

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

### Evaluación de las tensiones y deformaciones residuales en uniones solapadas de termoplásticos mediante soldadura por resistencia

Autor: Cristian Montané Palomo

Tutor: José Cañas Delgado

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

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2015





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Evaluación de las tensiones y deformaciones  
residuales en uniones solapadas de termoplásticos  
mediante soldadura por resistencia**

Autor:

Cristian Montané Palomo

Tutor:

José Cañas Delgado

Catedrático de Universidad

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado: Evaluación de las tensiones y deformaciones residuales en uniones solapadas de termoplásticos mediante soldadura por resistencia

Autor: Cristian Montané Palomo

Tutor: José Cañas Delgado

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*  
*A mis amigos*





# Agradecimientos

---

En primer lugar agradecer a mis padres, José y Carmen, por hacer posible, con mucho esfuerzo, que tome el camino que llevo.

Por supuesto a toda mi familia, por apoyarme en todo momento y hacer posible el sueño de convertirme en un gran ingeniero.

Sin duda, agradecer de corazón a todos mis amigos que me han acompañado en este camino, desde el colegio hasta ahora. En especial a todos aquellos que me han enseñado que “la vida son más cosas” y, que han sufrido junto a mí en tantos y tantos días de biblioteca, exámenes, aprobados, suspensos... sin vosotros no habría sido lo mismo.

También, agradecer a mi tutor, José Cañas, todas las enseñanzas y el tiempo que ha dedicado en mí, no solo en este año sino en todo este camino

Y, por último pero no menos importante, a Antonio Cañas y a todo el equipo del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, en especial a María José, María del Mar y José Ramón por enseñarme y facilitarme el uso de todos los equipos del departamento y, prestar su ayuda siempre que ha sido necesaria.



El objetivo del presente proyecto es analizar el comportamiento ante distintos tipos de cargas de un material termoplástico. Para todos los ensayos se ha utilizado fibra de vidrio 8HS con resina PPS (Sulfuro de polifenileno).

El material se nos proporciona en dos formas, por un lado, el material soldado mediante soldadura por resistencia, con el que analizaremos el comportamiento estático y dinámico del mismo. Por otro lado, el material sin soldar con el que realizaremos la caracterización del mismo, calculando su módulo elástico y su coeficiente de Poisson, datos que nos serán útiles en otros estudios realizados. Todos los ensayos han sido realizados en la Universidad de Sevilla.

Para los ensayos estáticos utilizamos tres tipos de geometrías distintas según la norma UNE-EN ISO 527:4 y comparamos los resultados de cada una de ellas. Uno de los datos importantes que obtenemos es la carga estática de rotura que nos será muy útil para los ensayos dinámicos.

En los ensayos de fatiga utilizamos un solo tipo de geometría de la probeta con  $R=0.1$ . Vamos variando la carga máxima a la que se somete teniendo en cuenta siempre que no podemos sobrepasar el 100% de la carga estática del material calculada en los ensayos anteriores. De estos ensayos se concluye que la vida infinita del material se alcanza al 55% de la carga estática.

Otro análisis importante que realizamos al material es el cálculo de las posibles tensiones residuales a las que se encuentre sometido. Para ello nos hace falta la caracterización del material, con la que calculamos el módulo elástico en ambas direcciones del mismo y el coeficiente de Poisson. Procediendo mediante un método de relajación del material y con los datos anteriormente calculados obtenemos los resultados de tensiones residuales debidas a la soldadura. Finalizando en la conclusión de que el material se encuentra bajo la acción de las tensiones residuales pero son tan pequeñas que se pueden considerar despreciables frente a la resistencia a tracción del mismo.



# Abstract

---

The objective of this project is to analyze the behaviour of different types of loads of a thermoplastic material. For all tests was used fiber glass 8HS PPS resin (polyphenylene sulfide).

The material is provided in two forms, firstly, the welded material by resistance welding, used analyze the static and dynamic behaviour thereof. Furthermore, the unwelded material that we will characterize the same, calculating the elastic modulus and Poisson's ratio, data that will be useful in other studies. All tests were carried out at the University of Seville.

For static tests use three types of different geometries according to the UNE-EN ISO 527: 4 and compare the results of each. One of the important information we get is the static breaking load will be very useful for the dynamic tests.

In the fatigue tests use a single type of geometry of the specimen with  $R = 0.1$ . Let varying the maximum load to which it is subjected while taking into account that we cannot exceed 100% of the static load of the material calculated in previous trials. From these tests it was concluded that the infinite life of the material is reached at 55% of the static load.

Another important analysis conducted material is the calculation of any residual stresses to which you are subjected. To do this we need the characterization of the material, with which we calculate the elastic modulus thereof in both directions and Poisson's ratio. Proceeding by a method of relaxation of the material and obtain the data previously calculated results of residual stress due to welding. Ending at the conclusion that the material is under the influence of residual stresses but are so small they can be considered negligible compared to the tensile strength of the same.



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Materiales compuestos</i>	1
1.2 <i>Técnicas de soldadura</i>	2
1.3 <i>Tensiones residuales. Formación y efectos</i>	6
1.3.1 Formación de tensiones residuales térmicas	6
1.3.2 Formación de tensiones residuales en la soldadura	9
1.3.3 Efecto de las tensiones residuales	11
<b>2 Objetivo y plan de trabajo</b>	<b>15</b>
<b>3 Preparación de las muestras</b>	<b>17</b>
<b>4 Ensayo de caracterización</b>	<b>21</b>
4.1 <i>Caracterización del material</i>	21
4.2 <i>Conclusiones de la caracterización</i>	23
<b>5 Medida de las tensiones residuales</b>	<b>27</b>
5.1 <i>Explicación técnica y procedimiento general</i>	27
5.2 <i>Descripción del procedimiento empleado</i>	28
5.3 <i>Resultados y conclusiones</i>	30
<b>6 Comportamiento estático y a fatiga</b>	<b>35</b>
6.1 <i>Selección de la geometría y justificación</i>	35
6.2 <i>Comportamiento estático</i>	36
6.2.1 Descripción del ensayo	36
6.2.2 Resultados	36
6.2.3 Conclusiones	37
6.3 <i>Comportamiento a fatiga</i>	39
6.3.1 Descripción del ensayo	39
6.3.2 Análisis estadísticos	41
6.3.3 Resultados	43
6.3.4 Modos de fallo	45
6.3.5 Conclusiones	47
<b>7 Conclusiones y desarrollos futuros</b>	<b>49</b>
7.1 <i>Conclusiones</i>	49
7.2 <i>Desarrollos futuros</i>	50
<b>8 Bibliografía</b>	<b>51</b>
<b>Anexo A. Caracterización</b>	<b>53</b>
<b>Anexo B. Ensayos dinámicos</b>	<b>57</b>





# Índice de Tablas

---

Tabla 1 Resultados de la caracterización	23
Tabla 2 Propiedades del material	25
Tabla 3 Medida experimental de las deformaciones residuales	32
Tabla 4 Resultados tensiones y deformaciones residuales en el solape	32
Tabla 5 Resultados tensiones y deformaciones residuales en cada lámina	32
Tabla 6 Resultados ensayos estáticos	37
Tabla 7 Resultados ensayos de fatiga	43
Tabla 8 Comparación del módulo elástico mediante distintos métodos de cálculo	55



# Índice de Figuras

---

Figura 1 Clasificación de las técnicas de soldadura	2
Figura 2 Esquema de soldadura por láser	3
Figura 3 Esquema de soldadura por ultrasonido	4
Figura 4 Esquema de soldadura por inducción	4
Figura 5 Esquema de soldadura por microondas	5
Figura 6 Esquema de soldadura por resistencia	5
Figura 7 Distribución de tensiones residuales en el espesor	8
Figura 8 Secciones distintas en una soldadura	10
Figura 9 Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales	11
Figura 10 Desviación de las fibras	12
Figura 11 Microfracturas	12
Figura 12 Curvatura de las láminas	12
Figura 13 Plan de trabajo	15
Figura 14 Panel de fibra de vidrio sin procesar	17
Figura 15 Panel de fibra de vidrio soldado	17
Figura 16 Máquina de corte	17
Figura 17 Probeta de caracterización	18
Figura 18 Probetas tras el mecanizado	19
Figura 19 Tipos de probetas para ensayos estáticos	19
Figura 20 Fabricación de las probetas tipos B y C	19
Figura 21 Horno utilizado en el curado	20
Figura 22 Gráfica tensión-deformación en la dirección de 0°	21
Figura 23 Gráfica tensión-deformación en la dirección de 90°	21
Figura 24 Probeta de caracterización ensayada	22
Figura 25 Detalle de la rotura de la probeta en la zona de la mordaza	22
Figura 26 Dispersión de los datos obtenidos (módulo elástico)	24
Figura 27 Dispersión de los datos obtenidos (coeficiente de Poisson)	24
Figura 28 Tensión-Deformación en ambas direcciones	25
Figura 29 Procedimiento I para la medida de tensiones residuales	27
Figura 30 Procedimiento II para la medida de tensiones residuales	28
Figura 31 Anverso del panel para la medida de tensiones residuales	28
Figura 32 Reverso del panel para la medida de tensiones residuales	29
Figura 33 Conexión de los equipos e instrumentación del panel	29
Figura 34 Mecanizado para la medida de tensiones residuales (1)	30

Figura 35 Mecanizado para la medida de tensiones residuales (2)	30
Figura 36 Esquema del anverso de la placa	31
Figura 37 Esquema del reverso de la placa	31
Figura 38 Tipos de probetas para ensayos estáticos	35
Figura 39 Comparación de las curvas tensión-deformación de cada tipo	35
Figura 40 Máquina Instron 4482 para ensayos de tracción	36
Figura 41 Modo de fallo tras el ensayo estático	37
Figura 42 Probetas tipo A	38
Figura 43 Probetas tipo B	38
Figura 44 Probetas tipo C	38
Figura 45 Gráfico de la tensión máxima en los ensayos estáticos	39
Figura 46 Máquina Instron 8801 para ensayos de fatiga (1)	40
Figura 47 Máquina Instron 8801 para ensayos de fatiga (2)	40
Figura 48 Gráfica de muestra del análisis estadístico de la fatiga	41
Figura 49 Hoja de cálculo para análisis estadístico	43
Figura 50 Ajuste estadístico de los resultados de fatiga	44
Figura 51 Curva S-N de fatiga	45
Figura 52 Fractura adhesiva en uniones	45
Figura 53 Fractura cohesiva en uniones	45
Figura 54 Superficie de rotura en los ensayos de fatiga (1)	46
Figura 55 Superficie de rotura en los ensayos de fatiga (2)	46
Figura 56 Probetas rotas por fatiga	47
Figura 57 Ajuste lineal del ensayo 1 (longitudinal 1)	53
Figura 58 Ajuste lineal del ensayo 2 (longitudinal 2)	53
Figura 59 Ajuste lineal del ensayo 3 (longitudinal 3)	54
Figura 60 Ajuste lineal del ensayo 4 (transversal 1)	54
Figura 61 Ajuste lineal del ensayo 5 (transversal 2)	55
Figura 62 Ensayo 50%	57
Figura 63 Ensayo 55%	57
Figura 64 Ensayo 60%	58
Figura 65 Ensayo 65%	58
Figura 66 Ensayo 70%	59
Figura 67 Ensayo 75%	59
Figura 68 Ensayo 80%	60
Figura 69 Ensayo 90%	60





# 1 INTRODUCCIÓN

---

La evolución de la humanidad se ha visto condicionada, en aspectos tanto sociales como culturales y técnicos, desde siempre por el descubrimiento de nuevos materiales. Las edades de piedra, de cobre, del bronce, del hierro son buena prueba de ello. Estos materiales marcaron etapas en la historia que permitieron al hombre, a través del conocimiento y manejo de estos nuevos materiales, desarrollar nuevos avances.

El concepto de material compuesto, al contrario de lo que se pueda pensar, viene desde tiempos muy lejanos. Sin ir más lejos en la naturaleza misma encontramos varios ejemplos de dichos materiales compuestos como puede ser la madera que se trata de fibras de celulosa unidas mediante una matriz de lignina o las chozas de adobe y paja también constituyen otro ejemplo de material compuesto. En la actualidad nos interesa más el conocimiento de los materiales compuestos con matriz polimérica y, el reto de estos materiales radica en conseguir unas propiedades que no serían capaces de alcanzar los materiales que constituyen las fibras o la matriz por separado.

Como hemos comprobado, el ser humano desde tiempos remotos tiende a desarrollar técnicas que faciliten el avance y la comodidad de la sociedad en la que vive. Así, uno de los aspectos en los que dispuso su conocimiento fue en la soldadura. La soldadura se practica desde que el hombre empezó a trabajar con los metales, sin embargo, por aquellos entonces se realizaba el proceso a fuerza de golpes, y los que realizaban la soldadura eran respetados artesanos. En 1800 se inventó la soldadura eléctrica, en plena revolución industrial y su uso se fue propagando. En los inicios el proceso de soldadura era considerado un trabajo crudo y primitivo que no tenía más fin que el de derretir un metal entre dos materiales para unirlos. Con el paso de los años se han ido desarrollando nuevas técnicas de soldadura que aúnan muchos conocimientos de toda la ingeniería en general, desde procesos mecánicos de fricción hasta procesos electromagnéticos pasando por todo tipo de operaciones electrónicas, eléctricas y de casi cualquier rama de la ingeniería.

Sin embargo, la soldadura como otros procesos industriales, genera un cambio en el material y esto hace que dicho material se comporte de formas diferentes. En concreto nos referimos a la aparición de tensiones residuales debido a la soldadura. Nairn y Zoller [1] fueron los primeros autores en escribir sobre este tema y publicaron un artículo basado en un estudio experimental de las tensiones residuales de origen térmico que aparecían en los materiales compuestos termoplásticos. En 1988 Favre aumentó la literatura dedicada a este tema estudiando las tensiones residuales que aparecían en los polímeros reforzados con fibras y, descubrió varios aspectos muy significativos sobre este tema como son el origen, la magnitud, la temperatura... Tras esto el objetivo marcado era terminar de conocer todos los aspectos que aun no conocemos y sobre todo conseguir reducir dichas tensiones.

El presente documento refleja un proyecto experimental en su totalidad que se compone de 7 apartados. En el primero de ellos abordamos el tema desde un punto introductorio desarrollando con un poco más de tecnicismo los temas introducidos hasta ahora, es decir, los materiales compuestos, la soldadura y las tensiones residuales. En el apartado 2 mostramos el plan de trabajo que vamos a seguir en la realización de todo el proyecto. Es en el punto 3 en el que comenzamos con el trabajo experimental y detallamos todos los pasos seguidos hasta alcanzar las probetas en estudio aptas para ensayarlas. Llegados al punto 4 describimos los ensayos realizados para caracterizar el material del que disponemos y comentamos los resultados. El apartado 5 es el bloque central del proyecto y trata de medir las tensiones residuales mediante uno de los procedimientos que explicaremos más adelante. Y en el apartado 6 realizamos todo el análisis tanto estático como dinámico de las probetas que habíamos preparado para ello. Finalmente se concluye con una serie de conclusiones y desarrollos futuros.

## 1.1 Materiales compuestos

En la industria aeroespacial y automovilística [2] es de vital importancia que los materiales que se utilicen tengan la mayor relación resistencia/peso, para ello durante muchos años se han utilizado materiales como el aluminio, cuya ligereza hace que sea un material de gran utilidad. Sin embargo, con el desarrollo de la ciencia se han comenzado a utilizar mucho más los conocidos como materiales compuestos.

Los materiales compuestos se componen de dos fases:

- **Matriz:** Se trata de una fase continua y es la de mayor proporción en el material. Es la encargada de dar forma al producto y de transferir la carga a las otras fases, además protege al resto de fases del medio ambiente.
- **Refuerzo:** Es una fase discreta en forma de partículas o fibras y, es la encargada de mejorar las propiedades de la matriz.

Estos materiales compuestos pueden ser de dos tipos atendiendo al refuerzo que se le proporcione:

- **Reforzados con partículas:** Este tipo de refuerzo tiene la gran ventaja de aportar las mismas propiedades en todas las direcciones al material. Algunos elementos que suelen utilizarse en la fabricación de estos tipos de materiales son el plomo o algunas aleaciones de cobre.
- **Reforzados con fibras:** Son los más utilizados a pesar de que no aporten las mismas propiedades en todas las direcciones, pero hacen que el material resultante adquiera unas excelentes propiedades mecánicas. Las fibras suelen clasificarse en cortas, largas y continuas.

Además también podemos hacer una clasificación según el tipo de matriz:

- **Termoestables:** Solo pueden formarse a través de un cambio químico irreversible. Sin embargo, la temperatura y presión a la que deben someterse para su fabricación son bastante menores en comparación a las termoplásticas. Estas dos también se diferencian en su estructura interna.
- **Termoplásticas:** Son las más utilizadas con diferencia. La principal ventaja que tienen sobre las termoestables radica en que pueden ser fundidas las veces que queramos sin perder propiedades aparentes. Por ello, este tipo de resinas puede utilizarse en soldadura, lo que hace innecesaria las uniones mecánicas.

## 1.2 Técnicas de soldadura

Una de las principales características de los materiales es su capacidad de ser mecanizados, modelados, unidos... en definitiva, su capacidad de ser manipulados. Dentro de este concepto incluimos la capacidad de ser soldado. La soldadura se define como el proceso de fabricación donde se realiza la unión de dos o más piezas a través de la fusión del material, aunque en algunos casos, se puede utilizar un material de aporte.

Si clasificamos las distintas técnicas de soldadura según el método que utilizan para realizar la unión (Figura 1) distinguimos tres grandes grupos, dentro de los cuales vamos a ver a continuación varios ejemplos detallando su modo de realización y sus principales características.

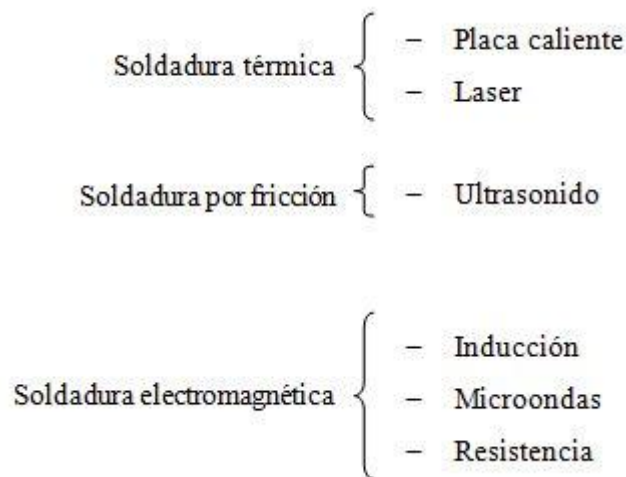


Figura 1 Clasificación de las técnicas de soldadura



Las probetas objeto de estudio de este proyecto están soldadas mediante el método de soldadura por resistencia, con lo que, llegado el momento haremos especial hincapié en su explicación detallada.

Cada uno de los tipos de soldadura que hemos comentado anteriormente van a ser explicados con relativa profundidad a continuación [3; 4].

### Soldadura de placa caliente

Se trata del proceso de soldadura térmico más utilizado debido a su sencillez de operación y a la robustez de la soldadura que produce. Esta técnica se divide en tres etapas, calentamiento, unión y enfriamiento. El proceso de soldadura se realiza en dos fases, en primer lugar se ponen las superficies que van a ser soldadas en contacto con un bloque metálico caliente hasta que comience a fundir el material, una vez llegados a este punto se separan las piezas del bloque caliente y se unen entre ellas, ejerciendo una presión para que se consolide la soldadura, hasta que el material solidifica.

Para este tipo de soldadura se necesitan entre 5-60 segundos, mientras que para garantizar unas buenas condiciones es necesario esperar unos 30 minutos.

### Soldadura por láser

Esta técnica de soldadura es la más precisa que existe en la actualidad (Figura 2) y, además, es la que menos calor aporta. Consiste en focalizar mediante espejos toda la energía del láser en una zona extremadamente pequeña que comienza a calentarse y al llegar a la temperatura de fusión se ioniza la mezcla del material fundido con los vapores y se forma lo que se conoce como plasma, este es capaz de absorber más energía incluso que el material fundido, por lo que, se transmite sin apenas pérdidas toda la energía del láser al material fundido. Esta técnica no utiliza, como hemos visto, material de aporte sino que se sueldan con el propio material de la pieza a soldar.

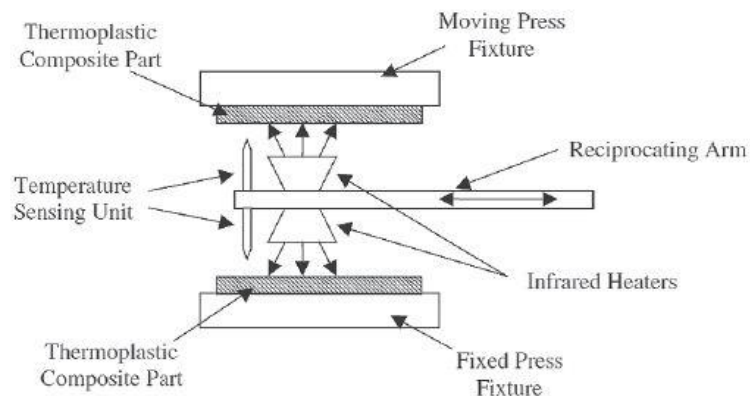


Figura 2 Esquema de soldadura por láser

Este proceso produce una soldadura de buena calidad, sin apenas porosidades y con contracción mínima. Tienen muy buena resistencia y son dúctiles.

