

Capítulo 5

Estudio experimental de rotura de las juntas tipo T-bolt

5.1 Introducción

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, con los actuales diseños de la unión T-bolt resulta prácticamente imposible que se produzca la rotura del laminado, debido a los elevados coeficientes de seguridad que se utilizan en su dimensionado. Por este motivo, no se dispone de ninguna información experimental (pública) sobre los límites de diseño ni sobre la fenomenología de la rotura de esta parte de la junta.

Por tanto, nuestro principal objetivo dentro de este estudio experimental de rotura consiste en obtener información sobre los distintos modos de fallo del material compuesto en la zona de la junta. Concretamente, se han realizado ensayos orientados a la obtención de la rotura en compresión local y en tensión neta, con especímenes realizados a partir de dos laminados distintos, a base de fibra de vidrio en matriz epoxídica, suministrados respectivamente por las empresas *Aertusa* y *MTorres*. En cada ensayo, aparte de los valores máximos, se han registrado las curvas fuerza - desplazamiento y se ha realizado una grabación de los sonidos emitidos por el espécimen. Una vez ensayadas las probetas se han realizado secciones de las mismas con el fin de poder observar con mayor detalle la zona dañada.

Para completar el estudio y permitir la comparación de los resultados obtenidos con probetas tipo T-bolt, se ha realizado la caracterización del laminado a tracción, a tracción con concentración de tensiones y a tracción con agujeros cargados, con fallos en tensión neta y en compresión local.

Finalmente, se ha realizado una caracterización del material a nivel de lámina con ensayos a tracción, compresión y cortante en el plano de la lámina.

5.2 Descripción de los ensayos de uniones T-bolt

Para la caracterización del comportamiento de la T-bolt tanto en tensión neta como a compresión local, se han preparado una serie de probetas formadas por una pieza rectangular de laminado de unos 35 mm de espesor en las que se han realizado los agujeros correspondientes una unión T-bolt en cada uno de sus extremos. Las dimensiones de los agujeros de ambos extremos son idénticas.

En la figura 5.1 se representa el esquema de las probetas tipo T-bolt junto con los distintos parámetros que la definen. Esta geometría es común para los distintos tipos de ensayos adaptándose a cada caso particular los valores de los distintos parámetros.

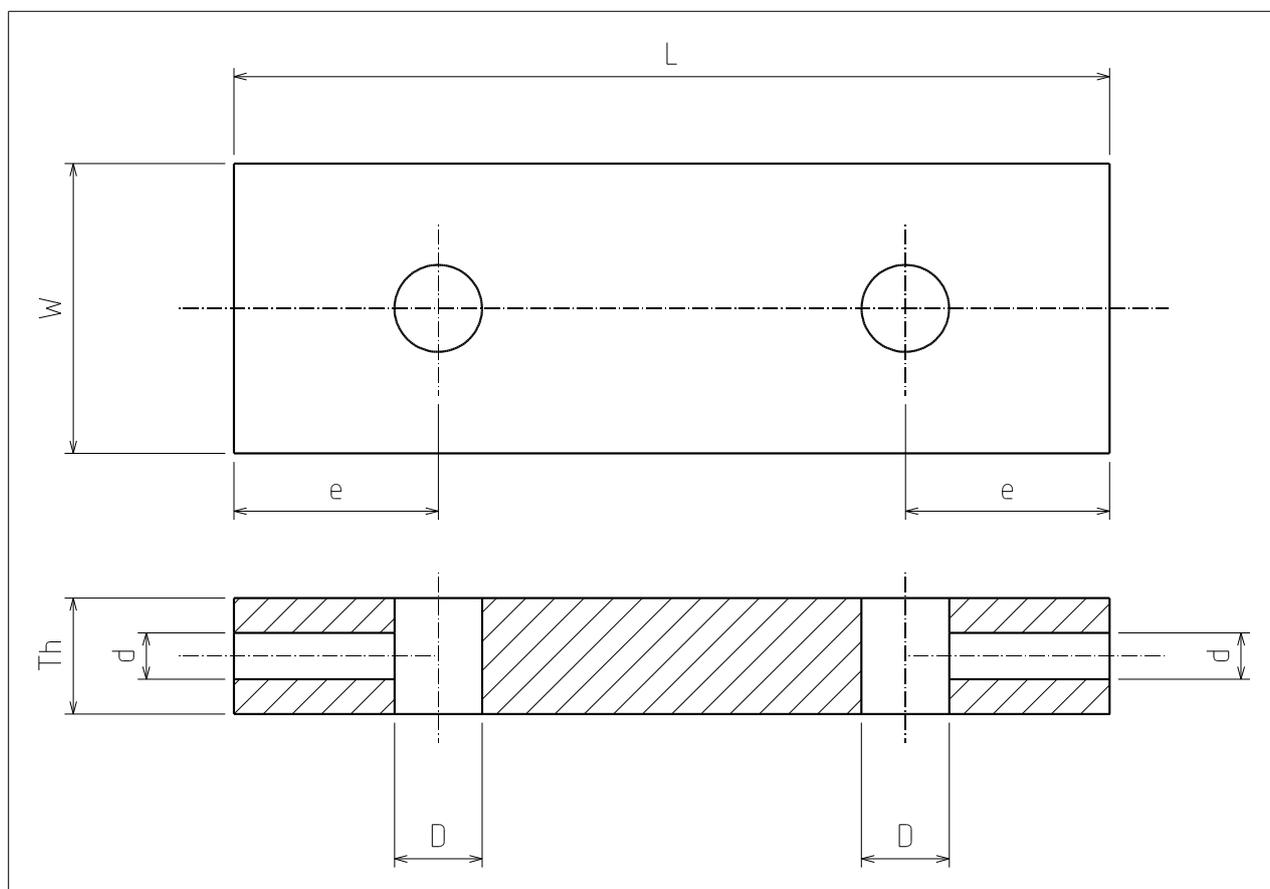


Figura 5.1: Esquema de la probeta T-bolt

5.2.1 Materiales de las probetas

Como ya se ha comentado en la introducción, las probetas ensayadas se han fabricado a partir de dos materiales distintos, facilitados respectivamente por las empresas *Aertusa* y *MTorres*. Ambos materiales están formados a base fibra de vidrio con matriz epoxídica, si bien sus características son considerablemente distintas, debido a los distintos métodos de producción y las diferentes propiedades de los materiales de base utilizados.

El primero de ellos, al que nos referiremos a partir de ahora como **A**, se ha obtenido por laminación manual y curado en bolsa de vacío a partir de una resina epoxy de la marca *MGS* y una tela multidireccional de la casa *Ahlstrom*. La secuencia de apilado es $(-45,0,+45,90)_n$, el tanto por ciento en peso de fibra es del 35% y los porcentajes de fibras a 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° son respectivamente: 50%, 40%, 10%. El espesor aproximado de cada grupo de capas $(-45,0,+45,90)$ es de 0.8 mm, variando el espesor de cada capa individual según la orientación de la misma.

El segundo, al que nos referiremos a partir de ahora como **M**, se ha obtenido por laminación automática y curado en bolsa de vacío a partir de un preimpregnado unidireccional de fibra de vidrio y epoxy de la marca *SP*. La secuencia de apilado es $(90,+45,0,-45,0)_{n,s}$, el tanto por ciento en peso de

fibra es aproximadamente del 60% y los porcentajes de fibras a 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° son respectivamente: 40%, 40%, 20%. El espesor de cada capa individual es de aproximadamente 0.4 mm siendo todas las capas de igual espesor.

Los distintos modos de fabricación implican distintos contenidos en fibra, distintos espesores de lámina e incluso distinto contenido de huecos. Todo esto lleva a que, mientras que el laminado tipo M tenga una resistencia última de unos 560 MPa y un módulo elástico de unos 25.5 GPa, el laminado tipo A sólo alcance unos valores de unos 430 MPa de resistencia y 18 GPa de módulo elástico. Por contra, el material tipo M presenta una mayor tendencia a la delaminación al utilizar láminas y fibras más mucho más gruesas y no tener ningún tipo de ligazón entre las distintas capas¹.

5.2.2 Probetas material A

Con este tipo de material se han ensayado probetas tipo T-bolt, en tres configuraciones distintas. Dos de ellas para provocar el fallo en compresión local y la tercera para provocar el fallo en tensión neta. En la tabla 5.1 se detallan las medidas de las probetas utilizadas de acuerdo con el esquema de la figura 5.1. Para identificar los distintos tipos de probeta se utilizarán dos letras, la primera indicando el material y la segunda el tipo de ensayo, de manera que las probetas tipo AB están realizadas en material A y serán utilizadas en los ensayos de compresión local (*Bearing*), y las probetas tipo AN son del mismo material y serán utilizadas en los ensayos de tensión neta.

Tipo probeta	cantidad	D	d	W	Th	e	L
AB1	1	25	17.5	100	37	60	300
AB	2	30	17.5	90	37	60	300
AN	4	30	17.5	50	37	60	300

Tabla 5.1: Medidas de las probetas del material A

En el caso de las probetas para compresión local se han realizado dos modelos distintos, debido a que, como se comentará más detalladamente en el apartado de resultados, la probeta AB1, con un diámetro “estándar” para estas dimensiones de laminado ($D = 25mm$), presentó algunos problemas de deformaciones permanentes en el bulón. Aparte de esto, como se puede apreciar en la tabla, la única diferencia entre las probetas destinadas al ensayo a compresión local (AB) y las utilizadas para el ensayo en tensión neta (AN) está en la anchura de las mismas, que es mayor en el caso de las probetas de compresión local. El resto de medidas utilizadas corresponden a valores considerados estándar en relación al espesor de la probeta, ya que al utilizarse el soporte representado en la figura 5.3 no resulta necesario realizar otras correcciones.

Las probetas han sido cortadas mediante una sierra de cinta refrigerada por aire a partir del laminado de base. Los agujeros han sido realizados en fresadora utilizando brocas de acero rápido. Para evitar en lo posible las delaminaciones durante el taladrado de los agujeros del bulón, éstos se han realizado contra una lámina de madera y realizando 3 pasadas distintas hasta alcanzar el diámetro deseado.

5.2.3 Probetas material M

Las probetas de material M se han realizado en dos configuraciones con las medidas especificadas en la tabla 5.2. Al igual que en el caso anterior, la letra B indica el ensayo en compresión local y la

¹Las diferentes capas del laminado tipo A están cosidas entre si mediante algunas fibras de poliéster.

letra N en compresión neta, mientras que la primera letra (M) se refiere al tipo de material utilizado.

Tipo probeta	cantidad	D	d	W	Th	e	L
MB	4	30	21	75	36	75	300
MN	4	30	16	48	36	75	300

Tabla 5.2: Probetas tipo T-bolt, material M

En este caso, puede apreciarse que, aparte de las diferencias de anchura entre los dos tipos de probeta, se ha cambiado también el diámetro del agujero del vástago. Esto es debido a que, en las probetas MB la carga se introduce directamente a través del vástago de la T-bolt por lo que su diámetro ha debido aumentarse considerablemente (hasta M20), además de utilizar tornillos de calidad 12.9 para el vástago y un acero equivalente para el bulón.

Las probetas se han cortado con cuchilla a partir del laminado en crudo. Para evitar que durante el curado se produjeran deformaciones en la superficie de la probeta, se ha introducido una plancha metálica entre la superficie de las probetas y la bolsa de vacío. En todas las probetas se ha realizado un refrentado de las superficies de apoyo de las probetas (figura 5.2), mientras que las superficies laterales sólo han sido mecanizadas en las probetas tipo MN dada la escasa influencia de su acabado en la resistencia a la compresión local. Los taladros se han realizado mediante un procedimiento análogo al descrito para las probetas de material A.

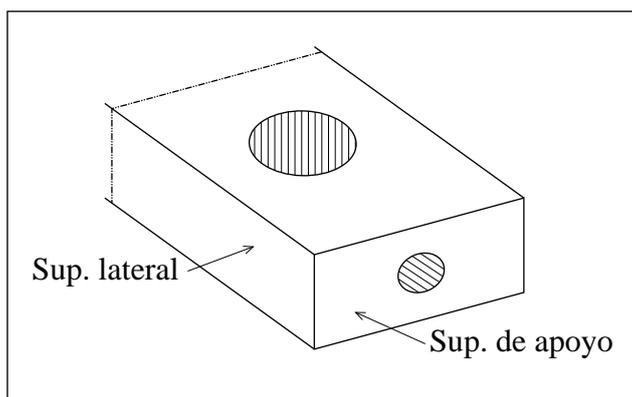


Figura 5.2: Definición superficie de apoyo

5.2.4 Utillaje

Si se utilizan las relaciones geométricas típicas de la uniones T-bolt reales, resulta imposible introducir la carga a través del vástago y, simultáneamente, obtener la rotura del laminado, ya sea en tensión neta o compresión local. Esto es debido a que, con las relaciones geométricas típicas y materiales estándar, siempre se producirá el fallo del vástago mucho antes de que el laminado haya alcanzado su estado límite. Existen, pues, dos alternativas para atacar este problema: o bien se sobredimensionan el bulón y el vástago o bien se construye un útil que permita introducir la carga por los extremos del bulón en vez de (o además de) a través del vástago.

En nuestro caso se ha optado por la utilización del soporte representado en la figura 5.3 para todos los casos excepto para las probetas en compresión local realizadas con el material M. Este soporte,

al sujetar el bulón por los extremos, permite la introducción de una carga en el bulón muy superior a la que se podría introducir través del vástago. Además tiene dos ejes de alineamiento por lo que permite la autoalineación de las probetas al entrar en carga.

