

## CAPÍTULO 5

### ***ENSAYOS***



## 5.1.- INTRODUCCIÓN.

En este apartado será donde se obtendrán los resultados a analizar, a partir de los cuales se sacarán las respectivas conclusiones acerca del comportamiento a fatiga de este material.

Como ya es sabido, se van a estudiar dos casos diferentes: en el primero los extremos se hallarán empotrados, y en el segundo se intentará simular lo más posible un caso de apoyos articulados. Para culminar, se realizarán también ensayos de flexión en tres puntos, que nos darán la correspondiente curva de compresión-compresión a comparar con las anteriores.

El primer paso será la obtención de unas tensiones de referencia. Para ello se llevarán a cabo los ensayos estáticos correspondientes, dos para cada uno de los casos. Lo que nos dará la máquina de ensayos serán valores de carga estática máxima. A partir de estos valores se llega a otros de tensión normal longitudinal máxima, que se producirán en las caras superior e inferior del espécimen y que procederán de haber empleado el modelo de vigas para los casos empotrado y articulado respectivamente.

La ecuación que relaciona carga y tensión usada en este caso procede de aplicar la ecuación original y sustituir los pertinentes valores.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y * z}{I_y} - \frac{M_z * y}{I_z} \quad (6)$$

En nuestra situación sólo tendrá un valor no nulo el tercer término, y el valor de la tensión máxima positiva se alcanzará para el mínimo valor de la coordenada  $y$ , que se corresponderá con  $-e/2$ . El momento de inercia con respecto al eje  $z$  para una sección de dimensiones  $b * e$  será igual a  $\frac{b * e^3}{12}$ . Los momentos flectores máximos, que se darán en el centro de la probeta, han sido calculados por medio de ecuaciones de equilibrio y diagramas de esfuerzos, y resultan  $\frac{P * L}{4}$  y  $\frac{P * L}{8}$  para los casos articulado y empotrado respectivamente.

De esta forma se llega a las expresiones deseadas en cada caso:

$$\text{- En el caso empotrado: } \sigma = \frac{3 * P * L}{4 * b * e^2} \quad (7)$$

$$\text{- En el caso articulado: } \sigma = \frac{3 * P * L}{2 * b * e^2} \quad (8)$$

Con las tensiones resultantes se calculó una tensión última media, a la cual se le aplicarán los porcentajes necesarios. Como en la máquina de ensayos dinámicos lo que se controla es la carga, será debido aplicar la fórmula inversa a la anteriormente vista para conocer ésta. De los ensayos de fatiga se obtendrán todos los puntos a representar más adelante en las gráficas.

Finalmente, y antes de entrar a explicar cada ensayo con detalle, es conveniente explicar el sistema de medición del material a utilizar, las probetas. Para hallar las dimensiones de la sección de cada probeta se midió el ancho y el espesor en tres puntos diferentes, esto es, en cada extremo y en el centro. De los tres valores encontrados se hacía una media aritmética para cada dimensión. Esto se haría en todos y cada uno de los especímenes a utilizar tanto en ensayos estáticos como dinámicos.

## 5.2.- ENSAYOS ESTÁTICOS.

El ensayo estático de flexión consiste en aplicar carga creciente distribuida en la línea central de una probeta, la cual se irá deformando progresivamente hasta romperse. Se puede realizar controlando la carga o el desplazamiento, siendo esta última la modalidad escogida en el caso que nos ocupa.

Estos ensayos se llevaron a cabo en una máquina INSTRON 4482 con célula de carga de 10000 Kg, específica para ello. En ella son las mordazas superiores las que se mueven hacia arriba o hacia abajo, siendo este desplazamiento regulado por un interruptor. También posee un teclado alfanumérico para introducir datos desde ahí y varias pantallas donde se muestra la carga, el desplazamiento y la deformación en cada momento. El programa utilizado fue uno de gestión de máquinas universales creado en el propio laboratorio con el Labview, y realmente fue desde aquí desde donde se introdujeron todos los datos y se controló el ensayo. Mediante este programa se obtendrían las gráficas de evolución de la carga, mostradas más adelante.

En la siguiente fotografía de la figura 5.1 se muestra la máquina empleada.



Figura 5.1: Máquina INSTRON de ensayos estáticos.

El útil de flexión es agarrado por las mordazas inferiores y se mantiene, como se ha dicho, fijo. El apoyo central junto a su soporte son sujetados por las mordazas superiores, que se desplazan a una velocidad programada con anterioridad. Aquí el sistema de colocación de las mordazas es totalmente mecánico: los soportes de éstas se aflojan o aprietan mediante roscas, y para fijarlas correctamente en su posición hay que introducir unos pasantes integrados a éstas a través de unos orificios instalados para tal fin. De entre todas las disponibles hubo que elegir unas planas para el apoyo superior con dimensiones adecuadas al espesor de éste (ya dijimos que hubo que mecanizarlo y reducirlo a 11 mm para que lo acogieran aquellas con un intervalo entre 6 y 12 mm), y otras que sirvieran de sujeción al vástago cilíndrico sobre el que se enroscó el útil de flexión. Al poseer este último un diámetro de 17 mm se emplearon las mordazas de entre 13 y 19 mm. En la siguiente fotografía de la figura 5.2 aparece un ejemplo de mordazas planas.



Figura 5.2: Mordazas utilizadas en la máquina de ensayos estáticos.

Ambos tipos de ensayo fueron de flexión con sección rectangular, y como el resultado que era de interés era la carga última, así lo hicimos constar en el programa. No hizo falta colocar un extensómetro para calcular las deformaciones, ya que no era necesaria la obtención de ningún módulo de rigidez.

#### 5.2.1.- Caso empotrado.

Los ensayos de empotramiento fueron realizados a una temperatura de 22°C, con una humedad relativa de 35% y con control en desplazamiento a una velocidad de 1 mm/min. La luz o distancia entre apoyos externos era, como ya se ha comentado, de 50 mm.

La probeta se colocó lo más centrada posible, entre la cara plana de los rodillos y el soporte y, tal como se ha comentado, los tornillos de los extremos fueron fuertemente apretados para no dejar libertad alguna.

Las dimensiones de las probetas empleadas aparecen en la tabla 5.1. La referencia de cada probeta se ha denominado "ID", siendo "b" su ancho en mm, "e" su espesor en mm, y "A" su superficie transversal en  $mm^2$ .

ID	b (mm)	e (mm)	A ( $mm^2$ )
Emp1	25,05	2,33	58,36
Emp2	24,94	2,35	58,6

Tabla 5.1: Características geométricas de las probetas usadas en el caso empotrado.

### 5.2.2.- Caso articulado.

Los ensayos de apoyos articulados se realizaron a una temperatura de 22°C también y con una humedad relativa del 50%. Así mismo se controló el desplazamiento, y la velocidad fue la misma que en el caso anterior, de 1 mm/min. La luz, como siempre, de 50 mm.

La probeta en este caso estaría colocada entre los rodillos, con sus zonas curvas enfrentadas entre sí. En este caso hubo algunas dudas al principio acerca de la forma más apropiada en que debían fijarse los extremos. Si se apretaban mucho los tornillos de los apoyos se estaría simulando algo más parecido a un empotramiento, pero tampoco se debían dejar sueltos, pues los resultados obtenidos corresponderían al de un ensayo de flexión en 3 puntos. Por tanto se decidió que los tornillos se apretaran lo justo.

A continuación, en la figura 5.3, se puede ver una fotografía de la realización de este ensayo, todavía con el útil primero.

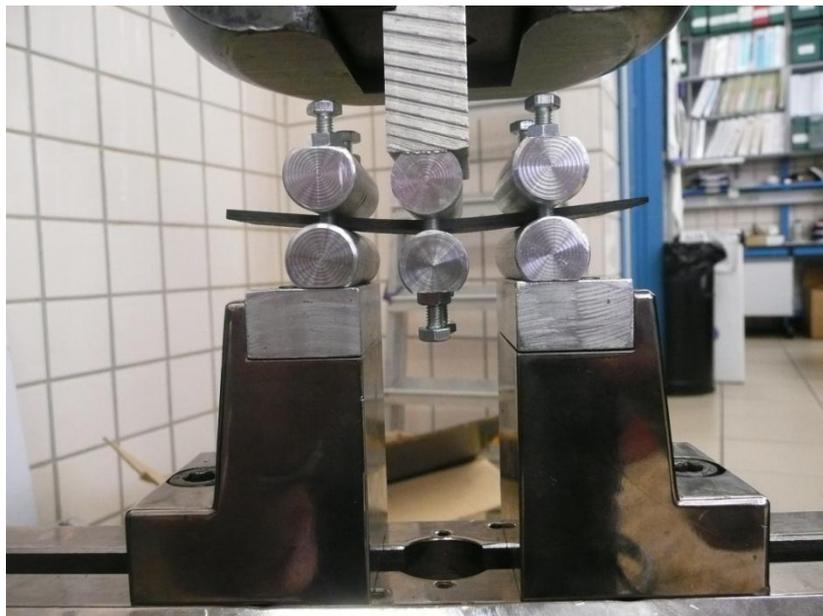


Figura 5.3: Imagen que muestra un momento de la ejecución del ensayo estático de flexión con extremos articulados.

Con respecto a las medidas de estos especímenes, aparecen detallados en la tabla 5.2.

ID	b (mm)	e (mm)	A ( $mm^2$ )
<b>Art1</b>	25,39	2	50,78
<b>Art2</b>	25,37	2	50,74

Tabla 5.2: Características geométricas de las probetas usadas en el caso articulado.

### 5.2.3.- Flexión convencional en tres puntos.

Como uno de los objetivos más relevantes a analizar con este proyecto era la comparación de curvas S-N Tracción-Compresión con las de Compresión-Compresión, se creyó conveniente hacer ensayos de este tipo con las probetas sobrantes. No fue necesario hacer ensayos estáticos al tomar esta decisión, ya que habían sido realizados con anterioridad. Antes de los que se consideraron como ensayos estáticos válidos para el caso de extremos articulados, se hicieron dos pruebas en la que los tornillos no se apretaron en absoluto, dado que se creía que ésta era la forma correcta de proceder. Al final resultó que estos especímenes no habían sido rotos en vano.

Las condiciones de humedad, temperatura, velocidad y luz fueron las mismas que las del caso de empotramiento, y las dimensiones se describen a continuación en la tabla 5.3.

ID	b (mm)	e (mm)	A ( $mm^2$ )
<b>3puntos_1</b>	25,13	2,33	58,55
<b>3puntos_2</b>	25,29	2,3	58,13

Tabla 5.3: Características geométricas de las probetas usadas en el ensayo de flexión convencional en tres puntos.

