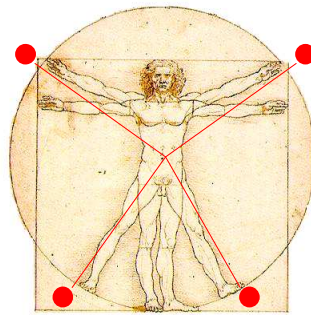


# TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

*Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*

VOLUMEN XI. AÑO 2013

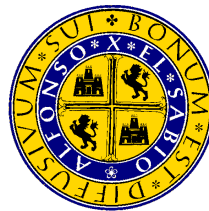
SEPARATA



PROCESO DE CARACTERIZACIÓN EN FATIGA DE UN MATERIAL

COMPUESTO

Rafael Trallero, Ricardo Atienza, Malte Frövel y Pablo Zuluaga



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO

Escuela Politécnica Superior  
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Rafael Trallero, Ricardo Atienza, Malte Frövel, Pablo Zuluaga  
Mayo 2013.

<http://www.uax.es/publicacion/proceso-de-caracterizacion-en-fatiga-de-un-material-compuesto.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*  
Escuela Politécnica Superior.  
Universidad Alfonso X el Sabio.  
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).  
ISSN: 1696-8085

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

# PROCESO DE CARACTERIZACIÓN EN FATIGA DE UN MATERIAL COMPUESTO

**Rafael Trallero<sup>(a)</sup>, Ricardo Atienza<sup>(b)</sup>, Malte Frövel<sup>(c)</sup> y Pablo Zuluaga<sup>(d)</sup>**

- (a) Ingeniero Aeronáutico. Centro de Ensayo de Programas Aeroespaciales  
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'.  
Profesor de Grado en Ingeniería Aeroespacial  
Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.  
Teléfono: 918 105 793, e-mail: [rtralvel@uax.es](mailto:rtralvel@uax.es)
- (b) Doctor Ingeniero Aeronáutico. Jefe del Centro de Ensayo de Programas Aeroespaciales  
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'.  
Jefe de Estudios de Grado en Ingeniería Aeroespacial  
Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.  
Teléfono: 918 105 793, e-mail: [ratiepas@uax.es](mailto:ratiepas@uax.es)
- (c) Doctor Ingeniero Industrial. Departamento de Materiales y Estructuras  
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'.  
Profesor de Grado en Ingeniería Aeroespacial  
Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.  
Teléfono: 918 109 168, e-mail: [mfrov@uax.es](mailto:mfrov@uax.es)
- (d) Ingeniero Mecánico. Departamento de Programas Espaciales y Ciencias del Espacio  
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'.  
Teléfono: 915 201 913, e-mail: [zuluagarp@inta.es](mailto:zuluagarp@inta.es)

## RESUMEN:

Este artículo recoge el trabajo de una serie de investigaciones de caracterización en fatiga de un material compuesto sometido a cargas de compresión mediante el denominado 'método de Castillo', que permite estimar la vida útil de un material a través del tratamiento estadístico de los resultados de ensayo. Se exponen las primeras fases del proceso, que consisten en la fabricación de las probetas, su ensayo y la obtención de las curvas S-N, dejando la aplicación del método para publicaciones posteriores. Las pruebas de laboratorio han sido llevadas a cabo en las instalaciones del Departamento de Materiales y Estructuras del INTA.

**PALABRAS CLAVE:** Material compuesto, Fatiga, Caracterización, Ensayo, Método de Castillo.

## ABSTRACT:

This work represents the first stage of a series of investigations over the characterization of composites under compressive fatigue loads using the Castillo's Method, which leads to life estimations of materials through statistical treatments of test data. The first phase of the process is shown in this paper and consists of the test samples manufacturing, their testing and the S-N curves, leaving the application of Castillo's Method for future works. The process has been carried out in the facilities of the INTA Materials and Structures Department..

<http://www.uax.es/publicacion/proceso-de-caracterizacion-en-fatiga-de-un-material-compuesto.pdf>

**KEY-WORDS:** Composite, Fatigue, Characterization, Test, Castillo's Method.

**SUMARIO:** 1. Introducción 2. Proceso de fabricación 3. Proceso de ensayo 4. Conclusiones 5. Referencias

**SUMMARY:** 1. Introduction 2. Manufacturing process 3. Testing process 4. Conclusions 5. References

## **1. Introducción**

La fatiga es bien conocida desde hace muchos años como causa de numerosos fallos mecánicos en estructuras reales en servicio cuando se ven sometidas a cargas muy inferiores a los valores máximos de diseño. Ello es debido a un envejecimiento progresivo del material como consecuencia de la acumulación de daño en su interior que genera una degradación en sus propiedades mecánicas.

El estudio de dicho fenómeno es muy complejo pero necesario toda vez que se quiera saber el periodo de vida útil de una pieza. A pesar de las numerosas investigaciones que se han llevado a cabo desde hace más de medio siglo a través de modelos teóricos, más tarde o más temprano se necesita recurrir a ensayos en laboratorio para validar dichas teorías o directamente determinar las características de comportamiento a fatiga sin modelo analítico previo. El problema se complica cuando la carga es a compresión ya que los mecanismos de fallo son diferentes de los que se producen en tracción y no son tan conocidos en materiales compuestos.

A continuación se ofrece un ejemplo de cómo es el proceso de fabricación y ensayo de probetas de laboratorio empleadas en programas de caracterización en fatiga de materiales reales. Las muestras han sido fabricadas por el equipo de trabajo del Área de Materiales Compuestos y ensayadas en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos, pertenecientes ambos al Departamento de Materiales y Estructuras del INTA, dentro de un programa de desarrollo de UAVs (*Unmanned Air Vehicles – Aeronaves no tripuladas*) que este organismo tiene en marcha en la actualidad.