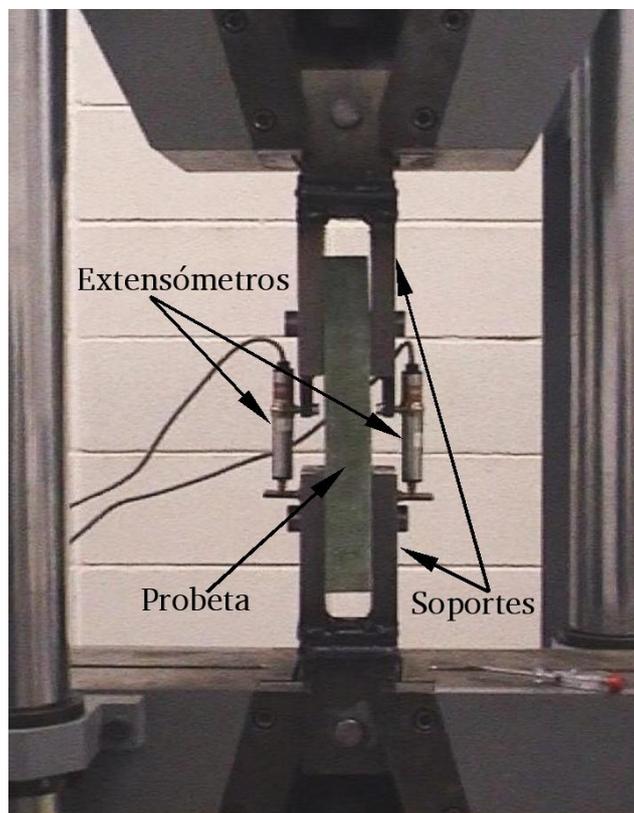


Figura 5.3: Soporte

Todos los ensayos se han realizado en el laboratorio de materiales de la Universitat de Girona con la máquina universal de ensayos *Servosis MUE-60* de 60T. El control se ha realizado por desplazamiento y, siempre que no se indique lo contrario, la carga se ha realizado a una velocidad constante de 0.015 mm/s. La fuerza se ha registrado directamente a partir de la señal de salida analógica del control de la máquina de ensayos, mientras que el desplazamiento se ha medido mediante dos extensómetros colocados entre los dos soportes (figura 5.3) o bien directamente sobre los dos bulones. En el caso en que no se ha utilizado el soporte, los extensómetros se han colocado directamente sobre los bulones.

La grabación de los sonidos emitidos se ha realizado de una manera muy sencilla, ya que el objetivo de este registro no consiste en evaluar el tipo de daño producido en cada momento ni su localización precisa, sino únicamente indicar los momentos en los que se producen cambios apreciables en la intensidad y frecuencia de emisión, los cuales son indicativos de cambios importantes en la evolución global del fallo de la unión. Concretamente se ha utilizado una cámara de vídeo doméstico digital *Sony TR-7000E*, la cual almacena el sonido en formato digital con una frecuencia de muestreo de 48 kHz y una resolución de 16 bits, a la cual se ha acoplado un micrófono de condensador *FoneStar FCM-440*. Debido al elevado ruido ambiental y a la imposibilidad de aislar el equipo hidráulico de la máquina se decidió rodear la probeta con una “caja” de poliestireno expandido de alta densidad con el objetivo de aumentar en lo posible el contraste entre la señal emitida por la probeta y el ruido de fondo. El micrófono se ha situado frente a la parte central de la probeta a unos 10 mm de su superficie, según el esquema de la figura 5.4.

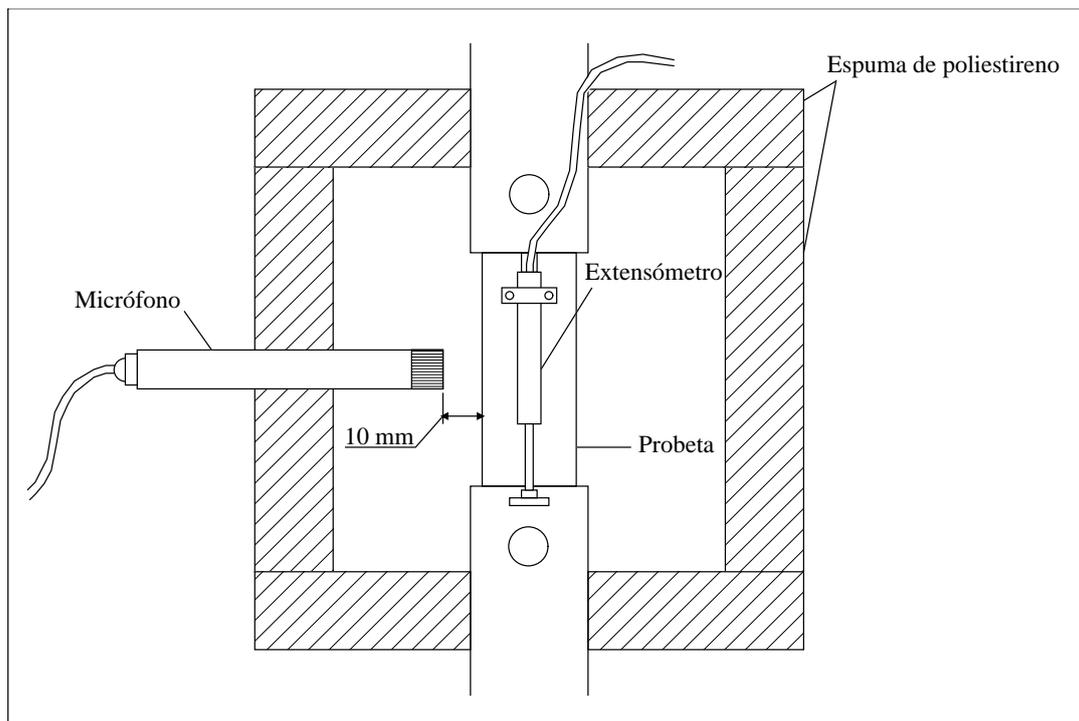


Figura 5.4: Posición del micrófono

5.2.5 Parámetros característicos

En este apartado se introducen los distintos parámetros utilizados para la presentación de los resultados de los ensayos de uniones T-bolt.

5.2.5.1 Superficies resistentes

Evidentemente, la carga máxima que puede soportar una probeta depende del tamaño de la misma. Resulta por lo tanto interesante referir los resultados a un área característica que será función del tipo de ensayo y de las dimensiones de la probeta. Para los ensayos en compresión local utilizaremos la superficie A_b , definida por la expresión:

$$A_b = D \cdot t - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (5.1)$$

Los distintos parámetros de esta expresión están representados en la figura 5.1 y en cada caso se han utilizado las medidas nominales de cada ensayo, excepto para aquellas medidas que pueden presentar una variabilidad importante, como el espesor del laminado. En estos casos se han utilizado mediciones realizadas sobre cada espécimen particular.

Para los ensayos en tensión neta se utilizará A_n , que viene dada por la expresión:

$$A_n = t \cdot (w - D) \quad (5.2)$$

En la figura 5.5 se representan gráficamente estas dos superficies.

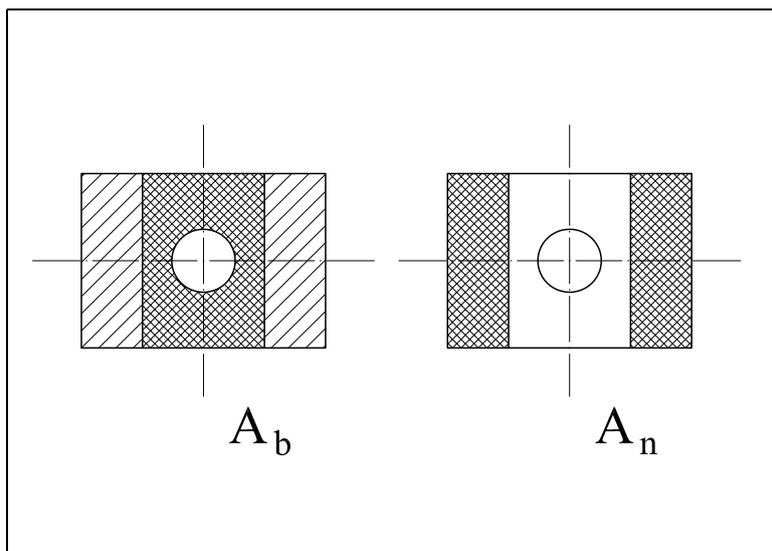


Figura 5.5: Áreas resistentes

5.2.5.2 Excentricidades del agujero del vástago y del bulón

En los ensayos a compresión local es importante que el agujero del vástago esté perfectamente alineado, tanto respecto del plano medio del laminado, como del eje del bulón. Se pueden medir pues el error o excentricidad respecto a estas dos referencias. De todas maneras, en la práctica, el alineamiento respecto del eje del bulón (ex_b) suele ser bastante bueno, tanto por los procedimientos de fabricación utilizados, como porque en caso de desalineación no resulta posible montar el vástago. Por este motivo, en los ensayos a compresión local, se ha verificado únicamente la alineación del eje del vástago respecto al plano medio del laminado (ex en la figura 5.6).

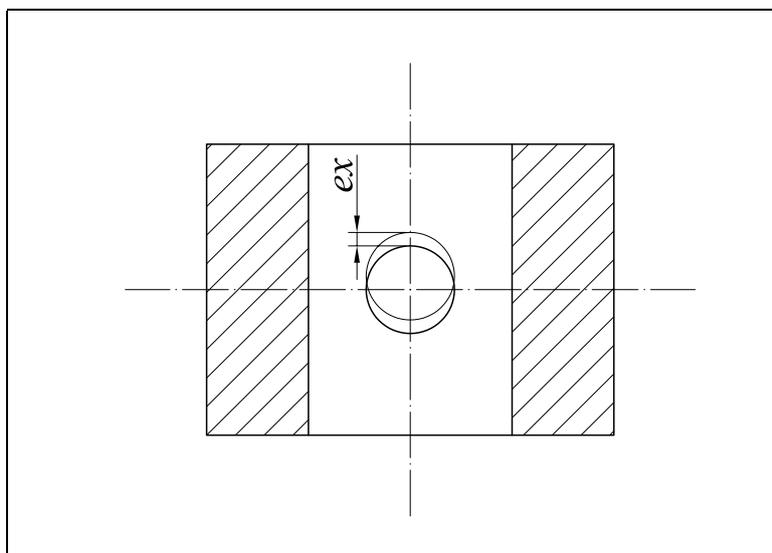


Figura 5.6: Excentricidad del agujero del vástago

En los ensayos a tracción neta, la posición del agujero del vástago tiene una importancia relativamente menor, en cambio, el posicionamiento del agujero de bulón respecto de la dimensión w resulta crítico, debiendo idealmente encontrarse perfectamente centrado. Por este motivo, en las probetas de este tipo, antes de empezar el ensayo se ha medido la distancia desde el centro del agujero del

bulón al punto medio del la probeta, que corresponde al parámetro ec en la figura 5.7.

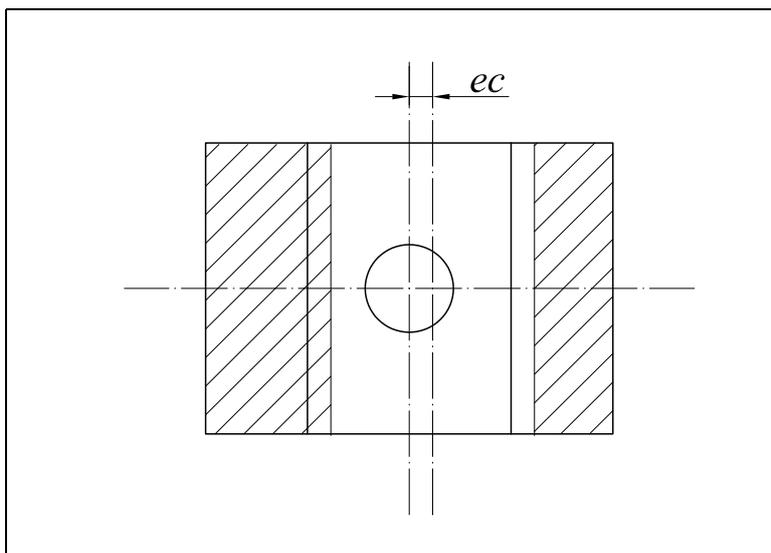


Figura 5.7: Excentricidad del agujero del bulón

5.2.5.3 Esfuerzos medios y resistencia del laminado

A partir de la carga registrada en cada instante y de las superficies características, podemos definir los esfuerzos medios en cada instante, que denominaremos σ_b para los ensayos a compresión local y σ_n para los ensayos en tensión neta, los cuales se obtendrán con las expresiones:

$$\sigma_b = \frac{P}{A_b} \quad (5.3)$$

$$\sigma_n = \frac{P}{A_n} \quad (5.4)$$

Los esfuerzos medios obtenidos para las cargas máximas admisibles de cada ensayo definen la resistencia del laminado frente a un determinado tipo de fallo, para geometrías similares a las ensayadas. La carga máxima admisible se puede estimar de diversas maneras, de las cuales, en este trabajo, se utilizaran dos:

1. La carga máxima alcanzada durante el ensayo (P_{max}).
2. La carga máxima alcanzada antes de la primera caída de carga significativa (P_1).

El valor de la caída de carga “significativa” depende de cada tipo de ensayo y del modo de fallo de la pieza, aunque como regla general siempre será superior al 1% de la carga máxima alcanzada hasta ese punto y, en algunos casos, va acompañado de una importante liberación de energía detectable en forma de emisión sonora. En la figura 5.8 se representa un ejemplo de curva de carga en la que se indican las cargas máximas admisibles según las dos definiciones anteriores.

Los respectivos valores de resistencia serán: $S_{bmax} = \frac{P_{max}}{A_b}$, $S_b = \frac{P_1}{A_b}$, para los ensayos a compresión local, y $S_{nmax} = \frac{P_{max}}{A_n}$, $S_n = \frac{P_1}{A_n}$ para los ensayos en tensión neta.