### Soldadura por ultrasonido

El principio de este proceso es la transformación de la corriente alterna de alta frecuencia en vibraciones mecánicas mediante un transductor piezoeléctrico. Estas vibraciones hacen frotar la parte superior de una de las piezas con la parte inferior de la otra produciendo energía térmica que plastifica localmente el material y los une molecularmente. Esta energía térmica es mayor en las zonas con asperezas, estos elementos son denominados directores de energía. Es indispensable que las dos piezas estén construidas con un material termoplástico de similar punto de fusión.

Una representación esquemática de la máquina de soldadura ultrasónica se muestra en la Figura 3.

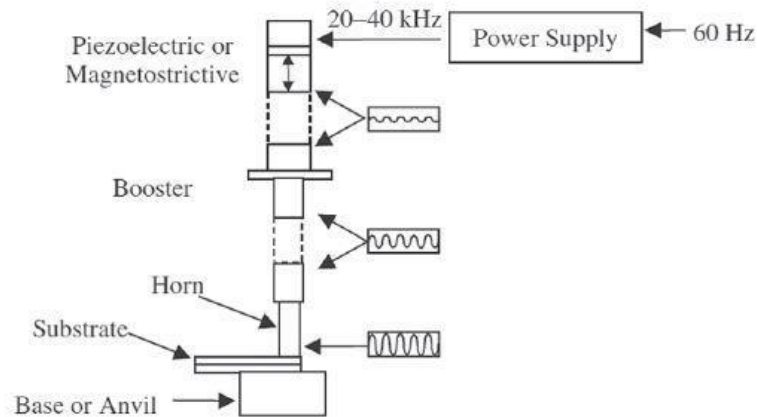


Figura 3 Esquema de soldadura por ultrasonido

### Soldadura por inducción

Esta técnica de soldadura se basa en utilizar el calor producido por un campo electromagnético en la zona de unión que hace que el material se funda. Un esquema de dicho proceso se muestra en la Figura 4.

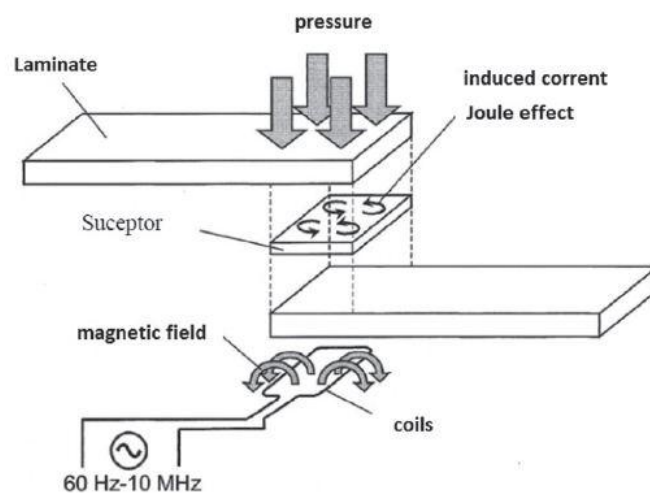


Figura 4 Esquema de soldadura por inducción

En ella se muestra el campo magnético inducido que va a generar el calor necesario para fundir el material, en el caso de que dicho material sea conductor de la electricidad el campo magnético creado es suficientemente eficiente para realizar la soldadura. Sin embargo, en el caso de que tratemos por ejemplo con fibra de vidrio, que es un material no conductor, necesitamos la aplicación de un suceptor como se muestra en la imagen para convertir la energía magnética en energía térmica. Por otro lado, los materiales ferromagnéticos presentan el fenómeno de histéresis, con el que se produce la disipación del calor. Para finalizar la soldadura se aplica presión y con ello se consolida la misma. Una de las principales ventajas de este proceso es poder realizar soldaduras de gran envergadura y de piezas con geometrías relativamente complejas.

### Soldadura por microondas

La mayoría de los termoplásticos no experimentan un aumento de temperatura cuando son irradiados con microondas. Sin embargo, la inserción de un implante susceptible a las microondas en la zona de unión hace que dicha zona adquiera una temperatura superior. Una imagen esquemática de dicho proceso se muestra en la Figura 5.

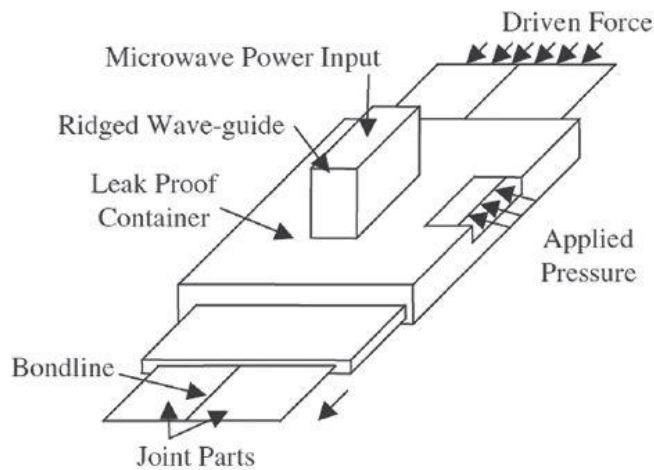


Figura 5 Esquema de soldadura por microondas

Esta técnica es muy parecida a la soldadura por inducción vista previamente y a la que será parte del objeto del proyecto, la soldadura por resistencia. Se trata de realizar presión en la zona de unión e irradiar con microondas al implante mencionado anteriormente para conseguir la unión entre las dos partes.

La principal ventaja de este tipo de soldadura es la capacidad de irradiar el componente completo y, en consecuencia, poder conseguir soldaduras en tres dimensiones. Además las soldaduras son creadas con gran velocidad, en menos de un minuto.

### Soldadura por resistencia

La soldadura por resistencia, utilizada en la fabricación de las probetas de este proyecto, es una de las técnicas consideradas como una promesa en la industria aeroespacial. Se trata de un proceso termoeléctrico, se sitúan las dos piezas a soldar y en la línea media del punto de unión se coloca un material conductor con menor punto de fusión que los que se van a unir, este será el material de aporte que lleve a cabo la soldadura. A este material se le colocan dos electrodos conectados a la máquina soldadora que le aplicarán una corriente eléctrica y, se aplica una presión sobre las piezas a soldar. Al discurrir la corriente eléctrica por el material de aporte, este se funde por efecto Joule y, posteriormente, al dejar de circular corriente solidifica el material produciéndose la soldadura.

Es un proceso relativamente rápido (1-4 minutos por soldadura) y además necesita muy poco material de aporte. Un esquema de este proceso se muestra en la Figura 6.

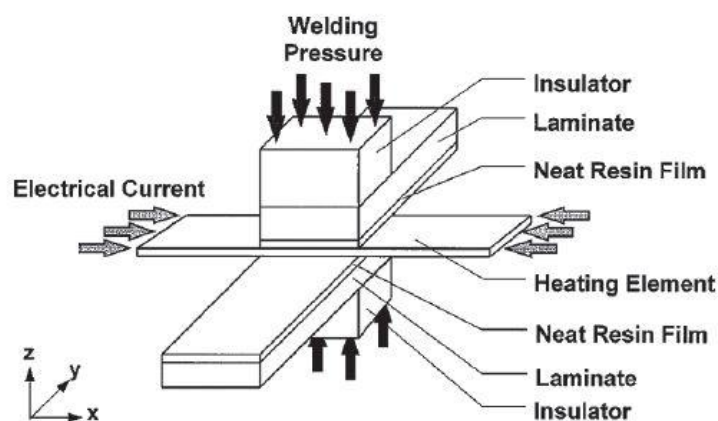


Figura 6 Esquema de soldadura por resistencia

Los principales factores que controlan esta técnica [5] son los siguientes:

- Magnitud de la corriente: el dispositivo que normalmente se utiliza para variar dicha magnitud es un transformador.

- Tiempo de flujo de la corriente: Este es un parámetro muy importante en la soldadura, y más aún lo es el dispositivo que controla este tiempo. Estamos hablando de tiempos de alrededor de 0.25 segundos, por lo que un actuador mecánico normal no sería capaz de llegar a eso. Se suele utilizar un rectificador controlado con silicón (SCR).
- Fuerza en los electrodos: Es una fuerza necesaria para mantener el contacto eléctrico entre las partes que van a ser soldadas. Normalmente se suele utilizar aire comprimido.

Además, entre los parámetros de dicha soldadura encontramos: tiempo de soldar, tiempo de presión, tiempo de sostenido, tiempo de pausa, corriente de soldar...

Este tipo de soldadura es muy utilizado en la industria de la automoción, sobre todo en la unión de carrocerías debido a los espesores tan pequeños de las chapas. Una de las principales razones por las que se utiliza este tipo de soldadura es la sencillez del proceso, ya que, las partes a unir no necesitan ninguna preparación especial. Además, es un proceso relativamente rápido con altas velocidades y tiempos de soldadura muy cortos y, tiene una robustez extraordinaria.

### 1.3 Tensiones residuales. Formación y efectos

Se definen las tensiones residuales [6] como aquellas tensiones que persisten cuando el material está libre de fuerzas externas o gradientes de temperatura. Estas tensiones pueden aparecer por diversos factores, ya sea en la manipulación y manufactura del material, esto es, mecanizado, cizalladura, soldadura... Centrándonos en este último, la base de la formación de estas tensiones es el aumento de temperatura, por eso es uno de los principales inconvenientes en los materiales compuestos termoplásticos, debido a que durante su formación y curado alcanzan temperaturas relativamente altas. Los campos mecánicos se ven afectados a través de la expansión térmica y de las propiedades del material dependientes de dicha temperatura. La expansión o contracción térmica debidas a la aplicación transitoria de gradientes de temperatura es normalmente la principal preocupación en el análisis de la tensión residual.

Sin embargo, no todas las tensiones residuales son malas, en ciertas ocasiones concede beneficios a los materiales.

#### 1.3.1 Formación de tensiones residuales térmicas

Según P.P. Parlevliet, [1] las tensiones residuales térmicas se pueden definir como aquellas tensiones residuales que quedan dentro del cuerpo debidas a un cambio de temperatura.

Las tensiones residuales debidas a la temperatura aparecen en las láminas de material compuesto tras el procesado y el posterior enfriamiento del mismo y, se pueden clasificar en tres niveles según cuál sea su origen, así encontramos:

- Nivel micromecánico, donde el parámetro que lo gobierna es el coeficiente de expansión térmica. Se considera la relación entre las fibras y la matriz del material.
- Nivel macromecánico, en este caso, las tensiones aparecen capa a capa debido principalmente a que el coeficiente de expansión térmica es distinto en la dirección longitudinal y transversal del material.
- Nivel global, donde consideramos el espesor completo del material.

Considerando estos tres niveles, las tensiones residuales dependen principalmente de cuatro parámetros: la diferencia de temperatura, coeficientes de expansión térmica, coeficientes elásticos y fracción volumétrica de fibras.

#### Nivel micromecánico

La principal razón de la aparición de las tensiones residuales en este nivel es la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica de la matriz y las fibras. Este coeficiente es, en general, mucho más bajo en las fibras que en las matrices termoplásticas. A continuación, entraremos un poco más en detalle de las propiedades dominantes en las matrices termoplásticas y que son las principales causantes de la aparición de las tensiones residuales.

- Contracción

La contracción de las matrices termoplásticas depende de la morfología de la misma, es decir, si es amorfa o semicristalina. En las matrices semicristalinas esta contracción es debida a la densificación del material en su paso de la fase amorfa a la fase semicristalina, además de eso hay que añadirle la contracción debida a la caída de temperatura. Sin embargo, en las matrices amorfas esta contracción es solo debida a la caída de temperatura de la que hablamos anteriormente.

La contracción total en una matriz semicristalina es diez veces superior a la que se produce en una matriz amorfa.

- Diferencia de temperatura

En el caso de la diferencia de temperatura también distinguimos entre matrices semicristalinas y matrices amorfas.

En el caso de estas últimas, cuando enfriamos el material desde la temperatura de procesamiento hasta la temperatura de transición vítrea pueden aparecer tensiones debido a las contracciones del material en su cambio de fase de líquido al estado visco elástico que presenta a estas temperaturas. Sin embargo, estas tensiones pueden liberarse de forma autónoma porque a estas temperaturas el material posee suficiente energía como para el movimiento molecular. Si continuamos enfriando el material sobrepasando la temperatura de transición vítrea, este pasa a estar en un estado termo elástico, y pueden formarse tensiones que se quedan “congeladas” en el material y permanecen durante los siguientes enfriamientos hasta temperatura ambiente. Esta temperatura donde comienzan a formarse dichas tensiones se denomina “temperatura libre de tensiones”.

En el caso de las matrices semicristalinas, esta “temperatura libre de tensiones” aparece cerca de la temperatura de cristalización, que suele ser más alta que la temperatura de transición vítrea. A su vez, del ratio de enfriamiento depende la altura a la que se encuentra dicha temperatura de cristalización.

Como conclusión podemos afirmar que para todas las matrices poliméricas enfriadas desde la temperatura libre de tensiones hasta la temperatura de servicio, la mayor parte de las tensiones residuales que aparecen son debidas a la discordancia entre los coeficientes de expansión térmica de la matriz y las fibras.

- Condiciones de procesamiento

Dentro de las condiciones de procesamiento podemos destacar algunas. En primer lugar podemos mencionar la presión de procesamiento del material, dicha presión afecta a las propiedades térmicas del material y puede influenciar en la formación de las tensiones residuales. Otro parámetro destacable es el ambiente en el que se procesa el termoplástico, este es un parámetro importante puesto que un material procesado en una atmósfera oxidante causa cambios químicos en la matriz y en la interfase fibra-matriz. Pero dentro de las condiciones de procesamiento el parámetro más importante a tener en cuenta es el ratio de enfriamiento.

Para poder explicar el ratio de enfriamiento introducimos otro concepto que denominaremos “volumen libre” siendo este concepto el que describe cuánto volumen del total está ocupado por el material y cuánto es el que queda de espacio libre entre las moléculas. Se puede comprobar experimentalmente que cuando el ratio de enfriamiento es alto, queda más cantidad de volumen atrapado o congelado que cuando tenemos un ratio bajo. Para matrices amorfas, cuanto mayor sea la velocidad de enfriamiento, dentro del rango de la transición vítrea, mayor serán las tensiones residuales que se formen.

En cambio, para matrices semicristalinas un mayor ratio de enfriamiento implica que la temperatura de cristalización disminuya así como los niveles de cristalización. Esto implica que las tensiones residuales debidas a la cristalización se pueden reducir aumentando el ratio de enfriamiento del material. Sin embargo, con esto se crea un conflicto al que habrá que llegar a un punto intermedio. Puesto que, si aumentamos el ratio de enfriamiento se reducen las tensiones residuales debidas a la cristalización pero aumentan las tensiones debidas a la velocidad de enfriamiento.

En el material en estudio, fibra de vidrio (PPS), se observa que a mayor ratio de enfriamiento el nivel de tensiones residuales que encontramos es mayor.

- Propiedades elásticas

Las matrices termoplásticas están muy influenciadas por el Módulo de Young del material. Dicha propiedad es

dependiente de la temperatura y, en los materiales semicristalinos es, además, dependiente del ratio de enfriamiento. Se puede concluir que si el Módulo de Young es mayor, las tensiones residuales crecen.

### Nivel macromecánico

La mayoría de las propiedades que hemos mencionado en el nivel micromecánico son también válidas para este nivel macromecánico, además de ellas encontramos una serie de peculiaridades que mencionaremos a continuación y que sólo son válidas para el caso de este nivel.

- Las deformaciones residuales que se encuentran en las fibras son siempre de compresión y mayores que las que se encuentran en los materiales con más capas.
- Las tensiones residuales que introduce la laminación solo incrementan el nivel de tensión residual del material cuando la temperatura final de procesamiento está lo suficientemente lejana a la temperatura que denominamos “libre de tensiones”
- En cuanto a la fracción volumétrica de las fibras en el material compuesto de capa cruzada las tensiones residuales interlaminares aumentan cuando aumenta el la fracción volumétrica del mismo.
- Aumentando la ondulación de las fibras disminuye la diferencia en los coeficientes de expansión térmica y las dirección perpendiculares, por lo que, disminuyen las tensiones residuales.
- Con ángulos de 30° entre las fibras las tensiones interlaminares son máximas.

Para concluir podemos añadir que la mayoría de las tensiones que aparecen a nivel macromecánico son debidas a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica entre las distintas direcciones del material.

### Nivel global

Uno de los principales factores que favorecen en la aparición de las tensiones residuales, como hemos mencionado varias veces a lo largo de este documento, es el ratio de enfriamiento al que se somete al material.

Como también mencionamos anteriormente, la mayor parte de las tensiones que se inducen inicialmente a temperaturas elevadas se relajan de forma autónoma antes de que la temperatura descienda, las que se inducen a partir de ese momento en el que la temperatura está más por debajo permanecen en el material hasta el final.

Cuanto mayor es el ratio de enfriamiento del material las tensiones residuales que aparecen son mayores y, la distribución toma forma de parábola siendo más significativa a medida que aumenta dicho ratio (Figura 7) siendo de tracción en la zona positiva del eje y de compresión en la contraria.

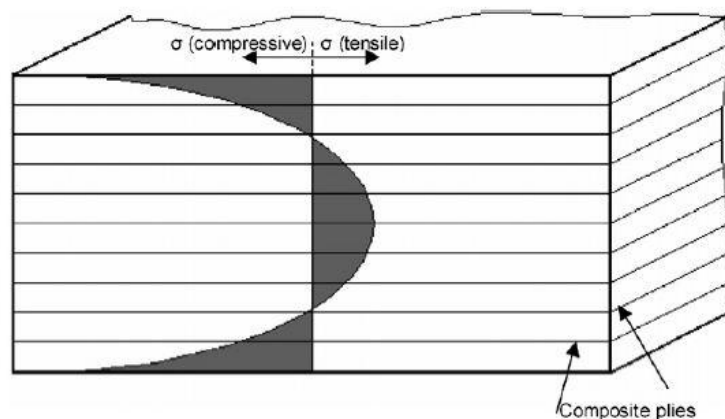


Figura 7 Distribucion de tensiones residuales en el espesor

Además en los materiales termoplásticos cristalinos o semicristalinos toma una cierta importancia los efectos sobre la piel del núcleo cuando este ratio es uniforme. Para reducir dichas tensiones se recurre al recocido. En los materiales isotrópicos las tensiones residuales se suelen eliminar de este tipo, mediante el recocido. En cambio para los materiales anisótropos esta tarea no es tan sencilla. Para los materiales amorfos el recocido no tiene resultados significativos.

Además, se considera el espesor completo del material. Para espesores gruesos experimentará un enfriamiento lento y se retendrán tensiones residuales de tracción en el centro del mismo, mientras que en las capas exteriores dichas tensiones serán de compresión.

Como resumen de la formación de las tensiones residuales de origen térmico, podemos añadir que aparecen principalmente por las diferencias entre los coeficientes de expansión térmica de cada uno de los elementos y, además también influyen bastante en la aparición de las mismas el ratio de enfriamiento que se adopte, así como, la presión y el ambiente en el que se fabrique el material.

### **1.3.2 Formación de tensiones residuales en la soldadura**

La formación de las tensiones residuales en la soldadura [7] podría sacarse del estudio realizado previamente para las tensiones residuales térmicas, la soldadura es un proceso en el que se realiza un calentamiento muy rápido a alta temperatura del material y un posterior enfriamiento. Este calentamiento será no uniforme en la pieza, es decir, se hace un calentamiento localizado que hace que el gradiente de temperatura no sea uniforme. Las tensiones residuales de soldadura se generan en una estructura como consecuencia de las deformaciones plásticas locales introducidas por un gradiente de temperatura local consistente en un rápido calentamiento y su posterior fase de enfriamiento.

Durante el proceso de soldeo, la zona de soldadura es calentada bruscamente en comparación con la zona que la rodea y que se funde localmente. El material se expande como resultado de ser calentado. La expansión es restringida por la zona más fría de alrededor, que da lugar a tensiones térmicas. Las tensiones térmicas superan en parte el límite elástico, el cual disminuye a temperaturas elevadas. Consecuentemente, la zona de soldadura es plásticamente comprimida.

Tras el enfriamiento, en la zona de soldadura se generan tensiones residuales de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material, mientras que las zonas circundantes están sujetas a tensiones residuales de compresión para mantener el autoequilibrio.

Aunque no será nuestro caso, ya que, la soldadura que utilizamos, como hemos mencionado anteriormente, es la soldadura por resistencia en la cual la zona de soldadura no será el cordón convencional sino que es la zona sobre la que se aplica la presión entre los dos materiales. Vamos a ver, a modo de introducción, qué ocurre en cada una de las secciones de un cordón de soldadura en los materiales en los que ocurre el fenómeno de la plastificación con las tensiones residuales.