Este trabajo, no obstante, abarca las primeras fases del proceso y los resultados ofrecidos presentan una aplicabilidad limitada, dado el escaso número de pruebas que se han podido llevar a cabo hasta la fecha. Una vez terminado el programa de ensayos se estará en condiciones de ofrecer un informe más completo de resultados, aplicar el método de Castillo y llevar a cabo su publicación en un próximo artículo.

## **2. Proceso de fabricación**

### ***2.1 Material a emplear***

La estructura del material está constituida por una sucesión de capas de material compuesto formado por fibra de carbono y resina epoxi en una configuración típica de las empleadas en componentes aeronáuticos. Se trata del conjunto MTM45-1/IM7 suministrado por *Advanced Composite Group*, que

es adquirido en grandes rollos y manipulado en las dependencias del INTA (MTM45-1 es la matriz e IM7 es la fibra). La fibra es de módulo elástico medio y presenta configuración de hebra continua (no empleándose en ningún momento tejido entrelazado) mientras que la resina es de tipo termoestable. La orientación de la fibra sigue la secuencia de apilamiento  $45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ$  (siendo la dirección de la envergadura del ala el origen de ángulos) y ésta se repite cuatro veces hasta obtener un espesor completo de 32 láminas, que equivale a unos 4 mm. Dicha composición provee al material de características cuasi-isótropas y al poseer plano medio de simetría impide su propia deformación durante el proceso de curado como consecuencia de la diferencia de valor existente entre los coeficientes de dilatación térmica de la fibra y la matriz.

## 2.2 Datos previos

El material compuesto MTM45-1/IM7 se corresponde con el utilizado en un proyecto de desarrollo de UAVs y parte de sus propiedades mecánicas son conocidas de antemano, pues el Área de Materiales Compuestos del INTA tuvo que estudiar su comportamiento en condiciones de carga estática (tracción y compresión) para el diseño de dichas aeronaves empleando probetas de  $100 \text{ mm}^2$  de sección. La fuerza a rotura es un dato de interés para la caracterización en fatiga ya que se escogen unos determinados porcentajes de la misma en la definición de los perfiles de carga. La siguiente tabla muestra los resultados a compresión del lote de 40 probetas utilizadas en su día en donde se destaca el valor de la fuerza a rotura soportado por el material así como su rigidez  $E$ .

$\sigma_{media}$ [Mpa]	Fuerza [kN]	$\epsilon_{media}$ [ $\mu\epsilon$ ]	$E$ [Gpa]
551	~55	10.018	~55

Tabla 1. Ensayo de rotura por compresión del material MTM45-1/IM7.  
(Fuente: INTA)

## 2.3 Especificaciones de los ensayos

Los ensayos involucrados en el proceso de caracterización en fatiga van encaminados a obtener las curvas S-N del material (adicionalmente  $\epsilon$ -N) para ser utilizadas posteriormente como elemento predictivo en la vida útil de un elemento real fabricado con dicho material. Se ha de tener en cuenta que para que los ensayos en laboratorio sean representativos de la vida útil de una estructura se debe buscar el mismo modo de fallo que la que ésta tendrá en servicio. Por ello, se ha optado por una configuración de carga compresión-compresión al considerar que la vida en fatiga de un cajón de torsión (para el cual se pretende validar dicha caracterización) con los niveles de carga involucrados viene determinado por la matriz, cuando ésta trabaja a compresión, y no por la fibra.

El perfil de carga empleado es de tipo sinusoidal y amplitud constante, y la frecuencia de aplicación es de 5 Hz. Se emplearán unos porcentajes variables de la carga máxima a rotura para estimar los puntos de la curva, que irán desde el 97,5% hasta el 60% o bien hasta que se alcance una vida superior a  $10^7$  ciclos ( $10^6$  es un valor típico en metales, pero dada la mayor longevidad de los materiales compuestos se ha decidido tomar los diez millones de ciclos como criterio de vida eterna).

Además, siempre es bueno (aunque no imprescindible) disponer no solamente de la información de la carga aplicada hasta la rotura sino de la deformación que se obtiene a lo largo de los ciclos, debido a la pérdida de rigidez experimentada por este tipo de materiales, habida cuenta de la dependencia de esta variable con el volumen de fibra que contiene. Conforme el material se va fatigando parte de las fibras se rompen y ello repercute en el valor del módulo elástico, haciendo que la deformación total bajo una determinada carga sea consecuencia tanto de la tensión aplicada como de la disminución de  $E$ . Así, se pueden obtener los campos S-N o  $\epsilon$ -N según convenga.

Dado que estos ensayos van a ser aprovechados en la toma de registros de deformación, se intercalarán ciclos lentos en los perfiles de carga, de entre 30s y 50s de duración, con el fin de disponer de valores precisos de deformación y fuerza a lo largo de la vida de la probeta, empleando para ello galgas extensométricas. Con todo, el perfil de cargas introducido tendrá la configuración que se muestra en la Figura 1.

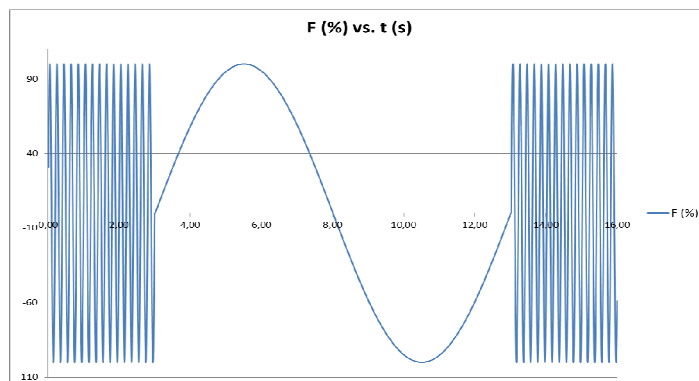


Figura 1. Perfil de cargas a 5 Hz con intercalación de ciclos lentos para la adquisición de datos.  
(Fuente: Elaboración propia).