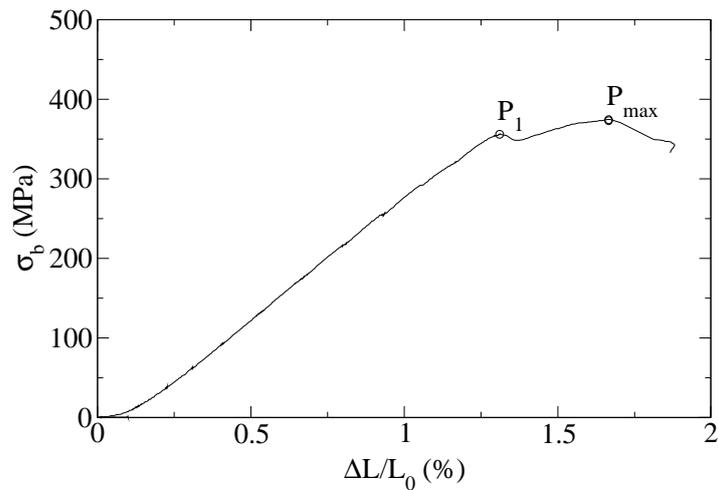


Figura 5.8: Cargas máximas admisibles

Desde el punto de vista del diseño, las definiciones de resistencia que creemos tienen más interés son las que se basan en la carga P_1 , ya que, en primer lugar, dan una estimación más conservadora de la resistencia del material y, en segundo lugar, a partir de este punto, el laminado padece daños irreversibles que pueden afectar seriamente al comportamiento de la unión. De todas formas es interesante conocer las estimaciones a partir de P_{max} , ya que dan una idea del margen de seguridad de que se dispone.

5.2.5.4 Eficiencia

Un parámetro de gran interés a la hora de evaluar el comportamiento de una unión mecánica es su eficiencia, que se define como la relación entre la carga que es capaz de soportar la unión y la carga que sería capaz de soportar el laminado.

En el caso de las probetas utilizadas, la eficiencia de la junta viene definida por una de las siguientes expresiones:

$$f_b = \frac{P}{S_{ut} \cdot (w \cdot t)} \quad (5.5)$$

$$f_n = \frac{P}{S_{ut} \cdot (w \cdot t)} \quad (5.6)$$

donde S_{ut} es la resistencia a tracción del laminado, f_b corresponde a los ensayos a compresión local y f_n corresponde a los ensayos en tensión neta.

5.2.5.5 Desplazamiento relativo entre bulones

El desplazamiento relativo entre bulones debería medirse entre los puntos medios de los mismos, lo cual resulta imposible debido a la geometría de la junta. Por ello se ha optado por medir los

desplazamientos relativos a ambos lados de la junta y estimar el desplazamiento de la parte central como la media aritmética de ambos valores.

Por otra parte, el desplazamiento relativo depende tanto de las propiedades del material, como de la longitud inicial de la probeta. Por ello, y para uniformizar en lo posible las medidas, el desplazamiento relativo se dará habitualmente en tanto por ciento de la separación inicial entre bulones.

5.2.6 Tratamiento de la señal sonora

5.2.6.1 Introducción

Como se ha comentado anteriormente, se ha registrado la señal sonora emitida por los distintos tipos de probeta durante la realización de los ensayos. Esta señal se genera a partir de las emisiones acústicas causadas por micro-fallos del material que pueden ser de muy diversas clases: roturas de fibra, despegue de fibras, delaminaciones, aparición de grietas en la matriz, etc. (Prosser, 1996). Estas ondas elásticas se transmiten al aire desde donde pueden ser captadas por el oído humano o bien por un micrófono convencional de audio. Evidentemente en la transición entre el material compuesto y el aire, se pierde gran parte de la información contenida en la onda original, con un importante amortiguamiento de la señal, especialmente de las altas frecuencias, las cuales, por otra parte, no son perceptibles ni para el oído humano ni para los equipos convencionales de audio, que están diseñados, en el mejor de los casos, para registrar frecuencias entre 30 Hz y 24 kHz.

Otro inconveniente adicional asociado a la utilización de la señal sonora es la gran cantidad de ruido ambiental que contiene esta señal en un ambiente típico de trabajo o de ensayos con materiales compuestos. Sin embargo, pese a todos estos inconvenientes, resulta evidente, para cualquier persona que haya realizado ensayos en materiales compuestos, que es posible, para el oído humano, distinguir de la señal de fondo una gran cantidad de eventos de emisión acústica o clics, producidos por el material compuesto a medida que avanza el ensayo. La intensidad y, sobre todo, la frecuencia de estos eventos, aunque no sean una medida tan precisa de los procesos de micro-fallo del material como los eventos de emisión acústica registrados mediante transductores de contacto de alta frecuencia, son un indicador de la respuesta del material a lo largo del ensayo.

5.2.6.2 Método de conteo de eventos

El primer objetivo que debe cumplir el tratamiento que se haga de la señal registrada deberá ser distinguir los eventos de emisión acústica de la probeta del ruido ambiente. Esto no puede hacerse únicamente en base a la intensidad de la señal registrada, ya que en muchos casos la señal máxima registrada durante un evento no supera en absoluto los valores alcanzados en los momentos en que sólo se tiene señal de fondo. Este hecho se puede apreciar en gráfica superior de la figura 5.9 en la que se representa una muestra de 10 segundos en la que son claramente audibles al menos 11 eventos y, en cambio, tan sólo en 4 de estos puntos se aprecia un valor de la señal ligeramente superior al producido por el ruido de fondo.

De la misma forma, resulta imposible llevar a cabo la detección a partir del reconocimiento de determinadas formas de onda a través de la señal sin tratar (Hinton, 1999), debido a la superposición de la señal que nos interesa con el ruido de fondo.

Dadas las dificultades que presenta el estudio de la señal en el dominio temporal, se pensó en el análisis espectral como una posible solución. Ahora bien, para que este análisis nos pueda ser de

utilidad no puede realizarse sobre la muestra completa, sino que debe realizarse sobre pequeños fragmentos de la muestra, de manera que se puedan detectar las diferencias entre dos instantes de tiempo distintos. La representación gráfica de este tipo de estudio es el espectrograma, que representa la evolución de las distintas componentes espectrales en función del tiempo. Esta técnica se utiliza extensamente en muchas ramas técnicas y científicas, como las dedicadas al reconocimiento del habla, el estudio de voces de animales o la ecolocalización, por lo que existen numerosos programas que permiten la obtención del espectrograma de una muestra de sonido. La gráfica central de la figura 5.9 representa el espectrograma correspondiente a la muestra anterior realizado con el programa de licencia GPL *Audacity*. Se puede observar que en esta gráfica se aprecian una serie de líneas verticales que se corresponden perfectamente con los instantes en que el oído humano es capaz de detectar un evento de emisión o clic.

Una vez encontrada una representación gráfica de la muestra en la que pueden detectarse a simple vista los clics en los que estamos interesados, queda por definir un método de detección automático, ya que resulta totalmente impráctico el estudio de las muestras disponibles de forma manual². Después de varias pruebas, se ha visto que, al tratarse de líneas verticales, sumando en cada instante los valores del espectrograma correspondientes a todas las frecuencias, se obtiene un parámetro cuya variabilidad es muy reducida, excepto en los puntos en los que se detectan eventos de emisión, con lo cual es posible establecer un umbral que defina en qué momentos se detecta un evento.

En la gráfica inferior de la figura 5.9 se puede observar la evolución de este parámetro junto con el umbral establecido y los instantes en los que se detecta un evento (marcados mediante pequeños círculos sobre una línea horizontal arbitraria).

El problema que se ha encontrado a la hora de implementar el método es que los programas que permiten la representación gráfica del espectrograma no permiten el tratamiento posterior de los valores obtenidos, por lo que ha sido necesario desarrollar un programa en C++ que desarrolle todo el proceso desde el principio, tomando únicamente librerías estándar para la estimación de la transformada rápida de Fourier (FFT). De forma muy simplificada, los pasos que realiza el programa son:

1. Se determina el espectrograma de la muestra de sonido original tomando muestras de N puntos cada Δt segundos para una banda de frecuencias entre ≈ 0 y F_{\max} .
2. Se realiza la suma aritmética de los valores obtenidos para cada instante de tiempo.
3. Se calcula la media y la varianza de las sumas obtenidas en el punto 2.
4. Se establece el umbral a partir del cual se considera que se ha producido un evento de emisión, como la media obtenida más NV veces la varianza.
5. Finalmente se realiza el conteo del número de picos con valor superior al umbral de detección.

Los parámetros N , Δt , F_{\max} y NV se definen al inicio del programa en función del tipo de la frecuencia de muestreo y de las condiciones en las que se haya realizado el ensayo. En el caso de los ensayos de la T-bolt, se han utilizado los valores mostrados en la tabla 5.3 tanto para las probetas de material A como para las de material M. La capacidad de discriminación que se obtiene con estos parámetros puede observarse en la gráfica inferior de la figura 5.9.

²Hay que tener en cuenta que un ensayo típico dura unos 10 minutos y que la frecuencia de muestreo utilizada es de 48 kHz, lo que significa que cada registro se compone de unos 30 millones de muestras.

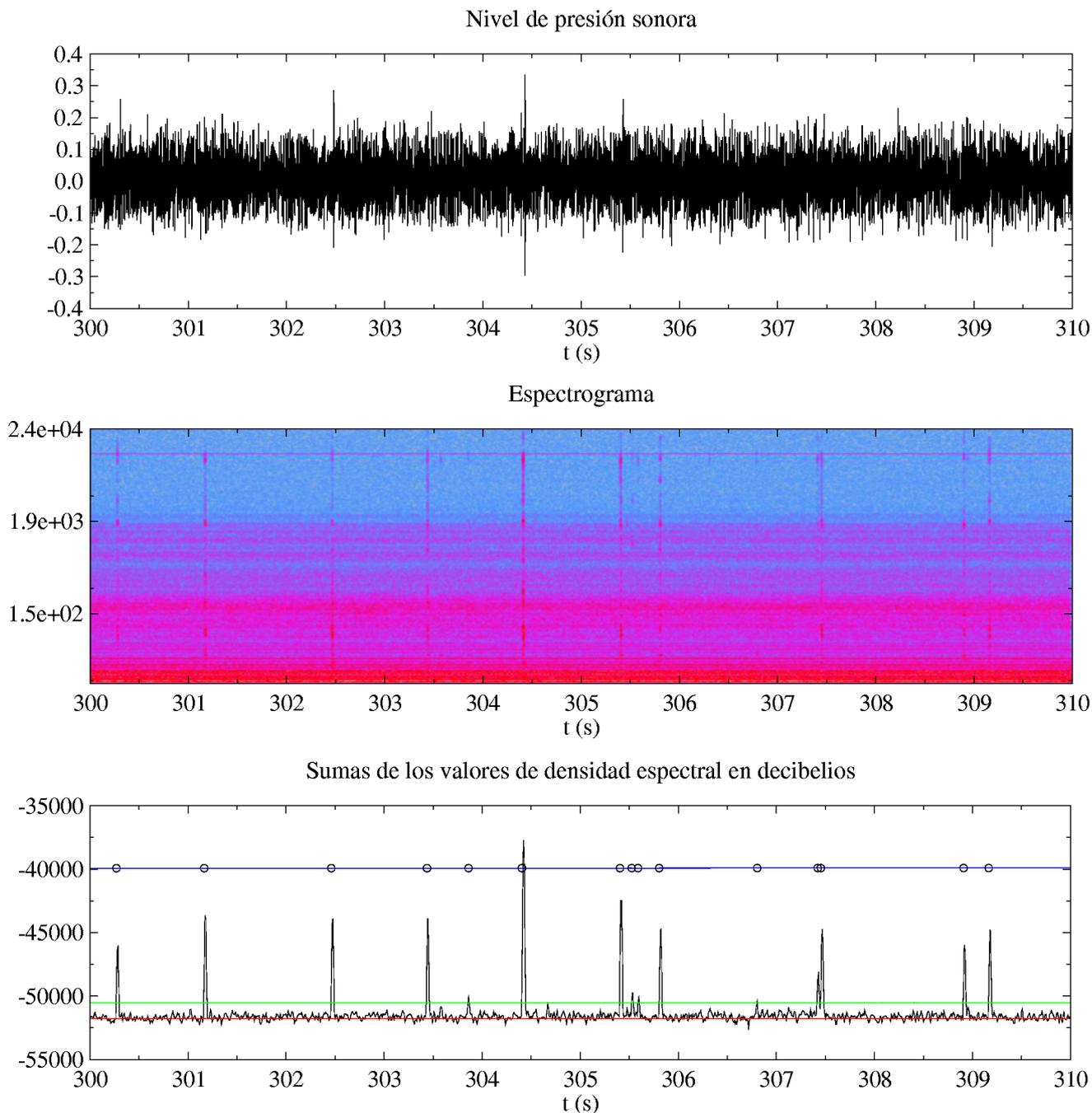


Figura 5.9: Ejemplo de tratamiento de la señal

N (puntos)	Δt (ms)	F_{\max} (kHz)	NV (-)
2048	8	24	5

Tabla 5.3: Datos para la detección de eventos

5.3 Ensayos de material

5.3.1 Caracterización del laminado tipo M

La empresa MTorres, aparte de facilitar probetas para los ensayos con uniones T-bolt, ha facilitado probetas para la caracterización del material, tanto a nivel de lámina como de laminado.

No se ha intentado caracterizar las propiedades del material de forma exhaustiva, sino obtener los valores necesarios para poder evaluar los resultados obtenidos con las probetas T-bolt. En particular se han realizado ensayos para determinar los siguientes parámetros de referencia:

- Resistencia a tracción / módulo elástico. Este valor resulta imprescindible para poder determinar la eficiencia de un determinado diseño.
- Resistencia en tensión neta, con agujero libre. Este ensayo está bastante extendido como método para determinar la sensibilidad del laminado a las concentraciones de tensión y se utiliza con frecuencia para determinar la longitud característica en métodos del tipo *Point Stress*.
- Resistencia en tensión neta, con agujero cargado. Este ensayo da una información similar a la anterior con las siguientes ventajas e inconvenientes:
 1. No es un ensayo normalizado.
 2. Para su realización se necesitan probetas de mayor espesor (\Rightarrow mayor coste).
 3. Por contra, las condiciones de carga son más parecidas a las que se encuentran en las condiciones de operación de las juntas mecánicas en general y de las juntas T-bolt en particular.
- Resistencia en compresión local. Para el estudio de la T-bolt tiene un gran interés la determinación de la resistencia a compresión local del laminado ya que a partir de este dato se puede investigar la influencia de las concentraciones de tensiones inducidas por el agujero del vástago en esta resistencia.

En la figura 5.10 se pueden observar los diferentes modelos de probeta utilizados en estos ensayos.

5.3.1.1 Tracción

Las probetas de tracción (figura 5.10T) se han cortado a partir de un laminado de 8mm aproximadamente, lo que significa un total de 20 capas, con una secuencia de apilado $((90,+45, 0, -45, 0)_2)_s$.

