

Capítulo 4

ENSAYOS

4.1 Introducción

En el presente capítulo se llevará a cabo una descripción exhaustiva de todos los ensayos realizados para caracterizar el comportamiento a fatiga del tejido de fibra de carbono / resina epoxi. Se describirán los procesos necesarios para realizar los ensayos, la maquinaria de ensayo y dispositivos auxiliares, la normativa y recomendaciones seguidas y por último se presentarán los resultados experimentales obtenidos. El correspondiente análisis de los resultados se llevará a cabo en el capítulo quinto.

Para poder alcanzar el objetivo principal de caracterizar el material compuesto bajo cargas cíclicas de tracción - tracción es necesario primero conocer la respuesta estática de dicho material. Esto es debido a que el valor de la carga aplicada en los ensayos dinámicos de fatiga será un tanto por ciento de la carga máxima soportada por las probetas en el ensayo de tracción. Concretamente trabajaremos con tensiones, es decir, la tensión máxima aplicada en cada uno de los ensayos de fatiga será un porcentaje de la tensión última soportada por el laminado. A dicho porcentaje lo llamaremos nivel de carga y se estudiará el número de ciclos soportados por las probetas hasta la rotura para distintos niveles de carga.

Por lo tanto deberán realizarse ensayos estáticos de tracción sobre probetas de cada uno de los paneles creados. Como resultados directos de dichos ensayos obtendremos la tensión última soportada por cada probeta y, gracias a un extensómetro, hallaremos el módulo elástico del laminado. La forma de tratar los resultados, así como el número de probetas a ensayar serán comentados posteriormente.

Una vez conocida la tensión última de las probetas extraídas de cada panel, podemos llevar a cabo los ensayos bajo cargas cíclicas. Se realizarán ensayos a dos frecuencias distintas para estudiar la posible influencia que ésta pueda tener en el número de ciclos hasta el fallo, es decir, en la vida a fatiga del laminado. Tendremos por tanto cuatro grupos de ensayos: a dos frecuencias distintas para las probetas con orientación del refuerzo a $0/90^\circ$ (ensayos on-axis), y a dos frecuencias distintas para las probetas con orientación del refuerzo a $45/-45^\circ$ (ensayos off-axis). Como resultados directos de estos ensayos obtenemos el número de ciclos hasta el fallo para distintos niveles de carga. El número de ensayos necesarios, la validez de los resultados y la forma de ser tratados serán comentados posteriormente.

Antes de llevar a cabo los ensayos citados es necesario realizar un trabajo previo de medición de todas las probetas fabricadas. Es necesario conocer el área efectiva de dichas probetas, por lo que necesitaremos conocer su ancho y su espesor reales. Los útiles necesarios para realizar las mediciones son los siguientes: un pie de rey digital con resolución de 0,01 mm para medir el ancho de las probetas, y un micrómetro digital de caras planas con resolución de 0,001 mm para medir el espesor de las probetas. Ambos instrumentos se encuentran disponibles en las instalaciones del LERM.

Para obtener resultados veraces de las dos dimensiones significativas se llevarán a cabo 5 mediciones del ancho y 5 mediciones del espesor de cada probeta, y tomaremos la media como resultado de cada dimensión.

El área efectiva de las probetas a ensayar a tracción será de gran importancia ya que nos interesa conocer la tensión última que éstas soportan y la máquina universal de ensayos nos proporciona la carga última. Además, puesto que no todas las probetas son exactamente iguales en ancho y espesor (aunque sus variaciones son pequeñas), es necesario conocer fielmente sus dimensiones para poder trabajar con la tensión última que éstas soportan a la hora de escalar la carga para los ensayos dinámicos.

Una vez conocemos las dimensiones reales de todas las probetas fabricadas podemos llevar a cabo los ensayos que se describen en los apartados 4.2 y 4.3.

4.2 Ensayos estáticos

Para poder llevar a cabo los ensayos de fatiga en tracción - tracción es necesario conocer la tensión última a tracción, es decir, la resistencia a tracción de los laminados fabricados. Para ello se llevarán a cabo ensayos estáticos de tracción de probetas extraídas de los 4 paneles desarrollados.

El objetivo fundamental de los ensayos estáticos es, por tanto, obtener la resistencia a tracción de cada uno de los laminados, pero además obtendremos el módulo elástico y la carga última.

La normativa seguida para realizar los ensayos es la *ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* [16].

Para realizar los ensayos se empleará una máquina universal de ensayos Instron 4482, la cual puede observarse en la figura 4.1. Se trata de una máquina estática de funcionamiento mecánico (mediante tornillos sin fin) que cuenta con una célula de carga de 100 KN. Además necesitaremos un equipo de adquisición de datos y un extensómetro axial de 50 mm para calcular las deformaciones a partir de las cuales hallaremos el módulo elástico de los especímenes. Puesto que no emplearemos galgas extensométricas en la dirección transversal a la de aplicación de la carga no podremos hallar la deformación transversal ni el coeficiente de Poisson.



Figura 4.1: Máquina de ensayos Instron 4482 empleada en los ensayos estáticos.

Se ensayarán dos probetas extraídas de cada uno de los paneles (dos paneles con orientación del refuerzo 0° y dos paneles con orientación del refuerzo 45°) y los resultados serán tratados estadísticamente para obtener la tensión última y el módulo elástico de cada panel. Para obtener unos resultados más veraces sería necesario ensayar un número superior de probetas de cada tipo, pero la falta de material nos hace utilizar un mayor número de probetas para los ensayos dinámicos. No obstante, como se verá posteriormente, la variación de los resultados obtenidos es aceptable por lo que los resultados se consideran válidos.

Para las 8 probetas ensayadas estáticamente el procedimiento es totalmente análogo y se describe a continuación:

En primer lugar debemos fijar la probeta a las mordazas de sujeción. Para evitar un posible deslizamiento, además de contar con los tacones de fibra de vidrio, disponemos papel de lija que asegure un correcto agarre durante todo el proceso de tracción. Es importante asegurar la verticalidad de la probeta para que no exista torsión durante el ensayo, ya que la aparición de ésta influiría en la tensión última a tracción. Además para asegurar una correcta tracción la probeta deberá estar situada en la mitad del ancho de la mordaza de sujeción.

Una vez la probeta se encuentra fijada procedemos a la colocación del extensómetro en la longitud libre de la probeta. En la figura 4.2 se puede apreciar en detalle la colocación de probeta y extensómetro en la máquina de ensayos



Figura 4.2: Detalle del montaje de los ensayos estáticos. Colocación del espécimen a ensayar y del extensómetro.

Una vez se ha realizado el montaje descrito procedemos a poner en marcha la máquina de ensayos. El ensayo se realiza con control en desplazamiento, siendo la velocidad de desplazamiento de la cruzeta 1 mm/min. Es preciso señalar que el extensómetro será retirado antes de llegar a la rotura de la probeta para evitar posibles daños. Para ello se parará la máquina un instante durante el tramo elástico, siendo esto irrelevante para el resultado del ensayo.

El resultado principal obtenido del ensayo es la carga de rotura (P_R). De acuerdo con la normativa la resistencia a tracción (σ_{T11}) se calcula como sigue:

$$\sigma_{T11} = \frac{P_R}{b \cdot h} \quad (MPa)$$

Donde:

P_R es la carga de rotura en Newtons.

b es el ancho de la probeta en mm.

h es el espesor de la probeta en mm.

Gracias al extensómetro en cada momento se va registrando la deformación relativa ϵ_{11} en función de la carga. La pendiente de esta recta es el módulo elástico (E_{11}). Para asegurar la veracidad del resultado tomaremos el tramo de recta comprendido entre 0.10 y 0.30 mm de desplazamiento. El modulo elástico se calcula como sigue:

$$E_{11} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P/(b \cdot h)}{\Delta L/L} \quad (MPa)$$

Para cada serie de ensayos es necesario calcular las variables estadísticas que permiten conocer la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación:

$$\bar{x} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2)}{(n-1)}}$$

$$CV = 100 \cdot \frac{S_{n-1}}{\bar{x}}$$

Donde:

\bar{x} es la media de los resultados.

S_{n-1} es la desviación estándar.

CV es el coeficiente de variación (%).

n es el número total de especímenes ensayados (en nuestro caso $n=2$)

4.3 Ensayos dinámicos

Como se ha comentado previamente el objetivo fundamental de los ensayos de fatiga es conocer el número de ciclos que resiste el material hasta el fallo, es decir, la vida a fatiga de las probetas, bajo diferentes niveles de carga.

Para llevar a cabo los ensayos dinámicos con cargas cíclicas de tracción - tracción se seguirán las recomendaciones de la normativa *ASTM D 3479 Standard Test Method for Tension - Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials* [17]. En dicha norma se especifica que la geometría, dimensiones y preparación de los especímenes son iguales a lo descrito en la norma *ASTM D 3039* (empleada anteriormente para los ensayos estáticos) con ciertas exigencias adicionales en cuanto al control de defectos de borde en las probetas, ya que son focos de posibles delaminaciones y por tanto de fallo prematuro.

Por lo expuesto anteriormente se decide emplear el mismo tipo de probetas usadas para los ensayos estáticos. Con esto conseguimos simplificar el proceso de fabricación y preparación de las probetas.

Como se comentó en el apartado 2.3 del presente documento, el comportamiento a fatiga de un laminado de material compuesto, no sólo depende del nivel máximo de tensión a que está sometido sino también al tipo de tensión cíclica que recibe. De todos los parámetros que definen la evolución temporal de la tensión cíclica se admite comúnmente que los valores de tensión máxima y mínima (σ_{\max} y σ_{\min}) y su cociente (denominado índice de reversión $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) son los valores imprescindibles para su caracterización.

