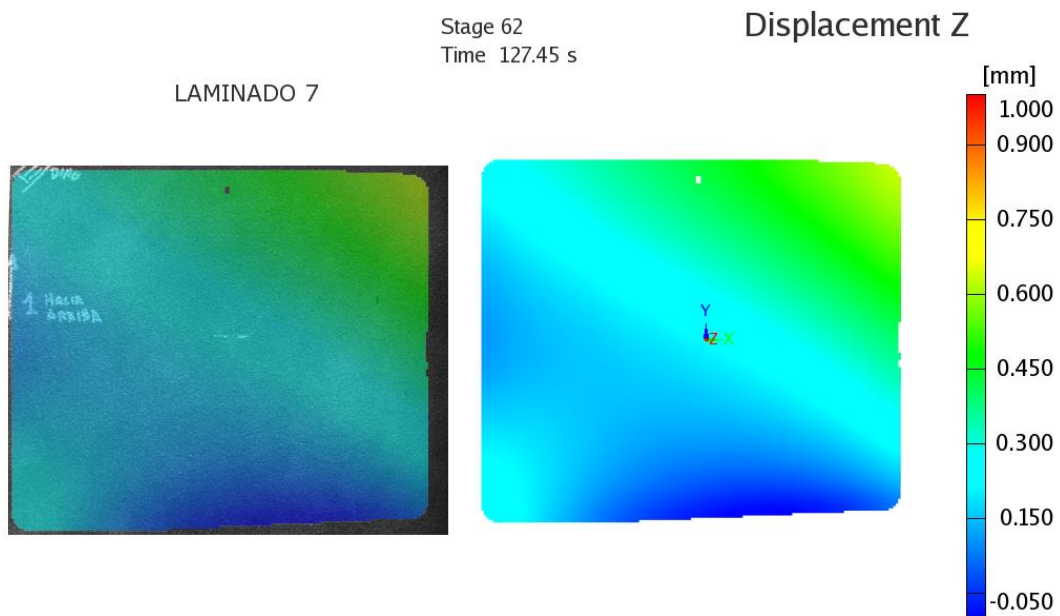
7/13/16

gom
www.gom.com

Figura 8.71: Desplazamiento en Z del laminado 10 a 11500 N de carga.

En esta fotografía el desplazamiento se encuentra centrado y menos acusado a medida que nos alejamos del centro, mostrando un modo 1 de pandeo teórico muy claro en el que se puede apreciar una forma distinta a la teórica circular debido a la disposición de las láminas a 45°.

El laminado 11 nos deja las imágenes de las figuras 8.72, 8.73 y 8.74.



Stage 62

ARAMIS

7/12/16

gom
www.gom.com

Figura 8.72: Desplazamiento en Z del laminado 11 a 1800 N de carga.

Se observa en las esquinas inferior izquierda y sobre todo en la superior derecha se aprecian ya zonas con desplazamiento positivo, si bien todavía tiene valores pequeños pues no se acercan al milímetro desplazado.