Se ha seguido en lo posible las indicaciones de la norma ASTM (1995b), aunque, debido al elevado espesor del laminado, se han tenido que mecanizar las probetas, de manera que estas presenten una parte central más estrecha, con el fin de evitar la rotura en la zona de agarre. El corte inicial rectangular se ha realizado sobre el laminado en crudo con guillotina, mientras que el mecanizado del estrechamiento se ha realizado mediante fresadora de control numérico con fresa de acero rápido.

5.3.1.2 Tensión neta (con agujero libre)

Para el ensayo a tensión neta con agujero libre (figura 5.10C) se han seguido las recomendaciones de la norma ASTM (1995a).

El laminado utilizado es de 4 mm de espesor aproximado, es decir, 10 capas con una secuencia de apilado $(90,+45, 0, -45, 0)_s$. El corte de la probeta se ha realizado mediante guillotina sobre el laminado en crudo y el agujero central se ha realizado mediante una broca de acero rápido.

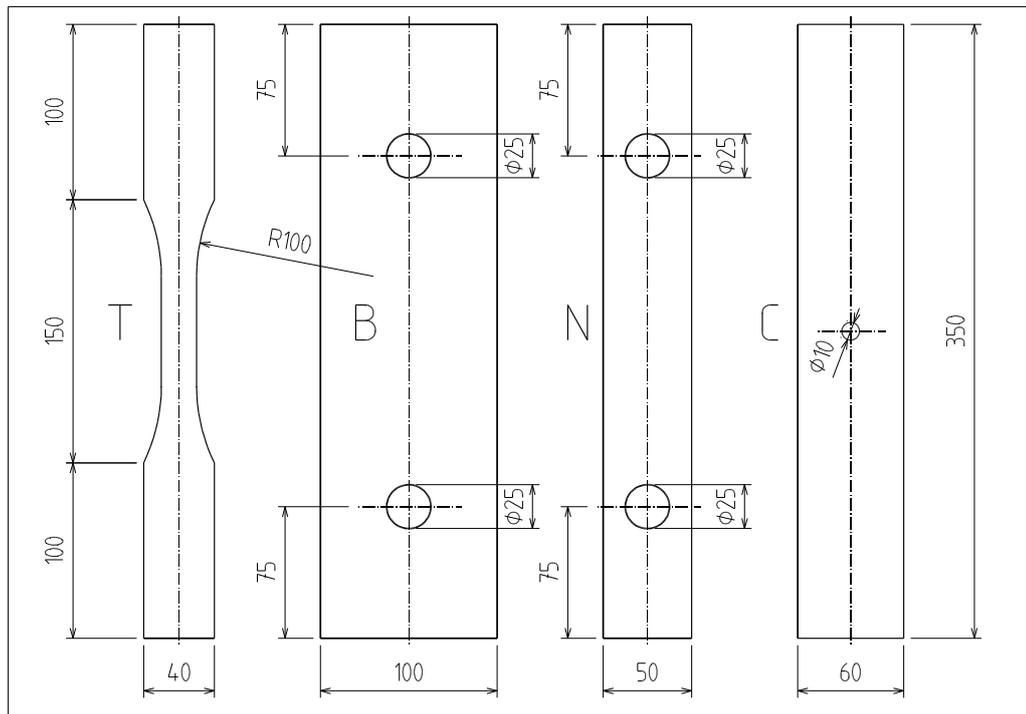


Figura 5.10: Probetas para el ensayo del laminado

5.3.1.3 Tensión neta (con agujero cargado)

En la figura 5.10N se ha representado el esquema de la probeta del ensayo en tensión neta con agujero cargado. Como se puede apreciar, consiste simplemente en una probeta rectangular a la que se han practicado dos agujeros sobre los que, posteriormente, se aplicará la carga exterior mediante el uso del mismo soporte utilizado para los ensayos con la T-bolt (figura 5.3). El diámetro del agujero se ha determinado de manera que sea de dimensiones similares a las del agujero del bulón de las probetas T-bolt.

El laminado utilizado tiene las mismas características que el del ensayo a tracción, es decir, 20 capas de unos 0.4 mm con una secuencia de apilado: $((90,+45, 0, -45, 0)_2)_s$.

5.3.1.4 Compresión local

Las probetas de compresión local, como se puede observar en la figura 5.10B, son idénticas a las anteriores, excepto en la anchura de las probetas. Esto es debido a que, en este caso, el fallo en tensión neta debe evitarse por todos los medios.

El laminado utilizado es el mismo de la probeta a tracción y a tensión neta con agujero cargado.

5.3.2 Propiedades de lámina (material M)

Para determinar las propiedades mecánicas a nivel de lámina no se ha considerado necesario la realización de ensayos propios, ya que se disponía de información facilitada por el fabricante. El resumen de esta información se muestra en la tabla 5.4.

E_{11} (GPa)	S_{ut} (MPa)	S_{uc} (MPa)	S_{sut} (MPa)	V_f (%)
42	1200	1000	70	56

Tabla 5.4: Propiedades de lámina del material tipo M

- E_{11} = Módulo elástico en la dirección de las fibras
- S_{ut} = Resistencia a tracción en la dirección de las fibras
- S_{uc} = Resistencia a compresión en la dirección de las fibras
- S_{sut} = Resistencia a cortante interlaminar
- V_f = Fracción volumétrica de fibra

5.4 Resultados

En el presente capítulo se presentan los principales resultados obtenidos en los ensayos descritos en los apartados anteriores. En primer lugar se exponen los resultados referentes a las propiedades del laminado, debido a que la información que proporcionan estos ensayos es necesaria para la interpretación de los resultados obtenidos con las probetas tipo T-bolt.

5.4.1 Propiedades laminado

5.4.1.1 Tracción

En estos ensayos se ha determinado la carga de rotura del laminado en la dirección principal del mismo S_x , así como su módulo elástico en la misma dirección (E_x) y el módulo de Poisson en el plano $X - Y$ (ν_{xy}).

Se han ensayado un total de 3 especímenes de los cuales uno, la probeta t3, ha sido equipada con galgas extensiométricas para la estimación de las propiedades elásticas del material, mientras que las otras dos sólo se han utilizado para la determinación del límite de rotura en la dirección X . Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.5 junto con los valores medidos del espesor th y la anchura de la probeta w .

Si comparamos las propiedades elásticas obtenidas con los valores estimados, mediante la teoría clásica de laminados, a partir de las propiedades de lámina proporcionadas por fabricante, se observan unos errores en la estimación del 1.56% (E_x) y -15.87% (ν_{xy}), los cuales se pueden considerar como perfectamente aceptables.

5.4.1.2 Tensión neta (agujero libre)

Con estos ensayos se pretende determinar la influencia de la presencia de concentraciones de tensiones en la resistencia a tracción del laminado, por lo que los parámetros a determinar serán la carga

	w (mm)	th (mm)	P_{max} (kN)	E_x (MPa)	ν_{xy} (-)	S_x (MPa)
t1	20.2	9.2	103.52	-	-	557
t2	20.2	9.2	103.91	-	-	559
t3	20.2	9.2	102.97	25232	0.32	554
Media	20.2	9.2	103.47	-	-	557
Desviación estándar*	≈ 0	≈ 0	0.46%	-	-	0.46%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.5: Propiedades del laminado tipo M en dirección X

máxima (P_{max}) y el esfuerzo medio máximo en la zona de tensión neta (S_c). Otros parámetros que se pueden determinar a partir de este ensayo, como la distancia característica en métodos del tipo *Point Stress* o *Average Stress* no se muestran en este apartado, ya que para su determinación es preciso realizar una estimación de la distribución de tensiones en el interior de la probeta.

En la tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos de P_{max} y S_c así como los valores medidos del espesor th y de la diferencia entre la anchura de la probeta w y el diámetro del agujero D .

	$w - D$ (mm)	th (mm)	P_{max} (kN)	S_c (MPa)
c1	52.0	4.325	84.51	376
c2	52.5	4.400	89.72	388
c3	52.0	4.250	86.33	391
Media	52.167	4.325	86.85	385
Desviación estándar*	0.55%	1.73%	3.04%	2.08%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.6: Tensión neta, agujero libre, material M

Se puede observar como, respecto a la probeta de tracción, se produce una reducción del 30% en la tensión máxima media que es capaz de soportar el material, lo cual indicaría en un material idealmente frágil un factor de concentración de tensiones de 1.44.

5.4.1.3 Tensión neta (agujero cargado)

El objetivo de estos ensayos es, en principio, idéntico al anterior, con la diferencia de que, en este caso, la carga se introduce en la probeta a través del agujero, con lo que el estado de tensiones en la zona de tensión neta es algo distinto al anterior y más similar al que encontraríamos en las uniones tipo T-bolt. Los parámetros medidos serán pues los mismos que en el caso anterior, si bien utilizaremos el símbolo S_n en vez de S_c para distinguirlo del caso anterior.

En la tabla 5.7 se muestran los resultados obtenidos de P_{max} y S_n , así como los valores medidos del espesor th y de la diferencia entre la anchura de la probeta w y el diámetro del agujero D .

Como se puede ver, las tensiones medias alcanzadas son inferiores a las del caso anterior (probetas tipo c) en un 20%, lo cual se justifica fácilmente por varios factores. En primer lugar, al estar el agujero cargado, se produce una compresión en el borde del agujero en la zona de tensión neta, lo que hace aumentar los esfuerzos máximos en esa zona. En segundo lugar, al tratarse de un agujero de mayor tamaño, la zona de material compuesto afectada por las altas tensiones es mayor, lo cual se agrava en este caso por la elevada fracción de la anchura de la probeta ocupada por el agujero.

	$w - D$ (mm)	th (mm)	P_{max} (kN)	S_n (MPa)
n1	25.6	9.175	71.8	306
n2	25.35	9.275	71.2	303
n3	25.7	8.775	68.5	304
Media	25.55	9.075	70.5	304
Desviación estándar*	0.71%	2.92%	2.49%	0.48%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.7: Tensión neta, agujero cargado, material M

Estas circunstancias, lejos de ser un problema, acercan las condiciones de trabajo de este tipo de probetas a las que se dan en la T-bolt. Si se tratase de un material idealmente frágil la concentración de tensiones que obtendríamos sería de 1.83.

5.4.1.4 Compresión local

En este caso, el objetivo de los ensayos consiste en determinar la carga máxima (P_{max}) y la tensión media máxima que es capaz de soportar el material tipo M cargado en compresión local (S_b). Como en el caso de los ensayos a tensión neta, otros parámetros deducibles a partir de estos valores no se incluyen en este apartado, ya que, aparte de los valores experimentales, requieren la estimación numérica o analítica de los estados de tensiones en el interior de la pieza.

En la tabla 5.8 se pueden ver los valores obtenidos tanto de P_{max} como de S_b , así como los valores medidos del diámetro D y el espesor th de cada probeta.

	D (mm)	th (mm)	P_{max} (kN)	S_b (MPa)
b1	25	8.925	99.9	448
b2	25	9.175	97.8	426
b3	25	9.15	104.4	456
Media	25	9.08	100.7	444
Desviación estándar*	≈ 0	1.52%	3.35%	3.48%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.8: Compresión local, material M

Si comparamos los valores obtenidos en compresión local con los obtenidos en tensión neta se observa que la tensión media máxima es entre un 15% superior al caso de agujero descargado y un 45% superior al caso del agujero cargado. Este hecho coincide con la mayoría de los resultados publicados en la bibliografía, y es debido principalmente a los diferentes mecanismos de fallo involucrados en cada uno de los distintos tipos de rotura.

5.4.2 Probetas AB

Como ya se ha comentado anteriormente, se han realizado dos versiones de este tipo de probetas con dos diámetros de bulón distintos. De la primera versión (AB1) se ha ensayado un solo espécimen, mientras que de la segunda (AB) se han ensayado dos. La figura 5.11 muestra la segunda geometría.

En todos los casos se ha obtenido el fallo en compresión local, si bien las curvas obtenidas para la probeta AB1 son algo distintas de las del resto de probetas. Esto se debe a que en este ensayo



Figura 5.11: Probeta tipo AB

el soporte del bulón presentaba una tolerancia muy ajustada respecto al espesor de la probeta, por lo que actuaba como “retén” lateral del material, aumentando la capacidad de carga de la probeta después del inicio del fallo. Como consecuencia de este problema, para el resto de ensayos se ha modificado el soporte, de manera que presente una cierta holgura respecto de la probeta, lo que a su vez ha obligado a incrementar el diámetro del bulón para evitar excesivas deformaciones del mismo. De todas formas, si tomamos como referencia el punto del inicio de la rotura, los valores de tensión promedio obtenidos son bastante similares, a pesar de las diferencias geométricas entre ambos tipos de probeta.

Las probeta AB1 se ha cargado hasta la rotura total de la pieza por la aparición de un desgarre a cortante. La probeta AB2 se ha cargado hasta valores similares de deformación, muy superiores al inicio del fallo; sin embargo no se ha alcanzado ninguna pérdida de carga superior al 5%. Finalmente, la probeta AB3 se ha cargado únicamente hasta el inicio del fallo. En los dos primeros casos el fallo se ha presentado en las dos juntas, mientras que en el tercero únicamente una de las T-bolts presentaba daños apreciables a simple vista.

5.4.2.1 Comprobaciones geométricas

Para este tipo de probetas, se ha verificado la excentricidad (ex) y el espesor del laminado (t).

Los espesores medidos de laminado varían entre 36.55 y 38.5 mm, con una variación máxima dentro de la misma probeta de un 4.2% del valor medio (1.6 mm, probeta AB3). Esto significa que si se toma el valor medio (\bar{t} en la tabla) para la estimación del área resistente a compresión local (A_b), no se incurre en un error superior al 2.1%. Por ello se ha optado por esta solución, ante la dificultad que presenta el determinar con seguridad cuál de las dos juntas de una probeta ha fallado en primer lugar. En cuanto a la excentricidad, la mayor de las desviaciones medidas es del 2.74% del espesor (1 mm, probeta AB2), lo que significa que el espesor de material que queda en la zona del agujero es del orden de un 10% mayor en una cara del laminado que en la otra, lo que aunque pueda parecer excesivo, comparado con las diferencias que pueden medirse en algunas uniones reales, resulta perfectamente aceptable. De todas formas, en el análisis de los resultados se podrá comprobar hasta qué punto estas asimetrías provocan diferencias apreciables en el modo de fallo de la unión.