En los ensayos descritos a continuación nos limitamos a someter a los especímenes a cargas cíclicas de tracción - tracción por lo que tanto la tensión máxima como la mínima serán positivas. El índice de reversión se mantendrá constante $R=0,1$ y la excitación será sinusoidal y con amplitud constante. La forma de obtener los parámetros para cada uno de los ensayos es la siguiente:

- Obtenemos la resistencia a tracción para cada uno de los paneles.
- La tensión máxima a aplicar en los ensayos dinámicos será un porcentaje de la resistencia a tracción, es decir, un cierto nivel de carga.
- La tensión mínima será igual a $0,1 \cdot \sigma_{\max}$
- Teniendo en cuenta las dimensiones reales de cada probeta en particular podemos hallar la carga máxima y mínima (en KN) a aplicar en la máquina de ensayos.

La onda de excitación, es decir la evolución temporal de la carga a aplicar para cada uno de los ensayos queda así definida a falta de determinar la frecuencia de ensayo. La posible influencia de esta frecuencia de ensayo será uno de los objetivos a determinar. Se realizarán ensayos para los mismos niveles de carga a dos frecuencias distintas. Para los ensayos on-axis (probetas con orientación del refuerzo $0/90^\circ$) se emplearán frecuencias de 10 Hz y 15 Hz.

Mientras que para los ensayos off-axis (probetas con orientación del refuerzo 45/-45°) se realizarán los ensayos a frecuencias de 2 Hz y 8 Hz. El motivo de esta discrepancia se explicará detalladamente en el capítulo quinto.

Una vez conocemos la carga máxima y mínima, así como la frecuencia del ensayo, la onda sinusoidal a aplicar queda totalmente determinada, tal como observamos en la figura 4.3.

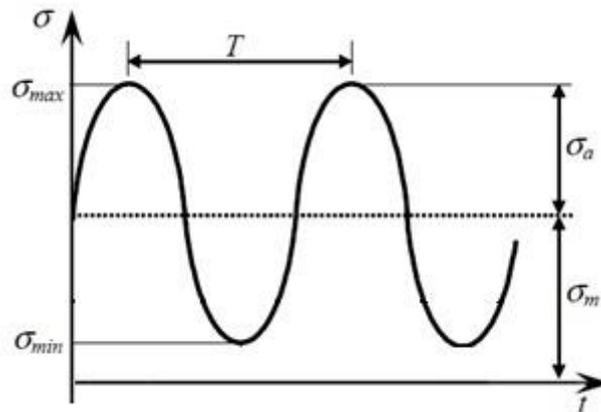


Figura 4.3: Carga dinámica sinusoidal aplicada en los ensayos de fatiga.

Para realizar los ensayos dinámicos se empleará una máquina de ensayos Instron 8801, la cual puede observarse en la figura 4.4. Se trata de una máquina servohidráulica con capacidad de actuación hasta 100 KN. Además es necesario un controlador y un software para la generación de la onda, calibración, empleo de límites y supervisión continua del estado de carga aplicado por la máquina. En las figuras 4.5 y 4.6 podemos observar un detalle del *software* de control y un detalle de la colocación de la probeta en la máquina de ensayos, respectivamente.



Figura 4.4: Máquina de ensayos Instron 8801 empleada en los ensayos dinámicos.

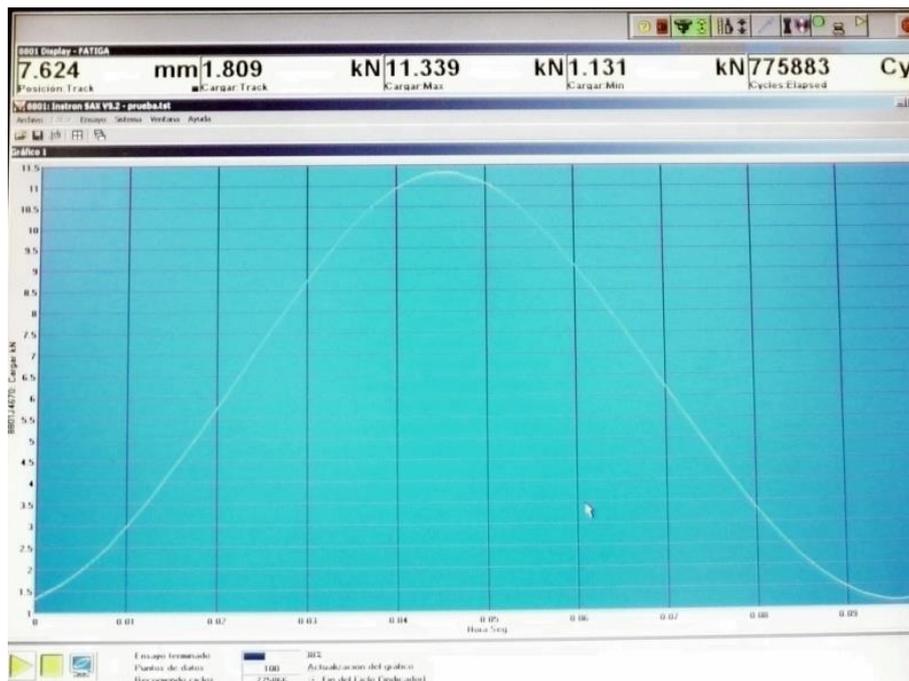


Figura 4.5: Detalle de software de control empleado en los ensayos dinámicos.

El proceso seguido para ensayar todas las probetas es prácticamente análogo, únicamente varía la programación de la excitación, es decir el nivel de carga a aplicar (carga máxima y mínima) y la frecuencia de ensayo.

En primer lugar debemos fijar la probeta a las mordazas de sujeción. Experiencias previas demuestran que no es necesario utilizar papel de lija ya que las probetas, gracias a los

tacones de fibra de vidrio adheridos, no resbalan durante la aplicación de la carga cíclica. Sí es importante asegurar que no existirá torsión durante el desarrollo del ensayo. Para ello debemos verificar que la probeta se encuentra en el centro de la mordaza de sujeción y que se mantiene su verticalidad durante la aplicación de la carga.



Figura 4.6: Detalle de la colocación de las probetas para los ensayos dinámicos.

Para programar la onda de carga debemos introducir en el software de control los valores de frecuencia, nivel medio de carga y amplitud de la onda. A partir de las cargas máxima y mínima a aplicar, calculadas anteriormente, podemos hallar el nivel medio y la amplitud como sigue:

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

$$A_{carga} = \frac{C_{max} - C_{min}}{2}$$

Donde:

C_{max} , C_{min} , C_{med} son la carga máxima, carga mínima y carga media respectivamente.

A_{carga} es la amplitud de la onda de carga.

Una vez tenemos programada la carga cíclica es preciso fijar unos límites de funcionamiento. Dichos límites permiten que el ensayo se interrumpa si, debido a alteraciones externas o bien fallos en el suministro hidráulico, se aplican valores superiores o inferiores a la carga máxima o mínima respectivamente. Estos límites dependerán del nivel de carga de cada ensayo por lo que serán fijados individualmente.

Adicionalmente, se estudiará la evolución de la temperatura alcanzada por la probeta durante el desarrollo del ensayo empleando para ello un termopar. Un termopar es un circuito formado por dos metales distintos que produce un voltaje que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” y el otro denominado “punto frío”. Con el termopar empleado no podemos obtener variaciones de temperatura inferiores a 1 °C, pero nos servirá para recoger datos suficientes para obtener una idea cualitativa del calentamiento sufrido por las probetas durante los ensayos de fatiga. Debemos asegurar que los extremos del termopar se encuentran en contacto con la probeta permanentemente. Podemos apreciar un detalle de la colocación del termopar en la figura 4.7.

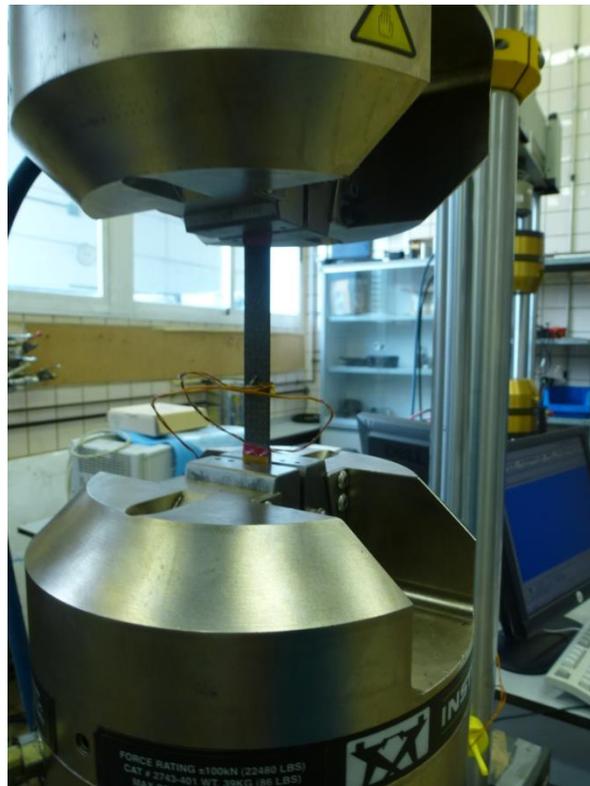


Figura 4.7: Detalle de la colocación del termopar.