## 2.4 Dimensiones de las probetas

Los paneles a partir de los cuales se obtendrán las piezas de ensayo tienen dimensiones de 350x300x4 mm por ser éste el tamaño de los moldes de que se dispone, y se fabricarán 3 unidades para conseguir las 36 pletinas previstas inicialmente.

Las dimensiones de las probetas se definen teniendo en cuenta la capacidad geométrica de la máquina donde van a ser ensayadas y consideraciones de pandeo por tratarse de una carga a compresión. La

fórmula de Euler proporciona la longitud libre de probeta que debe existir entre las mordazas de la máquina en función de la carga crítica, o de las deformaciones esperadas en dicha condición, tal que para el caso de barra empotrada resulta en:

Datos de entrada	Fórmulas	Datos de salida
$\varepsilon=12.000 \mu\varepsilon$	$\frac{F}{A} = E\varepsilon$	$F=66 \text{ kN}$
$E=55 \text{ GPa}$	$I = \frac{1}{12}bh^3$	
$b=25 \text{ mm}$	$F = \pi^2 \frac{EI}{\left(\frac{1}{2}L\right)^2}$	$L=66,23 \text{ mm}$
$h=4 \text{ mm}$		

Tabla 2. Estimación de la longitud libre de probeta para evitar el pandeo.  
(Fuente: Elaboración propia)

La tabla muestra que la probeta está teóricamente libre de rotura por pandeo siempre que la longitud libre entre mordazas no supere los 66,23 mm. Como la longitud inicial elegida es de 65 mm, y teniendo en cuenta que la deformación de 12.000  $\mu\varepsilon$  utilizada en el cálculo es superior a la que aparece experimentalmente en los datos previos del material (carácter conservativo), podemos asegurar que el pandeo de la probeta no va a tener lugar, al menos en teoría.

Así, las dimensiones nominales de éstas se fijan definitivamente en los valores de 165x25x4mm y se aprovecharán sus extremos para ser tomados, si procede, como muestras de análisis microscópico y determinar el volumen de fibra asociado a cada una de las probetas, pues éste influye en sus propiedades mecánicas.

### 2.5 Fabricación de las probetas

Dado que los paneles son modelos geométricos de pequeño tamaño su fabricación es esencialmente artesanal y ha sido llevado a cabo mediante el siguiente proceso, de acuerdo con los procedimientos internos de calidad del INTA:

1. Selección de las láminas de fibra para la fabricación de los paneles (350x300 mm, 32 láminas), descartando aquellas que presentan defectos o irregularidades. El fabricante proporciona información al respecto.

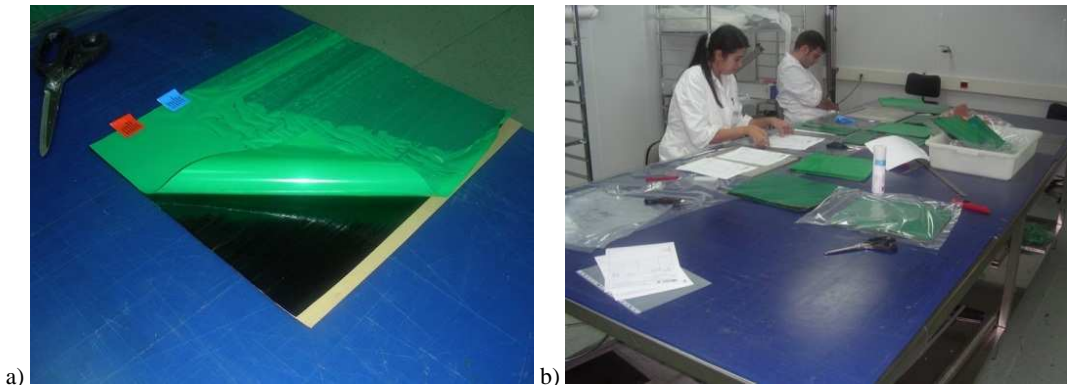


Figura 2. Láminas de preimpregnado (a) perteneciente al rollo proporcionado por el fabricante. Las marcas rojas y azules avisan de defectos de fábrica. A la derecha (b), el equipo de técnicos especialistas que montan las láminas en el molde para su posterior compactación.  
(Fuente: Elaboración propia)

2. Colocación de las láminas en el molde. La secuencia de apilamiento para cada conjunto de 8 láminas es:  $45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$ . Cada grupo de 4 láminas, no obstante, ha sido sometido a una compactación preliminar en una funda de vacío (-0,9 bar, temperatura ambiente, 12-15 minutos) antes de ser agrupada en un solo bloque.

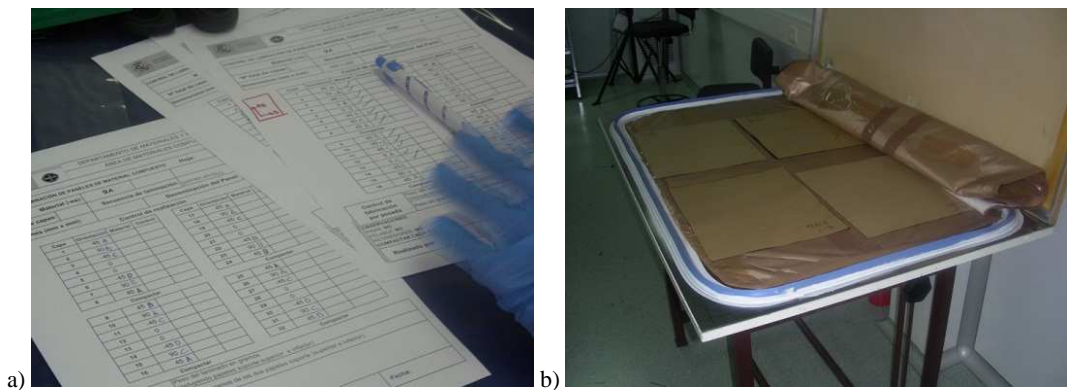


Figura 3. A la izquierda (a), las especificaciones sobre orientaciones y secuencia de laminado que deben seguir los paneles. A la derecha (b), la funda de vacío para la compactación parcial de los conjuntos de 4 láminas.  
(Fuente: Elaboración propia)

3. Colocación de los paneles sobre la mesa del autoclave y preparación del proceso de curado (placas de acabado superficial, bolsa de vacío, conexiones neumáticas, etc...).