## 5.3.- ENSAYOS DINÁMICOS.

Consistentes en la aplicación de cargas cíclicas con el tiempo para diferentes valores de carga, la realización de estos ensayos es la verdadera esencia de este proyecto, ya que nos permitirán caracterizar a fatiga el material bajo diferentes condiciones y llevar a cabo un estudio comparativo entre los diferentes tipos.

Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina INSTRON 8801, específica para ello. La célula de carga empleada posee un rango de fuerza de 100 KN. Las cargas más pequeñas a aplicar iban a estar alrededor de 1 KN, y se pensó que quizás la precisión de la máquina fuera insuficiente para esos niveles tan bajos, pero lo cierto es que funcionó con normalidad. El manejo de la máquina es bastante sencillo y se lleva a cabo a través de una serie de botones y pomos giratorios.

Con respecto a las mordazas, éstas son diferentes que las que se usan en la máquina de ensayos estáticos. Se sujetan a la máquina mediante unos pequeños muelles, y el sistema para apretarlas o soltarlas es automático como ya se ha comentado. Así mismo, algunas son para sujetar elementos planos y otras para elementos cilíndricos de diferentes medidas. Las planas se escogieron de entre 7,5 y 15 mm, y aunque las circulares que había disponibles eran de entre 10 y 16 mm fueron apropiadas para el vástago de diámetro 17 mm. En la fotografía de la figura 5.4 se observa un ejemplo de mordazas planas.



Figura 5.4: Mordazas planas de la máquina de ensayos dinámicos.

El programa usado para registrar las evoluciones temporales de carga y posición y para controlar los parámetros y regular el ensayo fue el SAX V9.2. Antes de iniciar cada ensayo hay que abrir el archivo donde estaban los datos del anterior. Luego es necesario ajustar y modificar los siguientes datos y parámetros:

- En primer lugar, hay que configurar la onda que describía la carga aplicada a lo largo del tiempo. Como la carga media era nula, se introduce el tipo de onda, que es sinusoidal, la semiamplitud en KN y la frecuencia en Hz, ya que la fase inicial siempre es cero. Se verá más adelante como para el último tipo de ensayo realizado, el de tres puntos, habrá modificaciones en cuanto a carga media y semiamplitud.
- Seguidamente se meten los límites de carga, que en el supuesto caso de ser sobrepasados provocarían que se parase la máquina. Esto se debe hacer siempre como medida de seguridad, ya que podría suceder que la probeta se rompiera y la mordaza inferior chocara con la superior, teniendo graves consecuencias como hemos aclarado anteriormente.
- Mientras se esté manipulando la probeta, esto es, posicionándola y fijándola correctamente en su posición, debe encontrarse protegida. La protección se lleva a cabo cliqueando en el quinto de los botones superiores, y una vez activada aparece una marca verde en forma de "v" en lugar de una "x" en rojo en el interior del icono que hay junto a la silueta de un espécimen.
- Además de los límites, también es importante el control del parámetro proporcional del PID en el apartado de carga, ya que a mayor valor en dB de la constante de proporcionalidad, antes adquirirá la onda la amplitud deseada. Se fijó en 14 dB para ambos casos, pues a menores valores puede que no se alcanzaran los niveles deseados.
- A continuación no debe olvidarse introducir el criterio para que se pare el ensayo. Por regla general se consideró que cuando la amplitud en posición variara un 50% con respecto a la permanente, el ensayo sería interrumpido. De todas formas en el caso articulado habrá excepciones al respecto que serán comentadas cuando proceda.
- La presión, indicada en un barómetro situado en la parte inferior lateral izquierda de la máquina, también debe ser comprobada. Más o menos deben ser 40 bar para 200 kg de carga de tal forma que no se dañen las mordazas, y como máximo 50 bares.

- Finalmente se cambia el nombre del ensayo previo por el del actual.

Una vez completados todos los campos pertinentes se inicia el ensayo. En la fotografía de la figura 5.5 se puede observar la clásica pantalla que se ve mientras se realiza éste. Aparte de los botones utilizados para introducir los parámetros antes señalados, se aprecia básicamente un gráfico color azul en el que se registra cómo evolucionan las variables deseadas (en este caso posiciones extremas de las mordazas frente a nº de ciclos, aunque bien podría ser carga respecto a tiempo, por ejemplo), y unos cuadrantes superiores en los que se registra la posición actual, cargas extremas, nº de ciclos y posiciones extremas. Observando estos valores últimos, cuando se estabilicen las cargas se establecerán los límites de posición, necesarios para proteger a la máquina de no sufrir daños y al mismo tiempo a la probeta. Hay que ser muy consciente de esto, ya que en este proyecto se perdieron algunas probetas por no colocarlos a tiempo.

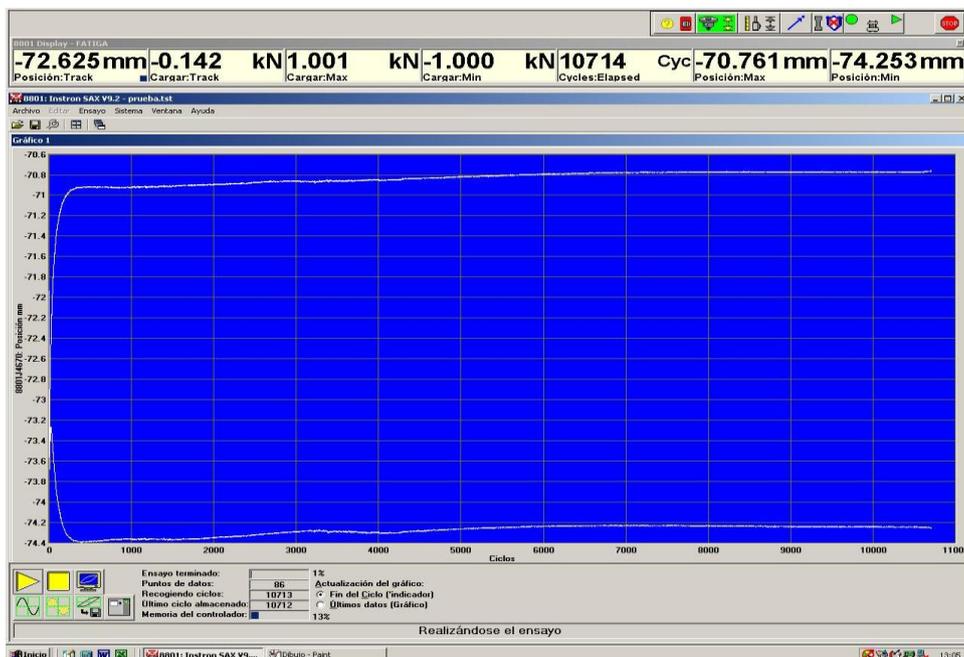


Figura 5.5: Clásica pantalla que muestra el SAXV9.2 durante la ejecución del ensayo.

A lo largo del ensayo fueron surgiendo problemas de diversa índole. El primero de ellos fue la rotación que experimentaba el pistón a medida que se sucedían los ciclos, dando lugar a que el útil de flexión también girara y no se mantuviera alineado correctamente con el marco de la máquina. De esta forma el apoyo central, sobre el que se realiza la flexión, no permanecía perpendicular a la probeta, y además podían generarse tensiones innecesarias. Se pensaron posibles soluciones, como rodear con una brida el pistón y el conducto por el que el aceite es bombeado para evitar el desplazamiento de éste último, pero no terminaba por surtir efecto. También se dispuso un bloque de Aluminio para impedir que se moviera el tubo del

aceite, pero esto podía ser peligroso y se descartó. Finalmente se colocó un bloque de gomaespuma con una mueca semicircular que limitaba el movimiento de la tubería hacia los lados, dando resultados bastante favorables.

Otro de los contratiempos fue el notable número de probetas que se rompieron al iniciar los ensayos. El pistón experimentaba un brusco desplazamiento y la probeta flectaba del mismo modo, quedando al instante inutilizada. Tras observar lo sucedido en varias ocasiones se intentó sacar alguna conclusión y ponerle remedio. Se observó que siempre ocurría en el primero de los ensayos, cuando el refrigerador se había encendido y la máquina empezaba a bombear aceite. Para evitarlo se usó, en los experimentos posteriores, un espécimen ya empleado como prueba, y seguidamente se colocaba la probeta a ensayar.

También hay que hacer mención al gran número de tornillos que se rompieron durante el desarrollo de los ensayos, ya que las uniones atornilladas en los apoyos resultaron ser algo frágiles para tantos ciclos de fatiga. Hubo ocasiones en las que se dejó una probeta ciclando y al llegar al laboratorio al día siguiente ésta se encontraba descentrada y doblada como consecuencia de la rotura de algún tornillo, acumulando tensiones que condicionarían su vida a fatiga. De hecho esto se comprobaba más tarde al comparar el número de ciclos soportados con el de otras colocadas a iguales niveles de carga.

### 5.3.1.- Caso empotrado.

Éste fue el primer caso a ensayar. Las probetas rectangulares empleadas, pertenecientes al primer panel, tenían como valores medios de ancho y espesor 24,81 mm y 2,32 mm respectivamente

En la tabla 5.4 se detallan las dimensiones junto a las cargas últimas específicas de cada una de las probetas en Newtons, éstas representadas como  $P_{ult}$ .

ID	b (mm)	e (mm)	A ( $mm^2$ )	$P_{ult}$ (N)
1	24,91	2,34	58,28	3359,16
2	24,82	2,33	57,83	3318,47
3	24,43	2,32	56,67	3238,35
4	25,12	2,33	58,52	3358,58
5	24,91	2,33	58,04	3330,51
6	24,32	2,28	55,44	3113,57
7	25,22	2,34	59,01	3400,96
8	25,21	2,34	58,99	3399,61
9	24,45	2,32	56,72	3241

Tabla 5.4: Dimensiones y carga última de las probetas empleadas en los ensayos dinámicos con extremos empotrados.

Se ensayó con una frecuencia de **5 Hz**, ya que se intentó a 8 Hz en un principio pero fue imposible, pues se observó que la máquina no alcanzaba la carga deseada pasados un número suficiente de ciclos y terminaba por pararse. Al principio se pensó que esto podía estar relacionado con las malas condiciones del aceite bombeado, que llevaba tiempo sin cambiarse, o también se barajó la posibilidad de que la máquina no alcanzara los KN deseados por falta de precisión.

El hecho de que no se pudiera ensayar a frecuencia más elevada era que al haber un mayor número de ciclos por unidad de tiempo, no podían alcanzarse en la probeta las amplitudes de oscilación que requería la carga introducida.

El criterio empleado para que terminase el ensayo fue, como se ha comentado anteriormente, que la amplitud en posición variara un 50% con respecto a la existente en régimen permanente. Es en este tipo de ensayo en el que se observaría cómo a partir de un determinado número de ciclos las ramas de la gráfica de posición comenzarían a divergir. Al mismo tiempo se escucharían repetidos crujidos correspondientes a la sucesiva rotura de fibras. Esta inestabilidad es significativa del proceso de rotura de la probeta, y culminaría con la parada de la máquina.