En primer lugar mostramos una imagen (Figura 8) con la representación de cada una de las secciones que comentaremos a continuación,

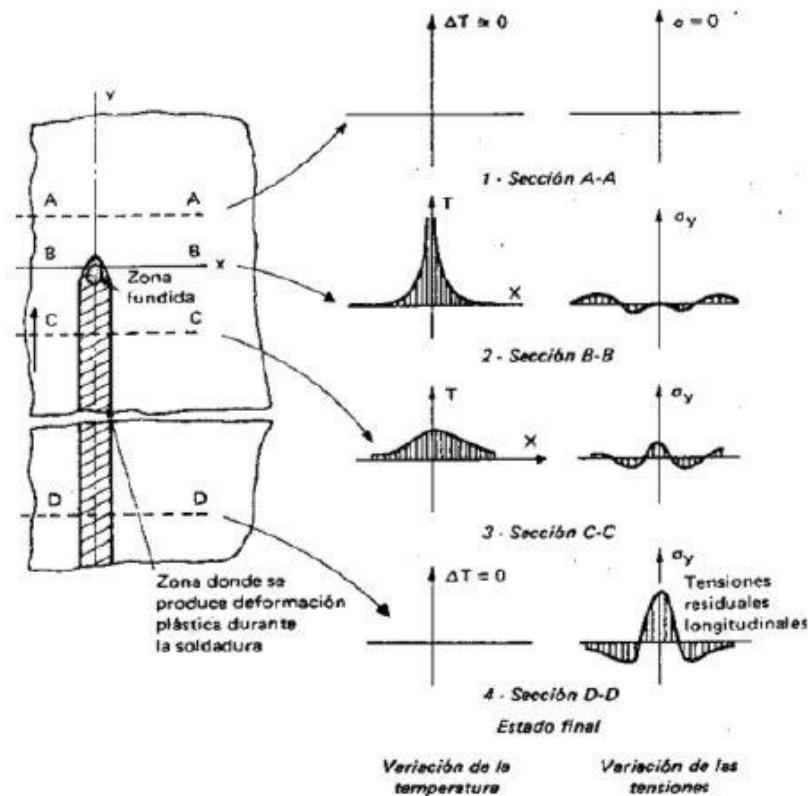


Figura 8 Secciones distintas en una soldadura

En la sección A-A del material el calor aún no ha llegado puesto que el foco de calor está situado en B, por lo que, la temperatura de esta sección será igual que la inicial y el material estará libre de tensiones residuales en esa zona.

En la sección B-B, centro del arco de soldadura, se produce un calentamiento muy brusco del material, alcanzando temperaturas muy altas. Debido a esto se produce la expansión del metal centro del calentamiento (que llega a fundirse) y como consecuencia aparecen tensiones de compresión en las zonas adyacentes al foco de calor. En consecuencia de estas tensiones de compresión, en las zonas más alejadas aparecen tensión de tracción para mantener autoequilibrado al material. En la zona central, debido a que el metal fundido carece de resistencia mecánica no aparecen tensiones de ningún tipo.

La sección C-C se estará enfriando en razón de la conductividad térmica del material, en cuanto pase el arco de soldadura comenzará la evacuación del calor. En cuanto a las tensiones residuales se refiere, se observa que una vez que comienza a enfriarse, las zonas dilatadas surgen tensiones de tracción en la zona de soldadura y en la zona afectada por el calor. En las zonas alejadas aparecen tensiones de compresión para que se cumpla el autoequilibrio que mencionamos antes.

En la sección D-D está suficientemente alejada del arco como para que se haya producido el enfriamiento total. Se encontrará nuevamente la temperatura inicial de la pieza, las tensiones tendrán su valor máximo final que corresponde al estado permanente definitivo de las tensiones residuales.

Es importante señalar, que durante los estados transitorios, como en la condición final, deberán satisfacerse las condiciones clásicas de equilibrio de las fuerzas y momentos totales actuantes, es decir, que la sumatoria de las fuerzas residuales es nula, lo que implica ausencia de traslación y rotación.

Las tensiones residuales surgen tanto en el plano perpendicular como en el longitudinal, siendo esta última de mayor magnitud, además a medida que nos alejamos de la línea de fusión de soldadura ambas disminuyen.

A lo largo de la dirección transversal, la tensión longitudinal cambia a compresión, mientras que a lo largo de la dirección longitudinal ésta se reduce a cero, como dicta la condición de equilibrio de las



tensiones residuales. Se observan similares tensiones residuales transversales con menores diferencias en la distribución que las tensiones longitudinales y menor magnitud.

Una muestra de esto se representa en la Figura 9.

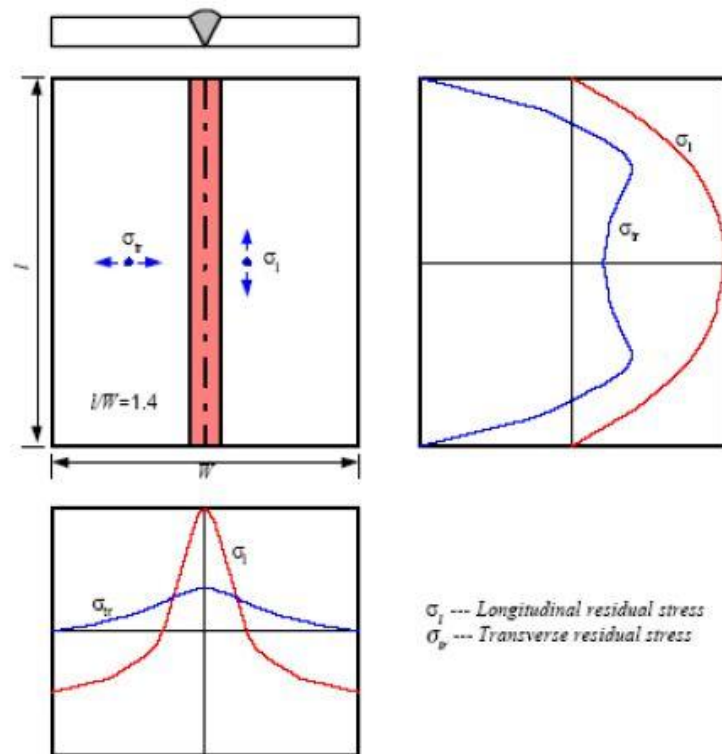


Figura 9 Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales

Para concluir, las deformaciones plásticas que tienen lugar a temperaturas superiores a 800°C causan siempre tensiones residuales.

### 1.3.3 Efecto de las tensiones residuales

A continuación, entraremos en detalle de los efectos que tienen las tensiones residuales [8] explicadas en apartados anteriores. Recordamos que había tres niveles de tensiones residuales: micromecánico, donde aparecían principalmente por la diferencia entre matriz y fibras, macromecánico, donde la principal causa era la diferencia de las propiedades en cada una de las capas del material y, global, donde se tenía en cuenta el enfriamiento de todo el material a través de su espesor completo.

Debido a la discrepancia entre las contracciones por temperatura de fibra y matriz, normalmente, aparecen estados tensionales en el material. Además, otras propiedades, como son, la temperatura de transición vítrea, la humedad, la velocidad de enfriamiento o el ambiente en el que se encuentre afectan notablemente al estado residual de tensiones que aparece. A causa de las distintas combinaciones de todos estos parámetros aparecen ciertos defectos en el material que veremos brevemente a continuación.

Uno de los principales defectos que aparecen por este fenómeno es la desviación de las fibras (Figura 10), en la fase de procesamiento del material las fibras experimentan distintas cargas que hacen que éstas acaben desviándose de la trayectoria unidireccional del material, esto es principalmente causado por la diferencia en los coeficientes de expansión aunque también tiene mucho que ver la temperatura a la que se lleve el material y el tiempo de enfriamiento que se le proporcione.

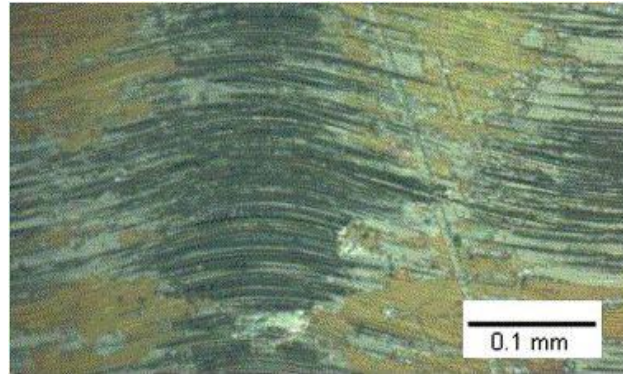


Figura 10 Desviación de las fibras

Además de eso también se ha observado que pueden aparecer pequeñas fracturas (Figura 11) (a nivel microscópico) debido principalmente a que se excede el límite elástico de la matriz o se consigue romper el enlace que hay en la interfase fibra-matriz, a causa de las tensiones residuales térmicas. Estas microfracturas pueden ser visibles en materiales transparentes o pueden permanecer ocultas hasta que se produce la iniciación del fallo del material en estado de servicio.

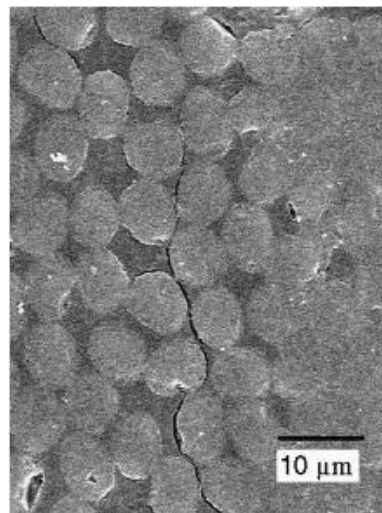


Figura 11 Microfracturas

La desunión interlaminar o delaminación es otro de los defectos comunes, y aparece sobre todo por la diferencia de propiedades de las capas en las distintas direcciones. Lo que ocurre es que las capas se van despegando unas de otras y provocan el fallo del material.

Por último pero no menos importante, uno de los defectos que ocurren con bastante frecuencia es la curvatura de las láminas (Figura 12) debidas a enfriamientos no simétricos, con lo que introduce ciertas tensiones que tienen como efecto esa curvatura interlaminar.

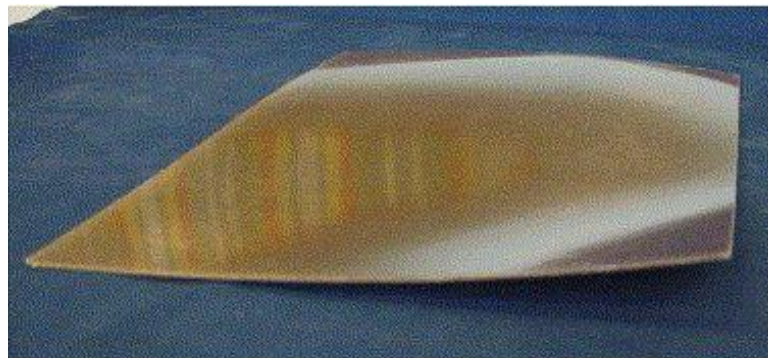


Figura 12 Curvatura de las láminas

### **Propiedades mecánicas**

No solo las tensiones ocasionadas por esfuerzos externos son las que condicionan las propiedades mecánicas del material, sino que las tensiones residuales que hemos visto hasta ahora toman un papel de cierta importancia en este tema, por ejemplo, el comportamiento a fatiga varía notablemente con este parámetro.

De hecho, no todas las tensiones residuales son malas, en este caso hay veces que no solo no ocasionan daño sino que son beneficiosas para dichas propiedades.

En cambio, cuando hablamos de fractura no tenemos tan buenas referencias, las tensiones residuales provocan que las grietas se inicien con más facilidad, así como, en la vida a fatiga disminuye el número de ciclos y la amplitud de carga que soporta el material



## 2 OBJETIVO Y PLAN DE TRABAJO

La investigación que hemos llevado a cabo tiene por objetivo el de caracterizar estática y dinámicamente la soldadura por resistencia en termoplásticos, así como, realizar la medida de las tensiones residuales que aparecen en el termoplástico a causa de la soldadura a la que se somete. El método utilizado para la unión del material es el de la soldadura por resistencia y dicho material, utilizado para todos los ensayos, se trata de fibra de vidrio con matriz termoplástica de sulfuro de polifenileno (GF/PPS).

El material se nos proporciona ya soldado, por lo que, no realizamos ningún ensayo para comprobar que esa soldadura esté realizada en perfectas condiciones. Disponemos de varios paneles soldados, así como, otros tantos paneles del material sin procesar. Estos últimos los utilizaremos para realizar los ensayo de caracterización del material que se explicarán en detalle en el capítulo 4 de este documento. Para el resto de los ensayos (estáticos y dinámicos), en los que se entrará más en detalle en el capítulo 6, utilizaremos los paneles del material soldado, del que deberemos fabricar las probetas siguiendo la norma [12; 13].

Un diagrama de flujo del proceso de trabajo (Figura 13) que vamos a seguir se muestra a continuación,

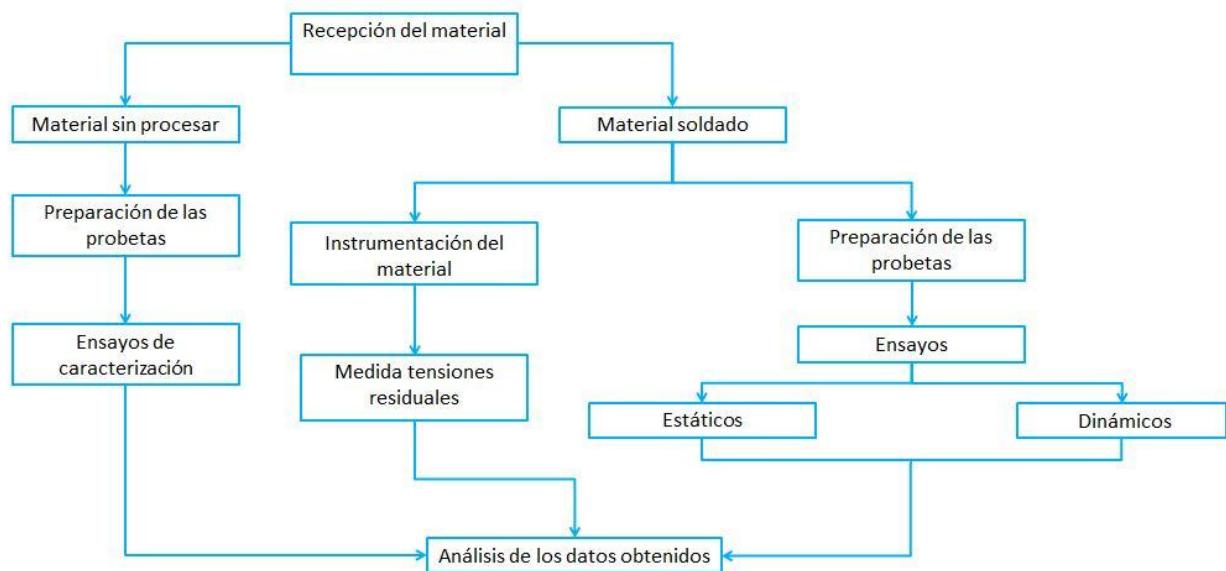


Figura 13 Plan de trabajo

Como podemos observar tenemos tres flujos de trabajo, por un lado, el material sin procesar que solo tendremos que mecanizar cada una de las probetas, instrumentarlas y ensayarlas a tracción. Por otro lado, con el material soldado seguiremos, a su vez dos flujos, la instrumentación del material (galgas extensométricas...) para la medida de las tensiones residuales introducidas por la soldadura y, la preparación de las probetas (mecanizado nuevamente) para, posteriormente, realizar los ensayos estáticos (tracción) y dinámicos (fatiga). Una vez finalizado todo esto analizaremos los datos obtenidos para cerrar con las conclusiones a las que llegamos.



### 3 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

---

Como ya hemos avanzado en capítulos anteriores de este documento, disponemos de paneles del material sin procesar (Figura 14), así como, otros tantos paneles del material ya soldado (Figura 15).



Figura 14 Panel de fibra de vidrio sin procesar



Figura 15 Panel de fibra de vidrio soldado

Siguiendo el diagrama de flujo expuesto en el capítulo 2, lo primero que realizamos es fabricar las probetas para la caracterización del material, para ello solo tenemos que mecanizarlas según la norma con la máquina que se muestra en la Figura 16.



Figura 16 Máquina de corte

Una vez que tenemos las probetas mecanizadas tenemos que instrumentarlas, para ello, le colocamos galgas extensométricas siguiendo el proceso descrito a continuación:

1. Buscamos el centro de la probeta para poder centrar la galga en toda su extensión
2. Lijamos el material para eliminar cualquier tipo de barniz o protector utilizado en la fabricación del termoplástico
3. Limpiamos con acetona para asegurarnos de que se eliminen todas las impurezas
4. Pegamos la galga en el lugar prefijado anteriormente con un pegamento de contacto utilizando un catalizador para que la reacción sea instantánea y presionando durante unos minutos sobre la zona
5. Soldamos, con un soldador de cobre, un cable a cada salida de la galga (dos por dirección de la galga)
6. Añadimos al otro extremo del cable unos puntos de empalme y comprobamos con un polímetro que la conexión es buena ( $120 \Omega$ )

Una vez realizado todo este procedimiento obtenemos una probeta lista para ensayar tal que así (Figura 17),

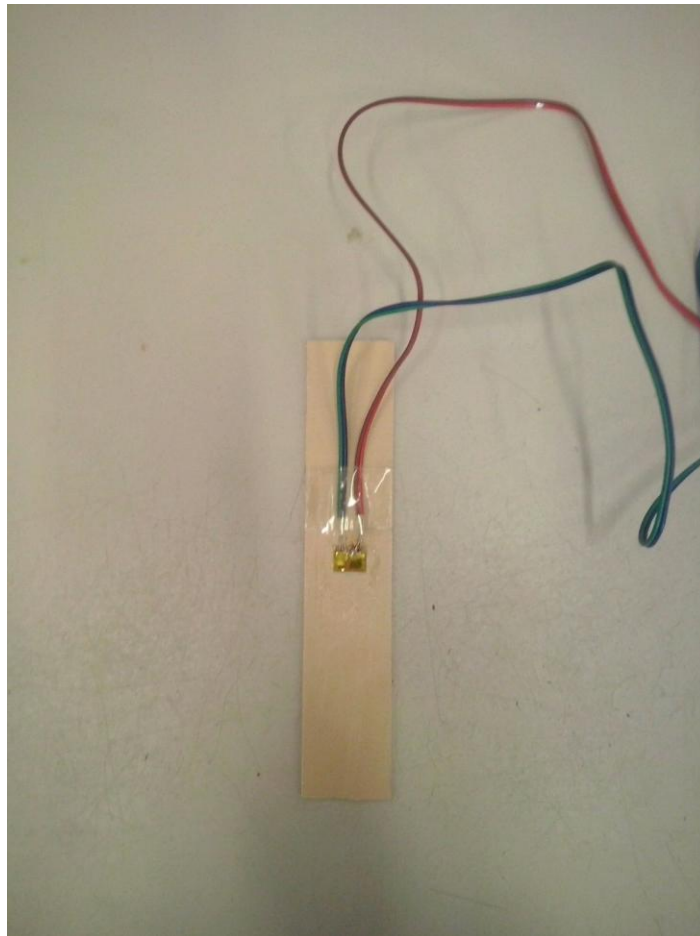


Figura 17 Probeta de caracterización

Lo siguiente que debemos realizar es mecanizar las probetas tanto de los ensayos estáticos como dinámicos, para estos últimos las probetas quedarán listas para ensayar tras este proceso, mientras que para los estáticos deberemos seguir procesando la probeta para ajustarla a la norma como explicaremos más adelante.

El mecanizado se realiza nuevamente en la máquina mostrada en la Figura 16 fabricando todas las probetas de una misma vez (Figura 18).





Figura 18 Probetas tras el mecanizado

Separamos 10 probetas que utilizaremos para los ensayos dinámicos y, que no nos serán necesarias hasta que nos pongamos con ellos. Para los ensayos estáticos tenemos 7 probetas restantes, de estas probetas vamos a hacer 3 tipos distintos según la norma [12; 13]. Un esquema de estas probetas se muestra en la Figura 19.

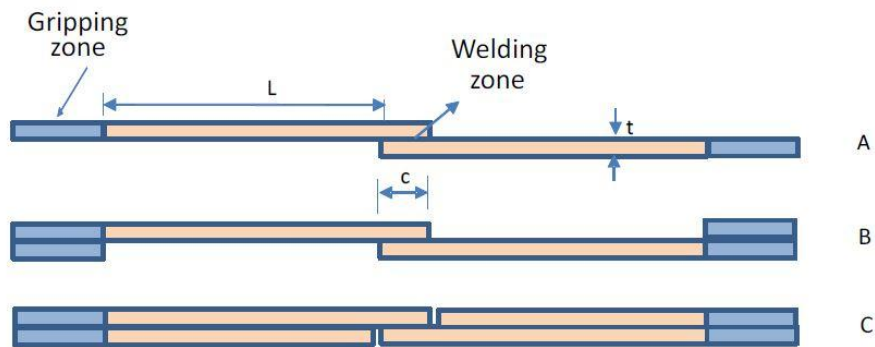


Figura 19 Tipos de probetas para ensayos estáticos

Para la fabricación de estas probetas (Figura 20) utilizamos un material adhesivo, concretamente EA 9394 QT AERO con el que realizaremos las probetas tipos B y C. Para los tacos adicionales utilizamos el mismo material que el de partida.