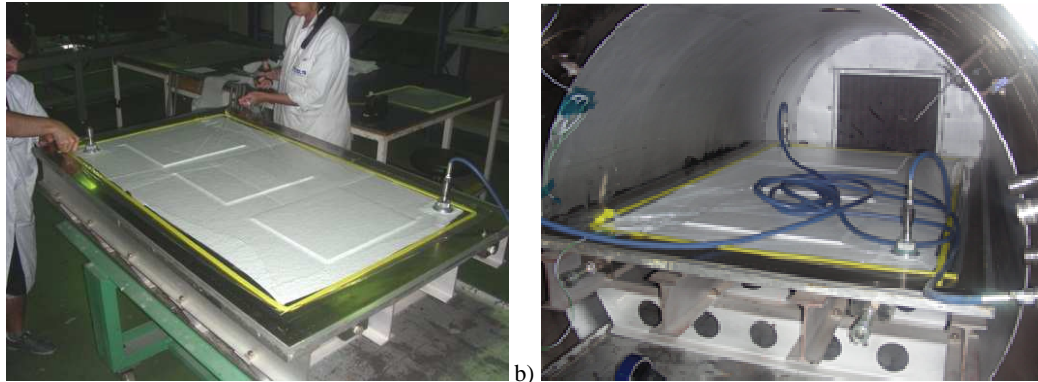


Figura 4. Preparación de los paneles en la mesa del autoclave (a). Momento previo al cierre del mismo para la ejecución del proceso de curado (b).  
(Fuente: Elaboración propia)

4. Curado a baja temperatura y tiempo prolongado, con el fin de no generar tensiones internas apreciables, en condiciones de vacío. La temperatura elegida ha sido  $85^{\circ}\text{C}$  y el tiempo de curación 20 horas, que está dentro de las especificaciones del fabricante. Los primeros 30 minutos se han empleado en alcanzar dicha temperatura a razón de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y la última media hora se ha empleado en el proceso inverso, un enfriamiento con el mismo gradiente ( $-2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). El vacío ha sido fijado y controlado en  $-1$  bar durante todo el proceso. El autoclave es un equipo de la casa *Maschinenbau Scholtz Coesfeld* y tiene capacidad para realizar curados a 20 bar de presión,  $375^{\circ}\text{C}$  de temperatura y especímenes de  $1.0 \times 1.8$  m de superficie en planta.

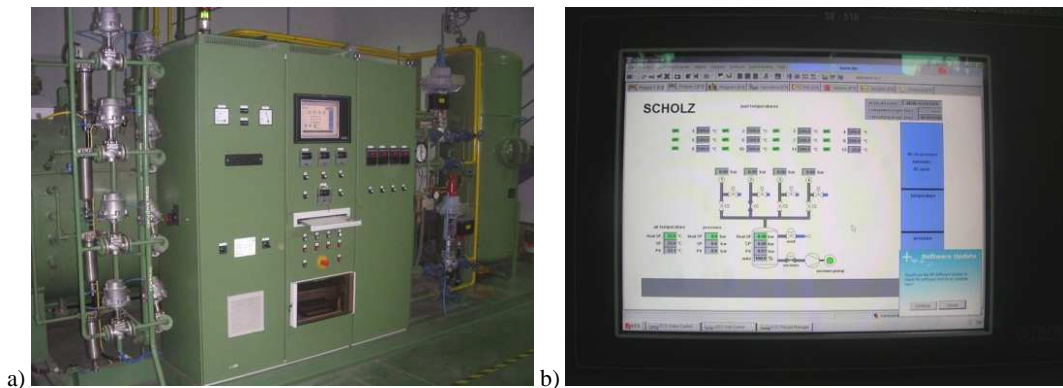


Figura 5. Estación de control del autoclave (a) y panel de control del mismo (b).  
(Fuente: Elaboración propia)

5. Post-curado final de baja duración a alta temperatura (180° C, 2 horas) con el fin de asegurar la reacción completa de la resina.

6. El último paso ha consistido en cortar los paneles para la obtención final de las probetas (165x25x5 mm). Se ha utilizado para ello una máquina, cuyo diseño y fabricación proviene de un trabajo conjunto entre el INTA y la empresa Megacal S.L., dotada de varias sierras de punta de diamante dispuestas en paralelo para garantizar precisamente el paralelismo dimensional de las pletinas.

De los 165 mm de longitud, los 50 mm de cada lado serán empleados en su amarre a las mordazas de la máquina de ensayo y se dejarán libres 65 mm aproximadamente en su zona central para la instrumentación del espécimen. Las probetas han sido identificadas de forma unívoca (con un número secuencial que distingue cada una de ellas y una letra que hace referencia a la cara de la misma, A o B) y sometidas a un examen de calidad para conocer sus dimensiones reales, cuyos valores se muestran en la Tabla 3.

Asimismo, se ha aprovechado parte de los extremos de cada probeta para ser analizados en laboratorio y determinar el volumen de fibra alcanzado si se considera necesario. La probetas que van a ser instrumentadas pertenecen al lote 9A/C<sub>1</sub> y las no instrumentadas al 9A/C<sub>2</sub>, según la codificación interna INTA.