### **5.3.2.- Caso articulado.**

Para el caso articulado se emplearon probetas del segundo panel, éstas de un espesor menor, puesto que hubo un fallo de cálculo al comparar grosores y número de capas de tejido entre dos tipos diferentes de probetas. Esto derivó en un apilado con una capa menos, diez en lugar de once. Las probetas, rectangulares también, presentaron de media un ancho de 25,26 mm y un espesor de 2,04 mm. En la tabla 5.5 aparecen valores de las dimensiones de las probetas junto a las cargas últimas. Las probetas cuyo número identificativo no aparece, es decir, la "1", la "4", la "10", la "13" y la "14", se rompieron debido a contratiempos con la máquina como los explicados: un pico de amplitud de carga, un tornillo que se rompe y desplaza y tuerce la probeta,...

ID	b (mm)	e (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	P <sub>ult</sub> (N)
2	25,37	2,07	52,51	1750,24
3	25,37	2,07	52,51	1750,24
5	25,32	2,04	51,65	1696,52
6	25,41	2,03	51,58	1685,9
7	25,37	2,02	51,24	1666,7
8	25,35	2,02	51,2	1665,39
9	25,38	2,02	51,27	1667,36
11	24,85	2,13	52,93	1815,19
12	24,85	2,06	51,19	1697,84
15	25,37	2,03	51,5	1683,25

Tabla 5.5: Dimensiones y carga última de las probetas empleadas en los ensayos dinámicos con extremos articulados.

En cuanto a la frecuencia, se comenzó a ensayar con una frecuencia igual a la anterior, de 5 Hz, pero hubo que reducirla a **3 Hz**. Los apoyos articulados conllevan unas condiciones menos restrictivas que los empotramientos, en los que los grados de libertad de giro están impedidos y no existe ningún tipo de deslizamiento de las probetas. Por tanto, en un ensayo de flexión como el que nos ocupa, las oscilaciones de la probeta serán mayores en el caso en que haya articulaciones. Por ende era necesaria una mayor amplitud de desplazamientos para que se satisficieran los valores de carga fijados para cada ensayo, y una frecuencia de 5 Hz no hacía posible que los extremos de la probeta alcanzaran las amplitudes adecuadas. Tras realizar la modificación se observó con satisfacción que transcurridos unos 900 o 1000 ciclos aproximadamente, se alcanzaban los valores de carga establecidos como semiamplitudes de la onda senoidal correspondiente.

Asimismo, el criterio para considerar que la probeta estaba rota también hubo que modificarlo, y éste es un tema acerca del cual surgieron algunas discusiones importantes. Considerar que la probeta se rompía cuando la variación en amplitud del desplazamiento en régimen permanente superaba el 50% era inviable, ya que mientras en el caso empotrado la mordaza inferior se desplazaba alrededor de 2 mm, en el articulado los desplazamientos eran casi del doble, y esto imposibilitaba que se alcanzaran tales variaciones por mínima que fuera la frecuencia. Por tanto había que considerar otro criterio como válido, y se razonó tal como se explica a continuación. Cuando se ensayaba alguna de las probetas la máquina se paraba después de cierto número de ciclos a pesar de seguir alcanzando la carga deseada. Seguidamente se reiniciaba el ensayo, que duraba otro número determinado de ciclos. En uno de estos “subensayos” la máquina ya **no alcanzaba la carga** porque la probeta no era definitivamente capaz de soportarla y terminaba por pararse, y era entonces cuando se daba por roto el espécimen, anotando como vida a fatiga la suma total de número de ciclos.

Seguidamente, en la figura 5.6, se observa una fotografía tomada durante la realización de uno de los ensayos.



Figura 5.6: Ejecución de un ensayo de fatiga con extremos articulados.

### 5.3.3.- Flexión convencional en tres puntos.

Por último se planteó como objetivo encontrar la recta de compresión-compresión para compararla con las anteriores de tracción-compresión. Al quedar sólo 5 probetas, la mayoría pertenecientes al primer panel, se pensó en hacer uno nuevo para tener un número suficiente de datos y obtener una recta de regresión lineal más fidedigna, pero no fue posible por falta de material. Como lo que se representan son tensiones frente a número de ciclos, se pasó por alto el hecho de que hubiera para estos ensayos probetas de diferentes espesores, si bien es cierto que un diferente número de láminas puede afectar a la distribución de esfuerzos internos. La frecuencia de ensayo fue nuevamente de **3Hz**.

Para realizar el ensayo se empleó el mismo útil, y aunque en el laboratorio ya existían los pertinentes apoyos para este tipo de ensayo, se consideró conveniente utilizar como

apoyos externos los mismos que se habían usado en el caso de tracción-compresión, ya que el uso de cilindros de mayor radio provocaría que la deformada en flexión de la probeta fuese diferente. Por tanto se colocarían dos de los semicilindros o rodillos disponibles en cada extremo sujetos con un par de tornillos de igual diámetro (4 mm) pero más cortos esta vez. Al ir a posicionar la probeta se observó otro inconveniente, y es que eran demasiado anchas para la distancia libre que dejaban entre sí las cabezas de los tornillos, de tal forma que se recurrió al torno para hacer unos huecos en los que se alojaran éstas. En la siguiente imagen de la figura 5.7 se puede apreciar como quedaron las piezas después del mecanizado.



Figura 5.7: Aspecto que ofrecían los apoyos después del empleo del torno para crear esas hendiduras donde se alojarían las cabezas de los tornillos.

Las dimensiones y cargas últimas de cada probeta para el ensayo de flexión en tres puntos convencional están recogidas en la tabla 5.6:

ID	b (mm)	e (mm)	A ( $mm^2$ )	$P_{ult}$
10	24,95	2,36	58,88	1899,36
11	25,23	2,33	58,78	1872,15
12	24,4	2,32	56,6	1795,06
16	25,33	1,97	49,9	1343,63

Tabla 5.6: Dimensiones y carga última de las probetas empleadas en los ensayos dinámicos de flexión convencional en tres puntos.

Las probetas se consideraron rotas cuando ya no soportaban el nivel de carga establecido, y se verá que hubo diferentes formas de rotura para este tipo de ensayo.

Hay que tener en cuenta que los datos de carga a introducir en la máquina eran semiamplitud de onda y el valor medio. En los ensayos anteriores el valor medio era cero, y lo único que cambiaba de un ensayo a otro era la carga aplicada, porcentaje determinado de la carga última y mitad de la amplitud de la onda senoidal. Ahora, al aplicar un porcentaje determinado a la carga última específica de cada probeta, lo que hallábamos eran los máximos valores que alcanzaba la onda en valor absoluto, o lo que es lo mismo, los valores mínimos de carga. Al dividir éstos entre diez se obtendrían las cargas máximas, que serían también negativas, ya que la máquina funcionará siempre en compresión. Para encontrar los valores de carga media y semiamplitud se recurrió a las siguientes fórmulas:

$$P_{MED} = (P_{MAX} + P_{MIN})/2 \quad (9)$$

$$A_{1/2} = P_{MAX} - P_{MED} \quad (10)$$

En la siguiente fotografía de la figura 5.8, tomada durante la ejecución de uno de los ensayos, podemos ver la disposición del útil, de los apoyos y de la probeta. Vemos que el apoyo central sobre el que flexa la probeta fue el que se ha usado siempre en el ensayo de tres puntos.

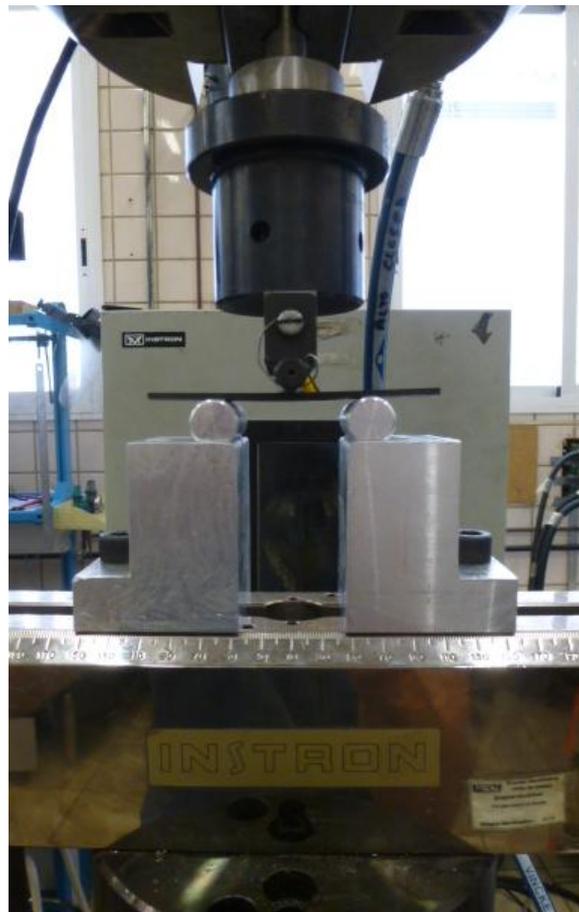


Figura 5.8: Ejecución de uno de los ensayos de flexión en 3 puntos.

#### 5.4.- RESULTADOS.

En este apartado 5.4 se muestran los resultados obtenidos. En primer lugar, las cargas de rotura halladas en cada uno de los ensayos estáticos junto a una descripción de los signos externos de fallo. En segundo lugar se detalla todo lo que se obtuvo de los ensayos dinámicos, cuyas tensiones de ensayo se obtuvieron a partir de porcentajes de la media de referencia hallada de las cargas últimas obtenidas en los estáticos. También se observaron tendencias, como la variación de la amplitud del desplazamiento con el porcentaje de carga aplicado, y se vieron al microscopio probetas correspondientes a cada nivel de carga para identificar los principales mecanismos de daño que tuvieron lugar.

##### **5.4.1.- Ensayos estáticos.**

###### 5.4.1.1.- Caso empotrado.

La primera probeta se rompió a una carga de 3257,9 N, y la segunda a 3484,51 N. A lo largo del ensayo se observó como, en primer lugar, la carga variaba casi linealmente con el desplazamiento de las mordazas superiores hasta llegar a un pico, tras el cual había un descenso considerable en el nivel de carga que soportaba el espécimen. Luego, la carga iba aumentando nuevamente poco a poco hasta llegar a otro pico, y este fenómeno se iba repitiendo a lo largo del ensayo. De todos los picos observados el primero de ellos era el absoluto, ya que una vez que se alcanzaba el máximo de carga, el laminado ya no alcanzaría nunca ese máximo otra vez. La tensión media que derivó de los valores de carga última hallados fue 953,54 MPa. Asimismo, después de cada pico hubo una notable pérdida de rigidez en la probeta, siendo la pendiente de cada nuevo tramo de curva carga-desplazamiento menor que la del tramo anterior.