5.4.2.2 Valores de resistencia

Con la probeta AB1 se ha obtenido una carga final de rotura (P_{max}) de 230 kN. Ahora bien, el inicio del fallo (P_1) se detecta para una carga notablemente inferior: 174 kN. Esto implica que,

	t_1 (mm)	ex_1 (mm)	t_2 (mm)	ex_2 (mm)	\bar{t} (mm)	A_b (mm ²)
AB1	37.30	0.80	37.15	0.10	37.225	690.1
AB2	36.55	1.00	37.70	0.20	37.125	873.2
AB3	38.50	0.80	36.90	0.90	37.700	890.5

Tabla 5.9: Comprobaciones geométricas, probetas tipo AB

posteriormente al fallo inicial de la probeta, se produce un incremento de la capacidad de carga de la misma de alrededor del 30%.

Si dividimos los valores anteriores por el área resistente a compresión local (A_b) de la probeta, obtenemos la resistencia al aplastamiento, que será de 334 MPa para la carga máxima y de 253 MPa para el inicio del fallo. Si comparamos estos valores con la resistencia última estimada para este tipo de laminado (≈ 430 MPa) vemos que el esfuerzo medio máximo en compresión local es de aproximadamente un 60% ³ de este valor. Por desgracia, al contrario de lo que sucede con el material M, para el laminado tipo A no disponemos de ensayos de resistencia a compresión local, con geometrías distintas de la T-bolt, por lo que no es posible establecer comparaciones.

En cuanto a la eficiencia los valores obtenidos son respectivamente del 17% y el 13% para carga máxima e inicio del fallo, de todas formas, esta eficiencia tan reducida se debe a que la geometría de la probeta ha sido diseñada para asegurar el fallo en compresión local y no para optimizar la eficiencia. Si suponemos que en una probeta con medias más estándar ($w = 2D$) el fallo en compresión local se produciría en un nivel de carga similar, entonces los valores obtenidos serían del 30% para la carga máxima y el 23.5% para la rotura inicial.

En la tabla 5.10 se muestra un resumen de los valores obtenidos para la probeta AB1.

	P_{max} (kN)	S_{bmax} (MPa)	f_{bmax} (-)	P_1 (kN)	S_b (MPa)	f_b (-)
AB1	230.2	334	17.2%	174.3	253	13.0%

Tabla 5.10: Valores de resistencia, probeta AB1

Los valores de S_b obtenidos para las probetas AB2 y AB3 tienen una presentan una media de 256 MPa coincidente con el valor obtenido para AB1, aunque, evidentemente, la carga a la que se produce el inicio del fallo (P_1) es superior (227 kN) debido al mayor diámetro del bulón. La eficiencia f_b es de casi el 17%, es decir, un 23% superior a la obtenida para AB1, si bien esto se debe únicamente a que se ha reducido la relación w/D . En cambio si, como hacíamos para AB1, calculamos la eficiencia tomando $w = 2D$, tenemos una eficiencia del 25% cuya diferencia respecto de AB1 (23.5%) cabe perfectamente dentro de la variabilidad de los ensayos.

La principal diferencia respecto de AB1 se refiere a los distintos valores obtenidos para la resistencia última, ya que, mientras que para esta probeta se obtenía un incremento superior al 30% respecto de la carga de inicio de fallo, en la probeta AB2 el incremento obtenido es tan sólo del 2.3%. Esto demuestra claramente que este incremento del 30% se debe principalmente a que el soporte impedía la expansión lateral del laminado, incrementando así su resistencia a la compresión local. Como esta restricción lateral no se produce en las uniones utilizadas en la práctica, debe asumirse que, al contrario de lo que pasa en la mayoría de las juntas a solape, la carga última en compresión local es prácticamente la misma que la de inicio del fallo.

³Valor calculado para el inicio del fallo. Si se toma como referencia la carga última el valor obtenido es del 78%.

	P_{max} (kN)	S_{bmax} (MPa)	f_{bmax} (-)	P_1 (kN)	S_b (MPa)	f_b (-)
AB2	223.3	256	16.7%	218.2	250	16.3%
AB3	-	-	-	234.2	263	17.3%
Media	223.3	256	16.7%	226.9	256	16.8%
Desviación estándar*	-	-	-	5.0%	3.6%	3.9%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.11: Valores de resistencia, probetas AB

5.4.2.3 Curvas esfuerzo - alargamiento

En la figura 5.12 se representan las curvas esfuerzo-alargamiento para las tres probetas ensayadas. En estas curvas se puede apreciar claramente como la probeta AB1 presenta un incremento de la capacidad de carga bastante apreciable posterior al inicio del fallo, experimentando una caída súbita de la misma a causa de un fallo a cortante cuando se había alcanzado un alargamiento de algo más del 3%, es decir, casi 4 veces el alargamiento relativo en el momento del inicio del fallo, y para una carga un 30% superior a la de ese punto. En cambio, la probeta AB2 mantiene su carga más o menos constante desde el momento del inicio del fallo hasta que se detiene el ensayo para un alargamiento de la probeta de $\approx 4\%$, sin que se observe ni incremento de la capacidad de carga ni ninguna caída significativa de la misma. En la probeta AB3 no puede apreciarse el comportamiento posterior al inicio del fallo, ya que el ensayo se detuvo inmediatamente después de la primera caída de carga.

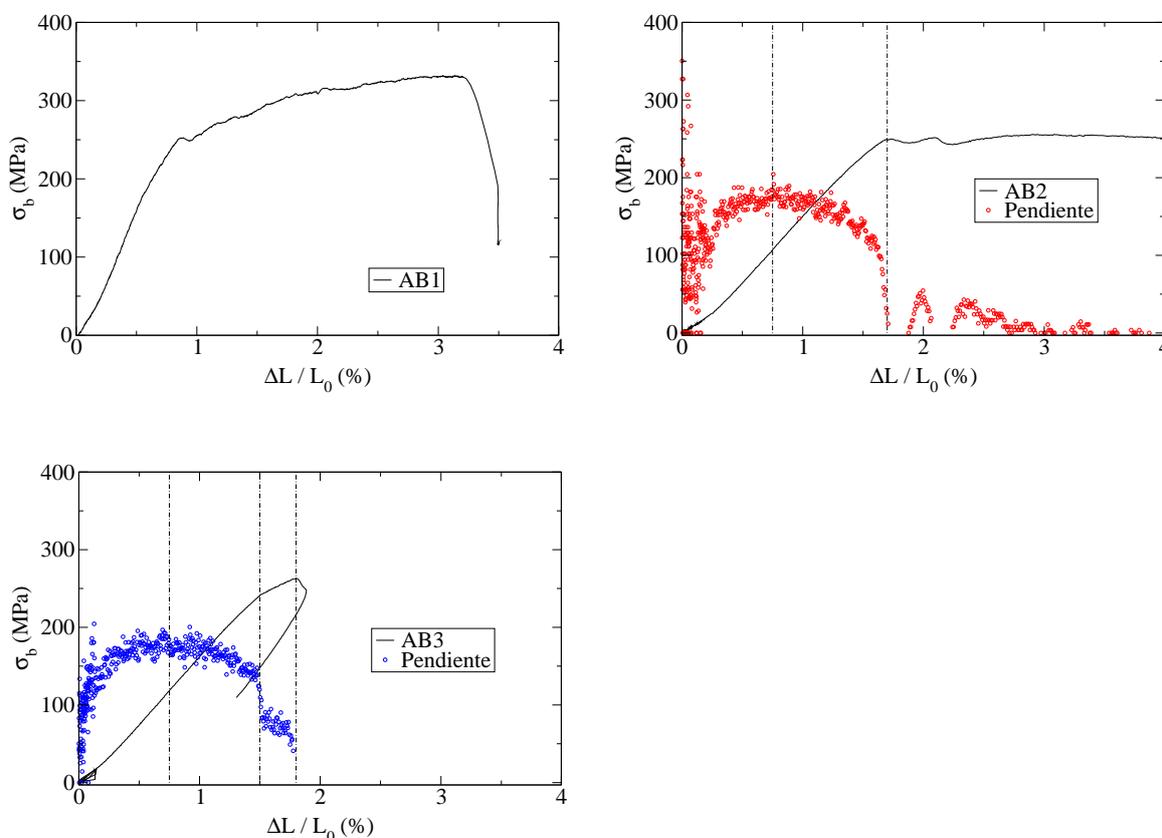


Figura 5.12: Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas AB

En cuanto al comportamiento anterior al inicio del fallo, éste es muy similar en las tres probetas, ya que en los tres casos se observa un incremento de la pendiente desde el inicio del ensayo hasta que se alcanza aproximadamente la mitad del alargamiento de rotura, para, a continuación, presentar una disminución de la misma hasta que se produce el inicio del fallo. De todas formas se observan algunas diferencias que conviene comentar:

- En primer lugar, la probeta AB1 presenta una pendiente media muy superior a la de las otras probetas,. Esto es debido simplemente a que, al utilizar un diámetro del bulón inferior, las cargas aplicadas también son inferiores, mientras que la probeta conserva las mismas medias (a excepción del diámetro del bulón), por lo que la deformación media de toda la probeta es inferior para un esfuerzo de compresión medio equivalente.
- En segundo lugar, la probeta AB3 presenta un cambio brusco de pendiente (codo) aproximadamente al 90% de la carga de fallo (66% del alargamiento de fallo). Este cambio brusco, que no se aprecia en los otros especímenes, probablemente se deba a la presencia de algún tipo de defecto o falta de homogeneidad interior del laminado.

5.4.2.4 Emisión sonora

En la figura 5.13 se muestra la evolución de la emisión sonora en función de la carga, para las probetas AB2 y AB3. Aunque en el inicio del ensayo de la probeta AB2 se producen algunas emisiones, en ambos casos se puede considerar que éstas se inician para una carga de aproximadamente el 70% de la carga de rotura. A partir de aquí, y hasta el inicio del fallo, la evolución es similar, si bien en el caso de la probeta AB3 la pendiente de la curva de emisiones se modifica de forma menos progresiva, produciéndose un importante incremento de éstas coincidiendo con el codo que se puede observar en la gráfica de esfuerzo - desplazamiento.

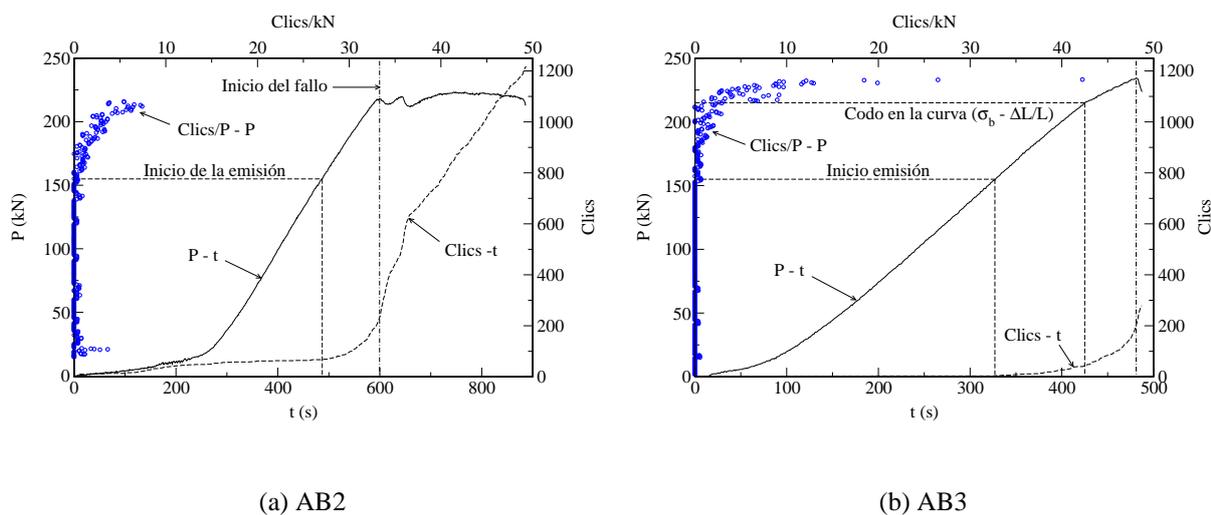


Figura 5.13: Curvas de emisión, probetas AB

En la probeta AB3 el ensayo se detiene en la primera caída de carga, pero para la probeta AB2 se puede observar la evolución post - fallo donde se ve claramente que la emisión sonora tiene una pendiente prácticamente constante en la zona de la gráfica en que la carga se mantiene prácticamente constante.

5.4.2.5 Inspección visual

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, la probeta AB1 presenta un cierto incremento de carga después del inicio del fallo, mientras que este fenómeno no se produce en la probeta AB2 (ni en las probetas tipo MB). En la figura 5.14 se puede apreciar la causa de estas diferencias, ya que, como se puede ver, la probeta AB1 (figura 5.14 izquierda) presenta un área totalmente “chafada” en la zona de compresión local, mientras que en la probeta AB2 (figura 5.14 derecha) este aplastamiento no se presenta. Esta compresión lateral tiene el efecto de aumentar la resistencia del material frente a las cargas aplicadas, ya que se reduce tanto la probabilidad de pandeo de las fibras como la probabilidad de fallo de la matriz a cortante.



Figura 5.14: Fallo de las probetas tipo AB1 y AB

Otra diferencia importante que presenta la probeta AB1 respecto del resto de especímenes cargados en compresión local, es que en uno de los extremos se produjo una rotura por desgarro, que podemos apreciar en la figura 5.15. Este tipo de rotura, de naturaleza catastrófica, sólo se produce si se incrementa la carga aplicada en al menos un 30% respecto a la carga de inicio de rotura por aplastamiento local, lo cual sólo se puede dar si se tiene una cierta restricción lateral. Además, en juntas reales, formadas por un gran número de uniones T-bolt, resulta poco probable su aparición, ya que antes de su aparición se produciría una importante redistribución de la carga desde la T-bolt más cargada hacia sus adyacentes, a causa de los grandes desplazamientos que se observan, previos al desgarre.