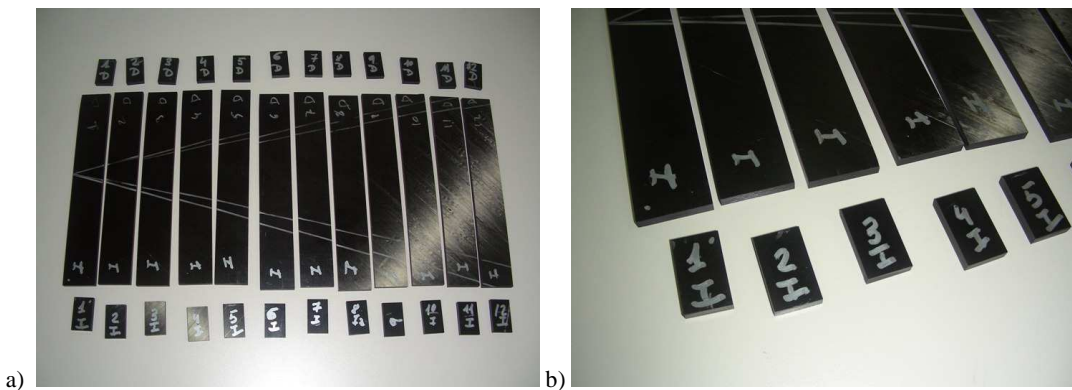


Figura 6. Probetas de caracterización del lote C<sub>2</sub> (a). Detalle de los terminales de análisis de volumen de fibra (b). (Fuente: Elaboración propia)

La sección ha sido medida utilizando un pie de rey y tomando valores en la zona central, izquierda y derecha de la probeta, tras lo cual se ha calculado su valor medio. Se puede determinar a través de la desviación típica que el efecto máximo que producen las variaciones de las dimensiones anteriores

sobre la tensión de rotura del material, con respecto a los valores medios de la sección, es aproximadamente del 3%, por lo que se toman por buenos dichos valores ( $S=25,13 \times 4,23$  mm) y solamente se hará uso de la tabla anterior en el caso de que, por obtener resultados inesperados, resulte necesario un mayor grado de precisión o corrección en los cálculos.

Nº probeta	Ancho $b$ (izquierda) [mm]	Ancho $b$ (derecha) [mm]	Ancho medio $b$ [mm]	Espesor $h$ (izquierda) [mm]	Espesor $h$ (centro) [mm]	Espesor $h$ (derecha) [mm]	Espesor medio $h$ [mm]
1	25,60	25,50	<b>25,55</b>	4,05	4,05	4,05	<b>4,05</b>
2	25,15	25,15	<b>25,15</b>	4,15	4,20	4,15	<b>4,17</b>
3	25,20	25,05	<b>25,13</b>	4,25	4,25	4,25	<b>4,25</b>
4	25,30	25,35	<b>25,33</b>	4,25	4,25	4,25	<b>4,25</b>
5	24,70	24,75	<b>24,73</b>	4,25	4,25	4,25	<b>4,25</b>
6	25,65	25,55	<b>25,60</b>	4,25	4,30	4,25	<b>4,27</b>
7	25,15	25,10	<b>25,13</b>	4,25	4,30	4,25	<b>4,27</b>
8	25,15	25,05	<b>25,10</b>	4,25	4,25	4,25	<b>4,25</b>
9	25,30	25,25	<b>25,28</b>	4,25	4,25	4,25	<b>4,25</b>
10	24,90	24,80	<b>24,85</b>	4,25	4,25	4,25	<b>4,25</b>
11	24,54	24,55	<b>24,55</b>	4,25	4,25	4,25	<b>4,25</b>
12	25,10	25,10	<b>25,10</b>	4,20	4,20	4,20	<b>4,20</b>
Media	-	-	<b>25,13</b>	-	-	-	<b>4,23</b>

Tabla 3. Dimensiones reales de las probetas.  
(Fuente: Elaboración propia)

## 2.6 Instrumentación de las probetas

Una vez se encuentran fabricadas las probetas el siguiente paso consiste en instrumentarlas con sensores de deformación. Para ello se han elegido rosetas extensométricas de dos direcciones de la marca *HBM*, modelo *1-XC11-3/350* y factor de galga  $k=2,16 \pm 1\%$ , común en ambas rejillas. Las rosetas se han colocado en el centro geométrico de las caras, orientadas según las direcciones principales de la carga y en configuración ‘back to back’ con el objeto de determinar la flexión introducida durante el ensayo y poder hacer las correcciones oportunas. Los terminales son de la marca *MM* y el cable presenta características comunes de aplicaciones electrónicas, baja resistencia eléctrica por unidad de longitud y elevada soldabilidad, pero sin ninguna propiedad especial. Las siguientes fotografías muestran algunas de las probetas instrumentadas.

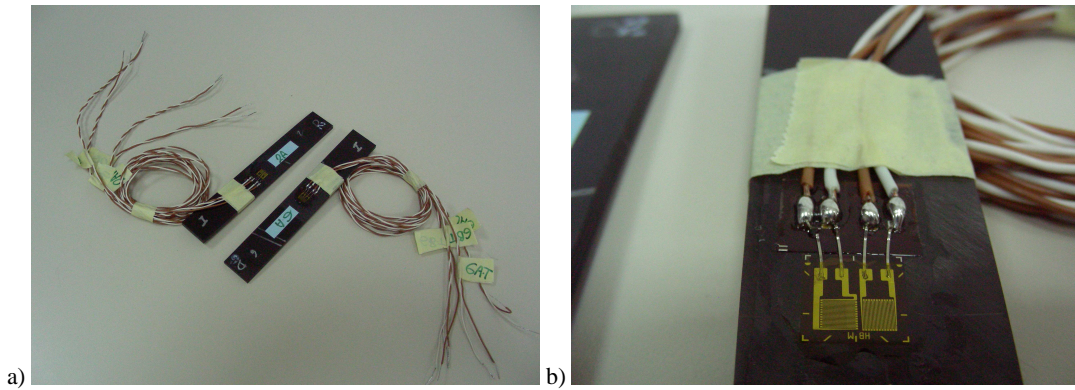


Figura 7. Probetas de caracterización instrumentadas con galgas extensométricas (a y b).  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3. Proceso de ensayo

#### 3.1 Ensayos de las probetas

Los ensayos de las probetas han sido realizados en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos del INTA. Este laboratorio dispone de una serie de naves convenientemente dotadas de máquinas universales que permiten llevar a cabo la caracterización de materiales avanzados.