Podemos observar las tendencias antes explicadas en la siguiente gráfica de la figura 5.9, correspondiente a la primera de las probetas.

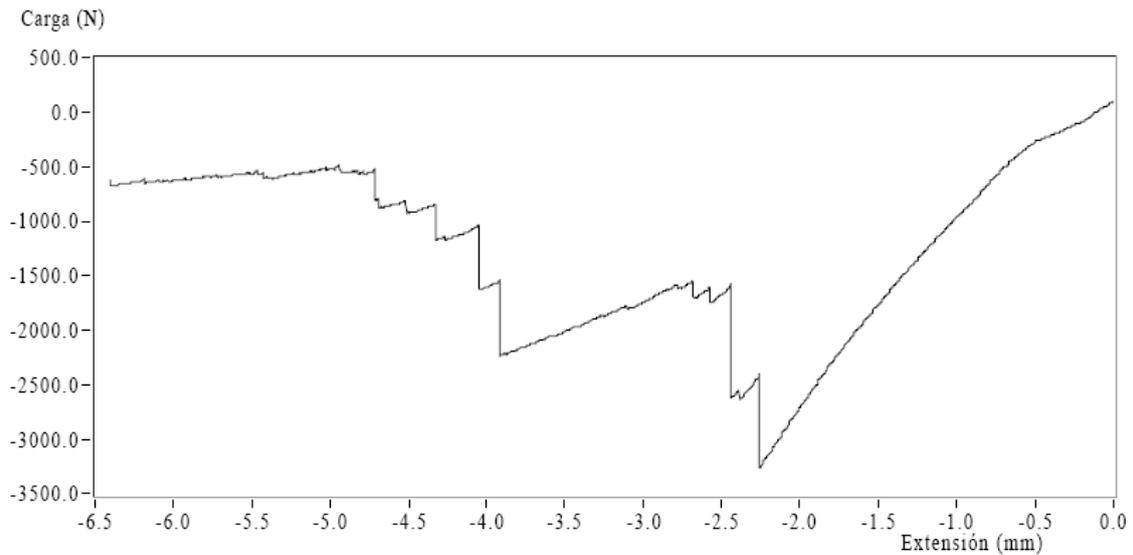


Figura 5.9: Evolución de la carga a medida que descendían las mordazas en el primero de los ensayos estáticos empotrados.

Tras la realización del ensayo la probeta mostraba una rotura por flexión en la cara inferior, que es la que se encontraba a tracción, aunque también presentaba una grieta en la cara posterior, ésta de menor profundidad. Dado que la prueba se prolongó bastante más allá del primer pico de carga, a ambos lados del eje de flexión había sendas grietas formadas como consecuencia de la tensión sufrida en las zonas de agarre. En la fotografía de la figura 5.10 se aprecia claramente cuál fue el resultado.



Figura 5.10: Aspecto que ofrecía la primera de las probetas ensayadas para el caso estático empotrado. Se aprecia la fractura en la zona central pero también las fisuras en los lados.

Con respecto al segundo espécimen, éste fue ensayado únicamente hasta la primera de las roturas, como podemos ver a continuación en la figura 5.11.

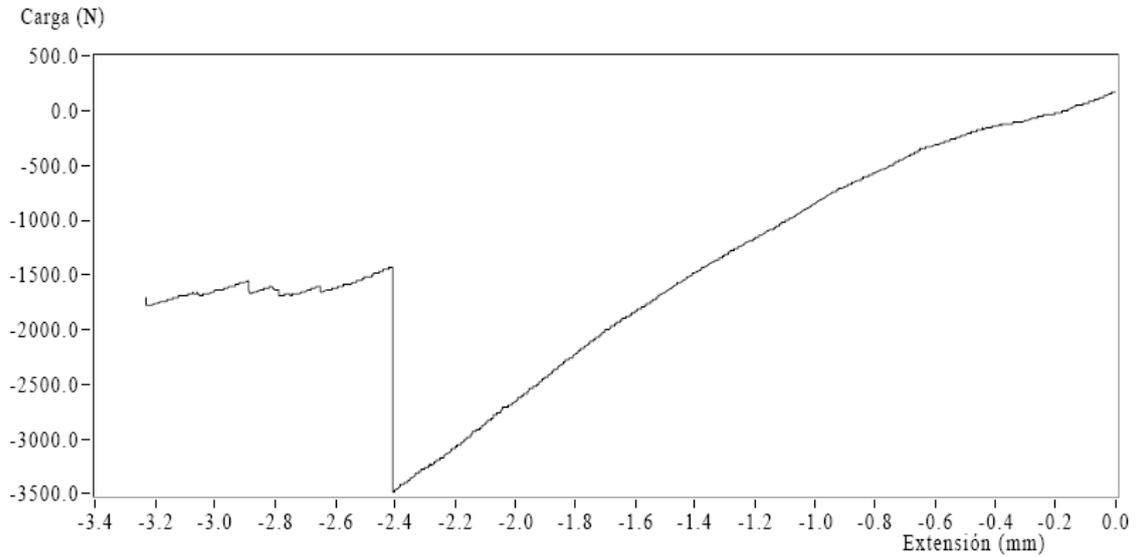


Figura 5.11: Evolución de la carga hasta alcanzar el primer pico en el segundo de los ensayos estáticos con extremos empotrados.

En la fotografía de la figura 5.12 se ve cómo quedó esta otra probeta.

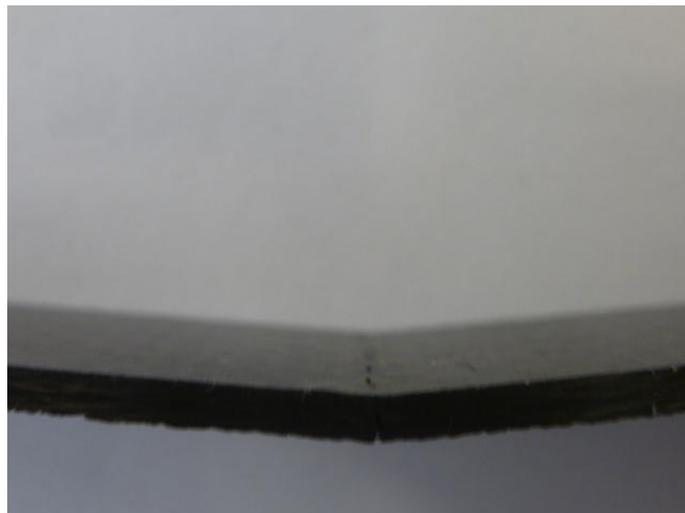


Figura 5.12: Aspecto ofrecido por la segunda de las probetas ensayadas en este tipo de ensayo.

## 5.4.1.2.- Caso articulado.

Al igual que en el caso empotrado, la carga que se tomó como válida fue la correspondiente al primer pico alcanzado. Éstas fueron de 1603 y de 1666 N respectivamente, y se puede observar la evolución de la carga a medida que descendían las mordazas superiores en las siguientes gráficas de las figuras 5.13 y 5.14 respectivamente.

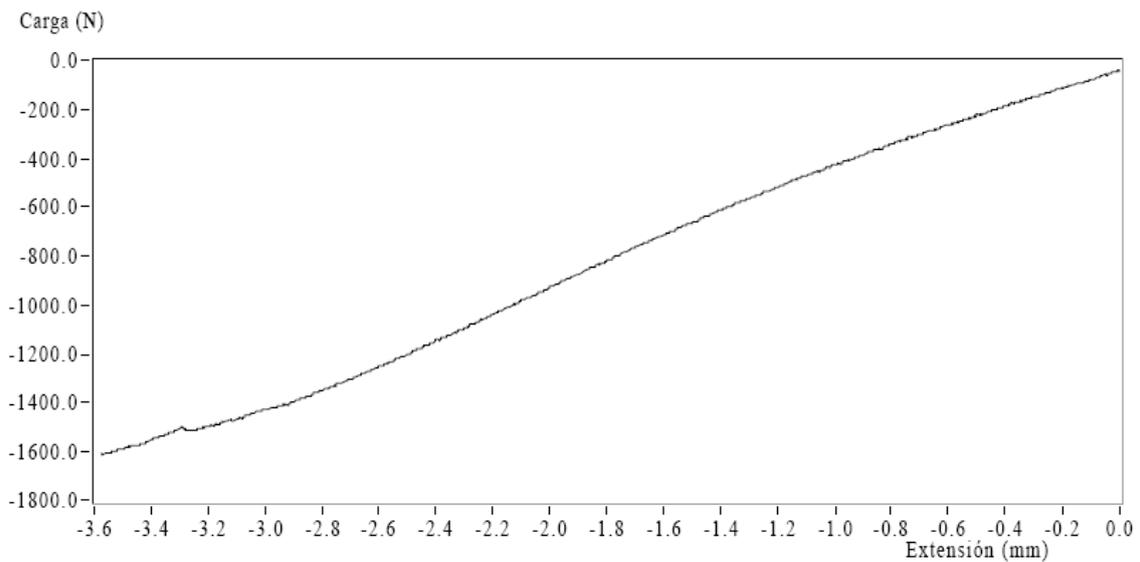


Figura 5.13: Evolución de la carga con el desplazamiento de las mordazas hasta el primer pico en el primer espécimen ensayado con extremos articulados.

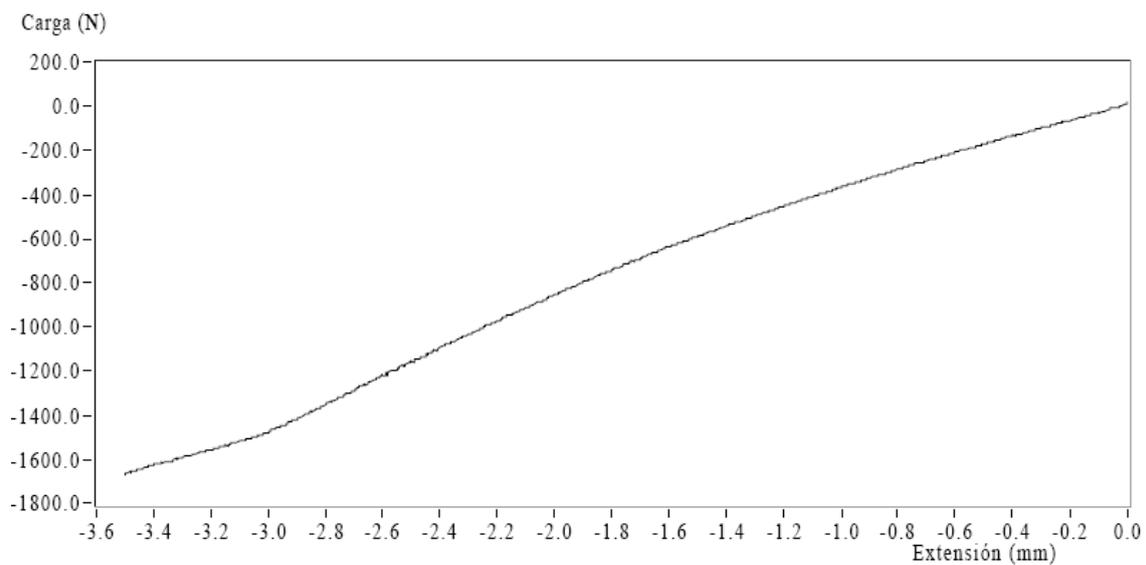


Figura 5.14: Evolución de la carga con el desplazamiento de las mordazas hasta el primer pico en el segundo espécimen ensayado con extremos articulados.