4.4 Resultados experimentales

4.4.1 Ensayos estáticos

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras el desarrollo de los ensayos estáticos de tracción sobre probetas extraídas de cada uno de los paneles fabricados. Se especifican las condiciones generales del ensayo, las dimensiones de las probetas ensayadas, la carga última soportada por cada una de ellas, la tensión última (resistencia estática a tracción) y por último el módulo elástico.

Con los resultados de cada ensayo en particular se adjunta una imagen de la rotura del espécimen y una gráfica que representa carga frente a la apertura de la cruceta de la máquina de ensayos. Como se comentó anteriormente en la descripción de los ensayos, el módulo elástico será calculado a partir de los datos obtenidos a partir de un extensómetro, ya que éstos serán más fiables que la apertura de la cruceta. Se tomarán los datos de apertura del extensómetro entre 0,10 y 0,30 mm.

Los resultados se encuentran ordenados para cada panel. Contamos con dos paneles con la orientación del refuerzo a $0/90^\circ$ (panel 1 y panel 2) y otros dos paneles con la orientación del refuerzo a $45/-45^\circ$ (panel 3 y panel 4). Para cada uno de los paneles se ensayaron 2 probetas. La variación de los resultados ha sido aceptable, por lo que se ha descartado realizar más ensayos. En primer lugar se muestra un resumen con los resultados de cada tanda de ensayos y a continuación los datos específicos de cada una de las probetas ensayadas.

4.4.1.1 Ensayos estáticos on-axis (orientación del refuerzo $0/90^\circ$)

En la tabla 4.1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos estáticos efectuados sobre las probetas del panel 1. Podemos apreciar las condiciones generales de los ensayos, los valores medios, máximos y mínimos de carga última, tensión última y módulo elástico, y la desviación estándar (DST) y el coeficiente de variación (CV) de dichos resultados.

Ensayo de tracción Panel 1 (orientación 0/90°)					
Resumen					
Material	Z-19.760	Temperatura (°C)	22,00		
Máquina de ensayos	Instron 4482	Humedad (% HR)	50,00		
Norma	ASTM D-3039 M	Velocidad (mm/min)	1,00		
	Media	Máximo	Mínimo	DST	CV (%)
Carga última (N)	14558,04	14783,67	14332,41	319,09	2,19
Tensión última (MPa)	729,538	758,643	700,433	11,48	1,58
Módulo (MPa)	58773,54	58811,30	58735,78	53,40	0,09

Tabla 4.1. Resumen de resultados del ensayo estático on-axis (Panel 1)

Resistencia estática a tracción del panel 1:

$$\sigma_{ut}^{0,1} = 729,538 \text{ MPa}$$

En las figuras 4.8 y 4.9 se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos estáticos llevados a cabo para cada una de las probetas extraídas del panel 1. Se especifica la identificación de la probeta, sus dimensiones reales y los valores obtenidos de carga última, tensión última y módulo elástico. Además se muestra una gráfica del desplazamiento de la cruceta y de la apertura del extensómetro en función de la carga aplicada. Por último se muestra una imagen del espécimen ensayado tras su rotura.

Espécimen 1 (Panel 1)

ID probeta	P0_01	Carga última (N)	14332,41
Ancho (mm)	14,86	Tensión última (MPa)	700,433
Espesor (mm)	1,377	Módulo (MPa)	58735,78

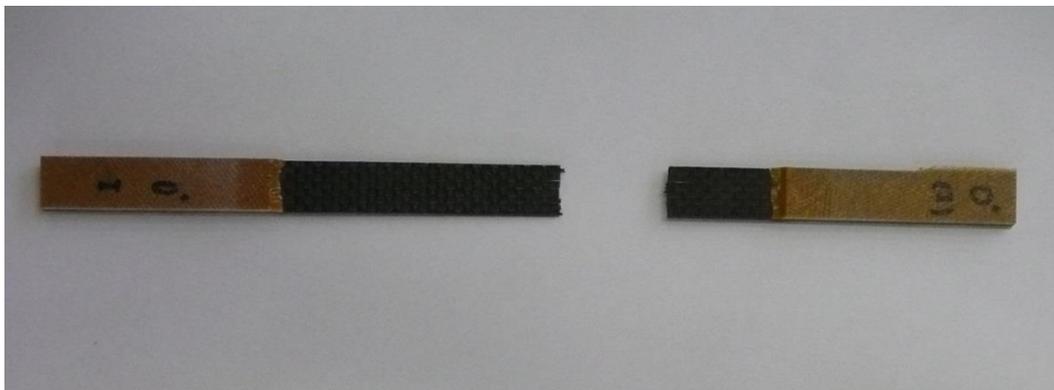
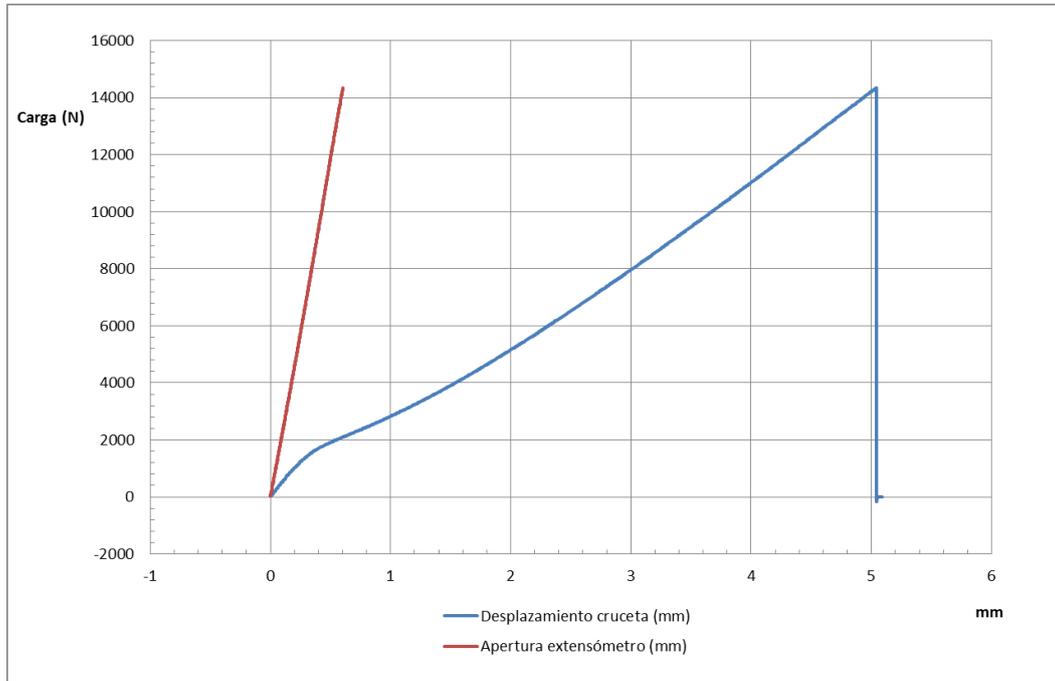


Figura 4.8: Ensayo estático on-axis (especimen 1 del panel 1)

Espécimen 2 (Panel 1).

ID probeta	P0_02	Carga última (N)	14783,67
Ancho (mm)	14,99	Tensión última (MPa)	758,643
Espesor (mm)	1,30	Módulo (MPa)	58811,30

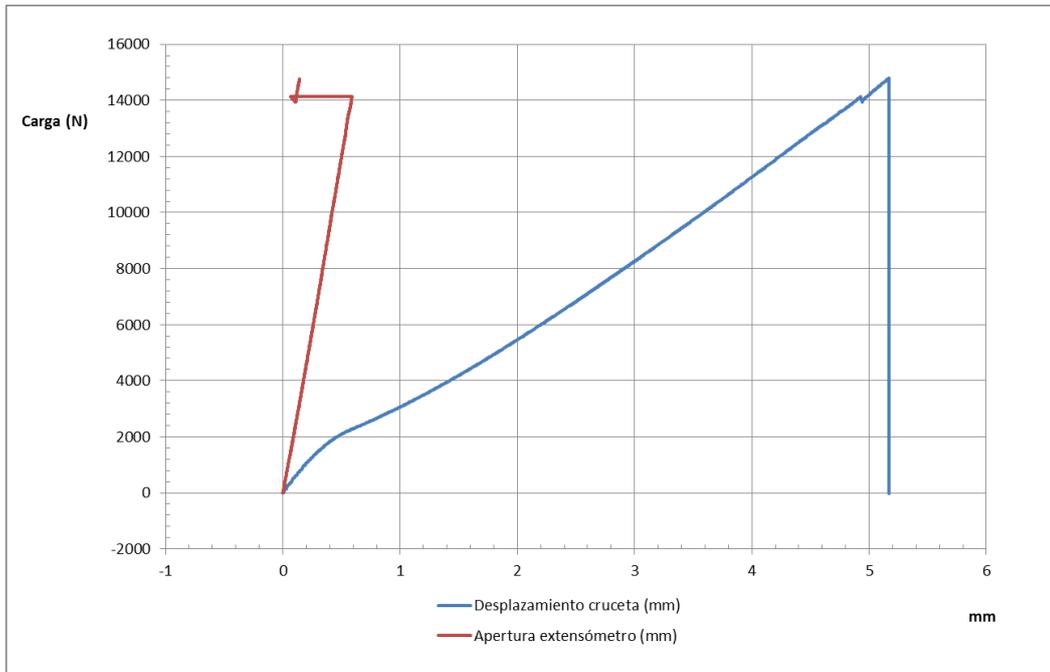


Figura 4.9: Ensayo estático on-axis (especímen 2 del panel 1)

En la tabla 4.2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos estáticos efectuados sobre las probetas del panel 2. Podemos apreciar las condiciones generales de los ensayos, los valores medios, máximos y mínimos de carga última, tensión última y módulo elástico, y la desviación estándar (DST) y el coeficiente de variación (CV) de dichos resultados.