Figura 20 Fabricación de las probetas tipos B y C

Una vez que tenemos las probetas montadas, se deja curar durante 1 hora aproximadamente al aire y, posteriormente, se mete en el horno (Figura 21) durante 1,5 horas a 66°C para, finalmente, dejarlo dentro del horno hasta acabar de curar.



Figura 21 Horno utilizado en el curado

Tras este proceso ya tenemos todas las probetas listas para ensayar estáticamente. En resumen, tenemos 3 probetas del tipo A y, 2 probetas de cada tipo B y C.

Como hemos dicho previamente, las probetas para los ensayos de fatiga quedaron listas para ensayar tras mecanizarlas, con lo que, solo nos queda procesar el panel para la medida de las tensiones residuales.

# 4 ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN

A continuación, comenzamos con los ensayos experimentales del material, todos ellos realizados en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla bajo la supervisión de A. Cañas. En primer lugar, nos vamos a centrar en los ensayos de caracterización del material.

## 4.1 Caracterización del material

Tras la fabricación e instrumentación de las probetas nos disponemos a ensayarlas. Disponemos de cinco probetas para la caracterización del material, tres en la dirección longitudinal y dos en la dirección transversal. Todas ellas han sido sometidas a un ensayo de tracción con una galga extensométrica situada para la medición en la dirección de  $0^\circ$  y en la de  $90^\circ$  del material. A continuación, observaremos las gráficas resultantes de los ensayos con las probetas orientadas en la dirección longitudinal (Figura 22) y con las probetas orientadas según la dirección transversal (Figura 23).

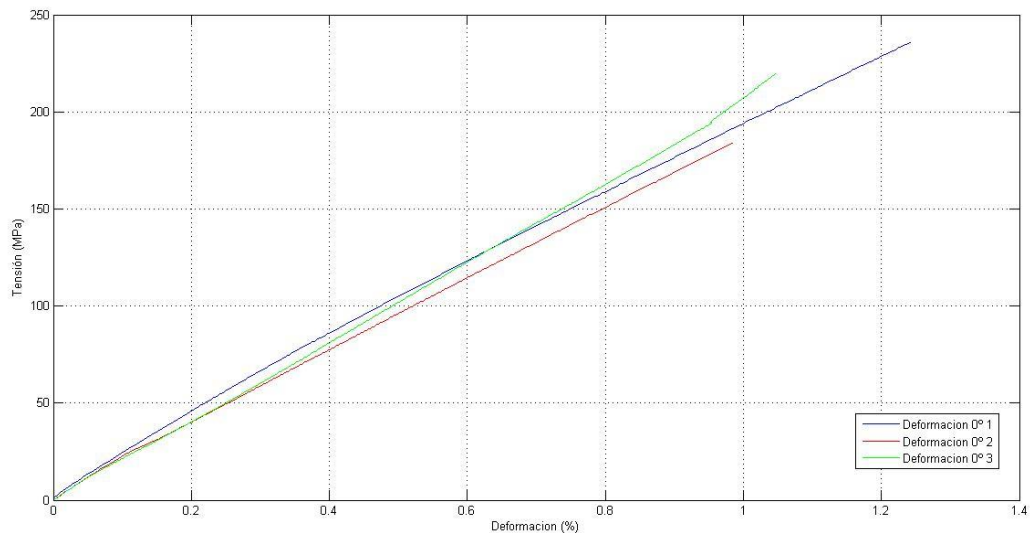


Figura 22 Gráfica tensión-deformación en la dirección de  $0^\circ$

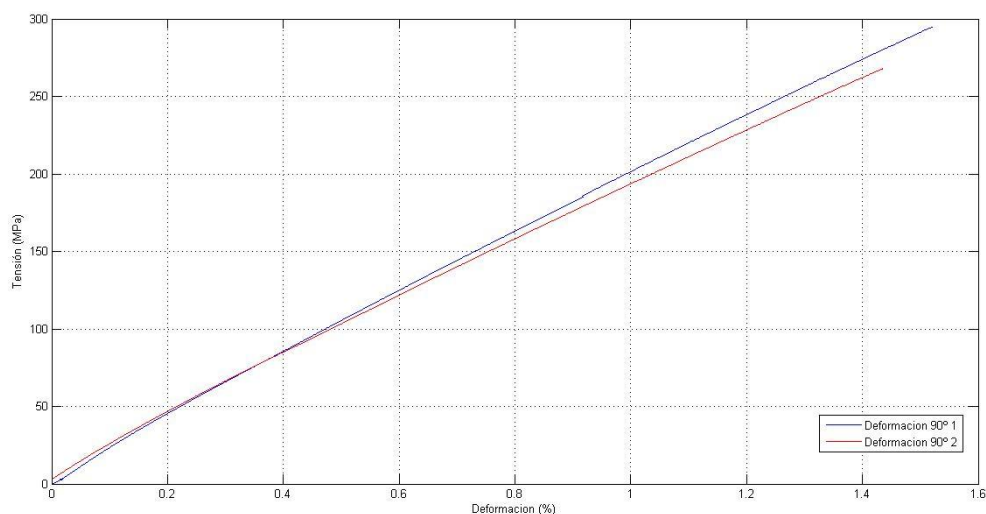


Figura 23 Gráfica tensión-deformación en la dirección de  $90^\circ$

Donde las gráficas representan la tensión en MPa frente a la deformación en tanto por ciento en las dos direcciones del material. A la vista de los resultados podemos sacar dos conclusiones muy relevantes:

1. El comportamiento del material se puede estimar como lineal hasta la rotura.
2. Las propiedades en la dirección longitudinal y en la dirección transversal del material son las mismas. El material es ortótropo con las mismas propiedades en ambas direcciones.

De la primera conclusión simplificamos la obtención del módulo elástico del material sin tener la necesidad de distinguir entre zona lineal y no lineal. De la segunda obtenemos las propiedades según la segunda dirección obteniéndolas en la primera. Aunque para confirmar esto calcularemos dichas propiedades en ambas direcciones y comprobaremos que son muy próximas.

Otros datos importantes obtenidos de los ensayos de caracterización se explican a continuación.

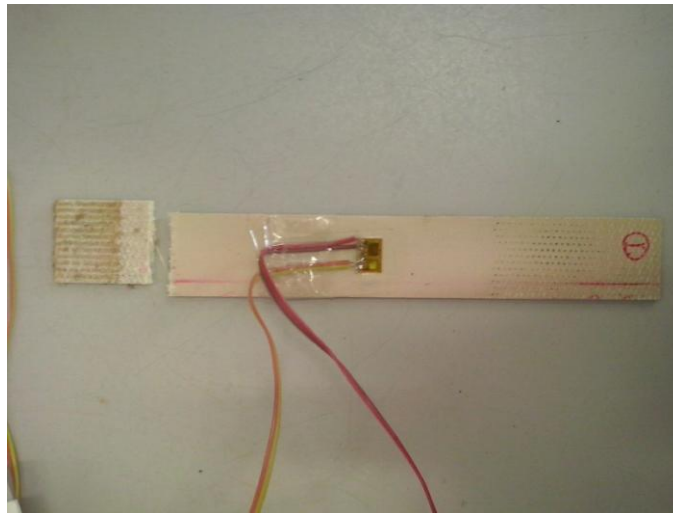


Figura 24 Probeta de caracterización ensayada

Todas las probetas ensayadas (Figura 24), tanto en una dirección como en la otra, han roto en la zona de la mordaza (Figura 25). Como nuestro mayor interés era conocer la evolución de la deformación con la carga aplicada no nos importa este hecho, sin embargo, la tensión última de rotura carece de valor significativo.



Figura 25 Detalle de la rotura de la probeta en la zona de la mordaza

El módulo elástico ( $E$ ) se define como [9] el valor de la tensión que provocaría una deformación longitudinal unitaria. En materiales compuestos, comúnmente, el módulo elástico depende de la dirección en que se aplique la carga, así para un material como el que disponemos nosotros calcularemos dicho módulo según las expresiones:

$$E_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}}$$

$$E_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}}$$

Esta propiedad la vamos a calcular siguiendo dos métodos distintos que se explican con detalle en el Anexo A, en el que comprobaremos que ambos métodos tienden a dar valores con una dispersión muy pequeña. La media de los resultados obtenidos con cada uno de los métodos se muestra en la Tabla 1.

La otra propiedad que nos interesa medir para caracterizar el material se trata del denominado coeficiente de Poisson que se define como [9] la relación entre la deformación transversal que se produce con respecto a la deformación longitudinal aplicando la carga en esta última. Al igual que con el módulo elástico tendremos dos coeficientes, uno para cada dirección.

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}}$$

	0°		90°	
	Módulo elástico (GPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo elástico (GPa)	Coefficiente de Poisson
Probeta 1	19.980	0.0241	20.825	0.0661
Probeta 2	18.625	0.0731	19.575	0.0466
Probeta 3	19.875	0.0190	-	-
Mínimo	18.625	0.0190	20.825	0.0466
Máximo	19.980	0.0731	19.575	0.0661
Media	<b>19.160</b>	<b>0.0387</b>	<b>20.200</b>	<b>0.0564</b>

Tabla 1 Resultados de la caracterización

## 4.2 Conclusiones de la caracterización

Como primera conclusión mostramos dos gráficas, en la primera se representa la dispersión que tienen los resultados obtenidos para el módulo elástico (Figura 26) y, en la segunda, vemos lo mismo con la otra propiedad que hemos calculado, el coeficiente de Poisson (Figura 27) para comprobar la validez de estos resultados.

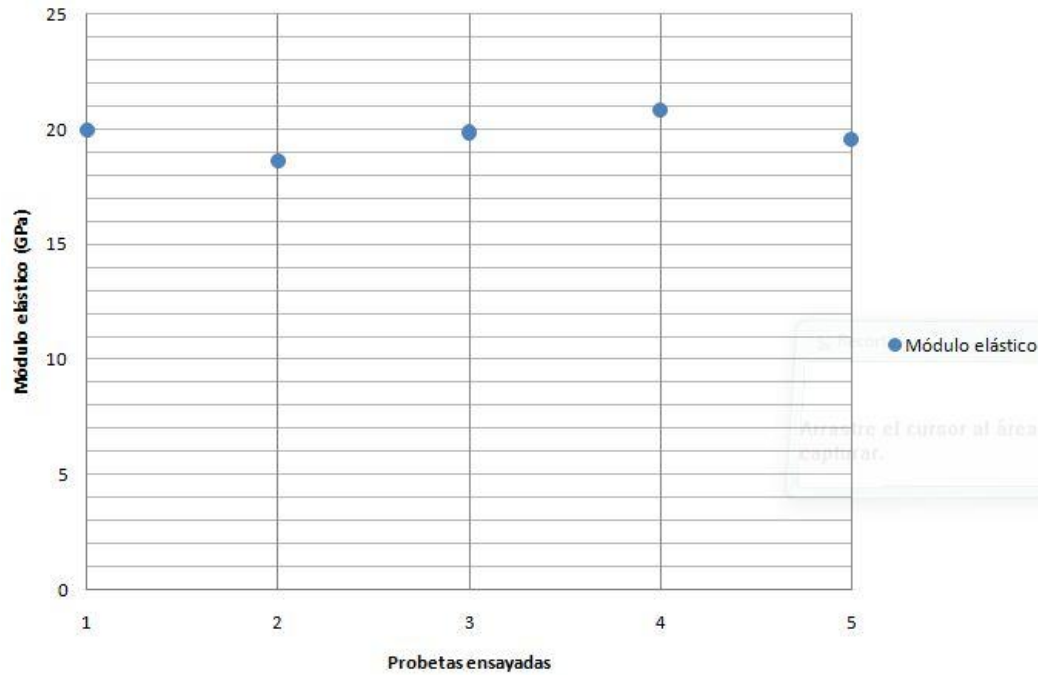


Figura 26 Dispersión de los datos obtenidos (módulo elástico)

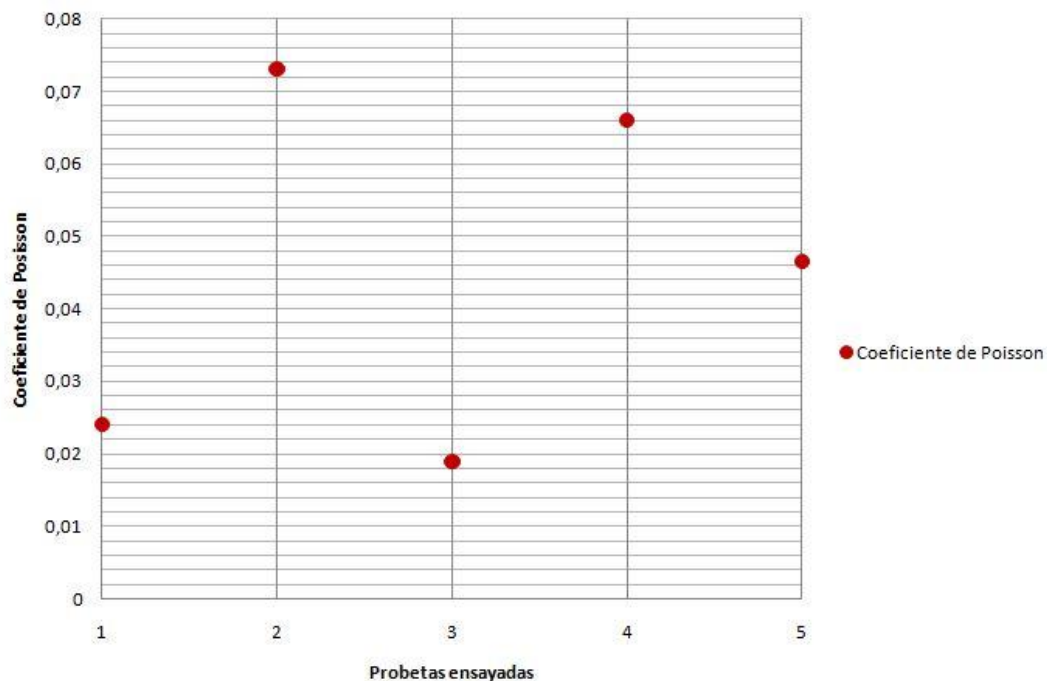


Figura 27 Dispersión de los datos obtenidos (coeficiente de Poisson)

En el caso del módulo elástico vemos como la dispersión no es muy grande entre cada uno de los datos. Y, además, ambas direcciones del material tienden al mismo valor.

En el caso del coeficiente de Poisson encontramos una nube de puntos un poco más dispersa, pero todos están en torno al 0.05 por lo que tenemos todos los puntos en cuenta.

Como dato estadístico mostramos la desviación típica de estos resultados:

$$s_E = 0.79326 \text{ GPa}$$

$$s_\nu = 0.02422$$

Estas desviaciones que nos hemos encontrado pueden ser debidas, entre otras cosas, a errores puntuales en las

medidas tomadas experimentalmente, como un leve deslizamiento de la probeta en las mordazas o que se despegara mínimamente la galga extensométrica del material.

Otra cosa importante a comentar es el carácter lineal de la curva tensión-deformación hasta la rotura, como comentamos anteriormente esto nos facilitará en gran medida el cálculo de algunos parámetros.

Como vamos a observar en la siguiente imagen (Figura 28) las propiedades del material en ambas direcciones son iguales, con lo que el material es ortótropo con las mismas propiedades en ambas direcciones.

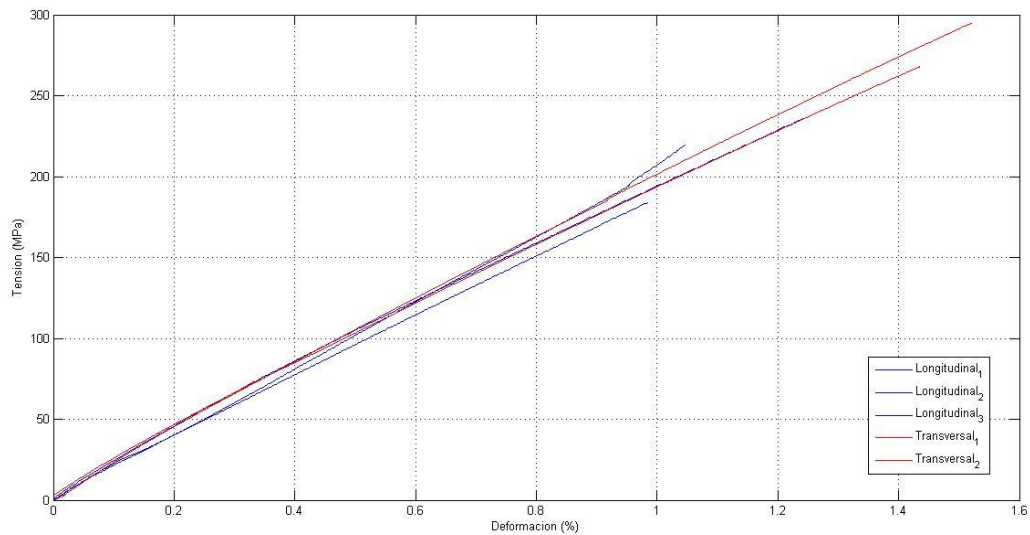


Figura 28 Tensión-Deformación en ambas direcciones

Podemos observar como la tendencia de las curvas en ambas direcciones es muy parecida por lo que podemos estimar, efectivamente, que las propiedades en ambas direcciones son idénticas.

Finalmente, estas propiedades que vamos a tomar para el resto de los cálculos que realicemos van a ser las siguientes (Tabla 2).

Propiedades del material	
Módulo elástico (GPa)	19.68
Coefficiente de Poisson	0.0475

Tabla 2 Propiedades del material





# 5 MEDIDA DE LAS TENSIONES RESIDUALES

## 5.1 Explicación técnica y procedimiento general

Como comentamos en la introducción de este documento, las tensiones residuales se definen como [6] aquellas tensiones que persisten en el material cuando este ya es libre de fuerzas externas o de gradientes de temperatura.

Como explica la teoría de la elasticidad, la tensión asociada a un canto libre es nula. En este principio nos vamos a apoyar para explicar cada una de las técnicas que se utilizan para medir las tensiones residuales y, en concreto, la que utilizaremos en nuestro caso.

Dentro de las técnicas comúnmente utilizadas para la medición de las tensiones residuales [10] encontramos varios grupos:

1. Relajación de tensiones
2. Difracción de rayos-X
3. Utilización de propiedades del material sensibles al estado de tensión
4. Técnica de propagación de grietas

En nuestro caso nos vamos a centrar en el primer punto de esta clasificación y vamos a ver los distintos procedimientos que se utilizan para la medición de dichas tensiones residuales mediante la relajación de tensiones [3], en todos ellos, utilizando galgas extensométricas eléctricas.

- Procedimiento I

El primer procedimiento que vamos a detallar se trata de la medición de las deformaciones provocadas en el material a través de las ya mencionadas galgas. En este caso, se colocan galgas en las dos direcciones del material sobre el solape de la soldadura, como se muestra en la Figura 29, y se procede a separar las dos partes soldadas hasta que queden completamente despegadas. Posteriormente, se mediría lo que marca cada una de las galgas para poder obtener las tensiones residuales del material.

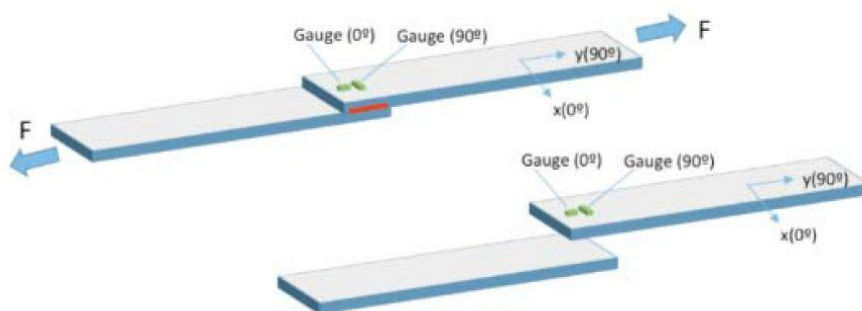


Figura 29 Procedimiento I para la medida de tensiones residuales

- Procedimiento II

En el segundo procedimiento (Figura 30), buscando que la forma de despegar las dos láminas sea menos brusca (en el procedimiento I se realiza mediante tracción), esta separación se realiza mediante fatiga. Se colocan las galgas de igual manera que en el procedimiento anterior pero en este caso se le aplica una carga de fatiga. Para concluir se mide la deformación en cada una de las galgas.

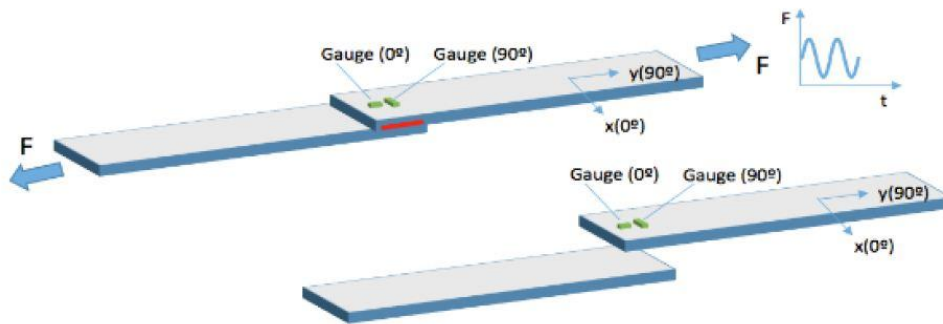


Figura 30 Procedimiento II para la medida de tensiones residuales

## 5.2 Descripción del procedimiento empleado

El tercer procedimiento de medición de tensiones residuales mediante técnicas de relajación es el que hemos utilizado en nuestros ensayos y que procedemos a explicar a continuación.