Se aprecia claramente que ambas gráficas son muy similares, y también puede observarse que los datos posteriores a la carga máxima fueron eliminados, ya que no tenían ninguna relevancia. En este caso, la tensión media de referencia fue 1207,53 MPa.

En la siguiente imagen de la figura 5.15 se aprecia el resultado del ensayo en el primero de los especímenes.



Figura 5.15: Así quedó la primera probeta como resultado del ensayo estático articulado.

Las cargas máximas obtenidas de los ensayos con empotramiento fueron bastante mayores que las de los ensayos articulados, el doble aproximadamente. Esto es debido en parte a que el espesor de las probetas en el segundo caso era de 2 mm, ya que pertenecían al segundo de los paneles, mientras que el primer grupo de probetas tenía alrededor de 2,3 mm. Aparte de esta variación en los espesores, esta diferencia en los valores de carga tuvo su origen en la naturaleza de los apoyos. El empotramiento, que no permite ningún grado de libertad, absorbe mayor cantidad de energía que el apoyo articulado. Al restringir mucho más el movimiento, se observa que el desplazamiento del centro de la probeta o flecha es menor en el primero de los casos. Mientras el desplazamiento de las mordazas era de 2.5 mm en el caso empotrado, en el articulado era de 3.6 mm aproximadamente.

## 5.4.1.3.- Flexión convencional en tres puntos.

Para este último caso las cargas de rotura resultaron 1972,79 y 1722,64 N respectivamente, y fueron las correspondientes a esos primeros picos de la gráfica que ya hemos comentado. De aquí, a través de las fórmulas antes expresadas, se llegó a una tensión media igual a 1025,12 MPa. Éstas que aparecen en las figuras 5.16 y 5.17 son las gráficas correspondientes a las probetas "3ptos\_1" y "3ptos\_2".

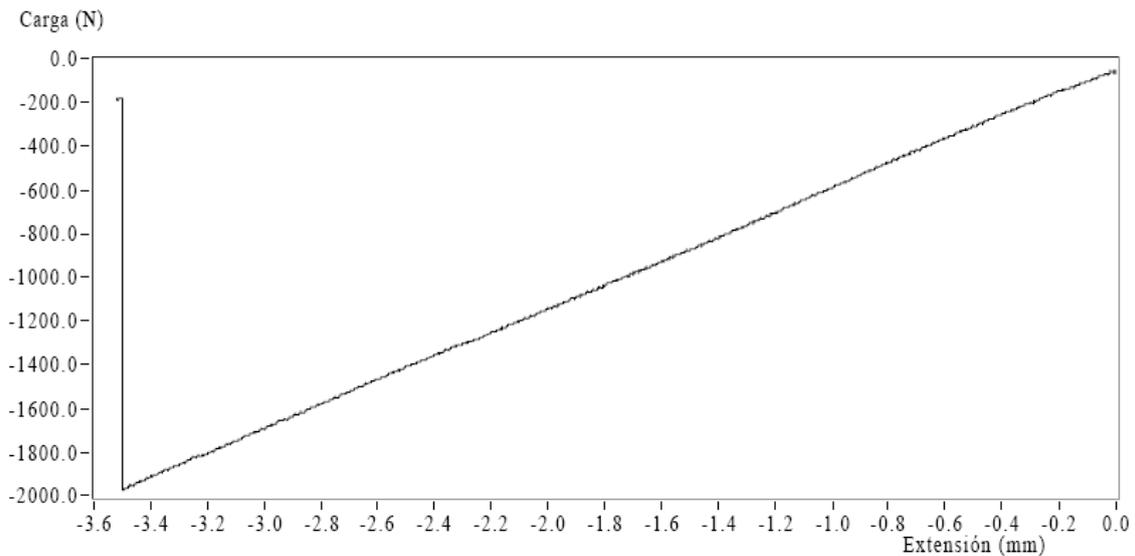


Figura 5.16: Evolución de la carga a medida que descendían las mordazas superiores en el primer ensayo estático de flexión en 3 puntos. Se registra sólo hasta el primer pico.

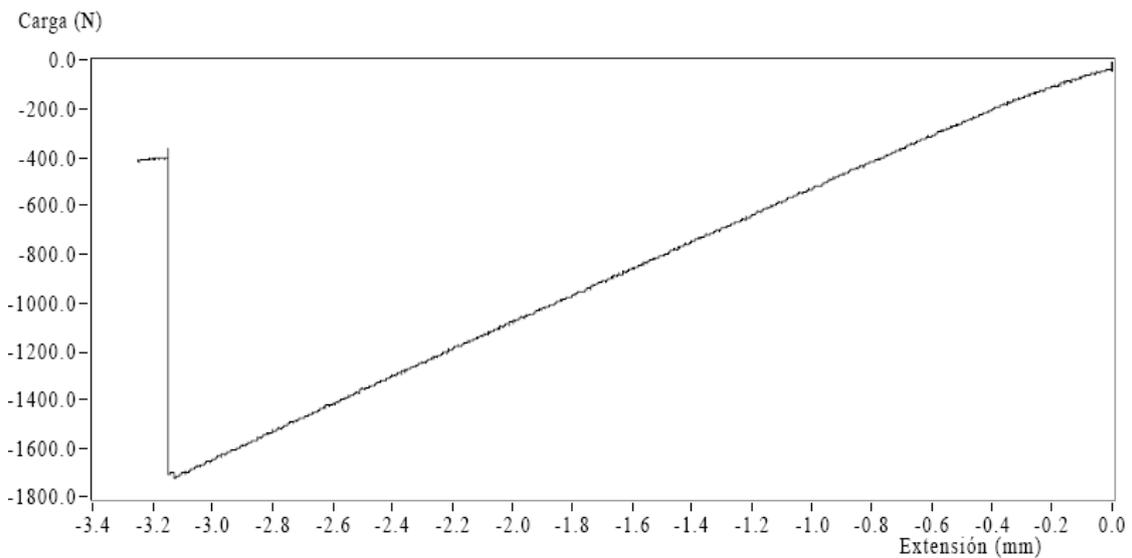


Figura 5.17: Evolución de la carga a medida que descendían las mordazas superiores en el segundo ensayo estático de flexión en 3 puntos. Se registra sólo hasta el primer pico.

### 5.4.2.- Ensayos dinámicos.

#### 5.4.2.1.- Caso empotrado.

Los porcentajes variaron entre el 55 y el 70% de la carga última, que se había calculado para cada probeta en función de las dimensiones de ésta. Las primeras probetas se ensayaron al 70%, y al comprobar que habían roto a muy bajo número de ciclos al comparar con resultados de otros ensayos de flexión se decidió ir bajando en 5% el nivel de carga hasta el 55%. Las cargas de ensayo, semiamplitudes de las ondas senoidales aplicadas, estuvieron en torno a 2 KN. La más baja era de 1,782 KN, mientras que la más alta fue de 2,331 KN. Huelga decir que el ratio de cargas “R”, cociente entre la mínima y la máxima, era igual a -1, ya que se trata de un ensayo de Tracción-Compresión y la tensión media es nula.

El conjunto de probetas ensayadas a fatiga con condiciones de empotramiento se muestra a continuación en la siguiente fotografía de la figura 5.18. Si era difícil apreciar los daños cuando se observaban desde cerca, viendo esta instantánea es prácticamente imposible.

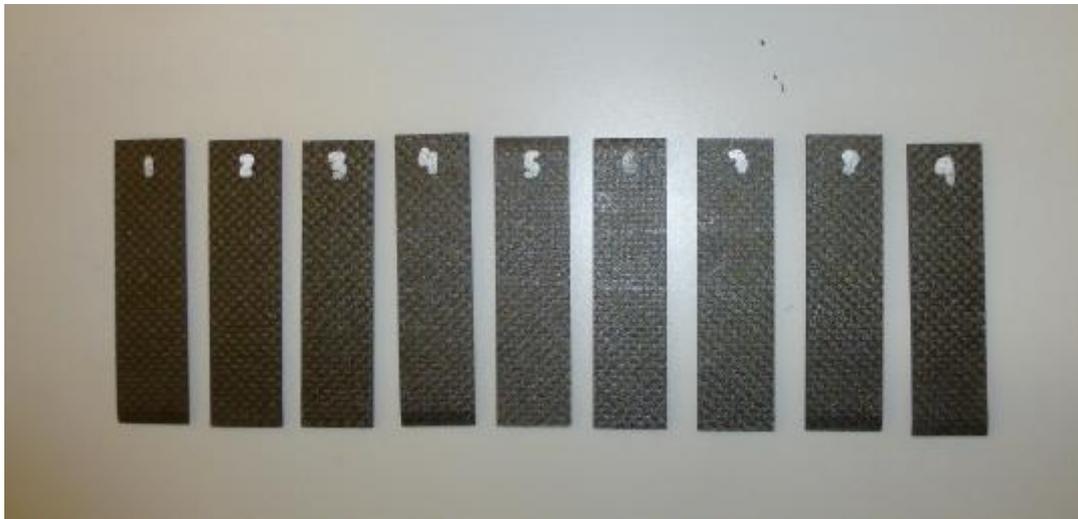


Figura 5.18: Conjunto de especímenes ensayados a fatiga para el caso empotrado.

Los resultados obtenidos se sumarizan en la tabla 5.7, que se muestra a continuación, donde se recoge el número de ciclos soportados para cada nivel de carga, así como el valor de la tensión en Mega Pascales y la carga aplicada en cada caso en KN. También aparece, en mm, la amplitud de los desplazamientos de las mordazas inferiores identificada como  $\delta$ , o lo que es lo mismo, la de los extremos de la probeta.

ID	Nivel de carga (%)	Nº de ciclos	Tensión (Mpa)	Carga (KN)	$\delta$ (mm)
5	70	2898	646,47	2,331	2,3
6	70	4700	646,47	2,179	2,3
4	65	5519	600,3	2,183	2,2
3	65	15101	600,3	2,104	2,1
2	65	9874	600,3	2,157	2,1
7	60	23971	554,12	2,040	1,8
1	60	33841	554,12	2,015	1,9
8	55	33010	507,94	1,869	1,8
9	55	45608	507,94	1,782	2,4

Tabla 5.7: Valores de los niveles de carga, número de ciclos, amplitudes de desplazamiento y máximos de tensión y carga para las probetas ensayadas a fatiga con condiciones de empotramiento en los extremos.