Figura 5.15: Desgarre de la probeta tipo AB1

Para terminar con el apartado de inspección visual de los especímenes fallados en compresión local, en la figura 5.17 se muestran tres uniones cortadas por la sección A-A' (figura 5.16) en las que puede

apreciarse la evolución del fallo a medida que aumenta la carga. La primera de ellas (figura 5.17a) muestra el estado de la unión en el momento inmediatamente anterior al fallo de la junta ($\sigma_b \approx 99\%$ de S_b) y corresponde al extremo de la probeta AB3 en la que no se produce el fallo. Como puede apreciarse, a simple vista no se pueden detectar daños aparentes y, en todo caso, estos se encontrarían restringidos a una pequeña franja inmediatamente adyacente al agujero del bulón. La segunda (figura 5.17b) muestra el estado de la unión en el momento inmediatamente posterior al inicio del fallo y corresponde al otro extremo de la probeta AB3. En este caso se puede apreciar como el fallo de la unión se inicia por el pandeo de las fibras. Finalmente las dos últimas imágenes de esta figura nos muestran el estado de la unión cuando, una vez iniciado el fallo, seguimos aplicando la carga. La figura 5.17c corresponde a la probeta sin restricciones laterales (tal como se fabrican en la realidad) y la figura 5.17d a la probeta AB1. Comparando ambas figuras puede apreciarse claramente la distinta evolución del fallo en presencia de restricciones laterales.

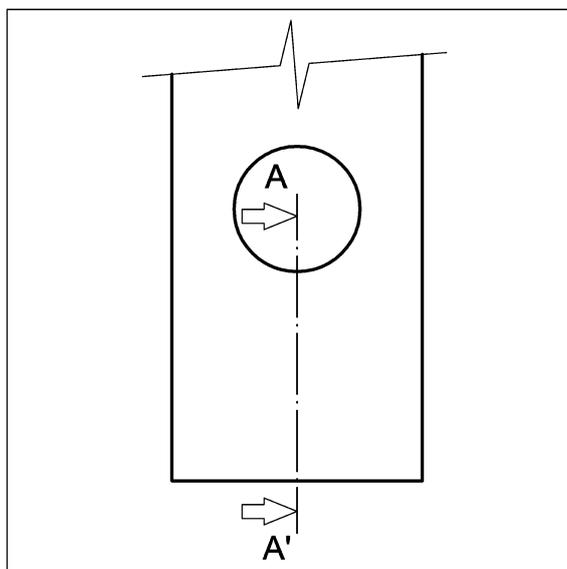


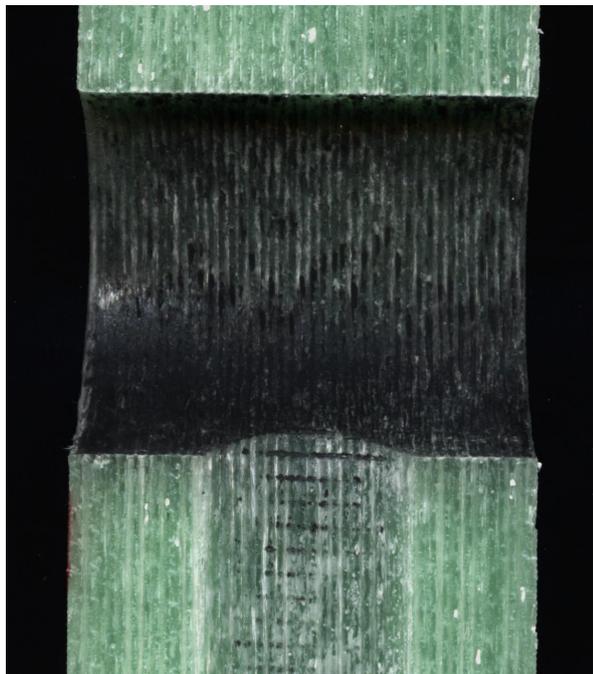
Figura 5.16: Sección A-A'

5.4.3 Probetas AN

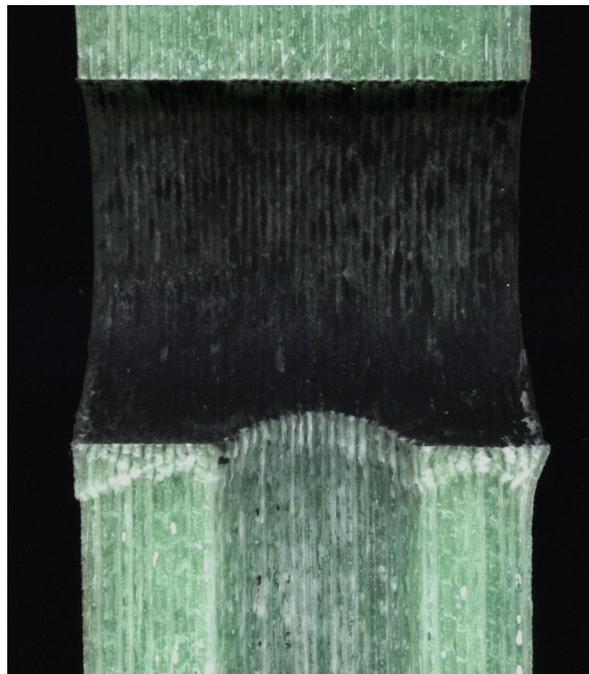
En la figura 5.18 se muestra un espécimen de este tipo de probeta antes del ensayo.

Se han ensayado cuatro probetas tipo AN. En los cuatro casos se ha obtenido la fractura en la zona de tensión neta y en los cuatro casos la rotura es súbita y catastrófica, sin embargo, el modo de rotura de la probeta AN1 es notablemente diferente del resto de probetas. Asimismo la pendiente de la gráfica esfuerzo - alargamiento es algo superior a la del resto de probetas. Ello no obstante, la carga final de rotura es bastante similar a la del resto de probetas, con una carga última tan sólo un 7% inferior a la media de las otras tres probetas, por lo que se ha decidido no descartar estos resultados. El modo de fallo, diferenciado, de esta probeta, puede deberse a un mayor grado de irregularidad en las superficies de contacto debido a un fallo en el mecanizado. En cambio, las diferencias de pendiente probablemente se deban al hecho de que con esta probeta se realizaron algunos ensayos no destructivos para la verificación del modelo numérico durante los cuales se alcanzaron valores de carga próximos a la de rotura⁴.

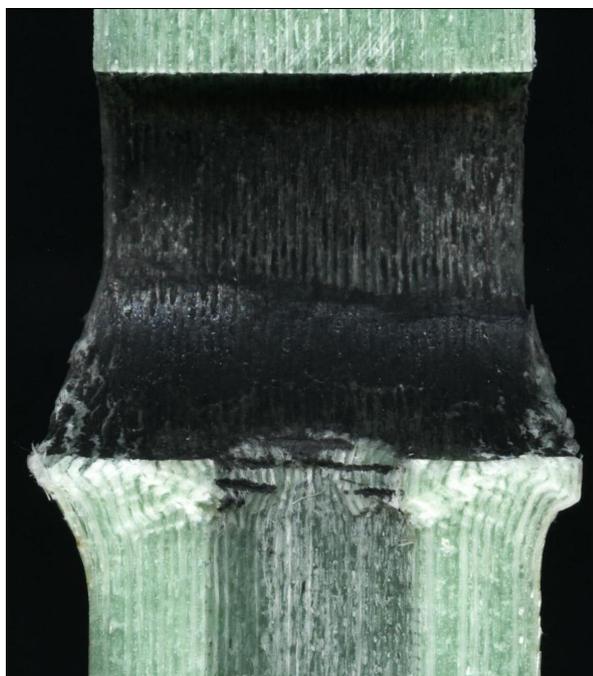
⁴En las gráficas 5.27 y 5.34 se puede apreciar como en una segunda carga se produce un incremento de la pendiente



(a) 99% carga rotura



(b) Inicio del fallo



(c) Estado final (AB2)



(d) Estado final (AB1)

Figura 5.17: Secciones de las probetas tipo AB

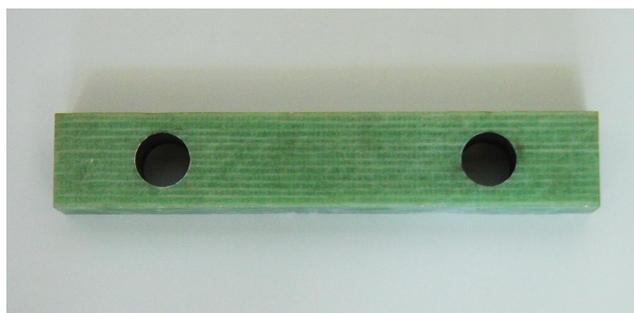


Figura 5.18: Probeta tipo AN

Las probetas AN3 y AN4 se han cargado una sola vez hasta la rotura, mientras que a la probeta AN2 se le ha aplicado una carga de 104 kN antes del ensayo definitivo, por un problema en la captación de datos que obligó a detener el ensayo.

5.4.3.1 Comprobaciones geométricas

En este tipo de probetas se han medido los espesores del laminado en la zona de tensión neta de cada una de las T-bolts (t_1 y t_2) y la anchura de la probeta (w_1 y w_2) a la altura de éstas, a partir de lo cual se ha estimado el área resistente a tensión neta (A_n). También se ha medido el descentrado del agujero de cada uno de los bulones respecto de la dimensión w (ec_1 y ec_2), este parámetro se define con más detalle en el apartado 5.2.5.2 del presente capítulo. En la tabla 5.12 se muestran los resultados obtenidos.

	t_1 (mm)	$w_1 - D$ (mm)	A_{n1} (mm ²)	ec_1 (mm)	t_2 (mm)	$w_2 - D$ (mm)	A_{n2} (mm ²)	ec_2 (mm)
AN1	37.00	23.3	862.1	0.25	36.55	23.2	848.0	0.10
AN2	37.85	23.6	893.3	0.40	36.50	24.1	879.7	-0.05
AN3	36.95	22.9	846.2	-0.05	35.70	23.5	839.0	-0.15
AN4	37.90	23.9	905.8	-0.25	36.75	23.3	856.3	-0.35

Tabla 5.12: Comprobaciones geométricas, probetas tipo AN

En este caso, para el cálculo del esfuerzo medio en tensión neta, se ha tomado el valor correspondiente a la T-bolt en la que se produce el fallo, por lo que no se calcula la media. En cuanto al descentrado de bulón, como se puede apreciar, en el peor de los casos es de 0.4 mm (probeta AN2, unión 1). Esto implica una asimetría lateral de esfuerzos de alrededor del 8%, lo que en principio no debería suponer un problema, si bien deberá observarse su influencia a lo largo de los ensayos, especialmente en la inspección visual de los especímenes después del fallo.

5.4.3.2 Valores de resistencia

La carga máxima P_{max} obtenida para cada una de las probetas varía entre 198.2 y 178.2 kN, con una media de 192.3 kN. Estos valores varían ligeramente si despreciamos los resultados obtenidos a partir de la probeta AN1, ya que se obtiene un mínimo de 194.3 y una media de 196.6 kN. De todas de la curva.

formas, esto representa tan sólo una variación del 2.2% respecto de la media obtenida a partir de todos los valores.

Dividiendo la carga máxima por el área resistente a tensión neta se obtiene la resistencia media en tensión neta S_n , para la cual se obtiene un valor medio de 219.8 MPa. Teniendo en cuenta que la resistencia a tracción del material tipo A está entorno a los 430 MPa, se obtiene un coeficiente de concentración de tensiones aparente del 1.95 o lo que es lo mismo, la rotura se produce para una tensión media del 51% del esfuerzo último a tracción del material.

En cuanto a la eficiencia, obtenida dividiendo P_{max} por el producto de la resistencia a tracción del laminado por el área en la sección central de la probeta, está en torno al 24%. De todas formas, al contrario de lo que sucedía para las probetas ensayadas a compresión local, la relación $w/D = 1.67$ está claramente subdimensionada, lo que curiosamente implica al igual que para las probetas tipo AB, que se obtenga una eficiencia algo inferior a la que se obtendría utilizando una geometría estándar. En este caso la estimación de la eficiencia que se obtendría tomando una relación $w = 2D$ es algo más complicada, ya que estamos cambiando, no sólo la sección media de la probeta, sino también el área resistente a tensión neta. De todas formas, se puede realizar una primera aproximación asumiendo que la tensión media máxima en la zona de tensión neta no cambia⁵, de manera que obtendríamos una eficiencia del 27%.

	P_{max} (kN)	S_n (MPa)	f_n (-)
AN1	179.2	207.9	23%
AN2	198.2	221.9	25%
AN3	194.3	231.6	25%
AN4	197.3	217.8	25%
Media	192.3	219.8	24%
Desviación estándar*	4.61%	4.47%	4.14%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.13: Valores de resistencia, probetas AN

Un detalle a observar es que la carga máxima obtenida para este tipo de probetas es de aproximadamente el 85% de la carga obtenida en las probetas tipo AB. Como la geometría, en la zona de compresión local de las dos probetas es idéntica, la zona de compresión local de las probetas AN ha sido sometida a tensiones del orden del 85% de las de rotura. Aunque este valor es más elevado de lo que sería deseable para asegurar que no existen interacciones importantes entre los modos de rotura en compresión local y tensión neta, debe tenerse en cuenta que en las probetas AB no se observan daños significativos hasta el mismo momento del inicio del fallo (figura 5.17a).

5.4.3.3 Curvas esfuerzo - alargamiento

En la figura 5.19 pueden observarse las curvas esfuerzo - desplazamiento para las cuatro probetas ensayadas. Se puede observar como su evolución es muy similar, excepto para la probeta AN1, lo cual ya se ha justificado anteriormente por el hecho de haber sido cargada hasta esfuerzos similares al de rotura y por la irregularidad de la superficie de contacto.

⁵De esta manera, obtenemos una estimación a la baja de la eficiencia, ya que en la realidad la tensión media admisible en la zona de tensión neta tenderá a aumentar a medida que el tamaño del agujero disminuye respecto a la anchura de la probeta.