Ensayo de tracción Panel 2 (orientación 0/90°)					
Resumen					
Material	Z-19.760	Temperatura (° C)	24,00		
Máquina de ensayos	Instron 4482	Humedad (% HR)	58,00		
Norma	ASTM D-3039 M	Velocidad (mm/min)	1,00		
	Media	Máximo	Mínimo	DST	CV (%)
Carga última (N)	15377,17	15637,14	15117,21	367,65	2,39
Tensión última (MPa)	818,693	838,228	799,159	27,63	3,37
Módulo (MPa)	62553,85	63780,54	61327,15	1734,81	2,77

Tabla 4.2: Resumen de resultados del ensayo estático on-axis (Panel 2)

Resistencia estática a tracción del panel 2:

$$\sigma_{ut}^{0,2} = 818,693 \text{ MPa}$$

Como ha sido explicado en el apartado anterior, la resistencia estática a tracción de los especímenes extraídos de cada panel nos servirá para escalar la carga a aplicar en los ensayos dinámicos, es decir, la tensión máxima que soportará cada probeta durante los ensayos de fatiga será un porcentaje de su resistencia estática a tracción. A dicho porcentaje lo denominamos nivel de carga.

Como puede observarse a partir de los resultados mostrados, la resistencia estática a tracción de los paneles 1 y 2 difieren considerablemente. Aunque el material empleado, el método de apilado, el ciclo de curado y el proceso de preparación de ambos paneles han sido en teoría idénticos, la diferencia de resultados puede deberse a varias situaciones derivadas del hecho de que los procesos se han llevado a cabo manualmente y sin un extenso conocimiento y experiencia sobre los métodos empleados:

- Curvatura de la fibra dentro del tejido empleado en el panel 1 debido a defectos en su fabricación o durante su almacenaje.
- Defectos propios en el tejido empleado en el panel 1, tales como falta de fibra en determinadas zonas o existencia de impurezas.
- Defectos en el proceso de apilado, como por ejemplo presencia de burbujas de aire o inclusión de impurezas.

Debido a esta diferencia de resultados, los ensayos dinámicos correspondientes a los paneles con orientación del refuerzo a $0/90^\circ$, serán llevados a cabo de forma independiente para los paneles 1 y 2. Esto se traduce en que para cada probeta extraída de uno u otro panel, la tensión máxima a aplicar será un nivel de carga correspondiente a su resistencia estática a tracción en particular, y no se tomará la media entre los valores correspondientes a ambos paneles.

Aunque a priori este hecho pueda restar consistencia al estudio llevado a cabo, esto no supone ningún inconveniente a la hora de tratar los resultados obtenidos. Como se explicará en el capítulo siguiente, podemos analizar los resultados de forma conjunta si adimensionalizamos los valores de la tensión máxima aplicada en cada probeta con su resistencia estática a tracción.

En las figuras 4.10 y 4.11 se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos estáticos llevados a cabo para cada una de las probetas extraídas del panel 2. Se especifica la identificación de la probeta, sus dimensiones reales y los valores obtenidos de carga última, tensión última y módulo elástico. Además se muestra una gráfica del desplazamiento de la cruceta y de la apertura del extensómetro en función de la carga aplicada. Por último se muestra una imagen del espécimen ensayado tras su rotura.

Espécimen 1 (Panel 2)

ID probeta	P0_18	Carga última (N)	15117,21
Ancho (mm)	14,44	Tensión última (MPa)	799,159
Espesor (mm)	1,31	Módulo (MPa)	63780,54

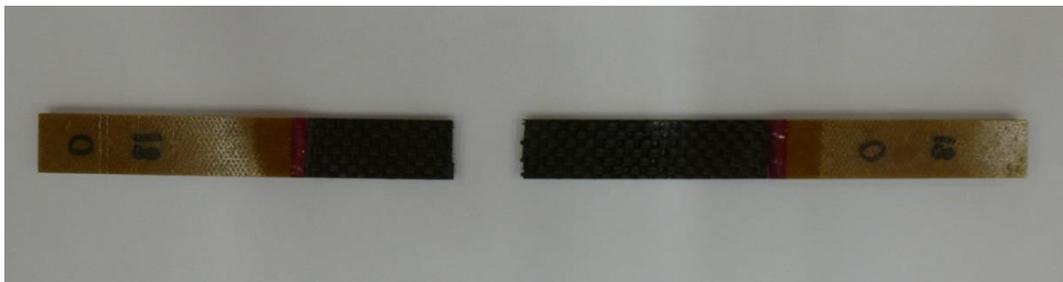
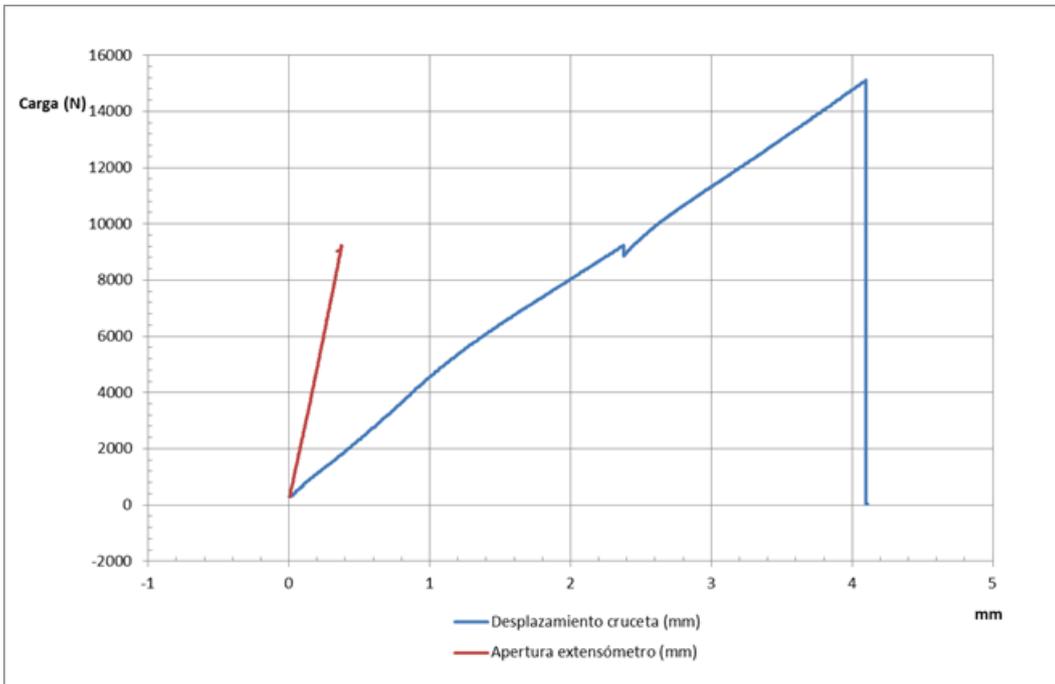


Figura 4.10: Ensayo estático on-axis (especímen 1 del panel 2)

Espécimen 2 (Panel 2)

ID probeta	P0_19	Carga última (N)	15637,14
Ancho (mm)	14,35	Tensión última (MPa)	838,228
Espesor (mm)	1,30	Módulo (MPa)	61327,15

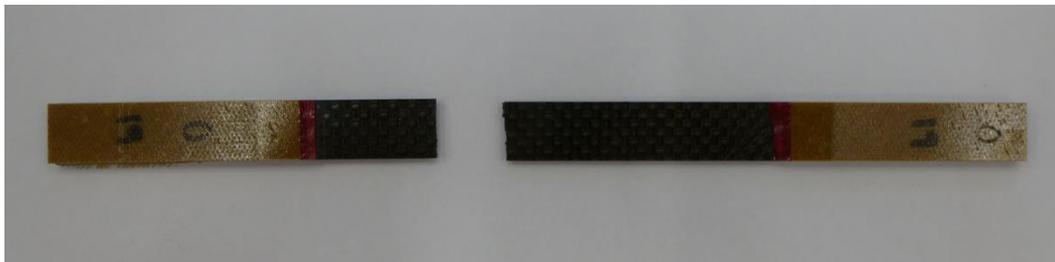
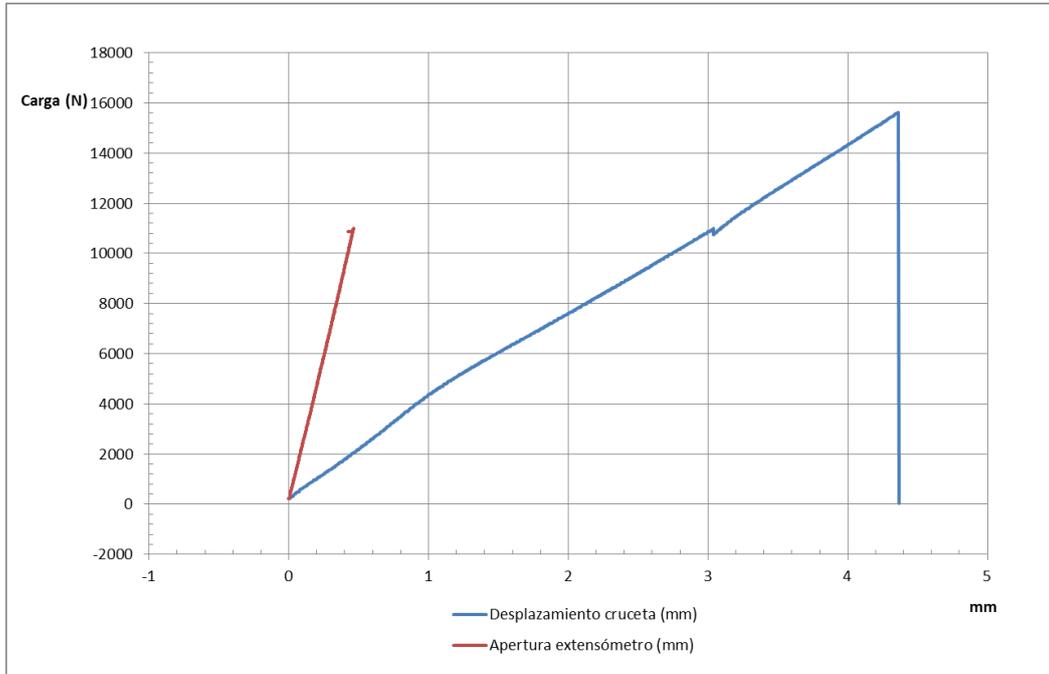