En este caso la relajación del material se realiza mediante mecanizado, al tratarse de galgas eléctricas conlleva un riesgo de que se dañe el cable o la soldadura con el fluido de refrigeración de la máquina de mecanizado.

En nuestro caso, la instrumentación de la probeta se ha realizado colocando 8 galgas extensométricas como se muestra en la Figuras 31-32.

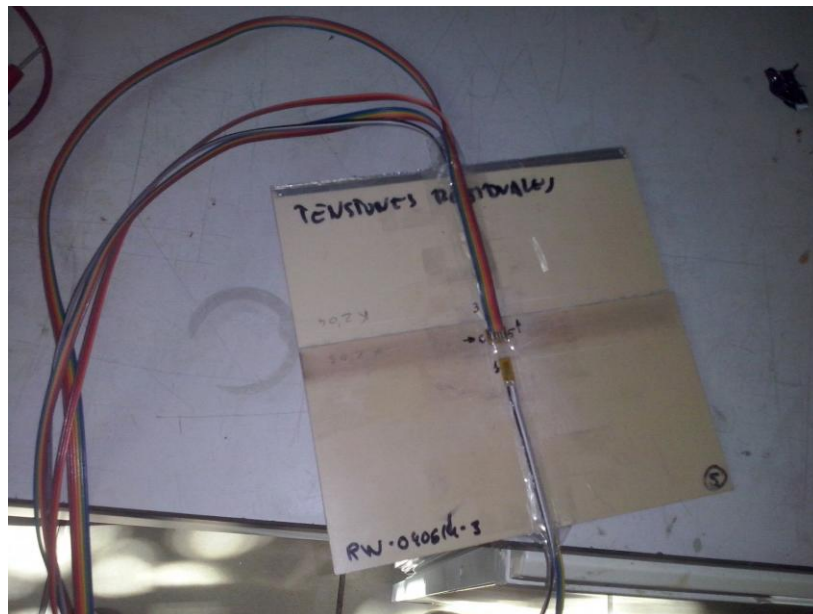


Figura 31 Anverso del panel para la medida de tensiones residuales

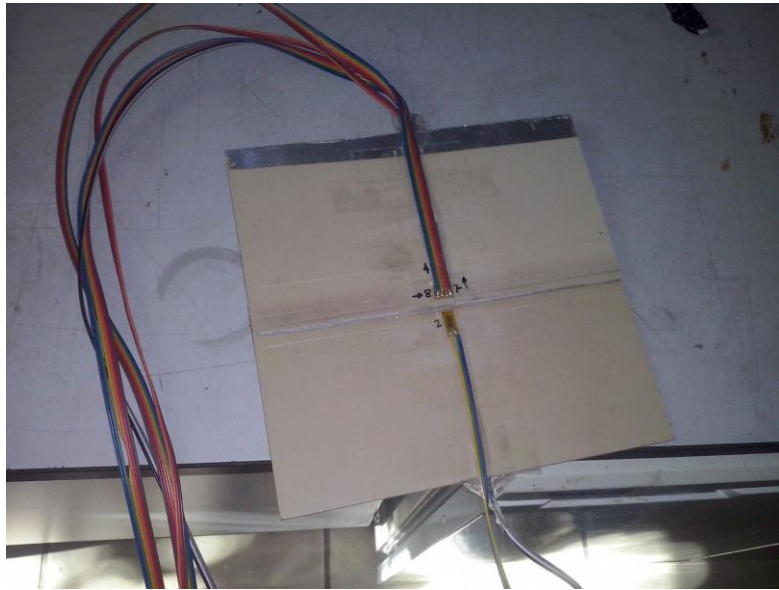


Figura 32 Reverso del panel para la medida de tensiones residuales

Como podemos observar las galgas 1, 2, 3 y 4 se encuentran situadas cerca de la zona de soldadura pero sin llegar a estar sobre la zona del solape, todas ellas miden en la dirección longitudinal, es decir en  $0^\circ$ . Las galgas 5, 6, 7 y 8 están situadas en el solape del material donde se realiza la soldadura. Las galgas 5 y 7 miden en la dirección de  $90^\circ$ , mientras que la 6 y 8 miden en la dirección de  $0^\circ$ .

La conexión de las galgas se han hecho a un indicador de deformación mediante una conexión de cuarto de puente como podemos observar en la Figura 33.



Figura 33 Conexión de los equipos e instrumentación del panel

Una vez conectados todos los equipos procedemos a realizar la medición de las deformaciones residuales que serán las que nos den la posibilidad de calcular las tensiones residuales. El procedimiento que vamos a emplear consiste en realizar un corte de forma perpendicular a la banda de soldadura muy próximo a las galgas que hemos colocado, tras ello, anotaremos las medidas que nos den las galgas y, posteriormente, realizaremos otro corte en las mismas condiciones que el anterior pero en el lado contrario que en el primer corte, siempre respecto a la galga (Figuras 34-35).



Figura 34 Mecanizado para la medida de tensiones residuales (1)



Figura 35 Mecanizado para la medida de tensiones residuales (2)

Al inicio el corte se intentó refrigerar mediante aire a presión, siendo insuficiente por lo que se tuvo que optar por refrigerar con agua con el riesgo que entrañaba. Tras el primer corte las galgas 5, 6, 7 y 8 se despegaron del material, es por ello por lo que carecemos de resultados en dichas galgas en el segundo corte.

### 5.3 Resultados y conclusiones

Una vez realizado el ensayo y, teniendo en cuenta los parámetros del material que obtuvimos en apartados anteriores mediante otros ensayos estamos en disposición de conocer las tensiones residuales a las que está sometido el material. Esto lo haremos mediante dos expresiones matemáticas que se muestran a continuación [3].

$$\sigma_0 = - \frac{E_0 \cdot \varepsilon_0 + \nu_{0\ 90} \cdot E_0 \cdot \varepsilon_{90}}{1 - \nu_{0\ 90}^2 \cdot \left(\frac{E_0}{E_{90}}\right)}$$

$$\sigma_{90} = - \frac{E_{90} \cdot \varepsilon_{90} + \nu_{0\ 90} \cdot E_0 \cdot \varepsilon_0}{1 - \nu_{0\ 90}^2 \cdot \left(\frac{E_0}{E_{90}}\right)}$$

Antes de comenzar con los cálculos vamos a definir claramente en qué dirección mide y dónde está situada cada una de las galgas (Figuras 36-37).

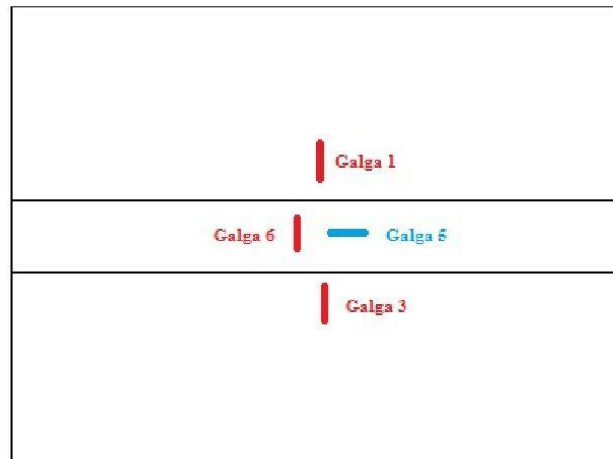


Figura 36 Esquema del anverso de la placa

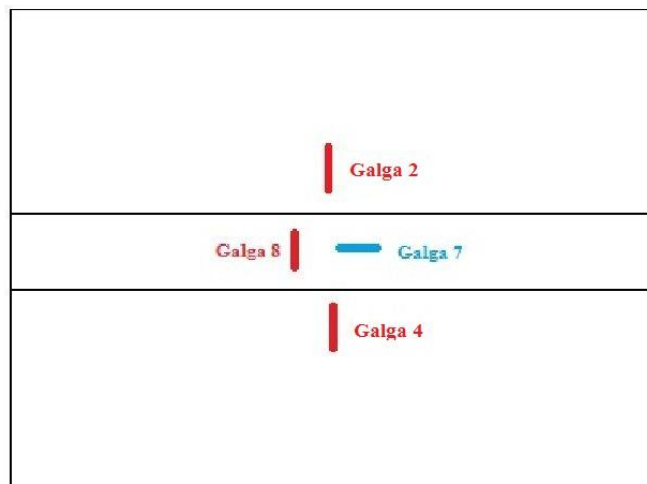


Figura 37 Esquema del reverso de la placa

Donde las líneas rojas denotan la medida de la deformación en la dirección de  $0^\circ$  y las líneas azules lo hacen con la medida de la deformación en la dirección de  $90^\circ$ .

En primer lugar se muestran (Tabla 3) los resultados obtenidos en cada una de las mediciones de las galgas, se puede apreciar el detalle que comentamos anteriormente del despegue de las galgas 5, 6, 7 y 8 en el segundo corte y de los que no tenemos resultados.

	Galga 1 ( $\mu\epsilon$ )	Galga 2 ( $\mu\epsilon$ )	Galga 3 ( $\mu\epsilon$ )	Galga 4 ( $\mu\epsilon$ )	Galga 5 ( $\mu\epsilon$ )	Galga 6 ( $\mu\epsilon$ )	Galga 7 ( $\mu\epsilon$ )	Galga 8 ( $\mu\epsilon$ )
<b>Corte 1</b>	52	-279	-244	-52	100	-187	-143	-319
<b>Corte 2</b>	-55	142	82	-7	-	-	-	-

Tabla 3 Medida experimental de las deformaciones residuales

Analizando los resultados obtenidos tomamos la decisión de hacer el análisis en varias etapas, como primera etapa vamos a considerar solo la zona del solape en la que se realizó la soldadura. En ella teníamos colocada una galga en cada una de las caras, tanto anverso como reverso, por lo que podremos saber las tensiones residuales que interiorizaba el material en la situación del primer corte en cada una de las caras mencionadas. Con las ecuaciones mostradas más arriba y haciendo uso de la información de la Tabla 3 obtenemos los siguientes resultados (Tabla 4).

	$\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ )		$\sigma$ (MPa)	
	0°	90°	0°	90°
<b>Anverso</b>	-187	100	3.4669	-1.7333
<b>Reverso</b>	-319	-143	6.1975	3.0085

Tabla 4 Resultados tensiones y deformaciones residuales en el solape

A la vista de estos resultados podemos ver como las tensiones residuales son más acentuadas en el reverso que en el anverso de nuestra probeta. Dado que la galga estaba situada justo en el centro de la misma, los resultados esperados [11] son de tracción en ambas direcciones del material. En la dirección de 90° del anverso de la probeta obtenemos un valor de compresión, pero se trata de un valor muy próximo a cero. De hecho, todos los valores de tensiones obtenidos son muy pequeños, rondan el 3% de la resistencia a tracción del material. Además, este valor de compresión también puede ser debido a que en la placa se haya producido una flexión motivada por dichas tensiones y sea la medida de deformación que se nos muestra.

A continuación vamos a estudiar los resultados obtenidos en el resto de las galgas, como estas galgas solo miden en la dirección longitudinal no podemos calcular las tensiones a las que está sometido el material, con lo que analizaremos las deformaciones del mismo comprobando que los resultados son coherentes (Tabla 5).

		Lámina 1	Lámina 2
		$\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ )
<b>Corte 1</b>	<b>Anverso</b>	52	-244
	<b>Reverso</b>	-280	-51
<b>Corte 2</b>	<b>Anverso</b>	-55	82
	<b>Reverso</b>	142	-7

Tabla 5 Resultados tensiones y deformaciones residuales en cada lámina

Según la distribución de las galgas mostrada en la Figura 36 y Figura 37 y considerando como lámina 1 la que contiene a la galga 1 y lámina 2 la que contiene a la galga 4, se espera a priori que las medidas de las galgas 1 y 2 coincidan en valor absoluto, al igual pasa con las galgas 3 y 4 debido a que miden la curvatura de una misma lámina. Observamos que esto no ocurre en ningún caso y puede ser debido a que los valores de deformación son muy próximos a cero por lo que la dispersión es muy pequeña en comparación con la resistencia del material.

En el corte 2 observamos como ninguno de los valores antes mencionado coinciden, aunque si observamos que la mayor relajación del material se ha producido en el corte 1, con lo que las deformaciones obtenidas en este segundo corte son algo menores en general.

En definitiva, como conclusión principal que sacamos de este ensayo podemos afirmar que las tensiones residuales a las que está sometida la probeta son muy pequeñas y se pueden considerar despreciables con respecto a la resistencia a la tracción del material.





# 6 COMPORTAMIENTO ESTÁTICO Y A FATIGA

## 6.1 Selección de la geometría y justificación

Para los ensayos estáticos hemos seleccionado tres tipos de geometría distintos [12; 13] para observar como esto influye en el comportamiento del material a tracción. El proceso seguido para fabricar cada uno de los tipos de probetas que hemos mencionado se explicó en detalle en el capítulo 3 de este documento. Como recordatorio añadimos de nuevo el esquema que muestra la configuración de cada una de las probetas (Figura 38).

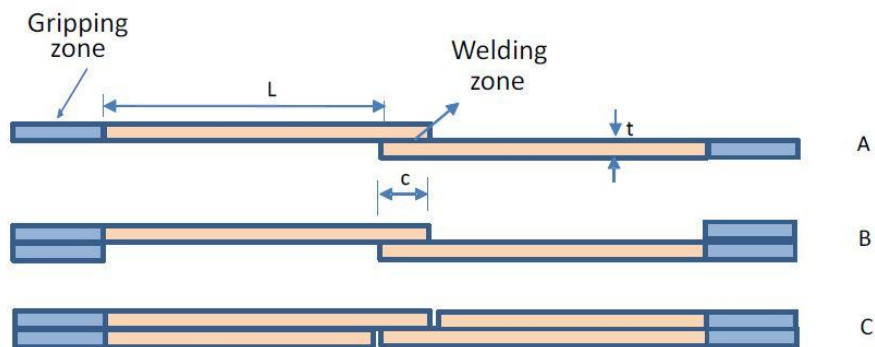


Figura 38 Tipos de probetas para ensayos estáticos

A continuación, observamos una gráfica (Figura 39) en la que podemos apreciar como los tipos A y B de estas probetas tienen un comportamiento muy parecido, mientras que el tipo C difiere un poco más de lo que sería el patrón.

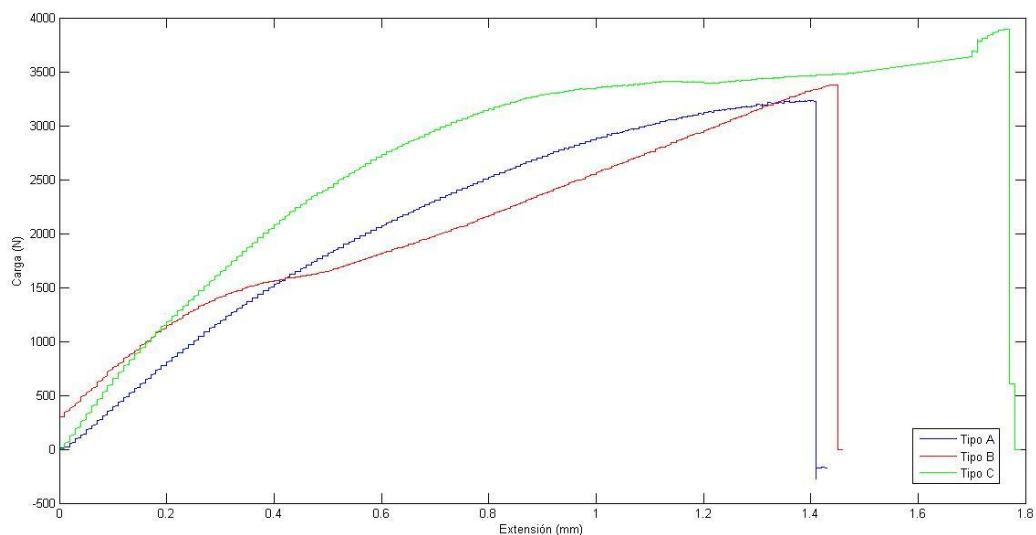


Figura 39 Comparación de las curvas tensión-deformación de cada tipo

Las pequeñas irregularidades que se dan en el tipo C son debidas a que en un cierto punto el material comenzó a deslizar de la mordaza, cosa que se solucionó al instante y el material pudo seguir con su ensayo sin afectar notablemente en los resultados. Vemos lo que hemos mencionado anteriormente, el parecido entre los tipos A y B y la diferencia con el tipo C.

Para el comportamiento a fatiga o dinámico solo utilizamos un mismo tipo de probeta, se trata del tipo A utilizado para el ensayo estático. Esto es debido a que lo que nos interesa en este tipo de ensayo es ver, según el tipo de carga a la que se le someta, en qué momento colapsa el material y, para poder comparar lo mejor es

que todas las probetas tengan la misma configuración.

## 6.2 Comportamiento estático

El objetivo principal de los ensayos estáticos es determinar el esfuerzo último soportado por la soldadura por resistencia aplicada a estas probetas cuando se le aplica una carga estática continuada a tracción. Los ensayos serán realizados sobre los tres tipos de probetas que hemos justificado en el apartado anterior.

### 6.2.1 Descripción del ensayo

Todos estos ensayos se han realizado en la Universidad de Sevilla en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales bajo la supervisión de A. Cañas.

La máquina empleada en dichos ensayos se trata de la Instron 4482 (Figura 40).



Figura 40 Máquina Instron 4482 para ensayos de tracción

Se ensayarán cada una de las probetas y se obtendrá la carga última que soporta dicha probeta, así como la tensión de cortadura de la misma en MPa. La velocidad empleada para los ensayos ha sido de 0.5 mm/min.

### 6.2.2 Resultados

A continuación se muestra una tabla (Tabla 6) con los resultados obtenidos de los distintos ensayos estáticos realizados donde se muestra la fuerza máxima en Newton que ha soportado cada una de las probetas junto con la tensión en MPa calculada con el área de solape. De estos datos se tomará la media de todas las probetas como resultado final del ensayo. Recordamos que teníamos 3 tipos de probetas, del tipo A disponemos de 3 probetas, mientras que de los tipos B y C disponemos de 2 probetas de cada uno.

Para el cálculo de la tensión máxima de cortadura del material se le ha proporcionado al programa de la máquina el área de solape del mismo, para que nos muestre el resultado en pantalla automáticamente cuando tenga el valor de fuerza máxima.

	Tipo A		Tipo B		Tipo C	
	F máx (N)	Tau máx (MPa)	F máx (N)	Tau máx (MPa)	F máx (N)	Tau máx (MPa)
Probeta 1	3234.367	7.8408	3378.564	8.1411	3897.513	8.9598
Probeta 2	3505.113	7.9661	3384.45	7.7358	3561.03	8.4175
Probeta 3	3328.533	8.0691	---	---	---	---
Mínimo	3234.367	7.8408	3378.564	7.7358	3561.03	8.4175
Máximo	3328.533	8.0691	3384.45	8.1411	3897.513	8.9598
Media	<b>3356.004</b>	<b>7.9586</b>	<b>3381.507</b>	<b>7.9384</b>	<b>3729.27</b>	<b>8.6886</b>

Tabla 6 Resultados ensayos estáticos

### 6.2.3 Conclusiones

En primer lugar, a la vista de los resultados obtenidos (Tabla 6) vemos como se corrobora la conclusión a la que llegamos en la justificación de la geometría del material, el tipo C soporta bastante más carga antes de la rotura. Además vemos como las tensiones máximas antes de rotura de las probetas A y B son bastante parecidas.

Todos los ensayos realizados han terminado con un resultado de rotura interlaminar del material como podemos observar en la Figura 41.



Figura 41 Modo de fallo tras el ensayo estático

Lo cual quiere decir que la soldadura estaba perfectamente realizada y que se ha roto porque se ha llegado a su límite no porque el material adhesivo se haya despegado.

Además podemos comparar la superficie de rotura de cada uno de los tipos de probetas que hemos ensayado (Figuras 42-44).

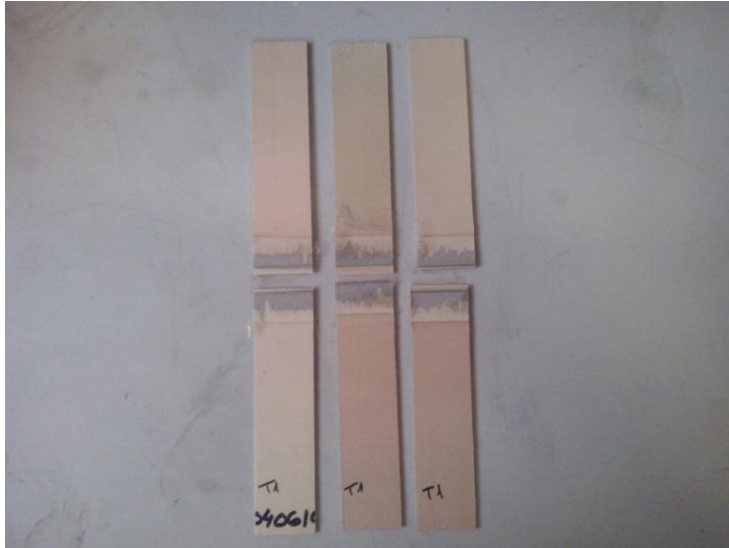


Figura 42 Probetas tipo A



Figura 43 Probetas tipo B



Figura 44 Probetas tipo C

A continuación, para mayor visualización de los resultados, veremos un gráfico de barras con cada uno de dichos resultados estáticos (Figura 45).