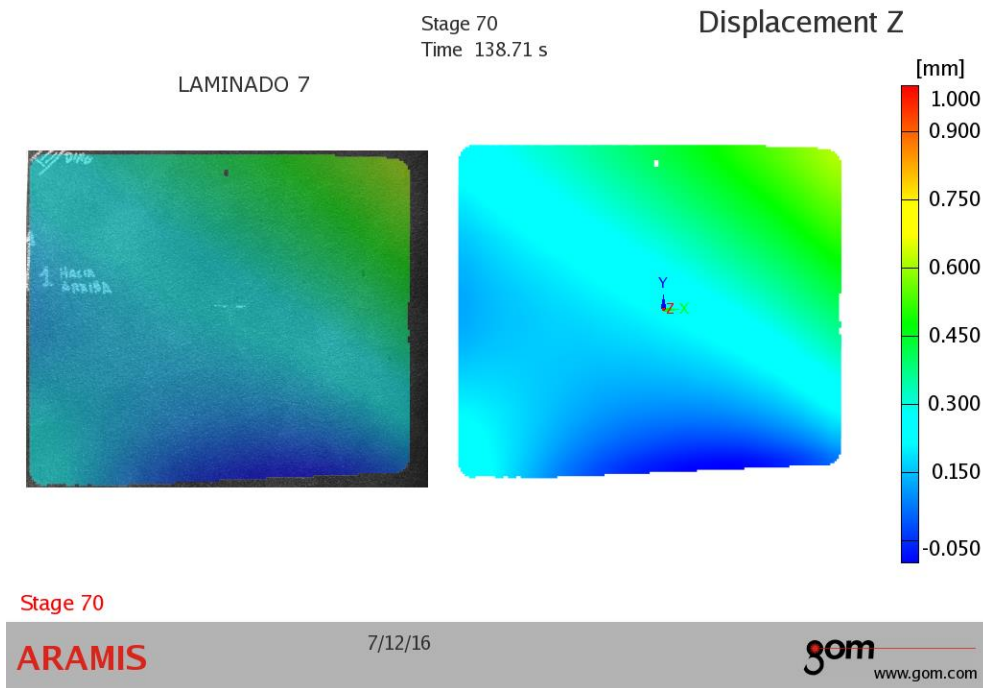


Figura 8.73: Desplazamiento en Z del laminado 11 a 2750 N de carga.

No pasa mucho tiempo entre ambas imágenes debido a que el nivel de carga aumenta rápidamente, por lo que se muestra una imagen muy similar a la anterior donde las zonas de desplazamiento positivo van creciendo.

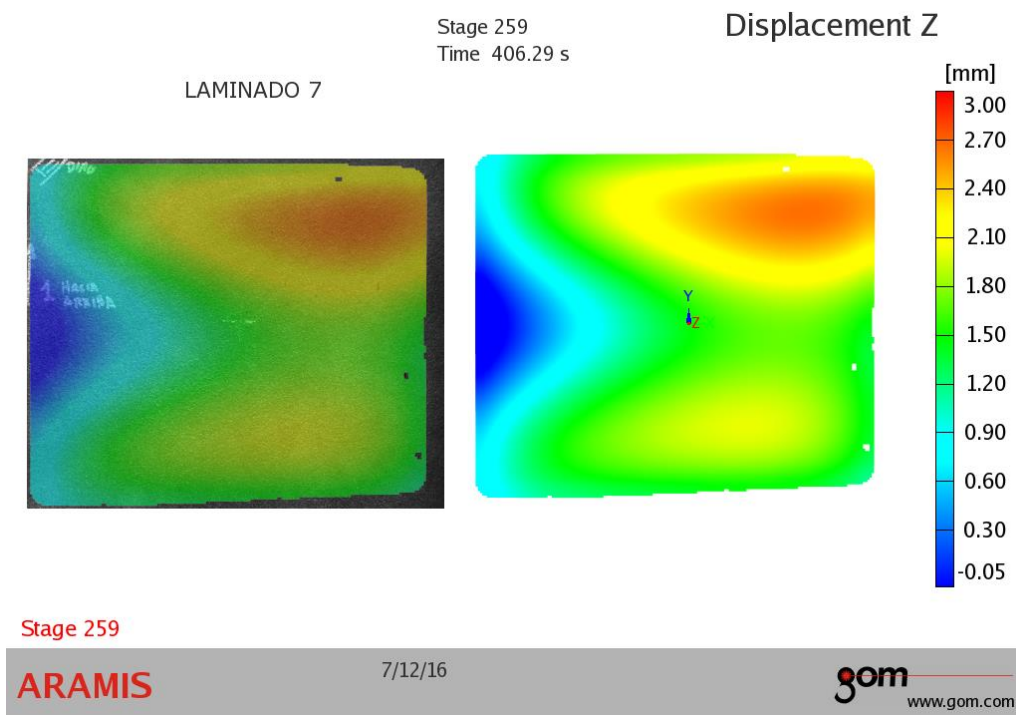


Figura 8.74: Desplazamiento en Z del laminado 11 a 9200 N de carga.

Claramente se ve un modo 4 de pandeo en el que tenemos dos bandas superior e inferior en la que el desplazamiento positivo en el eje Z predomina, mientras que en la banda central dicho desplazamiento es menos acusado. En la zona de la izquierda hay una superficie que continúa todavía con desplazamiento prácticamente nulo.

Las fotos correspondientes al duodécimo laminado son las figuras 8.75, 8.76 y 8.77.



Figura 8.75: Desplazamiento en Z del laminado 12 a 1800 N de carga.