Si se observa la tabla 5.7 se puede ver que se hicieron dos ensayos para cada uno de los niveles de carga exceptuando el caso a 65%, donde hubo que hacer un tercero al haber 5519 y 15101 ciclos para las probetas respectivamente, lo cual se consideró excesiva dispersión. El ensayo posterior dio 9874 ciclos, valor intermedio entre los anteriores.

En los desplazamientos se puede observar cierta tendencia de aumento de la amplitud a medida que aumentaba el nivel de carga, aunque no se cumple a rajatabla. Esto es coherente, pues a mayores niveles hacen falta mayores amplitudes para satisfacer y alcanzar la carga deseada. Lo mismo ocurría en los ensayos cuando iban llegando a su fin, pues la probeta ya no llegaba a la carga y las mordazas se movían con mayores amplitudes.

Con respecto a los daños externos que presentaban los especímenes una vez terminados los ensayos, no eran muchos ni muy visibles. Aunque la probeta estaba rota había pocos signos de ello. Únicamente en la zona de la probeta donde había tenido lugar la flexión se observaban ciertas irregularidades y zonas astilladas como consecuencia del fallo de esas láminas más superficiales, que ciertamente son las que sufren mayor variación de tensiones. Los detalles de estas zonas se ven a continuación en la fotografía de la figura 5.19.



Figura 5.19: Detalle de las irregularidades consecuencia de la rotura de las capas más superficiales.

Se quiso conocer qué había sucedido en las probetas en mayor profundidad, y para ello se recurrió a observar sus bordes al microscopio. Seguidamente se pueden apreciar micrografías tomadas de las probetas nº 8 (55% de carga), nº 1 (60% de carga), nº 2 (65% de carga) y nº6 (70% de carga), vistas con un aumento x15, en las figuras 5.20, 5.21, 5.22 y 5.23.

Las probetas 8 y 9 fueron las sometidas a menor nivel de carga en el caso empotrado. Sólo en la que se ha mostrado, la nº 8, se apreció cierta degradación a través de la pequeña grieta que se observa en la parte superior.

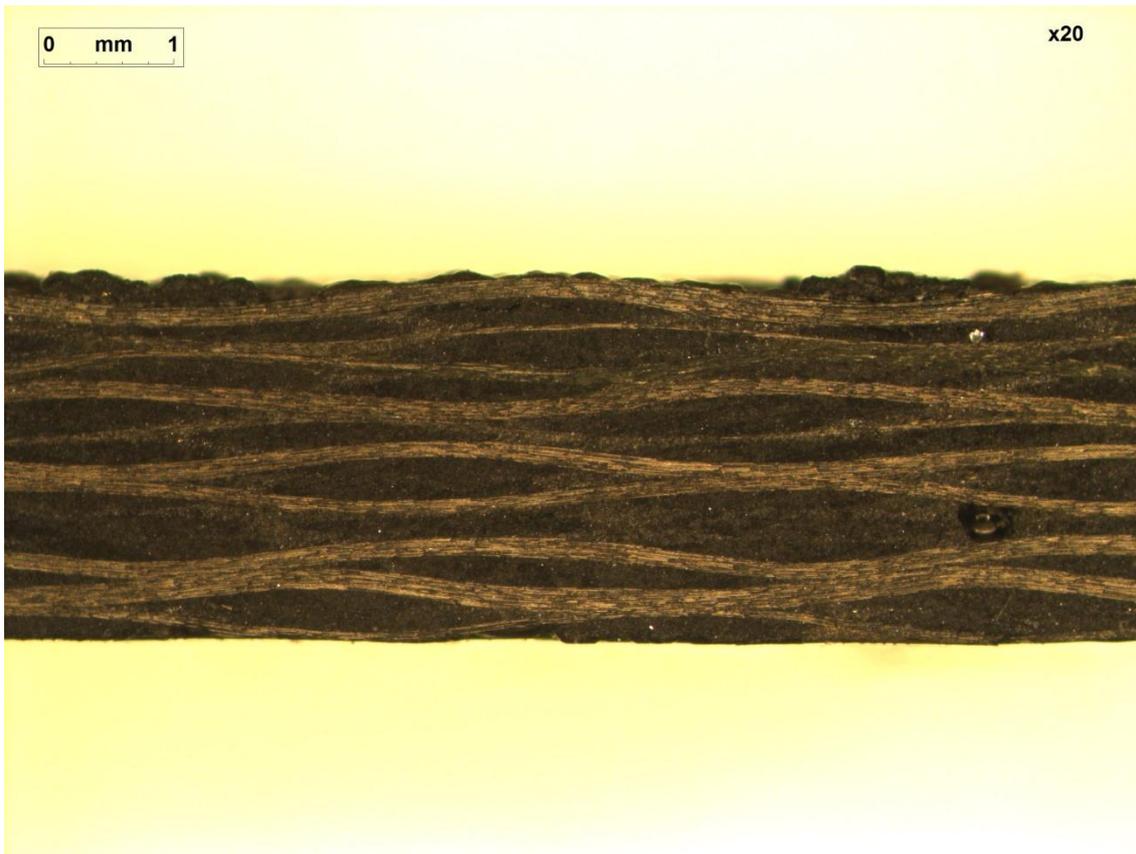


Figura 5.20: Micrografía de la probeta nº 8 (55% de carga) de empotramiento con aumento x20.

En este espécimen, el nº1 (figura 5.21), se aprecia una fina grieta en la parte central del espesor que cruza el tramo representado de la probeta de un lado al otro. Claramente ha habido una delaminación y agrietamiento en la matriz. Nos hemos cerciorado así de que la probeta presenta un daño considerable y que tendrá un avanzado nivel de degradación en su interior

0 mm 1

x15



Figura 5.21: Micrografía de la probeta nº 1 (60% de carga) de empotramiento con aumento x15.

En la micrografía siguiente de la figura 5.22, correspondiente al espécimen nº 2, no se ve mucho nivel de daño externo. Solamente una pequeña grieta en la parte superior que nos muestra que la matriz está agrietada en esa zona.

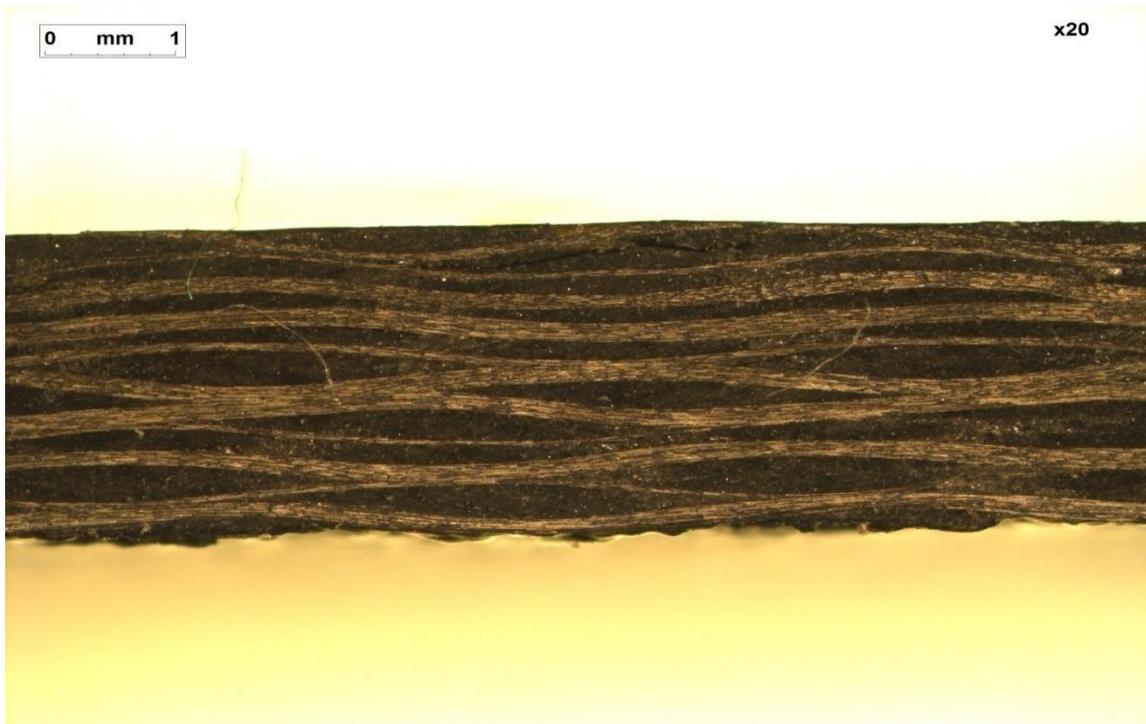


Figura 5.22: Micrografía de la probeta nº 2(65% de carga) de empotramiento con aumento x20.

En el siguiente caso de la figura 5.23, correspondiente al nº 6, la grieta visible también atraviesa la probeta y se ve mucho más claramente. Se aprecia agrietamiento en la matriz e incluso rotura de fibras.

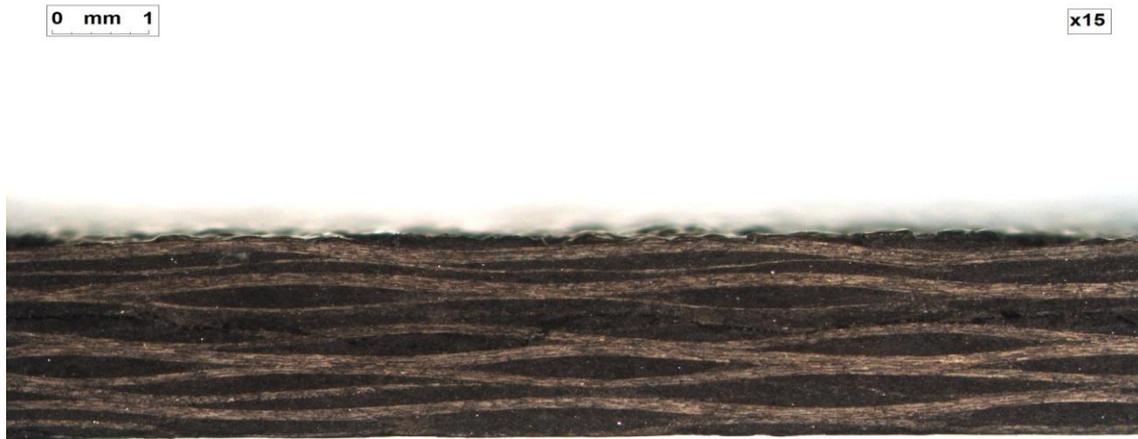


Figura 5.23: Micrografía de la probeta nº 6 (70% de carga) de empotramiento con aumento x15.