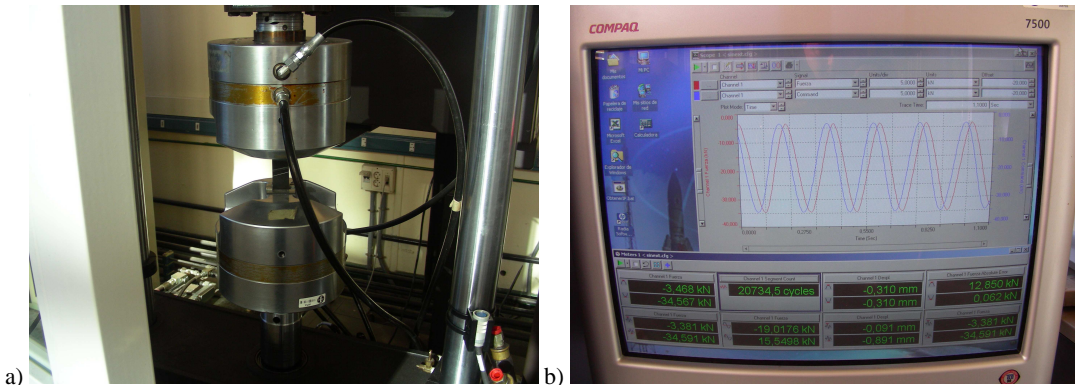


Figura 8. Máquina MTS 810 empleada en los ensayos (a) y software de control (b).  
(Fuente: Elaboración propia)

El sistema de aplicación de carga está formado por una máquina uniaxial MTS 810 dotada de mordazas hidráulicas con presión de apriete variable, una célula de carga de 100 kN (modelo MTS 66120B-03) convenientemente calibrada y un controlador MTS TestStar IIs. El controlador no

introduce la fuerza cíclica en toda su amplitud desde el principio sino que realiza unos 15 o 20 ciclos iniciales con una amplitud creciente para ajustar las ganancias de operación, tras los cuales se puede dar por iniciada la vida en fatiga con el nivel de carga establecido previamente para el ensayo. Es importante no olvidar este dato cuando se está trabajando con niveles de carga próximos a la rotura estática por ser el número de ciclos muy reducido.

El sistema de adquisición de datos pertenece al Centro de Ensayos de Programas Aeroespaciales del INTA y es un sistema multicanal de medida de extensometría de la empresa HBM, modelo MCGPlus, con tarjetas amplificadoras y acondicionadoras AP801 y ML801 respectivamente, y una capacidad máxima para registrar 128 canales a 2.400 lecturas por segundo. La configuración de ensayo empleada comprende el registro de 6 canales: dos de deformación según el eje longitudinal de la probeta, denominados AL y BL, dos con las deformaciones transversales, AT y BT, uno de fuerza F y otro de tiempo t, ya que la medida registrada es de carácter continuo (1 Hz).

Previamente a la realización de los ensayos de carga cíclica, se decidió llevar a cabo unas pruebas en condiciones estáticas para conocer si la longitud libre entre mordazas de 65 mm garantizaba la introducción de una flexión mínima en la probeta antes de romperse (<5% según las normas ASTM). La siguiente figura muestra algunos de los ciclos a que fue sometida la probeta con identificación 1-9A/C<sub>1</sub>.

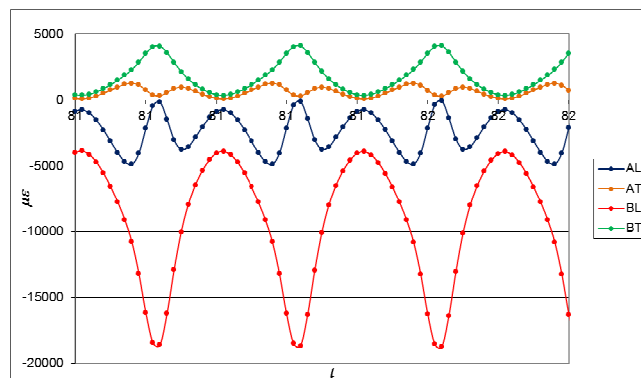


Figura 9. Galgas longitudinales AL y BL de la probeta 1-9A/C<sub>1</sub> durante unos pocos ciclos para ver el efecto de la flexión. (Fuente: Elaboración propia)

Como se ve, los canales de deformación longitudinal AL (azul) y BL (rojo) muestran una diferencia notable en la medida de la deformación que es indicativa de la presencia de una importante componente de flexión, lo que justifica un mayor y detallado análisis. Para ello se procedió a la realización de una serie de pruebas de rotura estática con diferentes longitudes libres. El siguiente gráfico muestra los datos de la probeta anterior y se aprecia claramente dicha flexión cuando la carga se aproxima al límite de rotura.

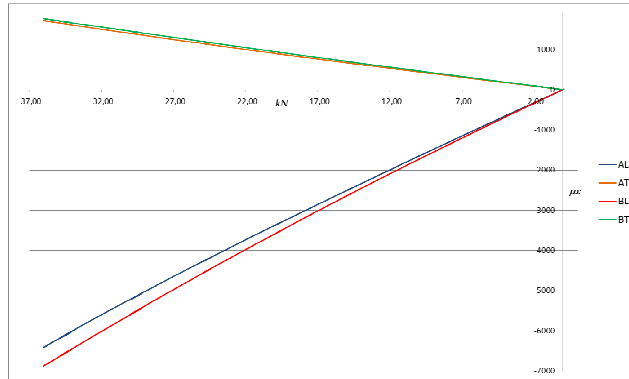


Figura 10. Galgas longitudinales AL y BL de la probeta 1-9A/C<sub>1</sub> hasta la rotura.  
(Fuente: Elaboración propia)

Con el resto de probetas, conforme se iba reduciendo la longitud libre se obtenían cargas de rotura mayores y así se continuó hasta que ya no se apreciaban tales variaciones. La Tabla 4 muestra los resultados de este análisis para los distintos valores de longitud libre.