El desplazamiento en Z en esta imagen es prácticamente nulo en toda la placa, excepto en la zona inferior derecha, donde se aprecia una pequeña zona con valores positivos. Esto ocurre debido a una mala calibración de los resultados del ARAMIS para esta imagen (y la siguiente).



Figura 8.76: Desplazamiento en Z del laminado 12 a 2750 N de carga.

Al igual que en la imagen anterior tenemos un mal calibrado del resultado del ARAMIS por lo que no se pueden extraer conclusiones de esta imagen.

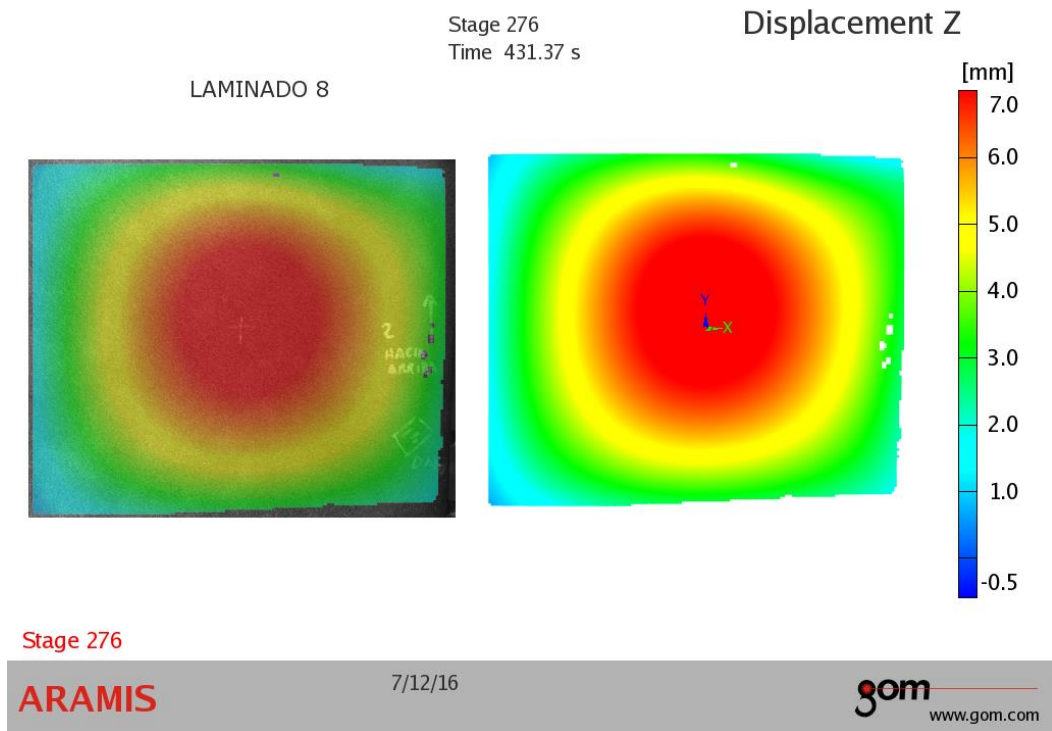


Figura 8.77: Desplazamiento en Z del laminado 12 a 9200 N de carga.

De nuevo se aprecia de forma clara el primer modo de pandeo, con unos valores de desplazamiento en el eje Z grandes para la zona central (sobre 7 milímetros) y una distribución radial que ocupa casi toda la placa en su totalidad.

8.1.4.1 Comparación entre las placas de 45°/-45°.

Lo primero es observar las gráficas de carga frente a desplazamiento. Se observa que, una vez pasada la primera zona de ajuste, las gráficas de los laminados 10 y 11 son semejantes. Ambas tienen una evolución bastante lineal, especialmente la placa 11, ya que la placa plana en la parte final del ensayo sí que decrece su pendiente, pero de forma muy suave. En cambio, la gráfica de la placa de la configuración 12 no se parece a estas dos, pues tiene un punto de inflexión muy acusado en torno a los 5500 Newton. A partir del cambio de pendiente sigue también un desarrollo lineal.

A continuación, se muestran las gráficas comparativas de las galgas extensométricas, en la figura 8.78 la comparación entre el laminado 10 y el laminado 11 y en la figura 8.79 entre los laminados 10 y 12.