Se concluye que en el caso empotrado hubo una notable reducción del daño observado para las probetas sometidas al mínimo nivel de carga (55%), si bien en la observada a 65% sólo se vio una pequeña grieta.

#### 5.4.2.2.- Caso articulado.

El ratio 'R' de cargas era aquí también igual a -1, y los porcentajes de carga variaron asimismo entre el 55% y el 70% del total hallado para las dimensiones de cada probeta. Así se podría hacer un estudio comparativo de mayor calidad, y este rango era de total validez ya que permitía estudiar objetivamente toda la vida a fatiga del material, dado que la diferencia en número de ciclos entre los niveles superiores e inferiores era más que suficiente y representativo. Las cargas aplicadas rondaron 1 KN, con la más baja de 0,925 KN y la más alta igual a 1,225 KN.

El total de las probetas ensayadas a fatiga en tracción-compresión con apoyos articulados se muestra en la figura 5.24. Los daños no se aprecian a esta distancia, aunque sí que se adivina la deformación permanente a flexión que presenta el conjunto. Algunas de ellas están rotas debido a que al quitarlas de su fijación hubo que forzarlas excesivamente y ya se encontraban debilitadas.

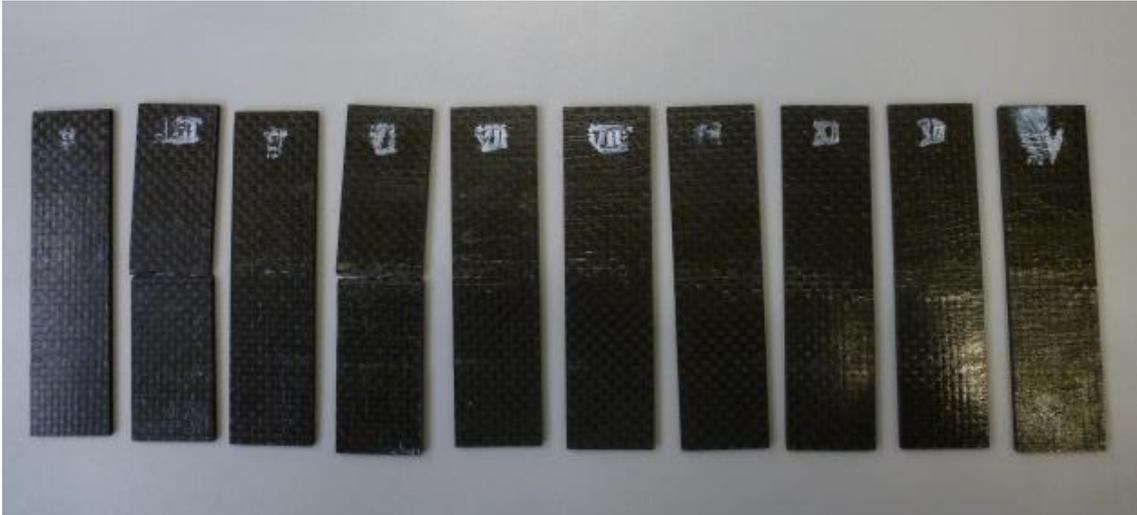


Figura 5.24: Conjunto de probetas ensayadas a fatiga para el caso articulado.

Los resultados de estos ensayos se encuentran recogidos en la tabla 5.8, donde aparecen el número de ciclos para cada nivel de carga junto a la tensión, la carga aplicada y la amplitud media de oscilación de cada probeta:

ID	Nivel de carga (%)	Nº de ciclos	Tensión (Mpa)	Carga (KN)	$\delta$ (mm)
2	70	2605	845,27	1,225	4,6
3	70	4025	845,27	1,187	5,3
5	70	8295	845,27	1,225	4,5
6	65	24848	784,89	1,095	3,7
7	65	17495	784,89	1,083	3,9
8	65	22962	784,89	1,082	4,1
9	60	41434	724,51	1	3,5
11	60	58550	724,51	1,089	3,6
12	55	340258	664,14	0,933	2,8
13	55	274248	664,14	0,925	3

Tabla 5.8: Registro de niveles de carga, número de ciclos, amplitudes de desplazamiento y valores máximos de tensión y carga para las probetas ensayadas a fatiga con apoyos articulados en los extremos.

En el caso articulado también se realizaron tres ensayos en dos de los casos, para el 70% y para el 65% de la carga última de las probetas, ya que se encontró demasiada variación entre los dos primeros resultados. El tercero de los valores hallado para cada una de las tensiones resultó estar entre los dos primeros.

Aquí también se observa esa tendencia de aumento de la amplitud del desplazamiento según aumenta el nivel de carga establecido. Asimismo, a medida que iba evolucionando el ensayo, se iban rompiendo láminas de la probeta y por tanto ésta se iba degradando progresivamente. Esto daba lugar a que hubiera una redistribución de tensiones en el espécimen para seguir soportando la carga, y al mismo tiempo a que la amplitud de los desplazamientos fuera in crescendo. Por ejemplo, la probeta nº 7 comenzó oscilando con una amplitud de 3,9 mm y terminó haciéndolo con 5 mm. También se ve que mientras la amplitud media en el caso empotrado era de 2 mm, en el caso articulado se encuentra en torno al doble, es decir, rondando los 4 mm.

Estas probetas quizás presentaban más signos externos de rotura que las anteriores, pero tampoco eran muy notables. Sólo esas delaminaciones en torno al eje de flexión de la probeta en las capas más externas que daban lugar a una zona irregular y astillada. Se decidió observar por tanto varios especímenes al microscopio con aumentos de x15 y x20, y se tomaron las micrografías que se observan a continuación, pertenecientes a las probetas nº12 (55% de carga), nº 11 (60% de carga), nº 8 (65% de carga) y nº 5 (70% de carga) respectivamente.

Aunque en el primer espécimen, el nº 12, no se observa mucho nivel de daño, sí se puede ver una grieta horizontal en la parte inferior del espesor. De todas formas la probeta está rota con total seguridad, ya que durante el último "subensayo" no alcanzaba la carga programada, y por tanto se deduce que en su interior habrá una mayor concentración de grietas y mecanismos de daño local que fueron confluyendo. Esto puede verse en la figura 5.25.



Figura 5.25: Micrografía de la probeta nº 12 (55% de carga) de extremos articulados con aumento x15.

En la probeta nº 11, a 60% de carga, se pueden ver ya claros síntomas de daño: una grieta horizontal que se extiende por casi toda la zona superior y algunas pequeñas abajo. Hay delaminación y agrietamiento de la matriz, como se observa en la micrografía de la figura 5.26.

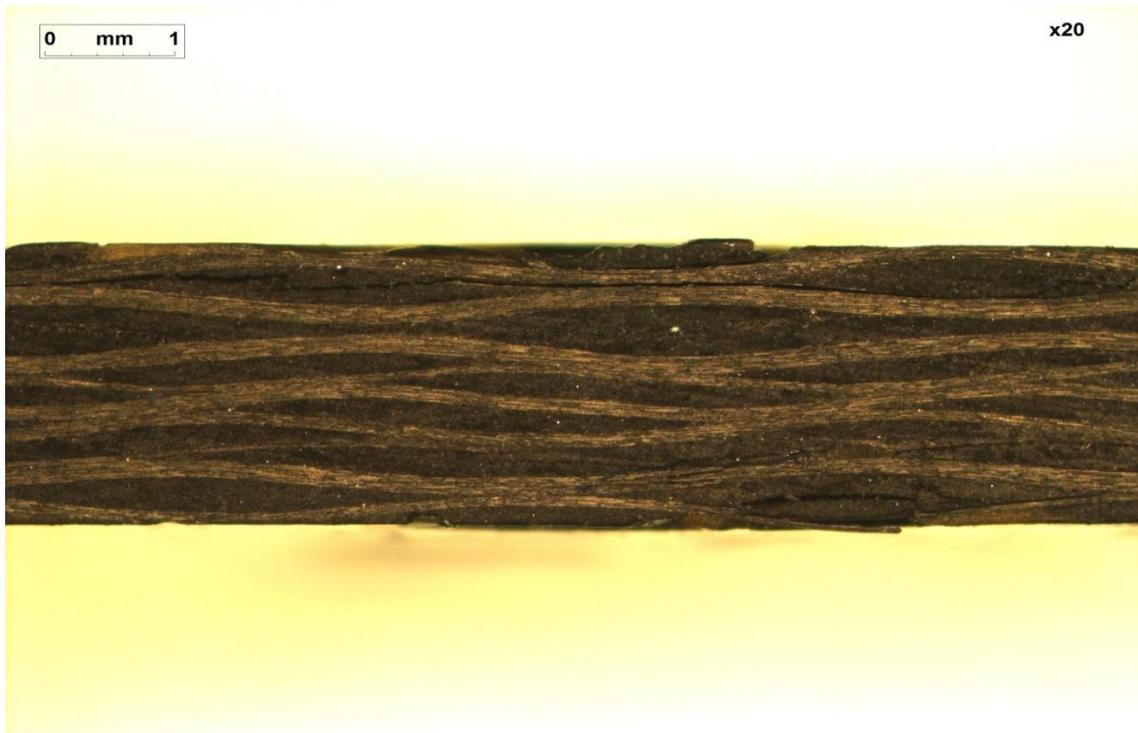


Figura 5.26: Micrografía de la probeta nº 11(60% de carga) de extremos articulados con aumento x20.

En la figura 5.27 se observa una delaminación arriba y un agrietamiento de la matriz en la parte baja del espesor. Se trata de la probeta nº 8.