Figura 4.11: Ensayo estático on-axis (especimen 2 del panel 2)

4.4.1.2 Ensayos estáticos off-axis (orientación del refuerzo 45/-45°)

En la tabla 4.3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos estáticos efectuados sobre las probetas del panel 3. Podemos apreciar las condiciones generales de los ensayos, los valores medios, máximos y mínimos de carga última, tensión última y módulo elástico, y la desviación estándar (DST) y el coeficiente de variación (CV) de dichos resultados.

Ensayo de tracción Panel 3 (orientación 45/-45°)					
Resumen					
Material	Z-19.760	Temperatura (° C)	22,00		
Máquina de ensayos	Instron 4483	Humedad (% HR)	50,00		
Norma	ASTM D-3039 M	Velocidad (mm/min)	1,00		
	Media	Máximo	Mínimo	DST	CV (%)
Carga última (N)	4012,29	4131,97	3892,61	169,25	4,22
Tensión última (MPa)	206,76	208,33	205,19	2,22	1,07
Módulo (MPa)	12943,32	13005,76	12880,87	88,31	0,68

Tabla 4.3: Resumen de resultados del ensayo estático off-axis (Panel 3)

Resistencia estática a tracción del panel 3:

$$\sigma_{ut}^{45,3} = 206,76 \text{ MPa}$$

En las figuras 4.12 y 4.13 se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos estáticos llevados a cabo para cada una de las probetas extraídas del panel 3. Se especifica la identificación de la probeta, sus dimensiones reales y los valores obtenidos de carga última, tensión última y módulo elástico. Además se muestra una gráfica del desplazamiento de la cruceta y de la apertura del extensómetro en función de la carga aplicada. Por último se muestra una imagen del espécimen ensayado tras su rotura.

Espécimen 1 (Panel 3)

ID probeta	P45_01	Carga última (N)	4131,97
Ancho (mm)	15,16	Tensión última (MPa)	208,33
Espesor (mm)	1,31	Módulo (MPa)	12880,87

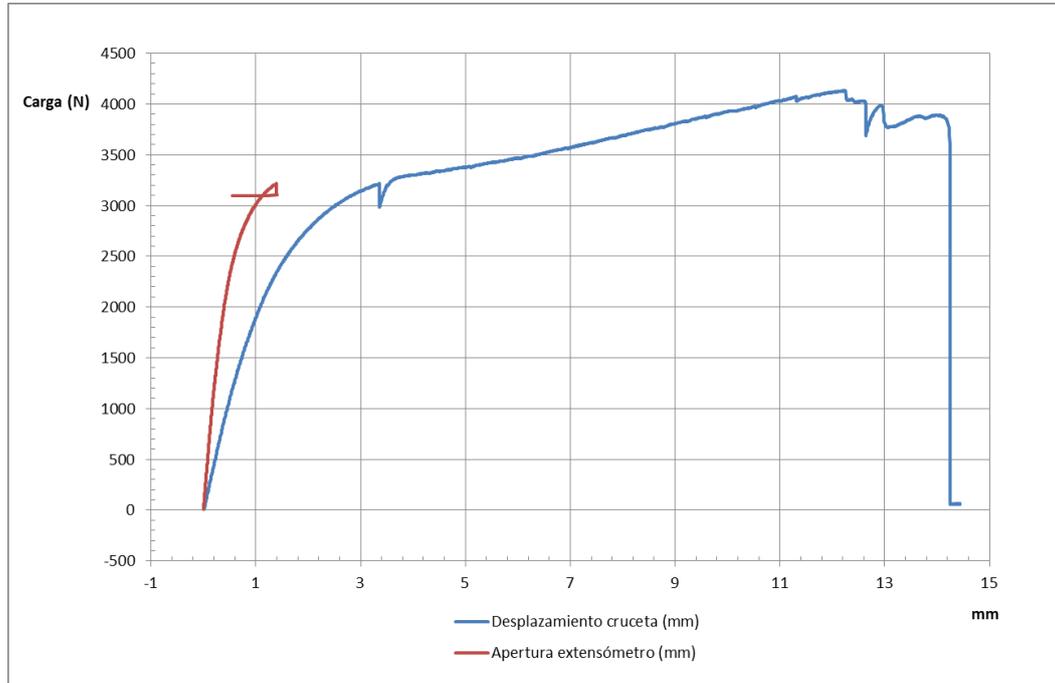


Figura 4.12: Ensayo estático off-axis (especimen 1 del panel 3)

Espécimen 2 (Panel 3)

ID probeta	P45_02	Carga última (N)	3892,61
Ancho (mm)	14,50	Tensión última (MPa)	205,19
Espesor (mm)	1,30	Módulo (MPa)	13005,76

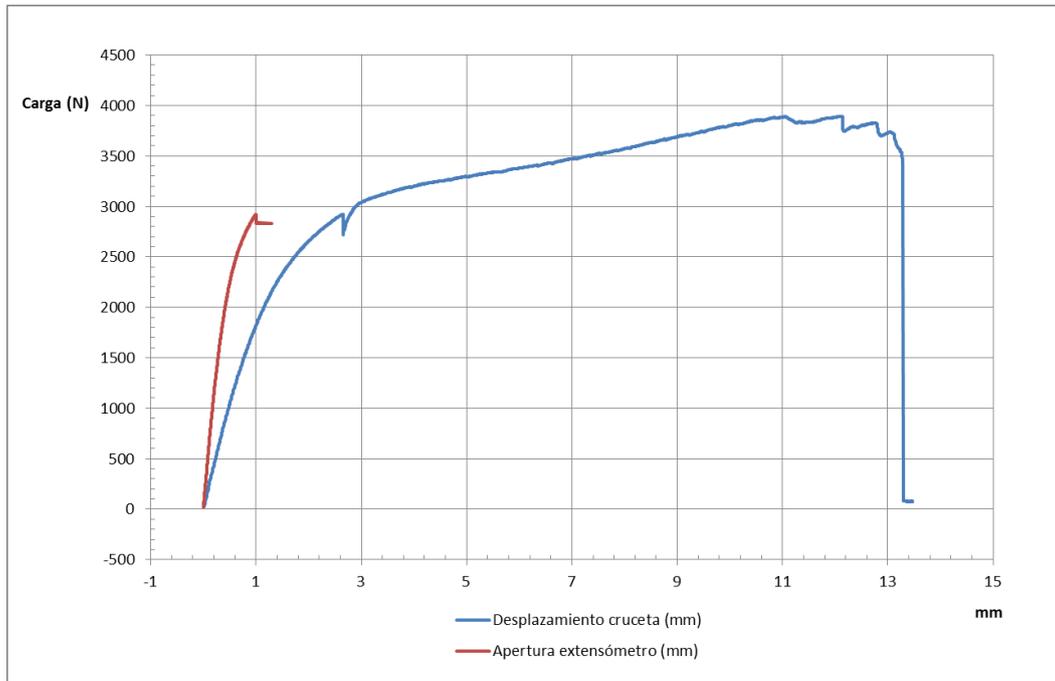


Figura 4.13: Ensayo estático off-axis (especimen 2 del panel 3)

En la tabla 4.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos estáticos efectuados sobre las probetas del panel 4. Podemos apreciar las condiciones generales de los ensayos, los valores medios, máximos y mínimos de carga última, tensión última y módulo elástico, y la desviación estándar (DST) y el coeficiente de variación (CV) de dichos resultados.

Ensayo de tracción Panel 4 (orientación 45/-45°)					
Resumen					
Material	Z-19.760	Temperatura (° C)	25,00		
Máquina de ensayos	Instron 4483	Humedad (% HR)	58,00		
Norma	ASTM D-3039 M	Velocidad (mm/min)	1,00		
	Media	Máximo	Mínimo	DST	CV (%)
Carga última (N)	3928,90	4077,04	3780,77	209,49	5,33
Tensión última (MPa)	211,51	216,59	206,44	7,18	3,39
Módulo (MPa)	11250,86	11337,47	11164,25	122,49	1,09

Tabla 4.4: Resumen de resultados del ensayo estático off-axis (Panel 4)

Resistencia estática a tracción del panel 4:

$$\sigma_{ut}^{45,4} = 211,51 \text{ MPa}$$

A diferencia de lo ocurrido en los paneles con orientación del refuerzo a 0/90°, en el caso de los paneles 3 y 4 con orientación de la fibra a 45/-45°, los resultados obtenidos son bastante similares por lo que en este caso sí trabajaremos con el valor medio para ambos paneles. Por lo tanto:

Resistencia estática a tracción paneles con orientación del refuerzo a 45/-45°:

$$\sigma_{ut}^{45} = 209.195 \text{ MPa}$$

En las figuras 4.14 y 4.15 se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos estáticos llevados a cabo para cada una de las probetas extraídas del panel 4. Se especifica la identificación de la probeta, sus dimensiones reales y los valores obtenidos de carga última, tensión última y módulo elástico. Además se muestra una gráfica del desplazamiento de la cruceta y de la apertura del extensómetro en función de la carga aplicada. Por último se muestra una imagen del espécimen ensayado tras su rotura.