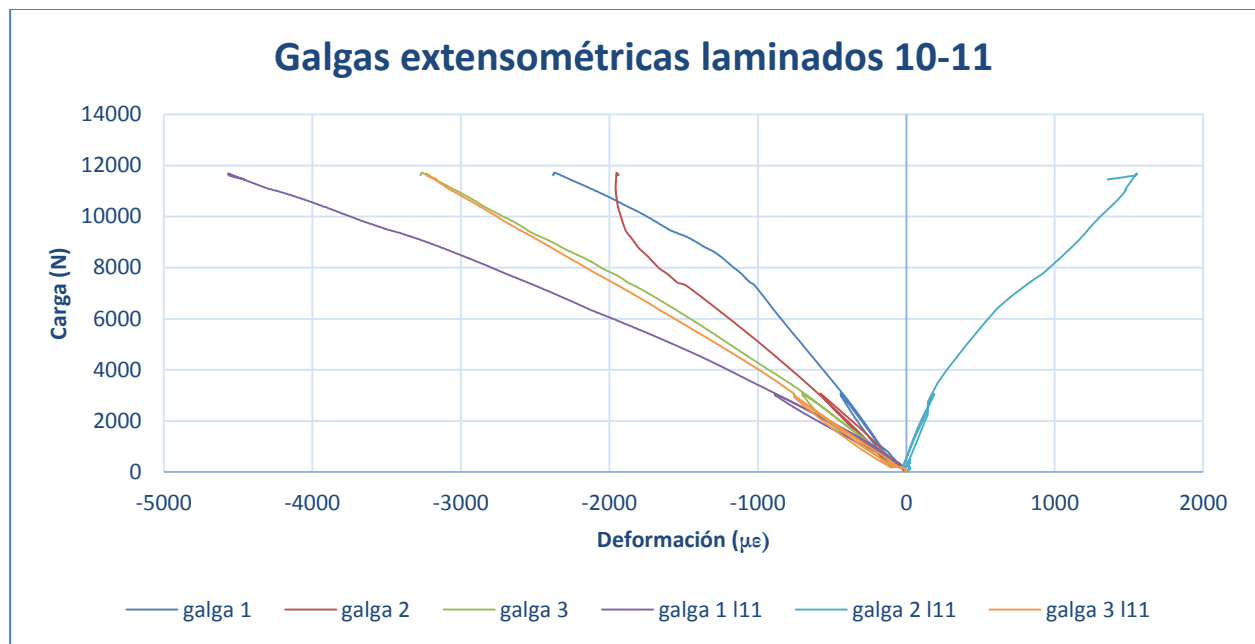


Figura 8.78: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 10 y 11.

Lo primero que se puede observar en la gráfica es que la galga central del laminado 11 es la única galga que ha sufrido una deformación positiva. Comparando el resto de galgas, se ve con claridad que las galgas de la derecha (galga 3 en ambas configuraciones) han actuado de forma muy semejante en ambas placas. En cuanto a las galgas de la izquierda la de la placa deformada (laminado 11) ha sufrido mayores deformaciones que la plana, si bien también ha tenido una evolución más suave a lo largo de todo el ensayo, pues la galga de la probeta plana tiene un cambio de pendiente brusco en torno a 8500 Newton.