Tipo de ensayo	Control de la carga	Probeta-Lote	Longitud libre [mm]	Carga o ciclos hasta la rotura	$\Delta\sigma$ [MPa]
Estático	Desplazamiento (2mm/min.)	1-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	65	38,40 kN	361
Estático	Fuerza (variación manual)	2-9A/C <sub>2</sub> (instrumentada)	50	33,08 kN	314
Estático	Desplazamiento (variación manual)	1-9A/C <sub>2</sub> (instrumentada)	43	36,07 kN	364
Estático	Desplazamiento (2mm/min.)	8-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	40	44,79 kN	426
Estático	Desplazamiento (2mm/min.)	C1-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	10	63,37 kN*	418
Estático	Desplazamiento (1mm/min.)	C2-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	10	65,53 kN*	440

Estas probetas presentan una sección de 35x4 mm.

Tabla 4. Estimación de la longitud libre de probeta.  
(Fuente: Elaboración propia)

Una longitud libre de 40mm constituye una geometría con la que se alcanzan valores de tensión muy similares a las obtenidas con 10mm. Esto significa que una reducción adicional no genera una mejora en el comportamiento a flexión por lo que se decidió tomar como buena dicha longitud. Además, resultaba necesario disponer de una zona libre lo suficientemente amplia como para instalar las galgas extensométricas.

Conviene notar también que el valor obtenido de carga de rotura a compresión no es igual a los valores de que se disponía previamente para el material MTM45-1/IM7. Al parecer la diferencia proviene de un defecto en la materia prima empleada. Efectivamente, el rollo de fibra preimpregnada empleado en la fabricación de estas probetas es distinto del que se utilizó en la caracterización del material en condiciones estáticas y sus propiedades mecánicas no coinciden. No obstante, ello no afecta al proceso de caracterización salvo por el hecho de considerar esta materia prima como un material compuesto diferente.

Solucionado el tema de la longitud libre, se continuó con el programa de ensayos de fatiga previsto inicialmente. A continuación se ofrecen los resultados de las pruebas bajo carga cíclica que, hasta el momento de escribir este artículo, se han llevado a cabo. La tanda de ensayos se corresponde con un barrido completo, en los que se ha empleado un factor constante  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$  de valor 10, que va desde el 97,5% de la carga a rotura hasta el 60%.

Tipo de ensayo	Control de la carga	Probeta-Lote	Longitud libre [mm]	Carga o ciclos hasta la rotura	$\Delta\sigma$ [MPa]
(Sección media 25,13x4,23 mm) F(100%)=38,40 kN					
Estático	Desplazamiento (2mm/min.)	1-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	40	38,40 kN	361
Fatiga (97,5%)	Fuerza (5 Hz)	5-9A/C <sub>2</sub> (instrumentada)	40	174 ciclos	317
Fatiga (95%)	Fuerza (5 Hz)	5-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	40	548.553 ciclos	309
Fatiga (90%)	Fuerza (5 Hz)	2-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	40	164.822 ciclos	292
Fatiga (85%)	Fuerza (5 Hz)	3-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	40	712.743 ciclos	276
Fatiga (80%)	Fuerza (5 Hz)	4-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	40	4.227.485 ciclos	260
Fatiga (60%)	Fuerza (5 Hz)	11-9A/C <sub>1</sub> (sin instrumentar)	40	10.000.000 ciclos (ensayo interrumpido)	195

Tabla 5. Primera tanda de ensayos de fatiga. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.2 Estimación de la curva S-N

El siguiente gráfico muestra una representación de los resultados experimentales realizados en los que se ha buscado una aproximación polinómica de 2º grado y utilizado una escala logarítmica en  $N$  (eje horizontal), típica en este tipo de representaciones. Es de resaltar que la aproximación presenta un índice de correlación bajo. Ello es debido a la inherente dispersión de los resultados de ensayo propia del comportamiento de los materiales compuestos y, obviamente, a la escasez de pruebas realizadas hasta la fecha dada la limitación de tiempo disponible. Cuando se realiza una caracterización completa se suele optar por un mínimo de 10-15 ensayos por nivel y un tratamiento estadístico posterior más elaborado a fin de alcanzar una mejor estimación de vida del material.

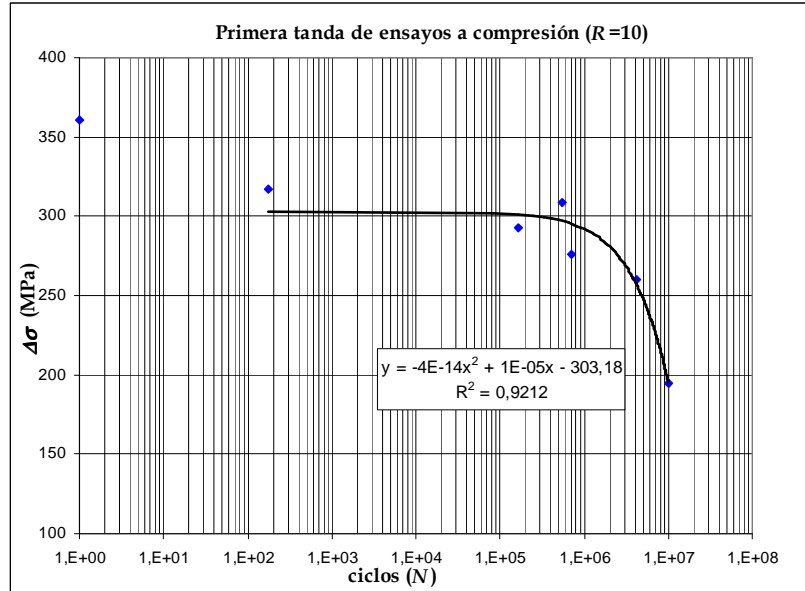


Figura 11. Estimación de la curva S-N. (Fuente: Elaboración propia)

Para finalizar este artículo y como curiosidad, en las siguientes fotografías se muestra el aspecto de la rotura obtenida, en donde se aprecia la delaminación interna tan característica de estos materiales.