Espécimen 1 (Panel 4)

ID probeta	P45_17	Carga última (N)	3780,77
Ancho (mm)	13,98	Tensión última (MPa)	206,44
Espesor (mm)	1,31	Módulo (MPa)	11164,25

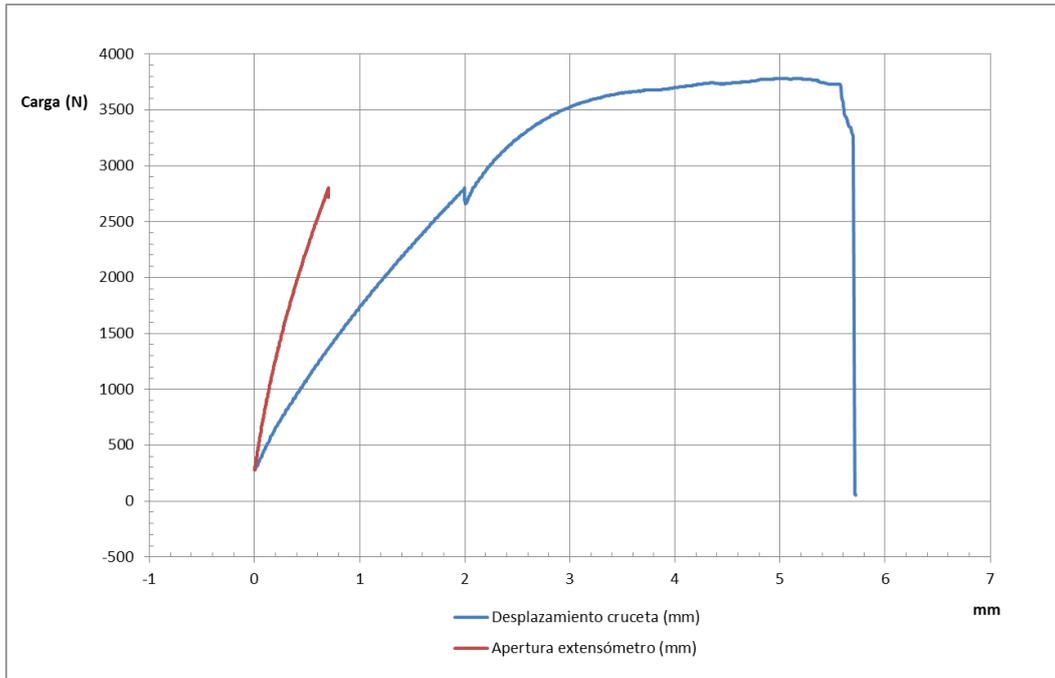


Figura 4.14: Ensayo estático off-axis (especimen 1 del panel 4)

Espécimen 2 (Panel 4)

ID probeta	P45_18	Carga última (N)	4077,04
Ancho (mm)	14,48	Tensión última (MPa)	216,59
Espesor (mm)	1,30	Módulo (MPa)	11337,47

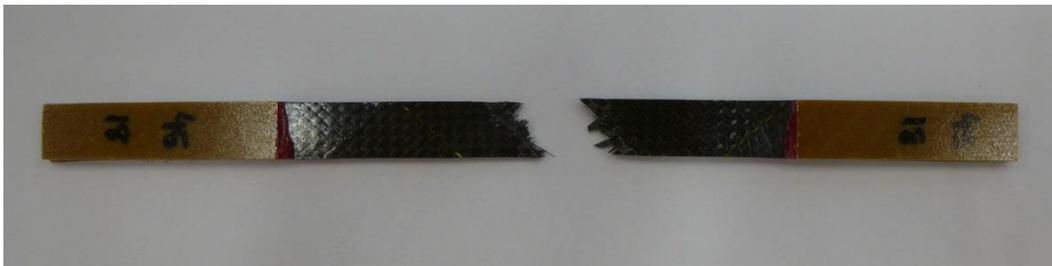
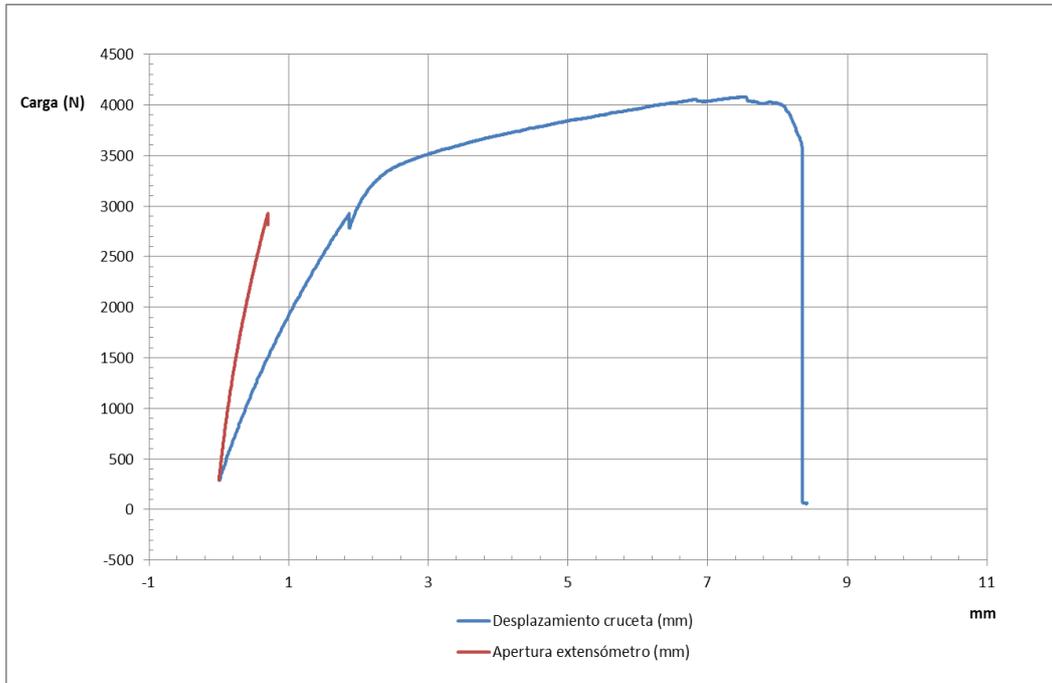


Figura 4.15: Ensayo estático off-axis (especimen 2 del panel 4)

4.4.2 Ensayos dinámicos

Una vez hallados los valores de resistencia estática a tracción para cada tipo de especímenes nos encontramos en disposición de llevar a cabo los ensayos dinámicos de fatiga. Como resultados de dichos ensayos obtenemos el número de ciclos de carga soportados por cada una de las probetas hasta su fallo. Los resultados se encuentran ordenados según el panel del que han sido extraídos los especímenes y según la frecuencia del ensayo. Para cada tanda de ensayos se especifican las condiciones generales de ensayo y para cada uno de ellos, ordenados en forma de tabla, se exponen las dimensiones de cada probeta, el nivel de carga aplicado, la tensión máxima soportada, la carga máxima y mínima aplicadas y por último el número de ciclos hasta el fallo de cada espécimen.

Los niveles de carga han sido definidos en base a la resistencia estática a tracción (σ_{ut}) de cada uno de los paneles fabricados. Para cada probeta a ensayar se ha multiplicado su área transversal (A) por la resistencia estática a tracción del panel del que procede y a continuación se ha multiplicado por el coeficiente correspondiente al nivel de carga (n_c). Con estas operaciones obtenemos la carga máxima a aplicar durante el ensayo de fatiga. La carga mínima será para todos los casos un 10% de la carga máxima, y esta amplitud de carga se ha mantenido constando durante todo el ensayo hasta la rotura. Para cada espécimen i procedente del panel j tenemos:

$$C_{max_i} = A_i \cdot \sigma_{ut_j} \cdot n_c ; \quad C_{min_i} = 0.1 \cdot C_{max_i}$$

Ensayos on-axis (orientación del refuerzo 0/90°)

- Frecuencia 10 Hz:

Se ensayaron 14 probetas distribuidas en 6 niveles diferentes de carga, correspondientes al 75, 80, 82, 85, 90 y 95 % de su resistencia estática a tracción.

- Frecuencia 15 Hz:

Se ensayaron 12 probetas distribuidas en 5 niveles diferentes de carga, correspondientes al 80, 82, 85, 90 y 95 % de su resistencia estática a tracción.

Ensayos off-axis (orientación del refuerzo 45/-45°)

- Frecuencia 2 Hz:

Se ensayaron 12 probetas distribuidas en 6 niveles diferentes de carga, correspondientes al 65, 70, 75, 80, 85 y 90 % de su resistencia estática a tracción.