En cuanto a las probetas AN3 y AN4, que se han cargado una sola vez, éstas presentan un incremento de la pendiente desde el inicio del ensayo hasta aproximadamente el 7% de desplazamiento relativo, que corresponde al 37% de la carga de rotura, mientras que a partir de este punto y hasta el momento del fallo se produce una progresiva reducción de la pendiente.

Finalmente, la probeta AN2 presenta un comportamiento muy similar al obtenido para las probetas AN3 y AN4, con la única diferencia de que, una vez alcanzado el máximo, su pendiente se mantiene más o menos constante hasta que se alcanza el valor de carga que se había aplicado a la probeta con anterioridad al ensayo. A partir de este punto presenta una reducción de pendiente algo más acusada que en los otros dos casos.

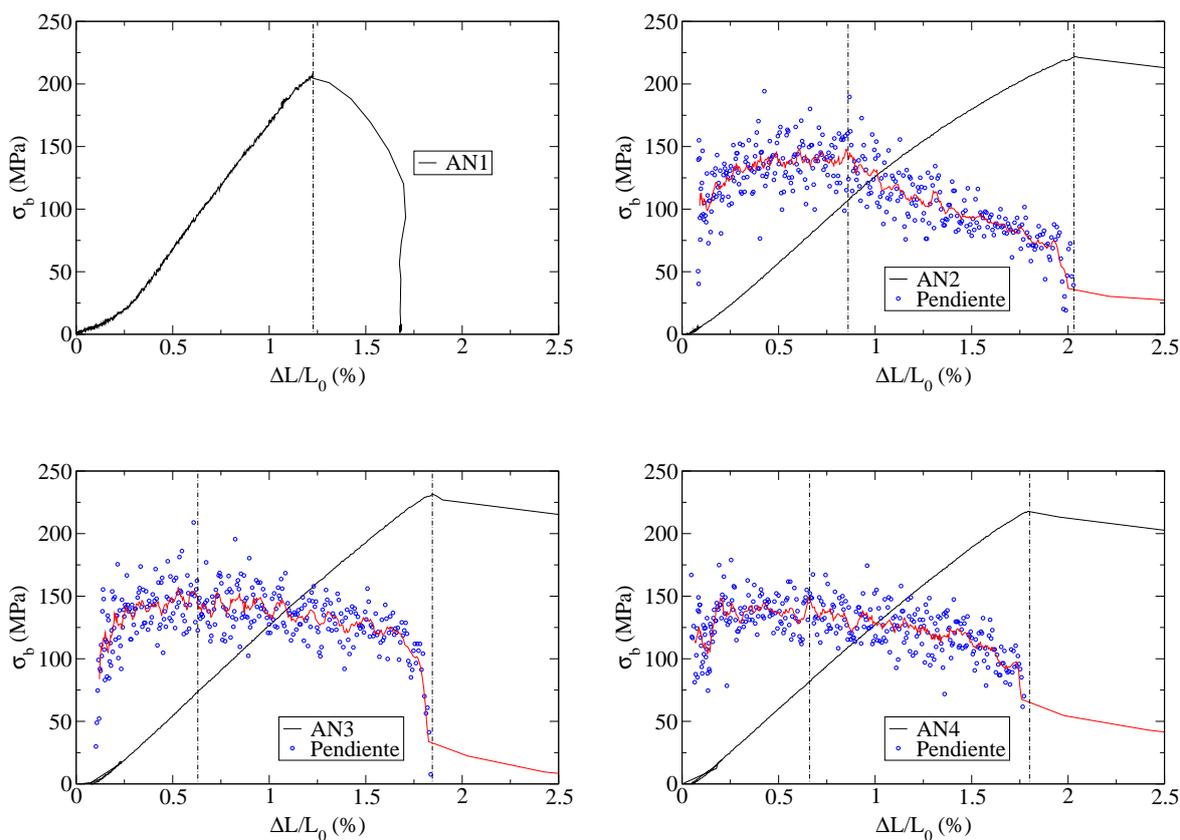


Figura 5.19: Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas AN

En las cuatro gráficas se puede apreciar claramente la naturaleza catastrófica de la rotura, ya que no se puede observar ninguna caída de carga antes de la rotura completa de la probeta.

5.4.3.4 Emisión sonora

En cuanto a la emisión sonora, para este tipo de probetas apenas se detectan emisiones hasta que se alcanza entre el 85 y el 90% de la carga de rotura. Esto no quiere decir que no se produzca ningún evento de emisión hasta ese instante, ya que pueden producirse eventos indetectables frente al ruido ambiental, pero si que nos indica claramente el punto en que estos eventos experimentan incremento significativo que lleva asociado la aparición de gran número de microfallos y delaminaciones previos a la rotura definitiva de la probeta.

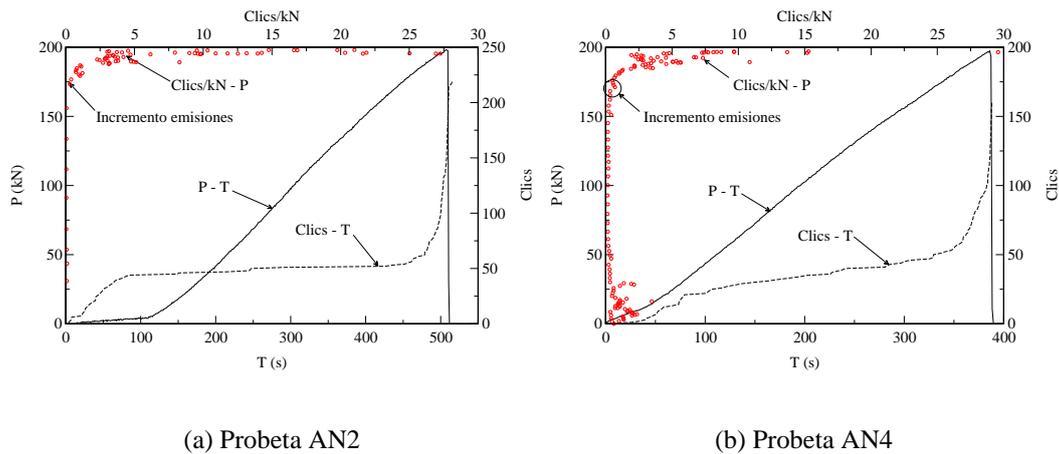


Figura 5.20: Emisión sonora, probetas AN2 y AN4

Si comparamos el valor de carga en el que aparece el incremento de emisiones, se puede comprobar que coincide a *grosso modo* con el instante en que éste aparece para las probetas tipo AB (especialmente en el caso de la probeta AN2), lo cual no debe sorprendernos si tenemos en cuenta que la única diferencia que existe entre los dos tipos de probeta es la anchura de la misma, por lo que resulta razonable que la fenomenología en la zona próxima a la unión sea muy similar. La única diferencia apreciable consiste en que en las probetas tipo AN, justo antes de la rotura, se alcanzan niveles de emisión muy elevados, (>50 clics/kN), hecho que no se observa en las probetas tipo AB.

5.4.3.5 Inspección visual

Las probetas AN2, AN3 y AN4 presentan el mismo modo de fallo, es decir una rotura completa a ambos lados de la T-bolt. Este modo de fallo indica que la asimetría de esfuerzos no ha tenido una especial influencia en los ensayos. Como ejemplo, en la figura 5.21 se muestra la rotura de la probeta AN4.

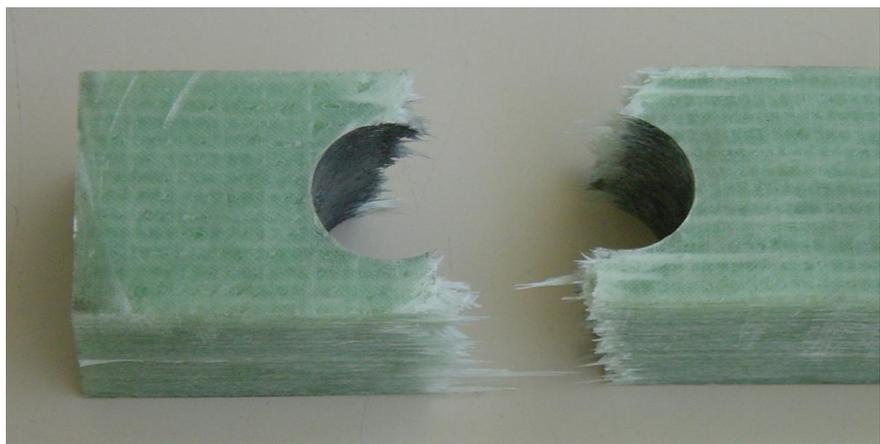


Figura 5.21: Rotura, probeta AN4

La probeta AN1, en cambio, presenta un modo de rotura bastante distinto, como puede apreciarse en la figura 5.22. En este caso la rotura en la zona de tensión neta no es uniforme a lo largo del espesor y está acompañada de fuertes delaminaciones.

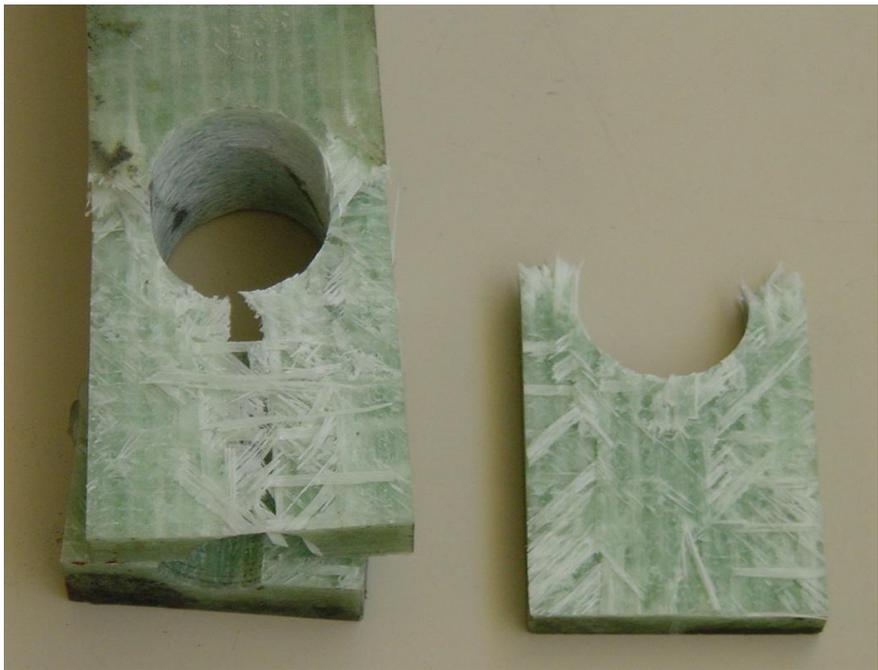


Figura 5.22: Rotura, probeta AN1

De todas formas, aunque el comportamiento de la probeta AN1 resulte algo exagerado y probablemente se deba las citadas irregularidades en el contacto, si se realiza una sección de la cualquiera de las probetas restantes por el plano B-B' se pueden también se pueden apreciar delaminaciones, tal como se muestra en la figura 5.23.

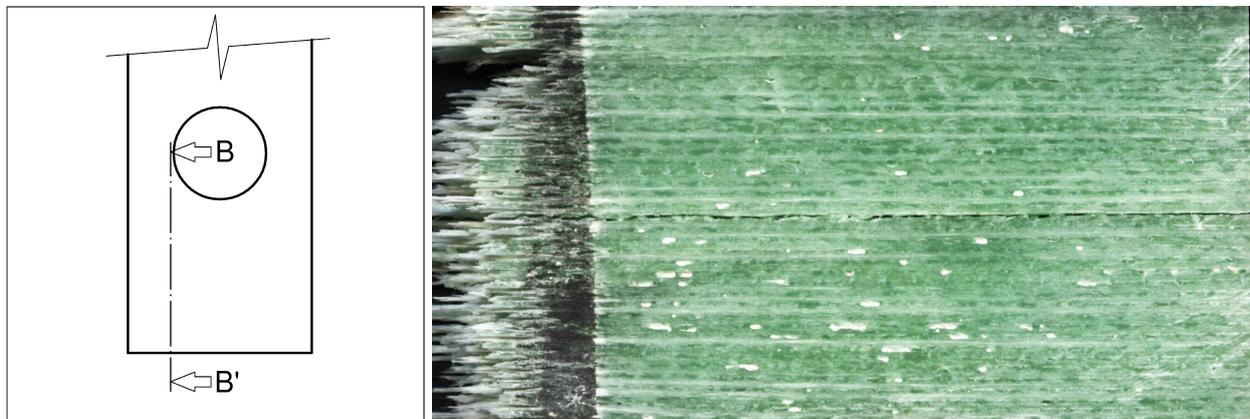


Figura 5.23: Sección B-B', probeta AN2 (unión con rotura)

Como se ha comentado anteriormente, en las cuatro probetas ensayadas el fallo se ha producido sólo en uno de los dos extremos. Si observamos el otro extremo podemos obtener información sobre el estado del material en el momento inmediatamente anterior a la rotura. Concretamente, se ha verificado el estado del material en la sección B-B', la cual puede observarse en la figura 5.24. Como puede observarse, a simple vista no es posible observar ningún tipo de degradación del material.



Figura 5.24: Sección B-B', probeta AN2 (unión sin rotura)

5.4.4 Probetas MB

En la figura 5.25 se muestra un espécimen de esta clase antes del ensayo. Se han ensayado 4 probetas de este tipo y en los 4 casos se ha obtenido el fallo en compresión local, para valores de carga muy similares.



Figura 5.25: Probeta tipo MB

Inicialmente, todos los ensayos debían realizarse aplicando la carga una sola vez hasta la rotura de la probeta. Sin embargo, la primera probeta (MB1), antes del ensayo definitivo, fue cargada hasta los 206 kN (75% de la carga de rotura), debido a que en este punto se produjo el fallo de la rosca del bulón (figura 5.26), el cual se había realizado en acero F1110 ($S_y = 300$ MPa, $S_{ut} = 450$ MPa). Por ello se fabricaron nuevos bulones, esta vez con el mismo acero de los vástagos, de calidad 12.9 ($S_y = 1100$ MPa, $S_{ut} = 1200$ MPa).