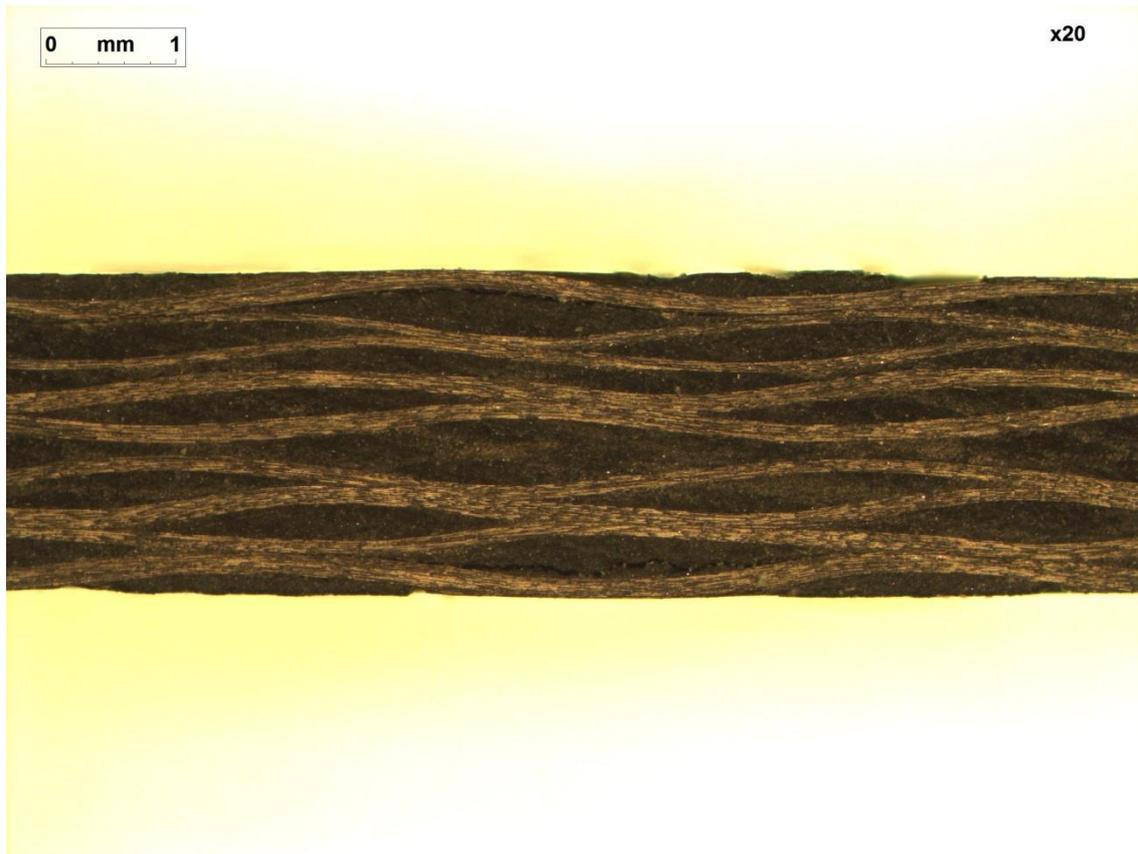


Figura 5.27: Micrografía de la probeta nº 8 (65% de carga) de extremos articulados con aumento x20.

Por último, en la imagen de la figura 5.28 se puede ver una grieta transversal a la longitud de la probeta que se origina en la parte de arriba y se extiende hasta casi la mitad del espesor. También algunos círculos de tonalidad más oscura que se corresponden con poros. Todas las probetas pertenecientes al segundo panel presentaban porosidad, debido probablemente a que no se eliminó el aire suficiente entre láminas durante el apilamiento. En la zona inferior también se aprecian también grietas horizontales a ambos lados.



Figura 5.28: Micrografía de la probeta nº 5 (70% de carga) de extremos articulados con aumento x15.

Tras observar el conjunto de probetas al microscopio se concluye que las señales de degradación se encuentran en las zonas más externas, que son las que están sometidas a tensiones más extremas. En las articuladas, por sufrir mayores deformaciones a flexión durante los ensayos, hay síntomas más claros de daño que en las empotradas. De todas formas se observaron grietas considerables para todos los niveles de carga, si bien en el más bajo fue donde menos daño se apreció.

#### 5.4.2.3.- Flexión convencional en tres puntos.

En este ensayo el valor de  $R$  ( $P_{min}/P_{max}$ ) sería igual a 10. Como ya es sabido por proyectos anteriores, el fallo en esta configuración de flexión se produce en la cara de compresión, que es la que se encuentra sometida a este ratio, mientras que la curva de tracción-tracción corresponde a uno de 0.1. A esto viene asociado el hecho de que la configuración de flexión en tres puntos sea más desfavorable que la de Tracción-Tracción longitudinal en cuanto a comportamiento en fatiga.

En la fotografía que aparece en la figura 5.28 se muestra el conjunto de las 4 probetas ensayadas.

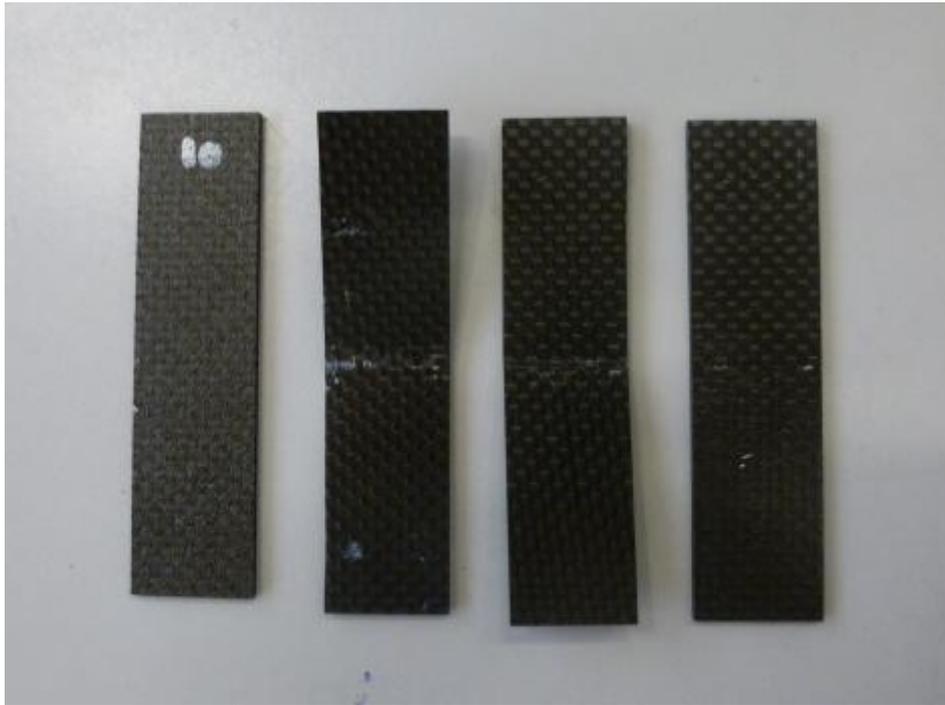


Figura 5.28: Conjunto de especímenes ensayados a fatiga mediante el ensayo de flexión en tres puntos.

Seguidamente la tabla 5.9, con los datos más relevantes de cada ensayo realizado.

ID	Nivel de carga (%)	Número de ciclos	Tensión (MPa)	Carga (KN)	$\delta$ (mm)
<b>10</b>	90	11413	922,60	1,209	2,7
<b>11</b>	85	58417	871,35	1,591	2,6
<b>12</b>	80	61959	820,09	1,436	2,5
<b>16</b>	70	1000000	717,58	1,329	2,1

Tabla 5.9: Registro de niveles de carga, número de ciclos, valores máximos de tensión y carga y amplitudes de desplazamiento para las probetas ensayadas a fatiga en el ensayo de flexión convencional en tres puntos.

Una vez aclarado esto, se procede a explicar porque se escogió ese intervalo de niveles de carga variando entre el 70% y el 90%. La primera probeta a ensayar alcanzó el millón de ciclos, con lo cual se consideró vida a fatiga infinita. Vemos que para valores similares de tensiones en el caso de apoyos articulados, rondando los 720 MPa, la vida a fatiga rondaba los 50000 ciclos. Tras investigar un poco se corroboró que este tipo de tejido en ensayos convencionales de flexión en 3 puntos era muy normal que diera vida infinita para esos

porcentajes de carga. Por ende, se determinó que había que subir el porcentaje, y se ensayaron probetas al 80, 85 y 90%.

En cuanto a las cargas aplicadas, se ve en la tabla que la correspondiente al 90%, nivel de tensiones más elevado, fue la menor, y esto no se debe a otra cosa sino a que esa probeta en cuestión era la única que pertenecía al panel nº 2 de las utilizadas en este tipo de ensayo. Por consiguiente, el hecho de poseer menor espesor llevaba a que la carga necesaria para satisfacer el nivel de tensiones deseado fuera más pequeña. La carga más baja fue la mencionada, igual a 1,209 KN, y la más elevada igual a 1,591 KN.

La amplitud de los desplazamientos siguió la misma tendencia explicada en los casos anteriores y estuvo en torno a 2,5 mm para los niveles de carga ensayados. Más o menos la mitad de las amplitudes del caso articulado.

Con respecto a la forma en que rompieron las probetas, aquí hubo algunas diferencias:

- La **probeta nº 12** se dejó ensayando en el laboratorio sin recibir supervisión. Hay que resaltar que no se colocaron los límites de posición necesarios, y cuando al día siguiente se volvió a ver cómo iba el ensayo, se vieron en la gráfica de posición frente a número de ciclos dos rectas paralelas que a partir de un momento determinado iban descendiendo desde valores de -65 mm hasta otros de -80 mm aproximadamente. Esto no significaba otra cosa sino que el pistón había ido subiendo hasta su posición más extrema, con el peligro que esto conlleva para la máquina. Así mismo la probeta había ido flectando cada vez más hasta romper bruscamente. La explicación que se le dio a este hecho fue que el espécimen tenía que flectar cada vez más para ser capaz de asumir el nivel de carga establecido, y al no haber límite de posición no había encontrado ningún impedimento.

-La **probeta nº 11** sí fue ensayada con los límites de posición activados. Se mantuvo siempre en un régimen permanente de flexión, hasta que al final del ensayo flectó un poco más sobre sí misma al subir el pistón un par de mm y terminó rompiendo bruscamente. En la figura 5 se ve lo que se observó en el microscopio con un aumento de x15: se aprecian muchísimas más grietas que en los demás casos debido a la brusca rotura, y aunque la más gruesa se encuentra en la parte a tracción, en la zona a compresión se ven bastantes agrietamientos en la matriz y delaminaciones en la dirección longitudinal del espécimen.



Figura 5.29: Micrografía de la zona central de la probeta nº 11 perteneciente al ensayo de flexión en tres puntos. Aumento x15.

-La **probeta nº 16**, perteneciente al segundo panel y por tanto de menor espesor, llegó a la rotura sin mostrar signo externo alguno de ello. Fue observada al microscopio y tampoco se percibió ningún mecanismo de daño, pero está claro que rompió dado que no logró alcanzar la carga en 4 “subensayos” que se hicieron al final para comprobarlo.

En la siguiente fotografía de la figura 5.30 se pueden ver de perfil estos tres especímenes, dos de ellos mostrando altos niveles de flexión permanente y el tercero totalmente recto. El hecho de que el borde de una de ellas esté pintado de blanco se debe a que eso facilita la percepción de la evolución de las grietas a lo largo del ensayo. Es este un hábito recomendable en ensayos de fatiga a flexión.



Figura 5.30: Probetas que rompieron a fatiga en el ensayo de flexión en 3 puntos vistas de perfil.

Hubiera sido conveniente disponer de un mayor número de probetas para realizar estos ensayos y obtener así resultados más concluyentes, pero la falta de material lo imposibilitó. De todas formas, los puntos se representaron en una gráfica S-N y se obtuvo la recta de regresión correspondiente.