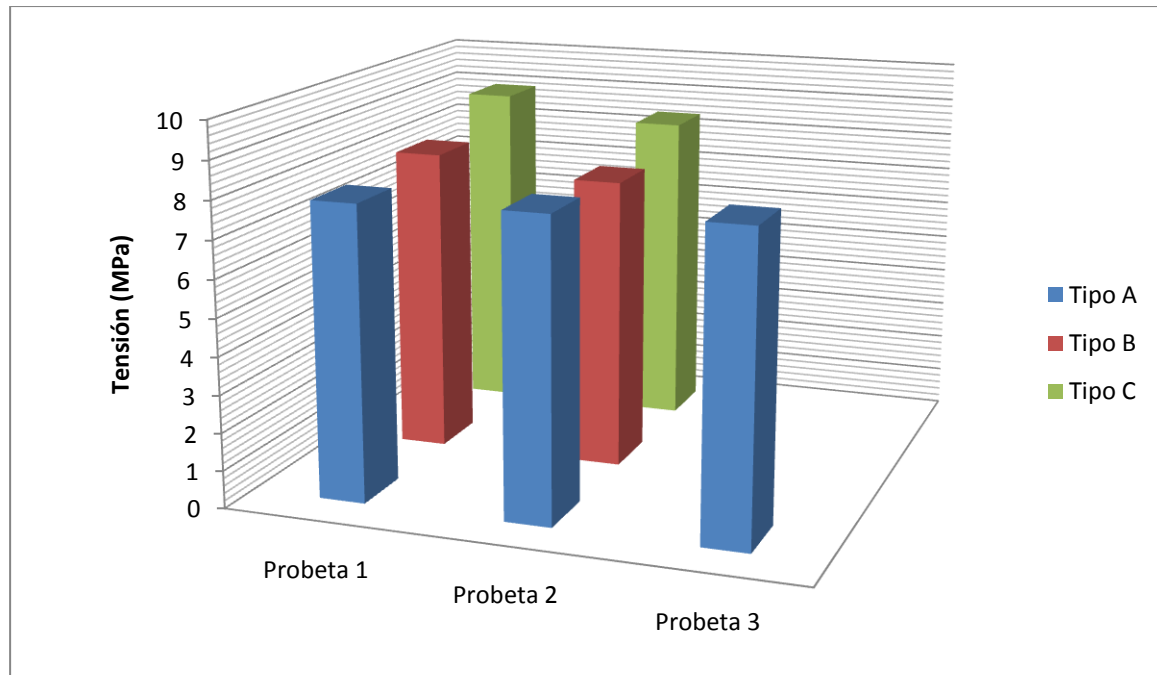


Figura 45 Gráfico de la tensión máxima en los ensayos estáticos

Podemos observar como las tensiones máximas del tipo C son superiores a las del resto.

## 6.3 Comportamiento a fatiga

El principal objetivo de estos ensayos es determinar el comportamiento bajo cargas dinámicas del material en estudio.

Otro de los objetivos que teníamos en los ensayos estáticos y que no hemos mencionado en el apartado anterior era el de conocer los límites entre los que podíamos someter al material en los ensayos dinámicos, esto es, conocer la carga a la que rompe el material para nunca superar dicho valor en un ensayo de fatiga, siempre quedarnos en un tanto por ciento inferior al límite de rotura.

### 6.3.1 Descripción del ensayo

Al igual que todos los ensayos anteriores, estos ensayos han sido realizados en la Universidad de Sevilla bajo la supervisión de A. Cañas. La máquina utilizada para este tipo de ensayos es la Instron 8801 (Figuras 46-47).



Figura 46 Máquina Instron 8801 para ensayos de fatiga (1)



Figura 47 Máquina Instron 8801 para ensayos de fatiga (2)

Estos ensayos consisten en someter a cada una de las probetas a un ciclo de carga, que iremos variando en cada una de las probetas, a una frecuencia determinada. Al no tener datos sobre cómo se iba a comportar el material en este tipo de ensayos, decidimos realizar los primeros ensayos con una frecuencia muy baja, para observar su comportamiento. Esta frecuencia comenzó siendo de 5 Hz y se fue incrementando hacia los 7, 10, 12, 15, 20 hasta finalmente quedarnos con una frecuencia de 25 Hz para el primero y todos los ensayos que le seguían. El incremento de la frecuencia a la que se realizaba el ensayo suponía el riesgo de que la probeta se calentara en exceso, así que nos quedamos con el valor máximo que podíamos introducir sin que la probeta se calentara.

Como hemos mencionado anteriormente, disponemos de 10 probetas para este tipo de ensayo, de las cuales cada una estará sometida a una carga, así dispondremos de dos probetas al 70% y 75% y una de cada una de las siguientes cargas: 50%, 55%, 60%, 65%, 80% y 90%, todos ellos tantos por ciento del límite de rotura estático del material, que aproximando por los distintos ensayos que se realizaron se decidió en 3.2 kN. Todas las cargas que se han tomado tienen como objeto conseguir una dispersión de puntos para finalmente poder hallar la curva de fatiga del material. En todos los ensayos se ha tomado  $R=0.1$ , que nos permite calcular las tensiones mínimas a partir de las máximas que hemos comentado previamente.

Además de los ciclos que aguanta el material en cada uno de los ensayos hemos tenido en cuenta el modo de fallo del mismo, que lo veremos en el apartado 6.3.4 de este documento.

### 6.3.2 Análisis estadísticos

En temas de ensayos de fatiga conviene hacer un análisis estadístico de los resultados obtenidos. A continuación, vamos a hacer una breve explicación de cómo será dicho análisis para, en el apartados siguiente, exponer los resultados del mismo.

Los datos de fatiga se suelen representar en una escala logarítmica, esto es, logaritmo del rango de tensiones frente al logaritmo del número de ciclos. Cuando hacemos esto observamos una dispersión de los datos que intentaremos aproximar por una recta mediante el método de los mínimos cuadrados.

El objetivo que nos marcamos en un ensayo de este tipo es el de poder aproximar la curva de vida de un material, para así saber a qué número de ciclos debe romper antes de que lo haga, y, además, poder comparar los datos teóricos con los datos experimentales obtenidos.

Una curva del estilo del que hemos mencionado se muestra en la Figura 48.

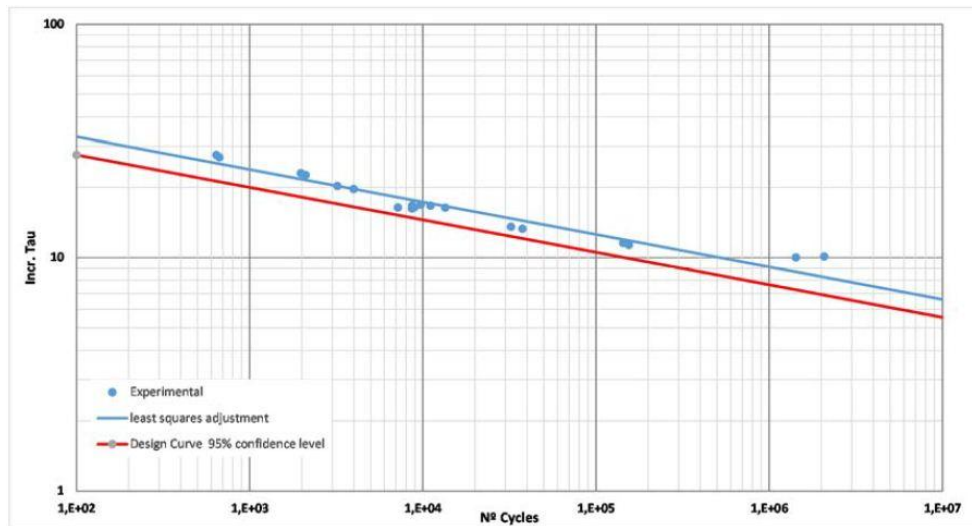


Figura 48 Gráfica de muestra del análisis estadístico de la fatiga

Donde se puede observar como los puntos son los datos experimentales que se han obtenido, mientras que la línea azul es la recta de ajuste de dichos puntos experimentales utilizando el método antes mencionado de los mínimos cuadrados. La línea roja representa la curva de diseño para el 95%, que quiere decir que, con un 95% de probabilidad, todos los puntos estarán por encima de dicha línea.

Para obtener esta recta teórica se tiene como objetivo alcanzar algo del estilo de la siguiente expresión,

$$\text{Log } N = \text{Log } A - m \text{Log } \Delta\tau \quad \text{ó} \quad \text{Log } \Delta\tau = (1/m) \text{Log } A - (1/m) \text{Log } N$$

Y buscar los parecidos de dichas expresiones con los de una recta. Para esto se pueden seguir dos procedimientos:

- Considerar como variable independiente  $x (= \text{Log } \Delta\tau)$  y predecir  $y (= \text{Log } N)$
- Considerar como variable independiente  $y (= \text{Log } \Delta\tau)$  y predecir  $x (= \text{Log } N)$

Para el caso a)

$$\text{Valor estimado } (\hat{y}_i = \text{Log } N): \quad \hat{y}_i = a + bx_i$$

$$\text{Valor real: } y_i = a + b x_i + e_i$$

Siendo,  $x = \text{Log } \Delta\tau$  y  $a = \text{Log } A$  ;  $b = -m$  y  $e_i$  el error cometido (residuo)

Para el caso b)

Valor estimado ( $\hat{y}_i = \text{Log } \Delta\tau$ ):  $\hat{y}_i = a + bx_i$

Valor real ( $y_i = \text{Log } \Delta\tau$ ):  $y_i = a + b x_i + g_i$

Siendo,  $x = \text{Log } N$ ;  $a = (1/m) \text{Log } A$  ;  $b = -1/m$  y  $g_i$  el error cometido (residuo)

Se puede observar como el error cometido para ambos casos es diferente, normalmente, para casos de fatiga, el valor que se toma como independiente, es decir, la predicción que realizamos es la del número de ciclos por, lo que es el caso “a” el que se suele utilizar y el que vamos a usar en nuestro caso.

Para el cálculo de los coeficientes “a” y “b” se utiliza, como hemos mencionado con anterioridad, el método de los mínimos cuadrados, un método que minimiza la suma de los cuadrados de los residuos. Por lo que, la condición (tomando como procedimiento a utilizar el método “a”) será la siguiente:

$$\text{Min} \left( \sum_{i=1}^{np} e_i^2 \right) = \text{Min} \left( \sum_{i=1}^{np} (y_i - \hat{y}_i)^2 \right) = \text{Min} \left( \sum_{i=1}^{np} (y_i - a - bx_i)^2 \right)$$

Donde “np” representa el número de puntos experimentales a ajustar que coincidirá con el número de ensayos que realicemos.

Así, una vez que tenemos la condición a cumplir para obtener los coeficientes de la recta de regresión que ajusta a los puntos experimentales solo nos queda aplicarla.

Para el coeficiente “a” la condición queda como sigue:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{np} e_i^2}{\partial a} = 0 \Rightarrow -2 \sum_{i=1}^{np} (y_i - a - bx_i) = 0$$

Al igual, aplicando la misma condición para “b”:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{np} e_i^2}{\partial b} = 0 \Rightarrow -2 \sum_{i=1}^{np} (y_i - a - bx_i) x_i = 0$$

Y resolviendo este sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas obtenemos el valor de ambos coeficientes, que en su expresión matemática tienen la siguiente forma:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{np} x_i \sum_{i=1}^{np} y_i - \sum_{i=1}^{np} x_i y_i}{(\sum_{i=1}^{np} x_i)^2 - np \sum_{i=1}^{np} x_i^2} \quad ; \quad a = \frac{\sum_{i=1}^{np} y_i - b \sum_{i=1}^{np} x_i}{np}$$

Una vez que tenemos realizado el ajuste, una medida de la calidad del mismo, para comprobar que la recta de verdad se aproxima a lo que la realidad nos muestra, es lo que se denomina como coeficiente de correlación, que tiene la siguiente forma:

$$r = \frac{np \sum_{i=1}^{np} x_i y_i - \sum_{i=1}^{np} x_i \sum_{i=1}^{np} y_i}{\sqrt{(np \sum_{i=1}^{np} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{np} x_i)^2)(np \sum_{i=1}^{np} y_i^2 - (\sum_{i=1}^{np} y_i)^2)}}$$

Un valor óptimo de este coeficiente, que marcaría un ajuste perfecto, sería  $r=1$ .

Una vez obtenido todo esto podemos predecir la vida del material a partir de la sollicitación a la que se vaya a someter.

Para este desarrollo estadístico de los datos experimentales vamos a utilizar una hoja de cálculo proporcionada por el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla. En dicha hoja obtendremos la recta de ajuste mediante los mínimos cuadrados, los puntos experimentales y la recta de diseño



del 95% introduciendo las cargas a las que se somete a la probeta en cada uno de los ensayos, la geometría de la misma y el número de ciclos que soporta dicha probeta (Figura 49).

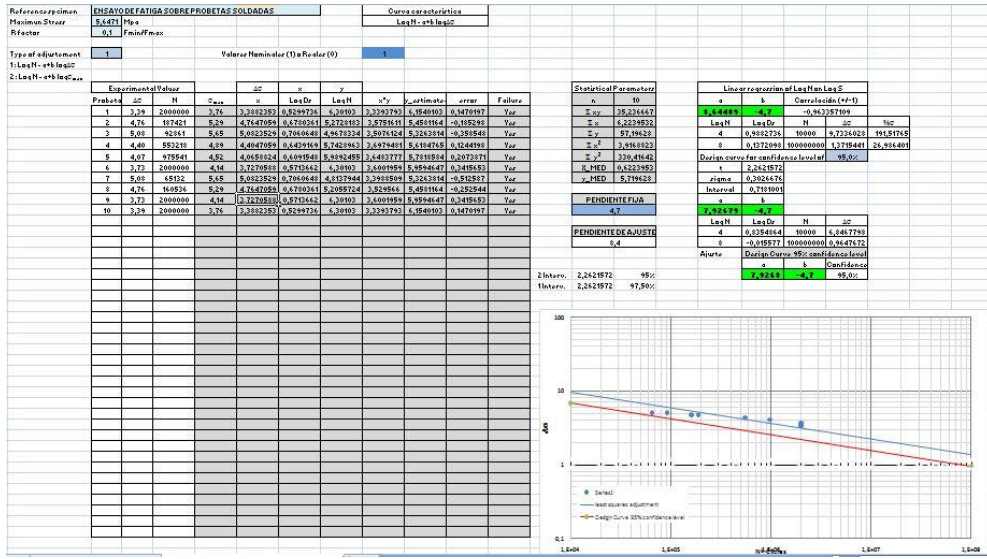


Figura 49 Hoja de cálculo para análisis estadístico

### 6.3.3 Resultados

Un total de 10 probetas han sido ensayadas dinámicamente en la realización de este proyecto, con las distintas cargas que se mencionaron al inicio del capítulo, a continuación, se muestra una tabla (Tabla 7) con los datos de cada uno de los ensayos. Todos los porcentajes son realizados en base a la carga de rotura en los ensayos estáticos que se ha considerado, tras realizar varios ensayos y estudiar los resultados en 3.2 kN.

Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
%Fmax	50%	55%	60%	65%	70%	70%	75%	75%	80%	90%
Fmax (kN)	1.6	1.76	1.92	2.08	2.24	2.24	2.4	2.4	2.56	2.88
Fmin (kN)	0.16	0.176	0.192	0.208	0.224	0.224	0.24	0.24	0.256	0.288
Fmed (kN)	0.88	0.968	1.056	1.144	1.232	1.232	1.32	1.32	1.408	1.584
Falt (kN)	0.72	0.792	0.864	0.936	1.008	1.008	1.08	1.08	1.152	1.296
Nº ciclos	-	-	975541	553218	187421	160536	92861	65132	8113	3623
ΔF (kN)	1.44	1.584	1.728	1.872	2.016	2.016	2.16	2.16	2.304	2.592
Solape (mm)	13.84	13.92	13.87	13.32	13.25	13.12	13.55	13.13	13.45	13.17
Ancho (mm)	24.92	24.87	24.82	24.86	24.96	24.91	24.89	24.82	24.76	24.96
Δτ (MPa)	4.17	4.58	5.02	5.65	6.10	6.17	6.40	6.63	6.92	7.89
Rompe	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 7 Resultados ensayos de fatiga

En dicha tabla encontramos los parámetros necesarios para los ensayos de fatiga como son, fuerza máxima (**Fmax**), fuerza mínima (**Fmin**), fuerza media (**Fmin**) y fuerza alterna (**Falt**). Para el cálculo de la fuerza media y alterna se han utilizado las siguientes expresiones:

$$F_{med} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$$

$$F_{alt} = \frac{(F_{max} - F_{min})}{2}$$

El número de ciclos se refiere a los ciclos que ha resistido la probeta,  $\Delta F$  se trata del incremento de fuerza a la que se ha sometido, calculado como:

$$\Delta F = F_{max} - F_{min}$$

El ancho y el solape son parámetros geométricos de la probeta y,  $\Delta\sigma$  es la tensión que provoca el incremento de fuerza antes descrito.

$$\Delta\tau = \frac{\Delta F}{solape \cdot ancho}$$

Todo ello mostrado en las unidades que se muestran en la tabla. Como dato característico y evidente el número de ciclos va disminuyendo conforme aumentamos el estado de carga del material.

A continuación se muestran dos gráficas, en la primera de ellas (Figura 50) se representan en escala logarítmica la serie de datos que hemos obtenido de los ensayos experimentales, junto con la recta de ajuste de mínimos cuadrados y la curva de diseño del 95%. En la segunda (Figura 51) se representa el tanto por ciento de la carga estática al que se ha sometido la probeta frente al número de ciclos que ha soportado.

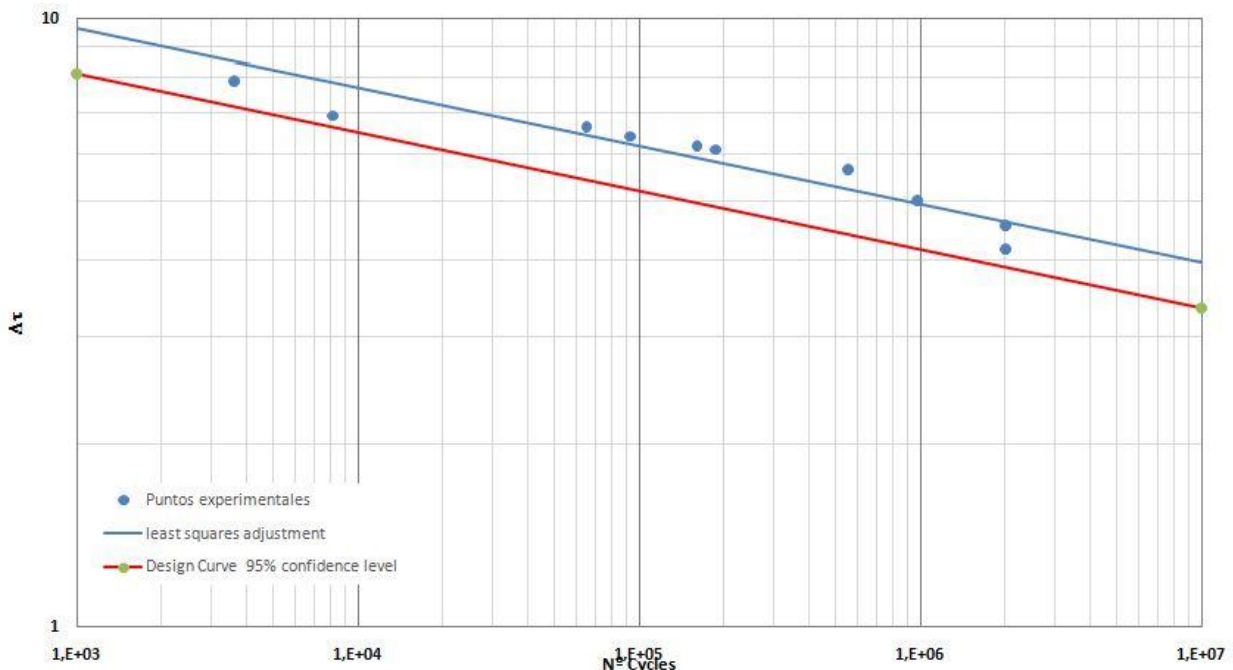


Figura 50 Ajuste estadístico de los resultados de fatiga

El ajuste de los mínimos cuadrados se considera bueno con un coeficiente  $r=-0.955$  muy próximo a -1.