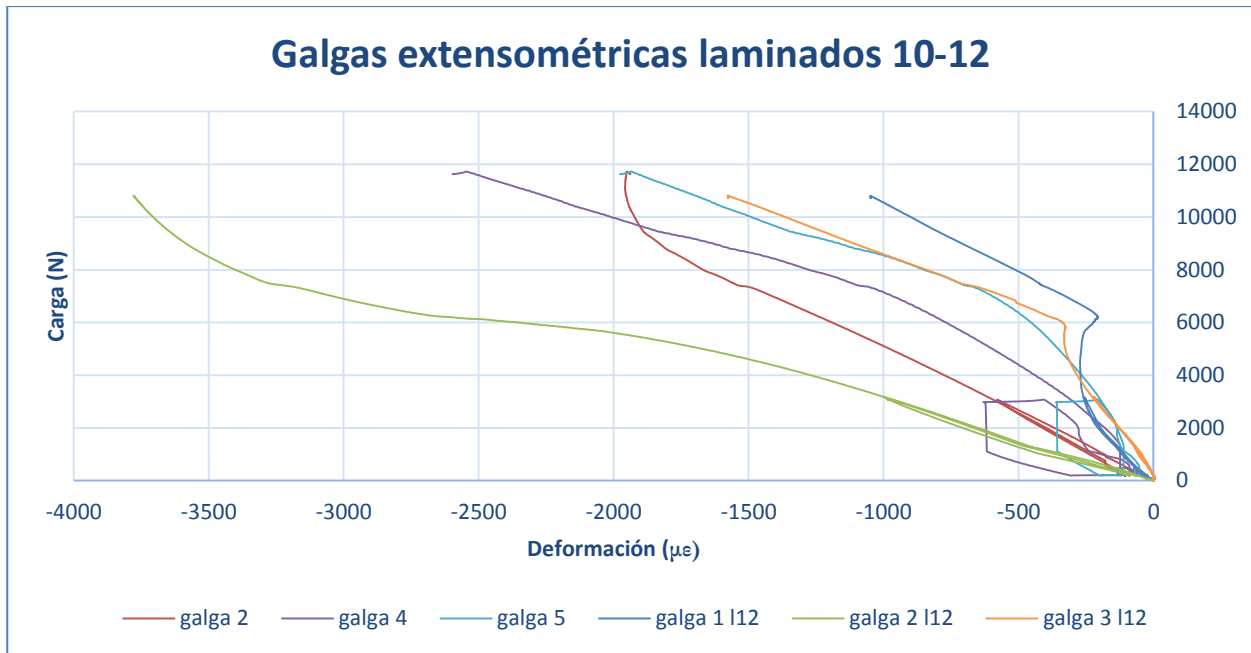


Figura 8.79: Comparación de las galgas extensométricas de los laminados 10 y 12.

En esta gráfica se aprecia que las galgas del centro de cada una de las placas son las que se han llevado una deformación más elevada durante casi todo el ensayo (en la placa plana en torno a los 9000 N sufre un cambio de pendiente a una prácticamente vertical por lo que deja de aumentar el valor de sus deformaciones). Ambas tienen una evolución de su pendiente, pero, excepto al final del ensayo, la evolución es bastante suave. En cuanto a las galgas de la izquierda (galga 4 y galga 1 l12) no tienen una evolución parecida. Las dos sufren un cambio de pendiente, pero en la placa plana es suave mientras que en la deformada este punto de inflexión es muy brusco, además de que el nivel de deformación es superior en la placa plana para todos los niveles de carga aplicados. En el caso de las galgas de la derecha de la placa sí se observan unos valores muy parecidos a lo largo de todo el ensayo. Tienen un cambio de pendiente a la misma altura, sobre los 6000 Newton, si bien dicho cambio tiene una diferencia grande y es que, en el caso de la placa plana, a pesar de ser un cambio importante, se da de forma suavizada, mientras que en el caso de la placa deformada el cambio de pendiente es muy abrupto.

Se da por terminado el apartado de los resultados por lo que se pasa a tratar las conclusiones del proyecto en el siguiente apartado.

9 CONCLUSIONES

En esta sección se realiza un resumen del trabajo realizado, seguido de un análisis de las conclusiones extraídas del trabajo y por último un apartado donde se discuten los posibles desarrollos futuros para esta investigación.

Analizando los objetivos del proyecto, lo primero es aseverar que se ha conseguido el objetivo principal, puesto que se han podido llevar a cabo satisfactoriamente los ensayos experimentales que componían el eje central de este proyecto, entregando una batería de resultados que ha permitido realizar el análisis necesario para ver cómo influyen las condiciones geométricas impuestas en el régimen a postpandeo en placas de material compuesto y la evolución de este.

En cuanto a los objetivos secundarios, el primero se refería a la fabricación de las placas, que se llevó a cabo en el *LERM* sin inconvenientes reseñables a nivel global, dando como resultado unas probetas que han podido ser ensayadas y cuyos comportamientos han sido coherentes con lo que se esperaba. Además, esto se realizó con el mayor ahorro posible de materiales y trabajando siempre en las condiciones necesarias en un laboratorio de materiales compuestos. Por ello, el grado de satisfacción en el proceso de fabricación es alto.