- Frecuencia 8 Hz:

Se ensayaron 11 probetas distribuidas en 6 niveles diferentes de carga, correspondientes al 65, 70, 75, 80, 85 y 90 % de su resistencia estática a tracción.

En las tablas 4.5 a 4.8 están presentes los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos dinámicos. En ellas se detalla la identificación de cada probeta ensayada, sus dimensiones reales, la resistencia estática a tracción (que dependerá del panel del que ha sido extraída la probeta), el nivel de carga aplicado, las cargas máxima y mínima a las que han sido sometidos los especímenes, la tensión máxima soportada y por último el número de ciclos alcanzados hasta el fallo.

En la tabla 4.5 se presentan los resultados de los ensayos dinámicos on-axis a frecuencia 10 Hz. Es preciso señalar que para la probeta PO_06 ensayada al 75 % de carga no se apreció fallo alguno tras superar $2 \cdot 10^6$ ciclos.

En la tabla 4.6 se presentan los resultados de los ensayos dinámicos on-axis a frecuencia 15 Hz.

En la tabla 4.7 se presentan los resultados de los ensayos dinámicos off-axis a frecuencia 2 Hz.

En la tabla 4.8 se presentan los resultados de los ensayos dinámicos off-axis a frecuencia 8 Hz.

Ensayos dinámicos on-axis. Frecuencia 10 Hz.

<i>ID probeta</i>	<i>Ancho (mm)</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Área (mm²)</i>	<i>Resistencia estática (MPa)</i>	<i>Nivel de carga</i>	<i>Carga máxima (N)</i>	<i>Carga mínima (N)</i>	<i>Tensión máxima (MPa)</i>	<i>Número de ciclos hasta el fallo</i>
PO_06	14,62	1,36	19,883	729,538	0,75	10879,159	1087,916	547,153	2306669 *
PO_07	14,21	1,367	19,425	729,538	0,80	11337,057	1133,706	583,630	909303
PO_08	14,19	1,35	19,157	729,538	0,80	11180,312	1118,031	583,630	1067981
PO_20	14,37	1,27	18,250	818,693	0,80	11952,858	1195,286	654,955	400812
PO_04	14,41	1,35	19,454	729,538	0,82	11637,491	1163,749	598,221	345536
PO_21	14,35	1,32	18,942	818,693	0,82	12716,306	1271,631	671,329	113156
PO_22	14,45	1,33	19,219	818,693	0,82	12901,928	1290,193	671,329	1167040
PO_09	14,15	1,36	19,244	729,538	0,85	11933,341	1193,334	620,107	89607
PO_10	14,18	1,37	19,427	729,538	0,85	12046,572	1204,657	620,107	238736
PO_23	14,49	1,32	19,127	818,693	0,85	13310,137	1331,014	695,889	61907
PO_11	14,167	1,35	19,125	729,538	0,90	12557,464	1255,746	656,584	61446
PO_24	14,41	1,30	18,733	818,693	0,90	13802,925	1380,292	736,824	4047
PO_12	14,61	1,37	20,016	729,538	0,95	13872,098	1387,210	693,061	450
PO_25	14,42	1,34	19,323	818,693	0,95	15028,476	1502,848	777,759	89

Tabla 4.5: Resultados experimentales ensayos dinámicos on-axis. Frecuencia 10 Hz.

Ensayos on-axis. Frecuencia 15 Hz.

ID probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm²)	Resistencia estática (MPa)	Nivel de carga	Carga máxima (N)	Carga mínima (N)	Tensión máxima (MPa)	Número de ciclos hasta el fallo
PO_13	14,22	1,37	19,481	729,538	0,80	11369,933	1136,993	583,630	1086969
PO_26	14,23	1,33	18,926	818,693	0,80	12395,607	1239,561	654,955	419000
PO_27	14,44	1,32	19,061	818,693	0,80	12483,961	1248,396	654,955	892100
PO_14	14,16	1,36	19,258	729,538	0,82	11520,300	1152,030	598,221	1008105
PO_28	14,38	1,33	19,125	818,693	0,82	12839,427	1283,943	671,329	154115
PO_29	14,51	1,32	19,153	818,693	0,82	12858,090	1285,809	671,329	680714
PO_15	13,79	1,36	18,754	729,538	0,85	11629,736	1162,974	620,107	135594
PO_30	14,36	1,31	18,812	818,693	0,85	13090,792	1309,079	695,889	16965
PO_31	14,22	1,33	18,913	818,693	0,85	13161,077	1316,108	695,889	473739
PO_16	13,57	1,37	18,591	729,538	0,90	12206,487	1220,649	656,584	39005
PO_32	14,24	1,32	18,797	818,693	0,90	13849,934	1384,993	736,824	5488
PO_17	12,65	1,36	17,204	729,538	0,95	11923,419	1192,342	693,061	325

Tabla 4.6: Resultados experimentales ensayos dinámicos on-axis. Frecuencia 15 Hz.

Ensayos off-axis. Frecuencia 2Hz.

ID probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm²)	Resistencia estática (MPa)	Nivel de carga	Carga máxima (N)	Carga mínima (N)	Tensión máxima (MPa)	Número de ciclos hasta el fallo
P45_11	14,05	1,33	18,687	209,195	0,65	2540,932	254,093	135,977	2793
P45_23	14,11	1,33	18,766	209,195	0,65	2551,783	255,178	135,977	11225
P45_12	13,94	1,33	18,540	209,195	0,70	2714,965	271,496	146,437	5514
P45_24	14,00	1,31	18,340	209,195	0,70	2685,648	268,565	146,437	3769
P45_13	13,98	1,35	18,873	209,195	0,75	2961,106	296,111	156,897	785
P45_14	13,99	1,22	17,068	209,195	0,75	2677,877	267,788	156,897	3504
P45_15	14,09	1,34	18,881	209,195	0,80	3159,785	315,979	167,357	236
P45_16	13,25	1,33	17,623	209,195	0,80	2949,234	294,923	167,357	671
P45_25	13,90	1,32	18,348	209,195	0,85	3262,567	326,257	177,816	559
P45_30	14,01	1,22	17,092	209,195	0,85	3039,266	303,927	177,816	627
P45_27	14,10	1,31	18,471	209,195	0,90	3477,640	347,764	188,276	203
P45_28	14,20	1,30	18,460	209,195	0,90	3475,569	347,557	188,276	212

Tabla 4.7: Resultados experimentales ensayos dinámicos off-axis. Frecuencia 2 Hz.

Ensayos off-axis. Frecuencia 8Hz.

ID probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm²)	Resistencia estática (MPa)	Nivel de carga	Carga máxima (N)	Carga mínima (N)	Tensión máxima (MPa)	Número de ciclos hasta el fallo
P45_03	14,37	1,30	18,681	209,195	0,65	2540,184	254,018	135,977	3507
P45_19	14,14	1,32	18,665	209,195	0,65	2537,982	253,798	135,977	2899
P45_20	14,05	1,33	18,687	209,195	0,70	2736,389	273,639	146,437	1989
P45_22	14,29	1,30	18,577	209,195	0,70	2720,354	272,035	146,437	7451
P45_05	13,98	1,32	18,454	209,195	0,75	2895,304	289,530	156,896	630
P45_06	14,06	1,34	18,840	209,195	0,75	2955,991	295,599	156,896	492
P45_29	14,09	1,31	18,458	209,195	0,80	3089,044	308,904	167,356	461
P45_08	14,05	1,32	18,546	209,195	0,80	3103,788	310,379	167,356	308
P45_09	14,04	1,33	18,673	209,195	0,85	3320,393	332,039	177,816	234
P45_10	14,01	1,32	18,493	209,195	0,85	3288,386	328,839	177,816	231
P45_21	14,05	1,33	18,687	209,195	0,90	3518,214	351,821	188,276	190

Tabla 4.8: Resultados experimentales ensayos dinámicos off-axis. Frecuencia 8 Hz.

En las siguientes imágenes (figuras 4.16 a 4.20) podemos observar la totalidad de las probetas ensayadas a fatiga.



Figura 4.16: Probetas ensayadas on-axis. Frecuencia 10 Hz.

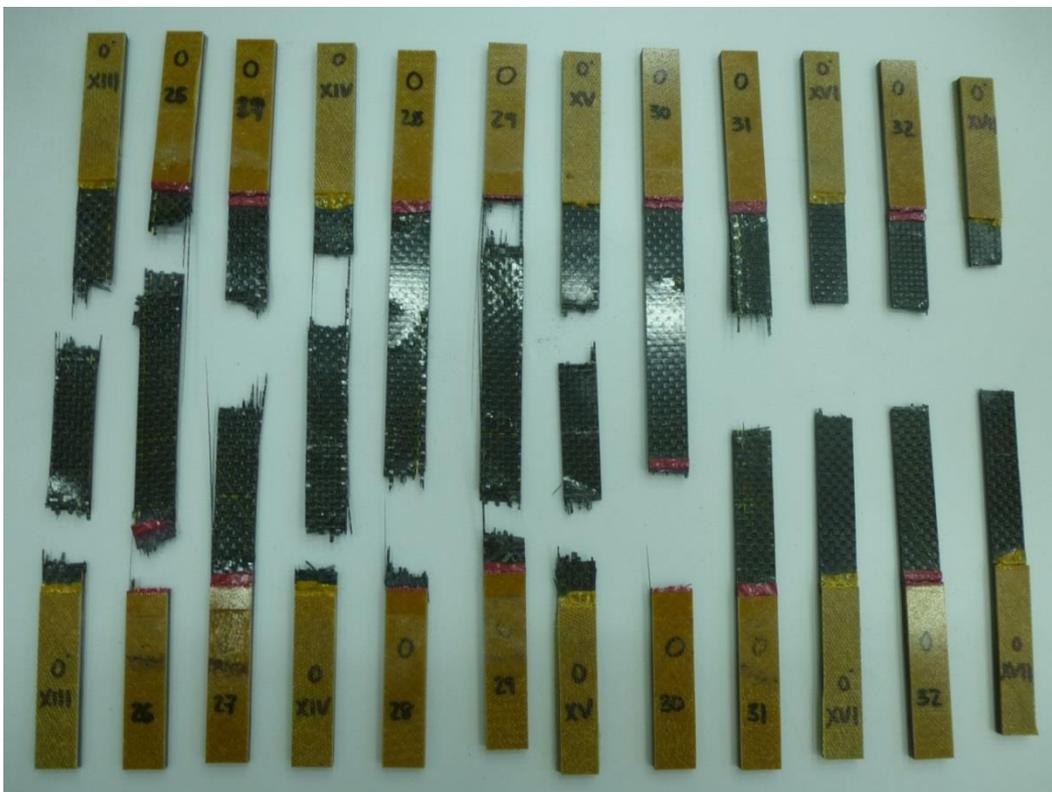


Figura 4.17: Probetas ensayadas on-axis. Frecuencia 15 Hz.