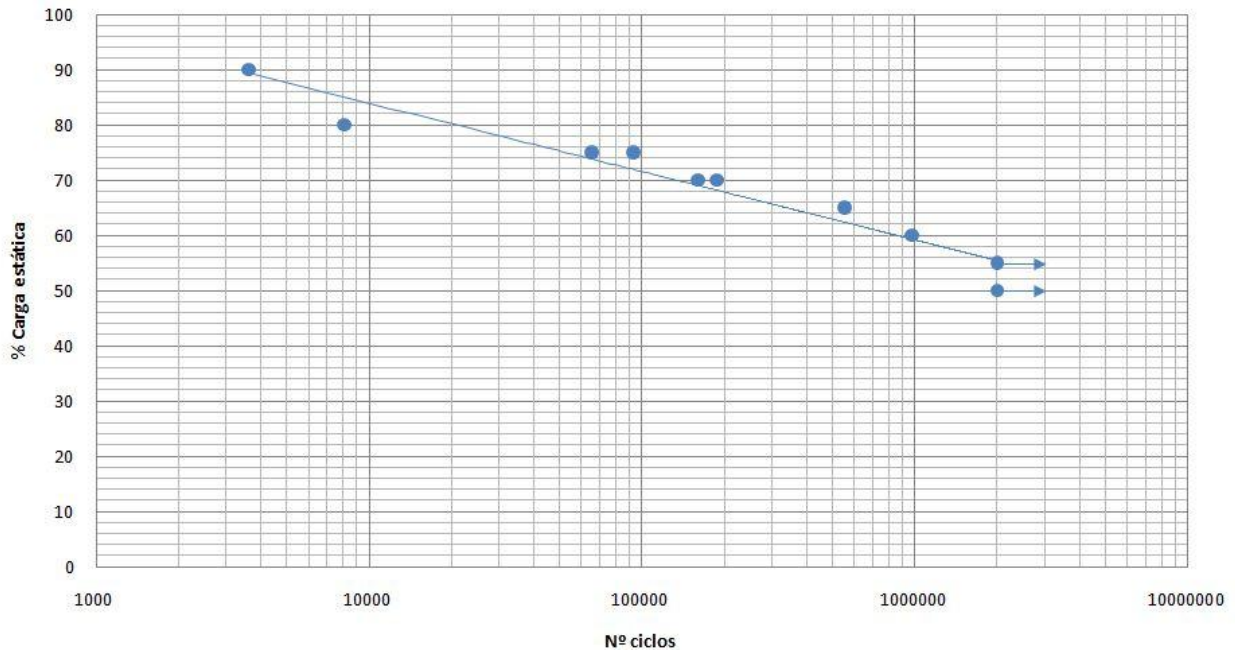


Figura 51 Curva S-N de fatiga

Se puede observar claramente como a partir del 55% de la carga estática el material alcanza la vida infinita.

#### 6.3.4 Modos de fallo

Como modos de fallo podemos, en primer lugar, destacar dos categorías: fallo adhesivo y fallo cohesivo [14]. El fallo adhesivo (Figura 52) es el que se da cuando dicho fallo se produce en la interfase de unión entre el sustrato y el adhesivo. En estos casos es importante prestar una especial atención al proceso de fabricación de la unión.



Figura 52 Fractura adhesiva en uniones

El otro tipo de fallo que hemos comentado previamente es el fallo cohesivo (Figura 53), en este caso la fractura se produce en el adhesivo, rompiéndose las fuerzas de cohesión del mismo. Dentro de esta clasificación se prefiere que el fallo que se produzca sea cohesivo,



Figura 53 Fractura cohesiva en uniones

Sin embargo, en el proyecto presente no podemos hablar de fallo cohesivo o fallo adhesivo puesto que esto

solo se da cuando entre los dos sustratos se encuentra un material adherente y, en nuestro caso, lo que tenemos entre ambos es un material considerado material caliente que no se trata de un adhesivo.

Así, dentro del tipo de ensayo de cortadura que le hemos realizado a nuestras probetas se pueden encontrar tres tipos diferentes de fallo [15; 16] de las mismas: fallo interlaminar, fallo interfacial y fallo de resistencia.

- Se considera que el fallo que se ha producido es interlaminar cuando ocurre dentro de la lámina de material, dentro del elemento caliente o dentro de ambos.
- El fallo es interfacial cuando ocurre en la interfase entre la lámina y el elemento caliente.
- El fallo se denomina de resistencia cuando el límite de resistencia de la lámina es inferior al de la soldadura y, por lo tanto, la lámina falla antes que el elemento caliente.

En nuestro caso, en parte de las probetas ensayadas la lámina se ha desprendido del elemento caliente, motivo por el cual se ha decidido desechar los resultados obtenidos, puesto que, ese tipo de rotura era muestra de que la soldadura no estaba bien realizada y toda la información que se sacara al respecto carecía de significado. El resto de las probetas se puede considerar que han tenido un fallo interlaminar puesto que la rotura se ha producido dentro del elemento caliente como podemos observar en la Figuras 54-55.



Figura 54 Superficie de rotura en los ensayos de fatiga (1)



Figura 55 Superficie de rotura en los ensayos de fatiga (2)

### 6.3.5 Conclusiones

A continuación, abordaremos las principales conclusiones a las que hemos llegado tras realizar el análisis dinámico del material.

En primer lugar y como conclusión principal de este análisis podemos afirmar que para una carga igual o inferior al 55% de la carga estática del material este alcanza la vida infinita. Además la tendencia que siguen los puntos experimentales en cada uno de los estados de carga se puede suponer como lineal a la vista de la Figura 50.

Otra cosa importante que observamos en la Figura 50 es que los puntos obtenidos para un mismo nivel de carga están relativamente próximos, es decir, que tenemos una dispersión pequeña, lo que corrobora que los ensayos muestran, en mayor o menor medida, la realidad de nuestro material.

La superficie de rotura, como podemos apreciar en la Figura 54 y Figura 55 tiene un claro aspecto de rotura interlaminar donde el material caliente se queda en cada uno de los substratos. Dentro de este análisis de la superficie de fractura del material vamos a comparar cada una de las probetas ensayadas para ver cómo influye el nivel de carga aplicado a dicha superficie (Figura 56).



Figura 56 Probetas rotas por fatiga

De izquierda a derecha vemos las probetas correspondientes al 90%, 80%, 75%, 75%, 70%, 70%, 65%, 60%, 55% y 50% de la carga estática. Podemos observar, a grandes rasgos, como conforme aumentamos el nivel de carga al que se somete al material, la superficie de unión pasa de estar repartida entre los dos substratos a cada vez quedarse más en el substrato inferior según la posición del ensayo.



# 7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

---

El presente proyecto está enfocado en conocer el comportamiento tanto estático como a fatiga de un material termoplástico, en nuestro caso fibra de vidrio PPS, soldado mediante el procedimiento de soldadura por resistencia. Para conocer más adecuadamente el comportamiento de este material se calculan las posibles tensiones residuales que pueden aparecer en el material debido a la soldadura.

## 7.1 Conclusiones

Para la realización de este proyecto se nos proporcionaron varios paneles de fibra de vidrio PPS soldada mediante el método de la soldadura por resistencia y, además de eso, dispusimos de otra serie de paneles del mismo material pero sin soldar.

En primer lugar, obtuvimos una serie de probetas de los paneles sin soldar según la norma [16] UNE-EN-ISO 527-4 con el objeto de caracterizar el material en tracción, lo que más nos interesaba era obtener los parámetros de rigidez mediante el módulo de elasticidad en las dos direcciones ortogonales ( $E_{11}$  y  $E_{22}$ ) y el coeficiente de Poisson del material. Se realizaron ensayos de tracción de las probetas debidamente preparadas y en ambas direcciones para poder aplicar la carga en las dos direcciones del material, tras eso se obtuvieron las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  del mismo a partir de las cuales obtuvimos los distintos parámetros característicos. En los distintos ensayos llegamos a la conclusión que el material se comporta de forma muy parecida en ambas direcciones, con lo que el módulo elástico y el coeficiente de Poisson se toma idéntico para los dos casos.

Una vez caracterizadas las propiedades del material, realizamos el análisis estático del mismo. Las probetas nos las proporcionaron soldadas, por lo que, no realizamos ningún ensayo de calidad de dicha soldadura y pasamos directamente a realizar los ensayos estáticos. Ensayamos siguiendo las normas [12] EN pr2667-1 y [13] AITM1-0019 que nos determinan que debemos realizar tres tipos distintos de probetas para caracterizar estáticamente el material soldado. Durante la realización de los ensayos en parte de las probetas se desprendió el material caliente de uno de los substratos, por lo que debimos desechar dichas probetas de todo un panel, ya que, los resultados obtenidos carecían de significado. Tras fabricar de nuevo las probetas una vez que nos aseguramos que las restantes tienen la soldadura en perfectas condiciones, ensayamos cada una de ellas concluyendo que los tipos A y B tienen un comportamiento muy parecido mientras que ambos difieren del tipo C. Todos ellos rondan los 8 MPa de tensión última, los dos primeros un poco por defecto mientras que el tercero la sobrepasa. Uno de los datos importantes a concluir en estos ensayos es la fuerza máxima que son capaces de soportar las probetas, puesto que ese dato nos será necesario para caracterizar dinámicamente el material, esta fuerza (carga estática) se estimó, tras analizar los datos, en 3.2 kN.

A continuación, con este último dato que hemos mencionado caracterizamos dinámicamente el material. Para ello dispusimos de una serie de probetas a las que les asignamos distintas cargas máximas en tanto por ciento de la carga estática sin superar en ningún caso el 100% con el objeto de conseguir una nube de puntos que nos dé una idea de la curva S-N del material. Tras realizar esto pudimos concluir que a partir del 55% de la carga estática el material se comporta con vida infinita.

Por último, el objeto principal de este proyecto se trata de determinar si existen tensiones residuales debidas a la soldadura en el material. Esta medida se realizó siguiendo un solo procedimiento aunque en este documento se detallan varios totalmente válidos. Realizamos dicho procedimiento que consiste en instrumentar la probeta con galgas extensométricas y realizar unos cortes para aliviar al material y reflejar las deformaciones residuales a las que estaba sometido y con ello poder calcular las tensiones asociadas. Realizando este procedimiento nos encontramos con que al realizar el primer corte se despegaron dos de las galgas, con lo que, no pudimos obtener sus resultados en el segundo corte. A pesar de estos inconvenientes obtuvimos la medida que las galgas nos proporcionaban dando estas unos valores muy pequeños. Los valores de tensión obtenidos en la zona del solape de la probeta rondaba el 3% de la resistencia a tracción del material, por lo que, visto los resultados podríamos concluir que el material se encuentra sometido a tensiones residuales pero que estas son tan pequeñas que las podemos considerar despreciables. Otro dato relevante que pudimos obtener es que en valor absoluto las tensiones longitudinales se pueden estimar por el doble de las transversales.

## 7.2 Desarrollos futuros

Tras realizar este proyecto algunas cuestiones surgen con las que se puede hacer un análisis en el futuro y seguir investigando sobre el tema. Algunas de ellas se muestran a continuación:

- Un aspecto importante y que no se ha tenido en cuenta por falta de tiempo y de material en este estudio es variar el coeficiente R de los ensayos de fatiga. Nosotros hemos tomado un  $R=0.1$  para todos los ensayos pero sería interesante variar ese parámetro y ver cómo se comporta el material en cada caso.
- Otra variación importante para ver el comportamiento dinámico del material sería variar la geometría de las probetas al igual que hicimos con los ensayos estáticos. Esto puede influir notablemente en la vida a fatiga del material.
- También convendría realizar la medida de las tensiones residuales por otros de los procedimientos explicados y poder comparar los datos que se obtengan con los resultados obtenidos en este proyecto.
- Un análisis interesante que se podría hacer para confiar plenamente en los resultados obtenidos de las tensiones residuales sería realizar un análisis por elementos finitos y obtener de forma numérica el valor de las tensiones residuales que se encuentran en el material y así, poder compararlas con los valores experimentales obtenidos.
- Por último, un estudio bastante más amplio sobre el tema se podría realizar investigando la influencia de la temperatura en todos los ensayos que hemos realizado en este proyecto ya que nos hemos limitado a realizar todos los ensayos a temperatura ambiente.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1]: Patricia P. Parlevliet, H. E. (2006). *Residual stresses in thermoplastic composites - A study of the literature - Part I: Formation of residual stresses*.
- [2]: Paris, F., Cañas, J., Marín, J., & Barroso, A. *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*. Sevilla: Sección de publicaciones Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- [3]: Racero, M. C. (2015). *Ultrasonic welded thermoplastic composites. An experimental study on the static and fatigue behaviour*. Sevilla.
- [4]: Costa, A. P., Botelho, E. C., Costa, M. L., Narita, N. E., & Tarpani, J. R. (2012). *A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications*.
- [5]: Villegas, I. F., Moser, L., Yousefpour, A., Mitschang, P., & Bersee, H. E. (2012). *Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites*.
- [6]: Gordillo, V. R. (2013). *Análisis mediante simulación del efecto de las reparaciones en las tensiones residuales de soldeo*. Cartagena
- [7]: Jacobino, J. G. (Junio de 2006). Monografías. Recuperado el 27 de Agosto de 2015, de <http://www.monografias.com/trabajos36/tensiones-residuales/tensiones-residuales2.shtml#origen>
- [8]: Parlevliet, P. P., Bersee, H. E., & Beukers, A. (2007). *Residual stresses in thermoplastic composites - a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses*.
- [9]: París, F. (2000). *Teoría de la Elasticidad*. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.
- [10]: Parlevliet, P. P., Bersee, H. E., & Beukers, A. (2006). *Residual stresses in thermoplastic composites - A study of the literature - Part II: Experimental techniques*.
- [11]: Leggatt, R., & Tavakoli, S. (1997). *Measurement of residual stresses in welded thermoplastics*.
- [12]: EN pr2667-1 (1996). *Aerospace series non-metallic materials foaming structural adhesives test methods. Part 1: Tensile single lap shear*.
- [13]: AITM1-0019 (2014). *Determination of Tensile Lap Shear Strength of Composite Joints*. AIRBUS
- [14]: Guillén, J. C. (2008). *Evaluación mecánica de uniones adhesivas de materiales compuestos en la construcción naval*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- [15]: Dubé, A. C., Hubert, P., Yousefpour, A., & Bersee, H. E. (2013). *Characterization of resistance-welded thermoplastic composite double-lap joints under static and fatigue loading*.
- [16]: UNE-EN ISO 527-4 (1997). *Determinación de las propiedades en tracción. Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras*.



# ANEXO A. CARACTERIZACIÓN

En este anexo vamos a justificar el cálculo de las propiedades del material en la caracterización del mismo. El cálculo de las propiedades del material se hizo con las expresiones matemáticas mostradas en el capítulo 4 introduciendo los datos experimentales recogidos.

Para el cálculo del módulo elástico hemos seguido dos procedimientos alternativos para comparar los resultados obtenidos en cada uno de ellos, cada uno de los cuales se explican a continuación.

En el primero de ellos, como el comportamiento del material se ha supuesto lineal hasta la rotura hemos ajustado los datos experimentales por una recta mediante el procedimiento de los mínimos cuadrados, obteniendo los ajustes que se muestran en las Figuras 57-61 donde las tres primeras representan ensayos en la dirección longitudinal y las dos últimas lo hacen en la dirección transversal del material.

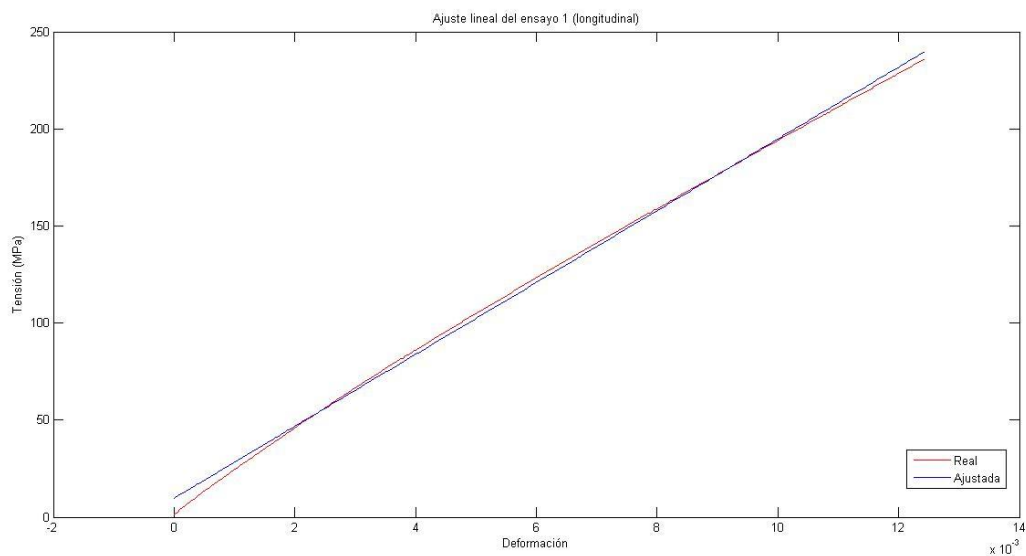


Figura 57 Ajuste lineal del ensayo 1 (longitudinal 1)

$$r_1 = 0.9993$$

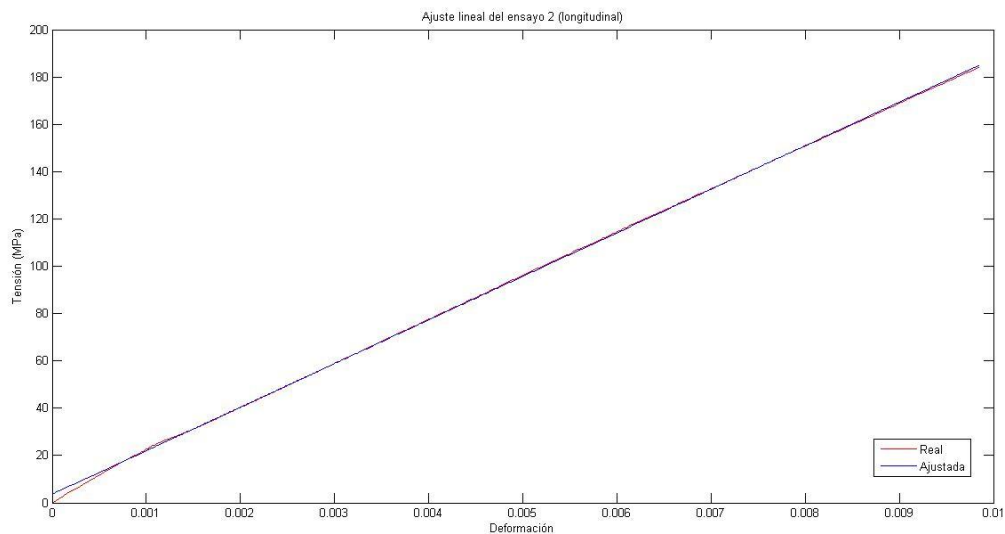


Figura 58 Ajuste lineal del ensayo 2 (longitudinal 2)

$$r_2 = 0.9998$$

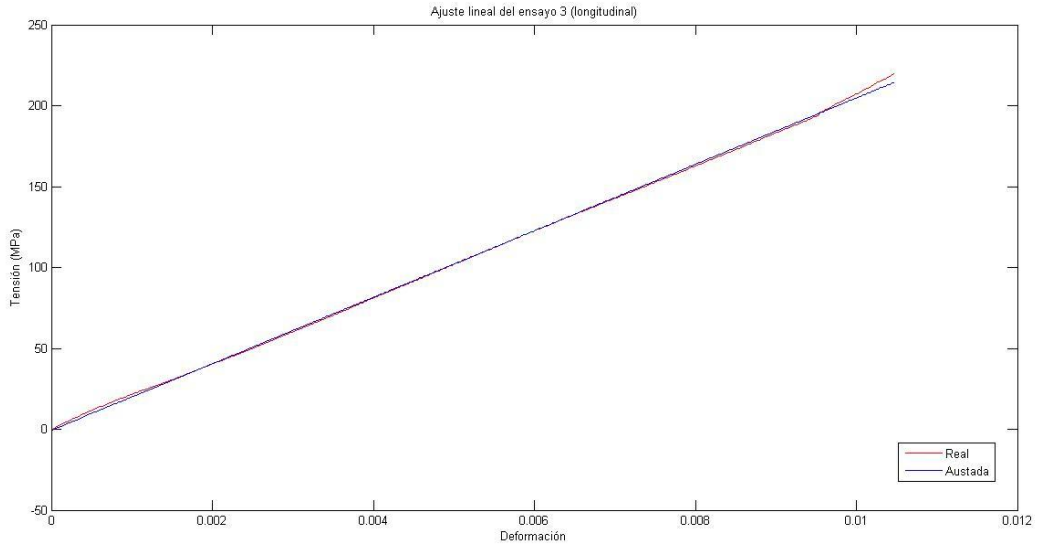


Figura 59 Ajuste lineal del ensayo 3 (longitudinal 3)