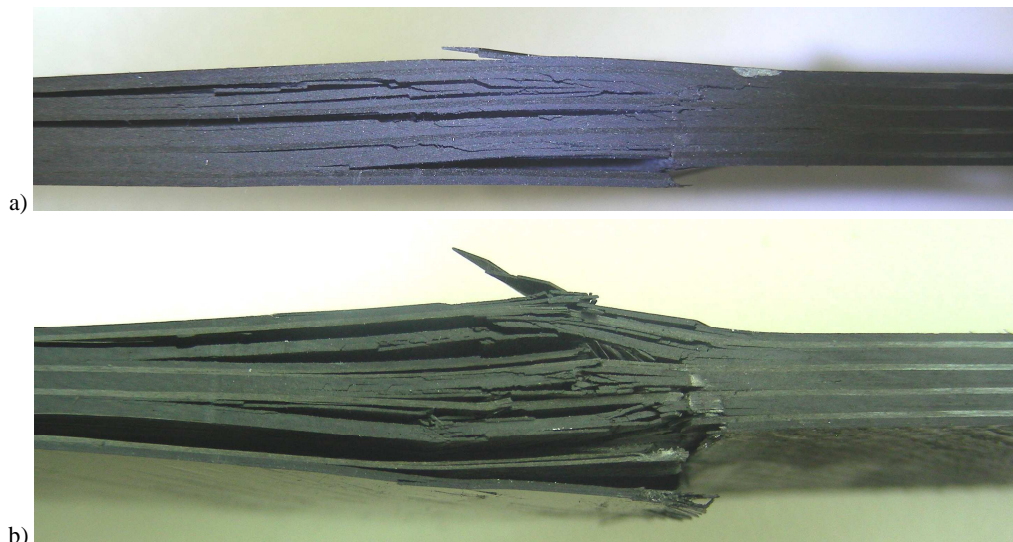


Figura 12. Rotura de las probetas 1-9A/C<sub>1</sub> (a), 2-9A/C<sub>1</sub> (b) 3-9A/C<sub>1</sub> (c) y 5-9A/C<sub>1</sub> (d).  
(Fuente: Elaboración propia)



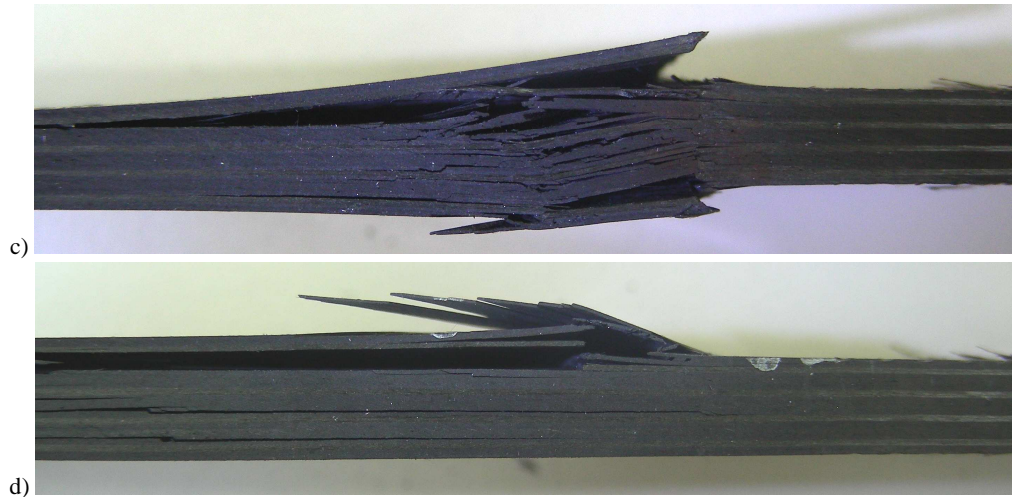


Figura 12 (cont.). Rotura de las probetas 1-9A/C<sub>1</sub> (a), 2-9A/C<sub>1</sub> (b) 3-9A/C<sub>1</sub> (c) y 5-9A/C<sub>1</sub> (d).  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4. Conclusiones

Este artículo refleja muy resumidamente cómo es el proceso clásico de caracterización del comportamiento a fatiga de un *composite* que se sigue en la mayoría de los laboratorios de materiales: se fabrican probetas en número suficiente, se estima el valor de rotura y se definen los niveles de carga aplicables en el programa de ensayos, después se realizan las pruebas y se van obteniendo los periodos de vida de las probetas. Finalmente se agrupan los resultados y se analizan para obtener una estimación de la curva S-N.

La curva S-N presentada contiene limitaciones en la práctica ya que proviene de un número muy reducido de pruebas de laboratorio, pero puede ser tomada como primera aproximación a falta de una estimación más completa, la cual será expuesta en futuras publicaciones una vez sea aplicado el método de Castillo.

El siguiente paso, posterior a la caracterización de un material a fatiga, consiste en conocer la historia de cargas que la pieza real en servicio tendrá y definir un modelo de acumulación de daño cuya combinación con la curva S-N proporcione una estimación de su vida útil para dicho perfil.

#### 5. Referencias

ASTM D4762-11a. "Standard guide for testing polymer matrix composite materials".

ASTM E1434-00 (2006). "Standard guide for recording mechanical test data of fiber-reinforced composite materials in databases".

<http://www.uax.es/publicacion/proceso-de-caracterizacion-en-fatiga-de-un-material-compuesto.pdf>

CASTILLO RON, E. y FERNÁNDEZ CANTELI, A. (2009). “Una metodología estadística unificada para modelar el daño a fatiga”. Real Academia de Ingeniería, Madrid (España), ISBN: 978-84-95662-27-9.