En la realización de los ensayos resaltar que los 12 ensayos previstos se pudieron realizar tal y como se habían planeado, congeniando la máquina de los ensayos con las galgas extensométricas y el sistema ARAMIS. La mayor incógnita se encontraba en el desempeño de las galgas, puesto que en el proyecto final de carrera de D. Rafael A. Roig Ortega fue uno de los inconvenientes que se tradujo en más problemas durante los ensayos. En este proyecto sin embargo se han comportado de acuerdo a lo esperado, al igual que el sistema ARAMIS y la máquina de ensayos, por lo que la realización de los ensayos se puede considerar un éxito.

El estudio de los resultados es el último de los objetivos secundarios. A pesar de la complejidad de la teoría de postpandeo se ha trabajado con todos los resultados obtenidos tanto de la máquina, como de las galgas, sistema ARAMIS y reconocimiento visual de las probetas, realizando un estudio particular y global de los ensayos, realizando comparativas allí donde eran de interés, por lo que se ha podido realizar dicho estudio de forma satisfactoria.

Como conclusión global del proyecto podemos confirmar que es posible la alteración del comportamiento a postpandeo de placas de material compuesto realizando modificaciones en la geometría inicial de las placas. Además, se puede observar también el hecho de que las placas son capaces de asumir una carga mayor que la primera carga crítica de pandeo manteniendo capacidad portante. Esto mantiene abierta una ventana continuista para el estudio de los materiales compuestos a postpandeo, pues un estudio más exhaustivo podría permitir la introducción de esta carga portante soportada más allá del pandeo en los coeficientes de seguridad de la fabricación de distintos elementos estructurales realizados con material compuesto, puesto que hoy en día es habitual tomar como frontera la primera carga crítica de pandeo, cuando no es el límite de carga que pueden soportar estas estructuras. Esto nos permitiría un ajuste mejor de las capacidades de estos materiales, permitiendo un ahorro de material y menor peso en estructuras, lo cual es de un interés capital en la industria aeronáutica.

Estas modificaciones que se podrían realizar en base a estos estudios pueden ser muy importantes y por ello sería necesario un estudio mucho mayor y más profundo del funcionamiento de los distintos elementos en este régimen, tanto a nivel de laboratorio como más adelante a niveles de pruebas reales a escala, etc.

Debido al interés de este campo, se proponen unos desarrollos futuros para poder seguir con el trabajo que se ha realizado en proyectos como este.

Por un lado, sería de gran interés la realización de ensayos como los de este proyecto en serie, es decir, con varias probetas para cada configuración adoptada. Con esto se eliminaría la posible aleatoriedad de un único ensayo por configuración, lo que entregaría un muestreo mayor pudiéndose así sacar conclusiones más definitivas que con una sola probeta ensayada por configuración no se pueden extrapolar como globales.

A su vez, el estudio de nuevas configuraciones que sean de interés por el hecho de utilizarse habitualmente en zonas susceptibles de sufrir postpandeo y ver cómo podrían comportarse para intentar extrapolar dichas conclusiones a la industria o a un estudio más específico.

Por otro lado, ensayos numéricos detallados de las configuraciones adoptadas en este y otros proyectos similares serían muy interesantes, pues al cotejar los datos obtenidos de ensayos experimentales y los que se extraerían de los ensayos numéricos nos ayudarían a comprender mejor el postpandeo y a mejorar posibles fallos de los ensayos experimentales por no ser capaces de reproducir fielmente el modelo buscado.

Estos desarrollos permitirían un avance aún mayor y sería adecuado realizarlos pues los resultados esperanzadores de los proyectos desarrollados hasta el momento invitan al optimismo y a continuar con esta línea de investigación.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rafael A. Roig Ortega. (2015) *Análisis experimental de la influencia de las imperfecciones geométricas en el comportamiento de placas de material compuesto* Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Sevilla.

- [2] Federico París Carballo, José Cañas Delgado, Juan Carlos Marín Vallejo y Alberto Barroso Caro. (2008) *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Sevilla.

- [3] Theodore Von Kármán. (1910) *Festigkeitsprobleme in Maschinenbau*. Encykl der Math.

- [4] Ramesh Chandra and B. Basava Raju. (1973) *Postbuckling analysis of rectangular orthotropic plates*. Structure Science Division, National Aeronautical Laboratory, Bangalore 17, India, 1st edition.

- [5] Antonio Blázquez Gámez and Rafael Picón Carrizosa. (2010) *Analytical and Numerical Models of Postbuckling of Orthotropic Symmetric Plates*. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1st edition.