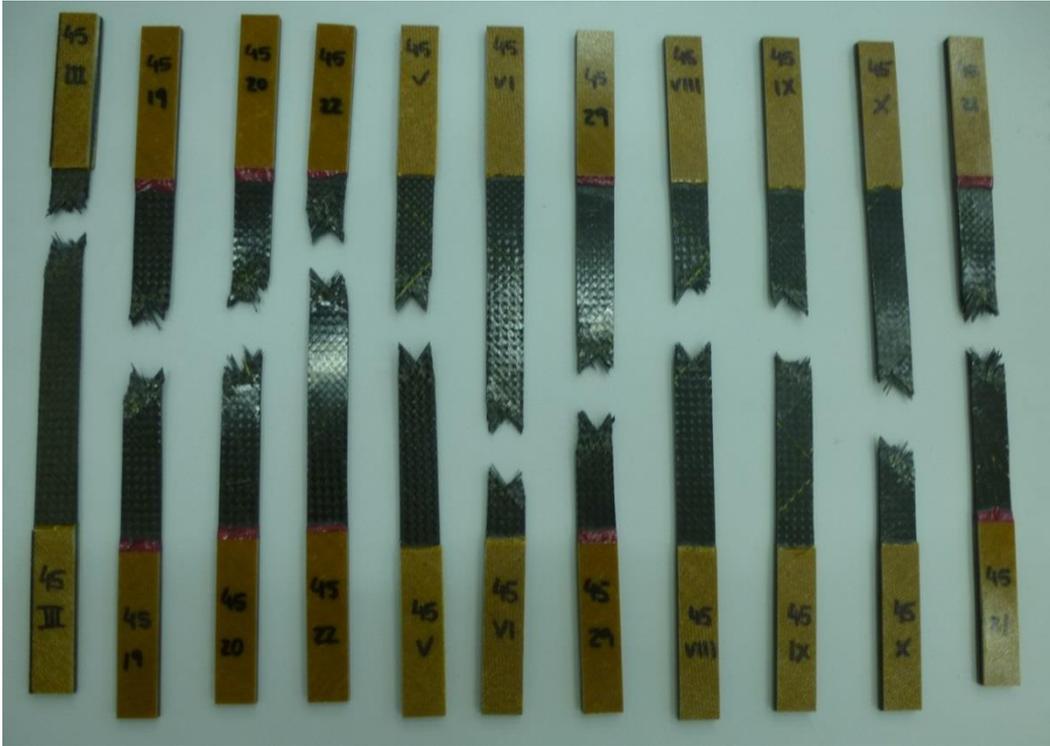


Figura 4.18: Probetas ensayadas off-axis. Frecuencia 8 Hz.

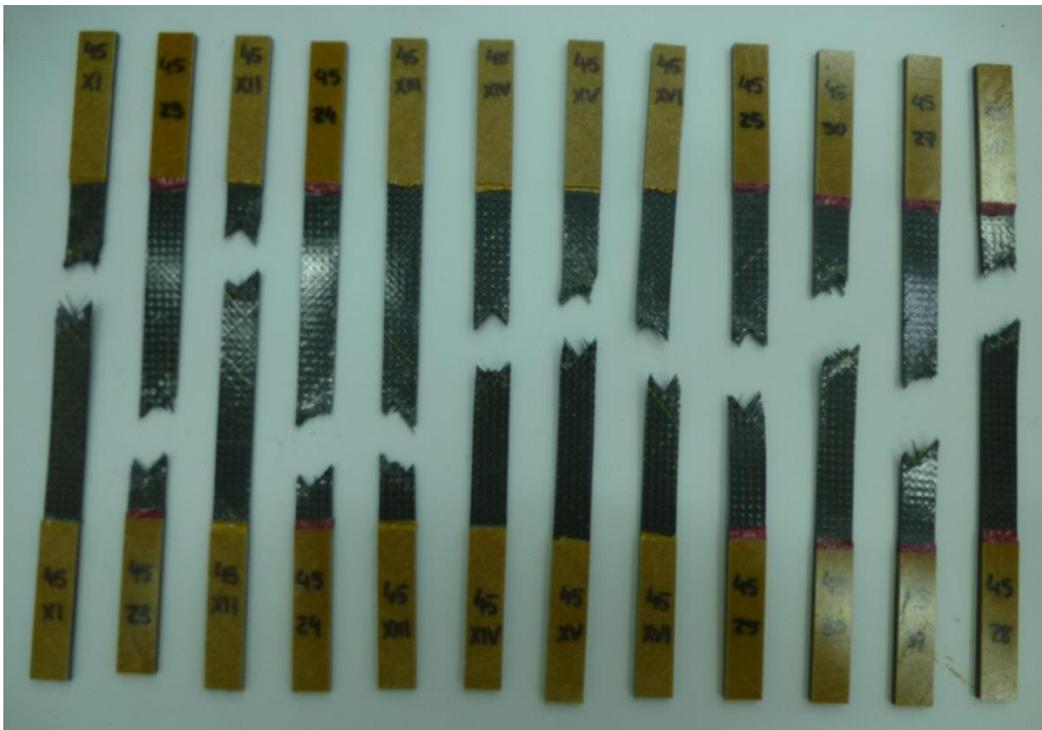


Figura 4.19: Probetas ensayadas off-axis. Frecuencia 2 Hz.

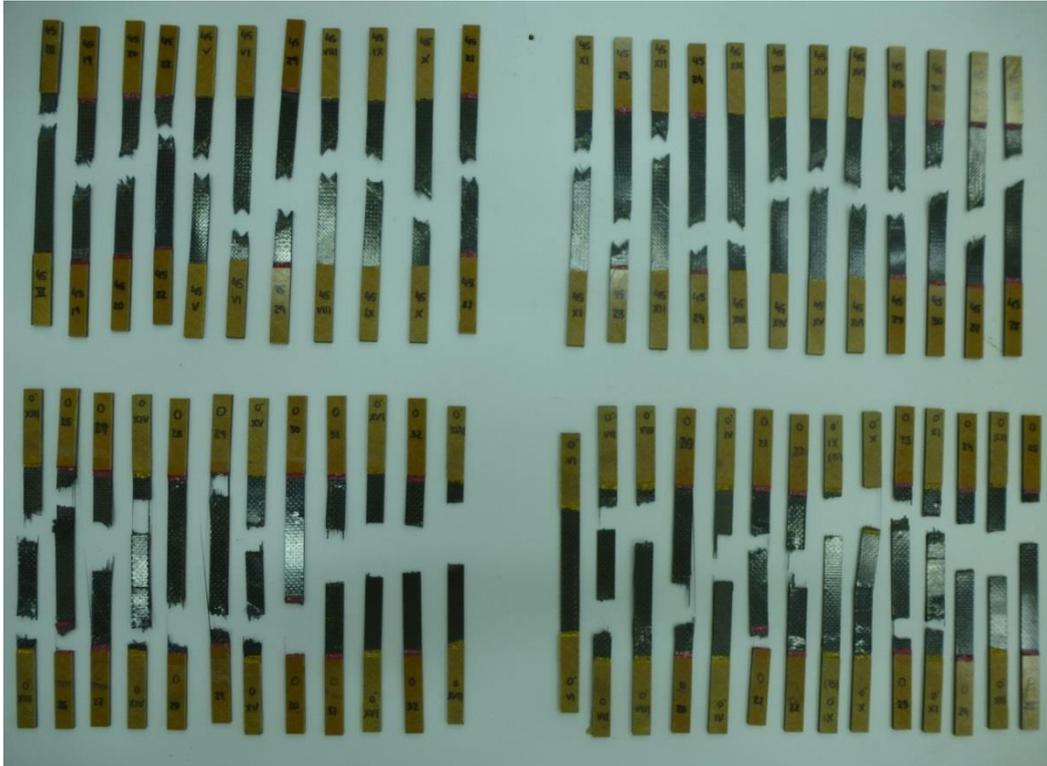


Figura 4.20: Conjunto de probetas ensayadas a fatiga.

En el capítulo cinco serán analizados los resultados aquí mostrados. Se representarán los valores obtenidos para una mejor comprensión de los mismos y se analizará su validez y representatividad del comportamiento a fatiga del material empleado.