$$r_3 = 0.9999$$

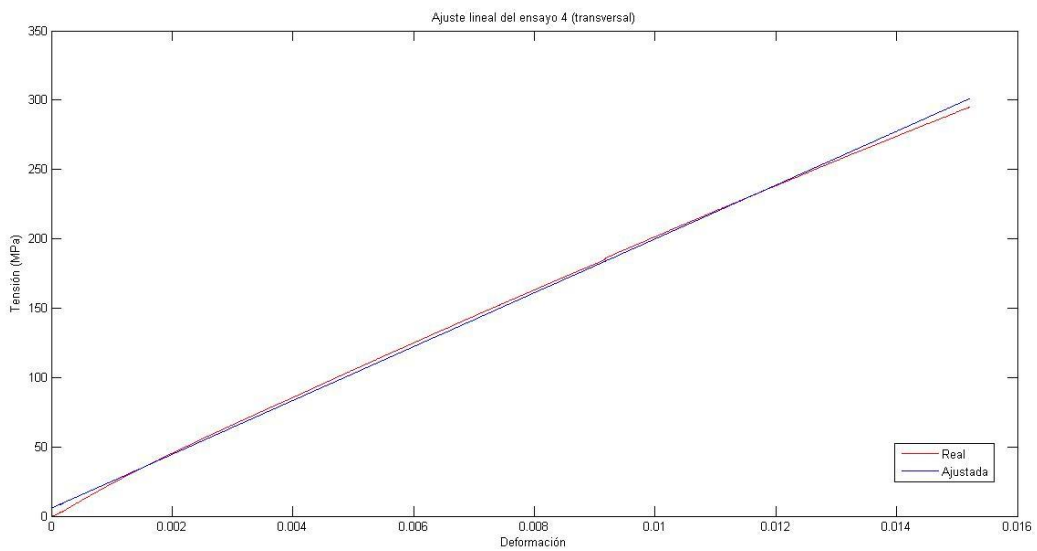


Figura 60 Ajuste lineal del ensayo 4 (transversal 1)

$$r_4 = 0.9997$$

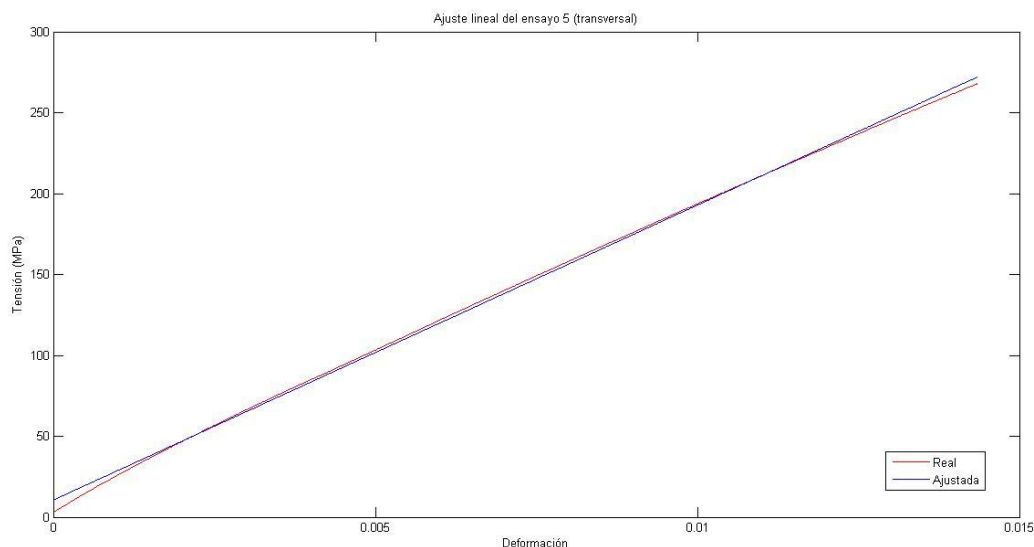


Figura 61 Ajuste lineal del ensayo 5 (transversal 2)

$$r_5 = 0.9994$$

Observamos como todos los coeficientes de correlación son muy próximos a 1 lo que demuestra que el ajuste es bastante bueno. Además en todas las gráficas se demuestra que esto es así, por lo que, la hipótesis que hemos tomado de comportamiento lineal hasta fractura queda validada.

Además de este procedimiento para calcular el módulo elástico lo hemos hecho según la norma [16] UNE-EN ISO 527:4 en la que se detalla que el módulo elástico debe calcularse tomando los valores de deformación del 0.05% ( $\varepsilon_1$ ) y el 0.025% ( $\varepsilon_2$ ) y sus respectivos valores de tensión para calcular la pendiente de la curva ( $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ). Para el cálculo del módulo elástico se utilizará la siguiente expresión:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

En la siguiente tabla (Tabla 8) se muestran los resultados obtenidos mediante ambos procedimientos para realizar la comparación.

	Dirección 0°			Dirección 90°		
	Ajuste	Norma	Diferencia	Ajuste	Norma	Diferencia
E_1 (GPa)	18.50	21.46	2.96	19.41	22.24	2.83
E_2 (GPa)	18.42	18.83	0.41	18.23	20.92	2.69
E_3 (GPa)	20.53	19.22	1.31	-	-	-
Máximo	20.53	21.46	-	19.41	20.92	-
Mínimo	18.42	18.83	-	18.23	22.24	-
Media	<b>19.15</b>	<b>19.83</b>	<b>0.68</b>	<b>18.82</b>	<b>21.59</b>	<b>2.77</b>

Tabla 8 Comparación del módulo elástico mediante distintos métodos de cálculo

Se observa como mediante ambos procedimientos obtenemos resultados muy parecidos, con una dispersión muy pequeña en comparación con las magnitudes con las que trabajamos.

Además, como la mayor parte de los ensayos en ambas direcciones tienden a valores muy parecidos se decidió por esta razón tomar:

$$E_{11} = E_{22}$$

$$\nu_{12} = \nu_{21}$$

# ANEXO B. ENSAYOS DINÁMICOS

A continuación se mostrarán algunas de las gráficas obtenidas de los ensayos de fatiga, donde se pueden apreciar claramente los valores de cargas máximo y mínimo que se han tenido en cada uno de ellos (Figuras 62-68).

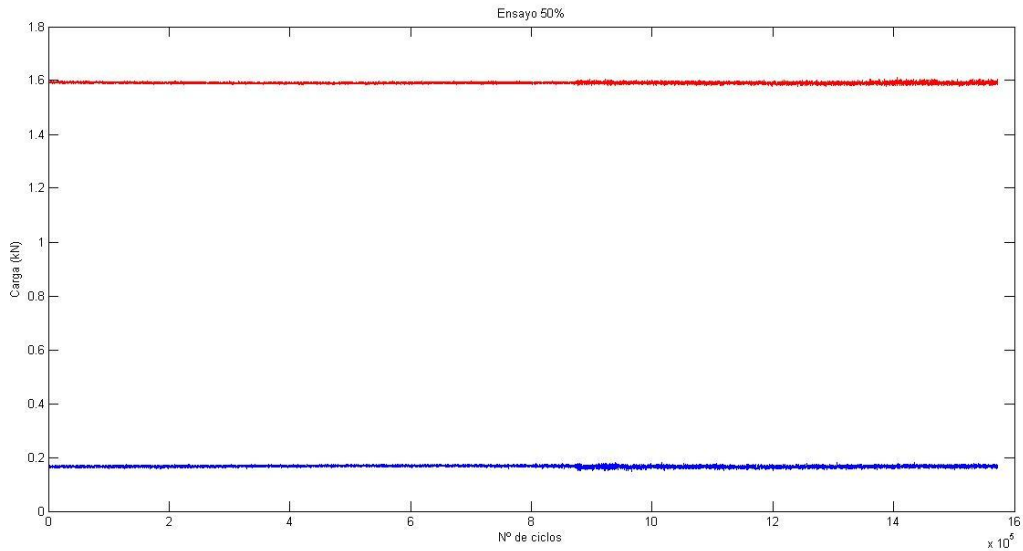


Figura 62 Ensayo 50%

$$\tau_{max} = 1.6 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.16 \text{ kN}$$

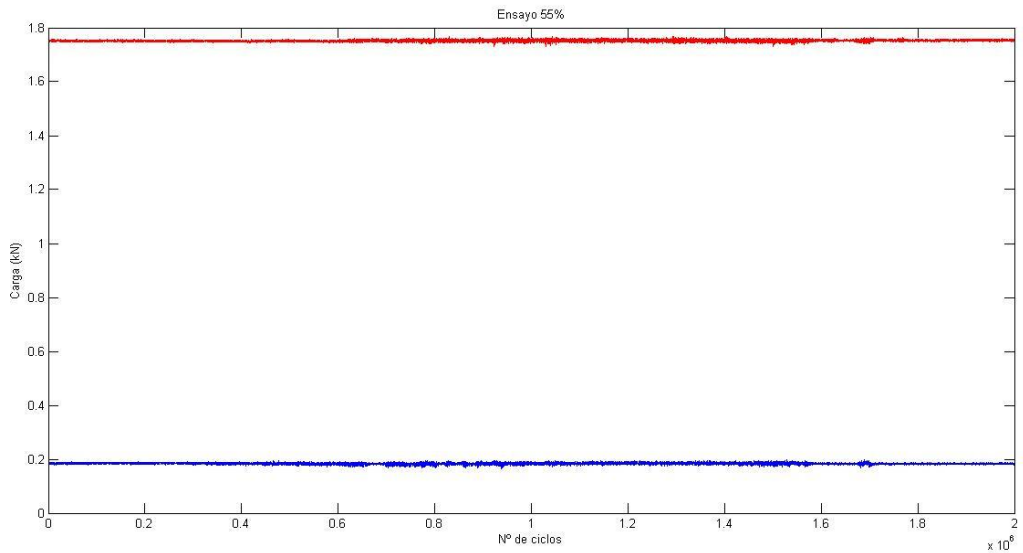


Figura 63 Ensayo 55%

$$\tau_{max} = 1.76 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.176 \text{ kN}$$

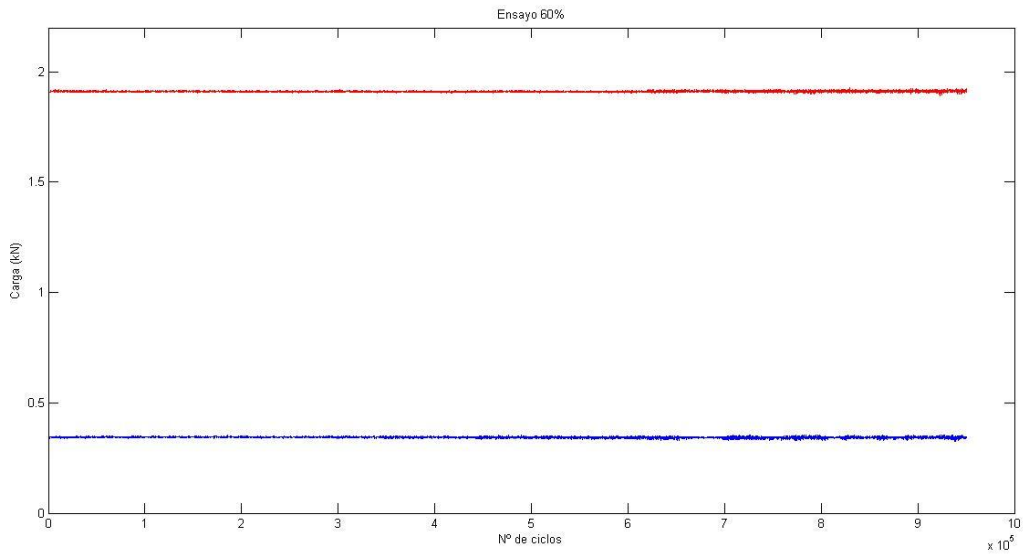


Figura 64 Ensayo 60%

$$\tau_{max} = 1.92 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.192 \text{ kN}$$

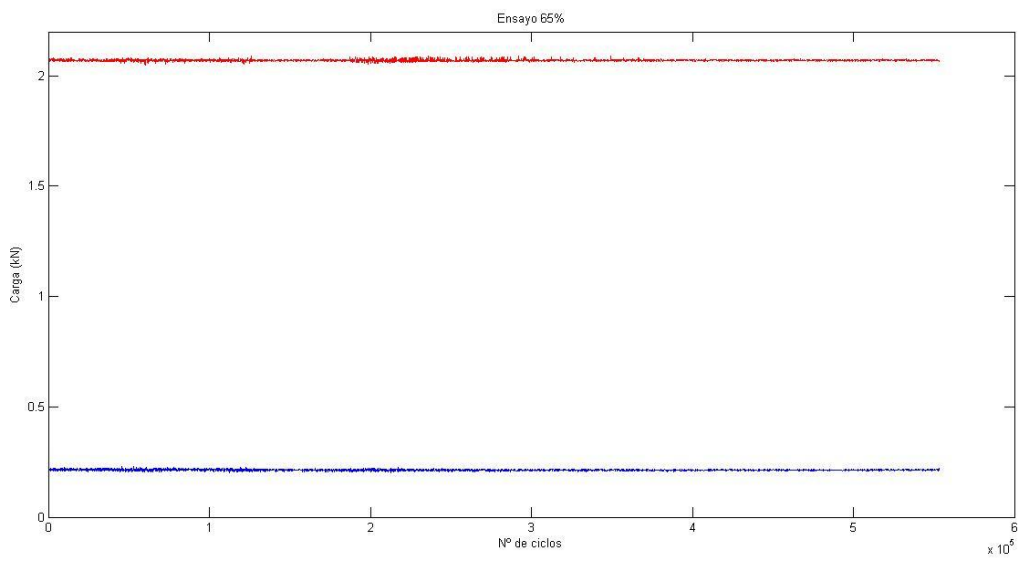


Figura 65 Ensayo 65%

$$\tau_{max} = 2.08 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.208 \text{ kN}$$



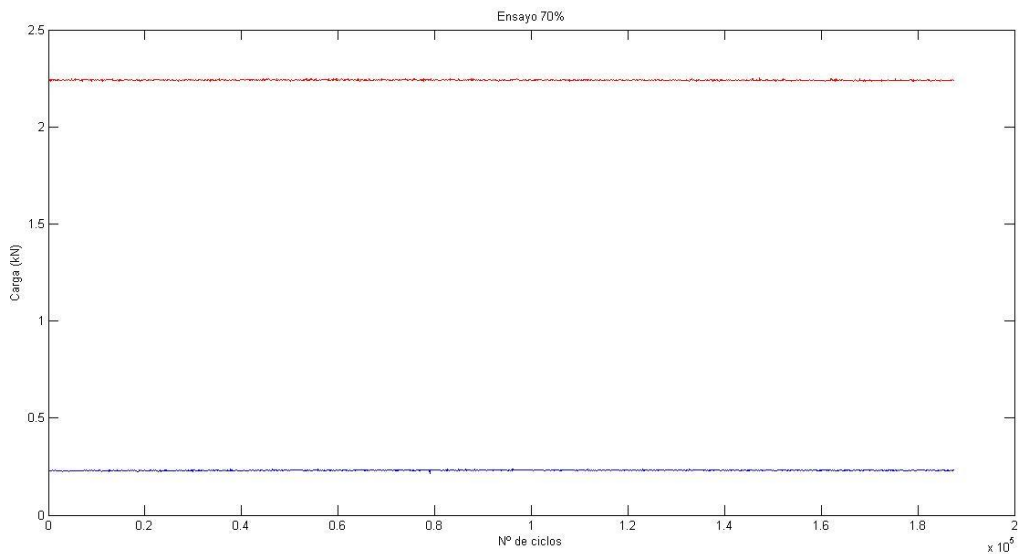


Figura 66 Ensayo 70%

$$\tau_{max} = 2.24 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.224 \text{ kN}$$

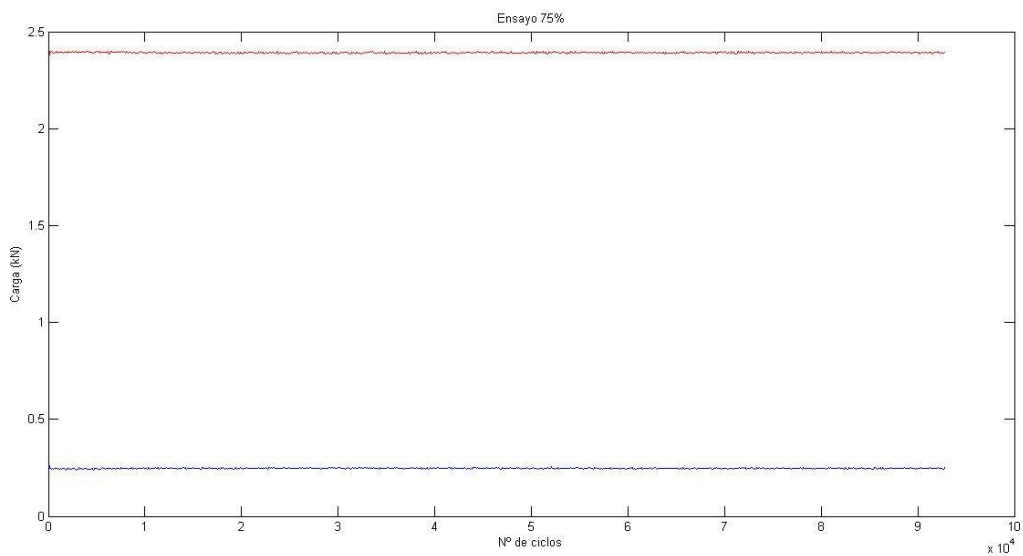


Figura 67 Ensayo 75%

$$\tau_{max} = 2.4 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.24 \text{ kN}$$

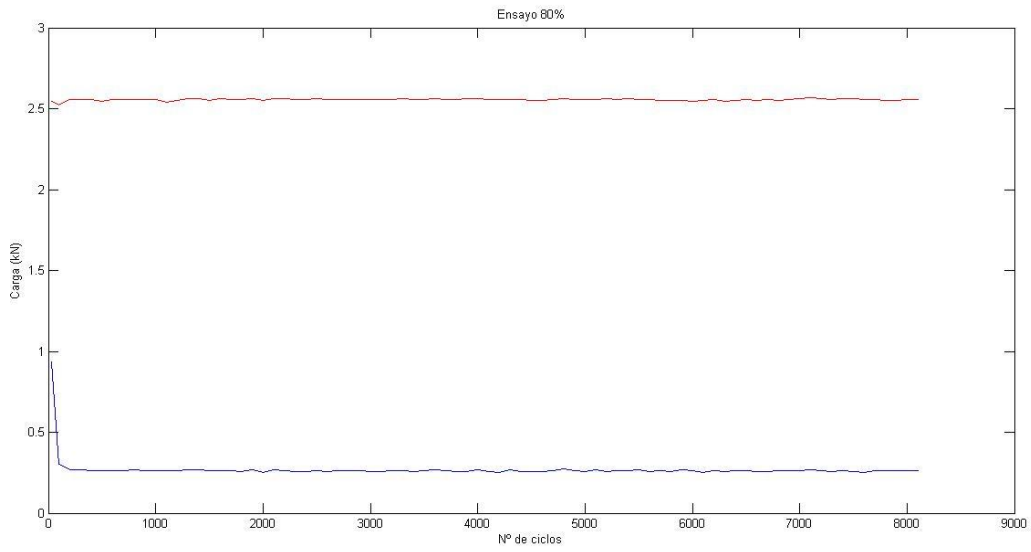


Figura 68 Ensayo 80%

$$\tau_{max} = 2.56 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.256 \text{ kN}$$

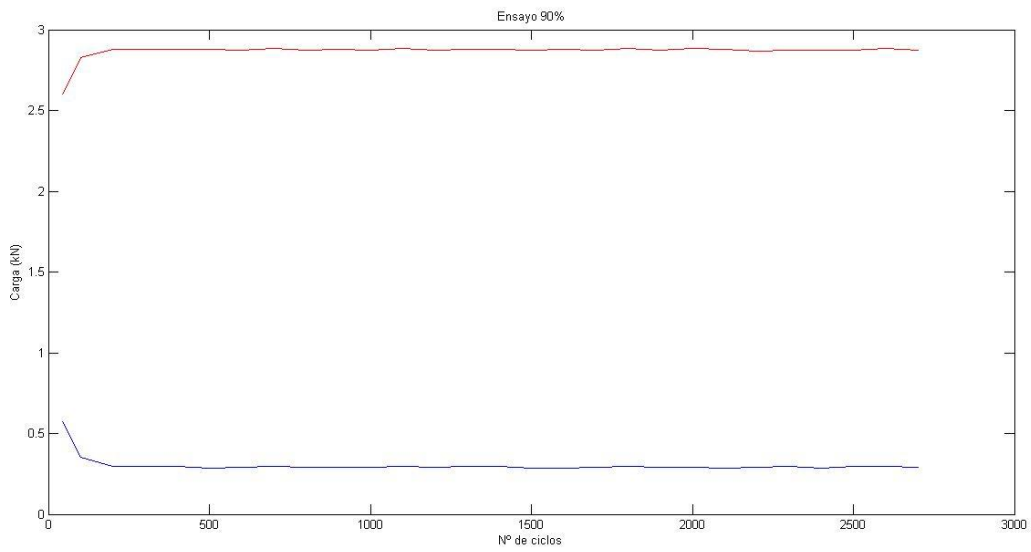


Figura 69 Ensayo 90%

$$\tau_{max} = 2.88 \text{ kN}$$

$$\tau_{min} = 0.288 \text{ kN}$$