Figura 5.26: Fallo del bulón a cortante

Las probetas MB2 y MB3 se ensayaron según el plan inicial. Finalmente, la probeta MB4 fue cargada de forma escalonada hasta los 225 kN, descargada y vuelta a cargar hasta la rotura, para verificar la influencia del historial de carga sobre las curvas esfuerzo-deformación.

5.4.4.1 Comprobaciones geométricas

Se han verificado los valores de la excentricidad (ex) y el espesor de laminado (t).

Los espesores de laminado hallados se encuentran entre 36.3 y 37.5 mm, con una variación máxima entre los dos extremos de una misma probeta del 0.8% del espesor medio (0.3 mm, probeta MB4). Dada esta pequeña variación, se ha utilizado el espesor medio (\bar{t}) de cada probeta para estimar el área de compresión local (A_b). En cuanto a la excentricidad, la mayor de las desviaciones medidas es del 0.7% del espesor (0.5 mm, probeta MB3), por lo que podemos dar como válidas todas las probetas y a efectos prácticos se puede considerar una excentricidad nula.

En la tabla 5.14 se muestran los valores medidos en ambos extremos de cada probeta (t_1 , ex_1 , t_2 , ex_2) y los valores calculados de \bar{t} y A_b .

	t_1 (mm)	ex_1 (mm)	t_2 (mm)	ex_2 (mm)	\bar{t} (mm)	A_b (mm ²)
MB1	37.50	0.20	37.35	0.25	37.425	776.4
MB2	36.30	0.25	36.30	0.05	36.300	742.6
MB3	37.45	0.15	37.40	0.20	37.425	776.4
MB4	37.50	0.25	37.20	0.25	37.350	774.1

Tabla 5.14: Comprobaciones geométricas, probetas tipo MB

5.4.4.2 Valores de resistencia

La carga máxima registrada en cada ensayo varía entre 273.7 y 290.0 kN, con una media de 284.4 kN. Estos valores varían muy poco si tomamos como valor de referencia el primer máximo relativo de la curva fuerza-desplazamiento, con valores entre 270.4 y 288.5 kN y una media de 279.7 kN. Como se puede comprobar, la variación entre un valor medio y el otro es tan sólo del 1.7 %, dándose incluso el caso (probeta MB2) de que el máximo absoluto coincida con el primer máximo relativo.

Dividiendo estos valores por el área resistente a compresión local (A_b) de cada probeta obtenemos la resistencia al aplastamiento (S_b), con un valor medio de 365 MPa, el cual es sensiblemente inferior al que se ha obtenido en los ensayos del material ($\bar{S}_b = 443.5$ MPa). Esto nos indica que la concentración de tensiones aparente en la zona de aplastamiento local de las juntas tipo T-bolt es más elevada que en las juntas a solape. Concretamente, para el material tipo M tenemos: $\frac{S_{ut}}{S_b} \approx 1.5$ para juntas T-bolt y $\frac{S_{ut}}{S_b} \approx 1.25$ para juntas a solape.

En cuanto a la eficiencia de la junta, dividiendo la carga máxima por el producto de la resistencia a tracción del laminado y el área de la sección central de la probeta, se obtienen eficiencias del orden del 18%. De todas formas, debe tenerse en cuenta que la geometría de estas probetas no ha sido diseñada para la optimización de la eficiencia, sino para asegurar el fallo por aplastamiento local, por lo que la anchura de las mismas ($w = 2.5D$) está claramente sobredimensionada. Tomando un valor más cercano a los diseños reales ($w = 2D$) obtendríamos una eficiencia del 22.5% suponiendo que el fallo todavía se produjese en la zona de aplastamiento.

En la tabla 5.15 se muestran la carga máxima absoluta (P_{max}) y el primer máximo local (P_1) obtenidos para cada probeta, así como los valores de resistencia (S_{bmax} y S_b) y eficiencia (f_{bmax} y f_b) calculados a partir de los mismos.

	P_{max} (kN)	S_{bmax} (MPa)	f_{bmax} (-)	P_1 (kN)	S_b (MPa)	f_b (-)
MB1	273.7	353	17.4%	270.4	348	17.2%
MB2	283.9	382	18.6%	283.9	382	18.6%
MB3	290.0	374	18.4%	288.5	372	18.4%
MB4	290.0	375	18.5%	276.1	357	17.6%
Media	284.4	371	18.2%	279.7	365	17.9%
Desviación estándar*	2.7%	3.4%	3.1%	2.9%	4.9%	3.7%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.15: Valores de resistencia, probetas MB

5.4.4.3 Curvas esfuerzo-alargamiento

En la figura 5.27 se representan las curvas esfuerzo-alargamiento para las cuatro probetas ensayadas. Todas ellas, después de la primera caída de carga presentan una zona en la que la carga se mantiene más o menos constante a pesar de que se siga incrementando la distancia entre bulones. La única que presenta una caída importante de capacidad de carga al final del ensayo es la MB3, mientras que en los otros tres casos el ensayo se detuvo antes de que se alcanzara este punto. Esta caída de carga se produjo después de que se alcanzara un alargamiento relativo algo superior al 2%, lo que supone un incremento del 43% respecto al alargamiento correspondiente al inicio del fallo.

El comportamiento de la curva, anterior al inicio del fallo es aproximadamente lineal, aunque se observan algunos cambios de pendiente que dependen del historial de carga de cada espécimen. Así las probetas que sólo se han cargado una vez (MB2 y MB3) presentan un comportamiento muy similar, en el que se pueden distinguir 2 fases:

1. La etapa inicial va desde el inicio del ensayo hasta que se alcanza el 0.5% de alargamiento ($\sigma_b \approx S_b/3$) y se caracteriza por un continuo incremento de la pendiente.
2. La segunda etapa abarca el intervalo comprendido entre el 0.5% hasta el inicio del fallo. En esta fase se produce un suave pero continuo descenso de la pendiente.

Si, en cambio, nos fijamos en la curva correspondiente a la probeta MB1, vemos como el comportamiento es totalmente distinto, ya que aparece una zona central intermedia, entre el 0.25% y el 1% de alargamiento, en la que la pendiente se mantiene bastante constante. Es interesante observar como el alargamiento del 1% corresponde a una carga de 220 kN, lo cual concuerda perfectamente con la carga aplicada a la probeta en el ensayo fallido comentado anteriormente.

Finalmente, si nos fijamos en la gráfica correspondiente a la probeta MB4 vemos claramente como al descargar la probeta y volver a cargarla la pendiente se mantiene mucho más constante que en la carga inicial.

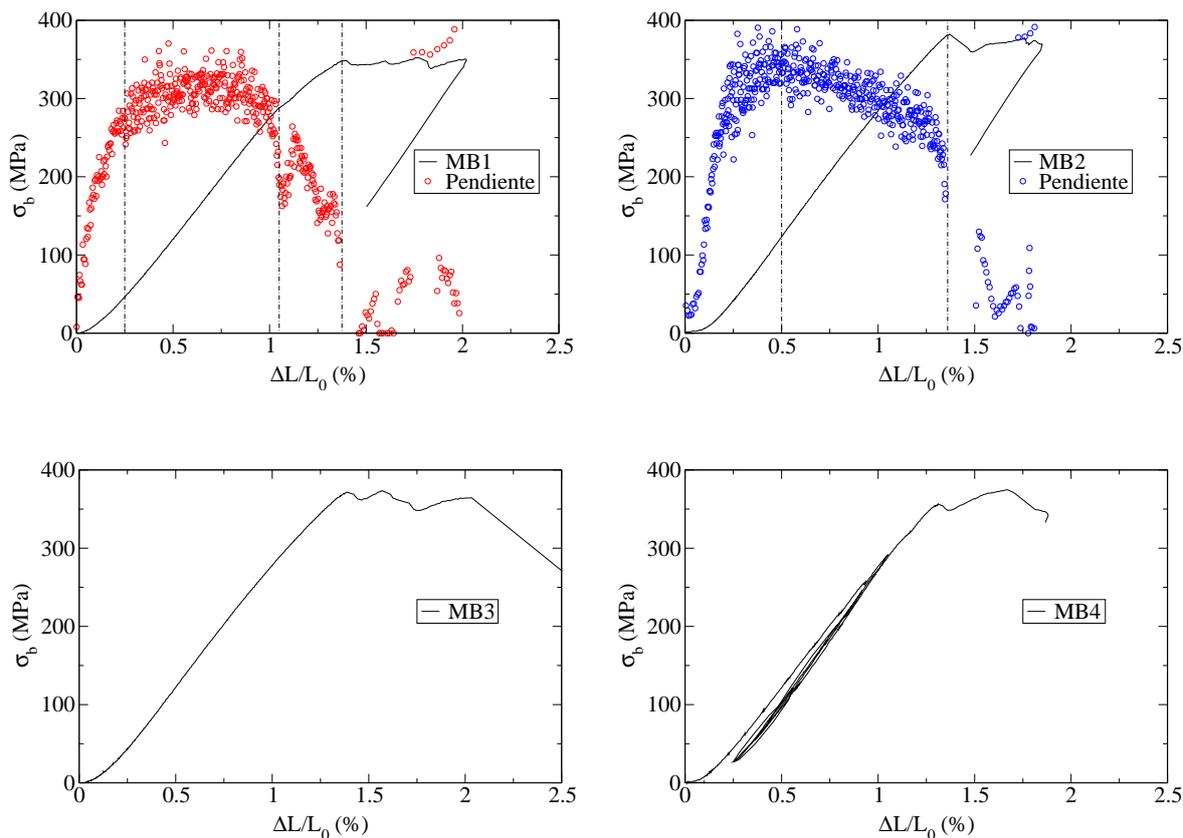


Figura 5.27: Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas MB

5.4.4.4 Emisión sonora

Como en el caso de las curvas esfuerzo-deformación, la emisión sonora registrada depende del historial de carga de la probeta. En la figura 5.28 se muestra la gráfica correspondiente a la probeta MB2, que es representativa de las que han sido cargadas una sola vez, en la que están representadas: la curva carga-tiempo (P-T en la figura), la curva clics-tiempo (clics-T), es decir, el número total de eventos detectados desde el inicio del ensayo hasta un instante determinado; y, finalmente, una estimación del número de eventos (clics) que se detectan por cada kN adicional de carga (curva Clics/kN - P).

Mirando la curva de eventos acumulados (Clics - T) se aprecia como, después de un periodo inicial en el que no se detectan eventos, estos se van acumulando a ritmo creciente, hasta el final del ensayo. De

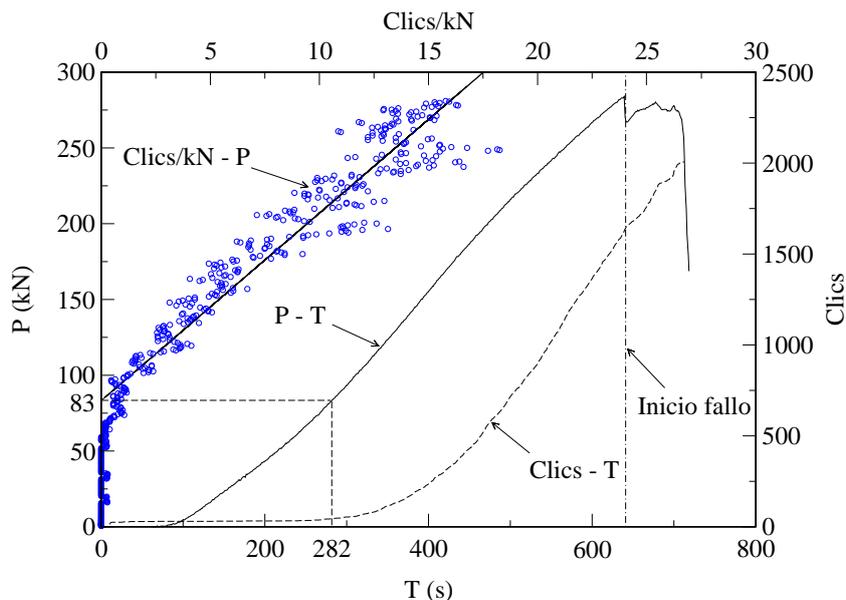


Figura 5.28: Emisión sonora, probeta MB2

todas formas, debido a los cambios de velocidad de aplicación de la carga, que provoca fluctuaciones en la pendiente tanto de la curva P - T como de la curva Clics - T, no queda claro, a partir de esta curva, cuál es la relación existente entre la cantidad de emisiones y el nivel de carga. Por ello se ha trazado la gráfica Clics/kN - P, donde se puede apreciar con más claridad como a partir de unos 83 kN (el umbral a partir del que empieza a aumentar la pendiente de la gráfica Clics - T) el número de Clics detectados por unidad de carga adicional aplicada se incrementa de forma prácticamente lineal. Como vemos, se constata la relación existente entre las emisiones sonoras y los cambios de pendiente en la curva esfuerzo - alargamiento, ya que el valor a partir del que comienzan a incrementarse las emisiones sonoras, coincide con el punto a partir del cual la pendiente de la curva esfuerzo - alargamiento empieza a disminuir ($83 \text{ kN} \approx \frac{1}{3} P_{max}$).

Si observamos ahora la figura 5.29, veremos claramente cómo influye el historial de carga en la emisión sonora de la probeta, ya que desde el momento en que empieza la descarga hasta que se vuelve a alcanzar el valor anterior de carga, el número de eventos detectados es prácticamente nulo. Por tanto, se observa que sólo se producen emisiones cuando la probeta se carga con una fuerza superior a la que había sido sometida hasta el momento. Esto concuerda con hecho de que la pendiente de la curva esfuerzo - deformación de las probetas que han sido precargadas es más uniforme, ya que no se producen relajaciones de esfuerzos en las mismas hasta que se alcanza un nivel de carga superior al de la precarga.

5.4.4.5 Inspección visual de los especímenes fallados

El signo más evidente del fallo en todas las probetas tipo MB es una gran delaminación en la zona de compresión local como la mostrada en la figura 5.30. Esta delaminación se puede apreciar en las dos T-bolt para todos los especímenes excepto para el MB4, en que sólo se encuentra en una de las T-bolts. En cuanto a la cara de la probeta en que se presenta preferentemente, no se encuentra ninguna tendencia definida, detectándose en la mayoría de los casos en ambas caras.

En la figura 5.31 se muestran tres especímenes cortados por la sección A-A'. De éstos, el primero

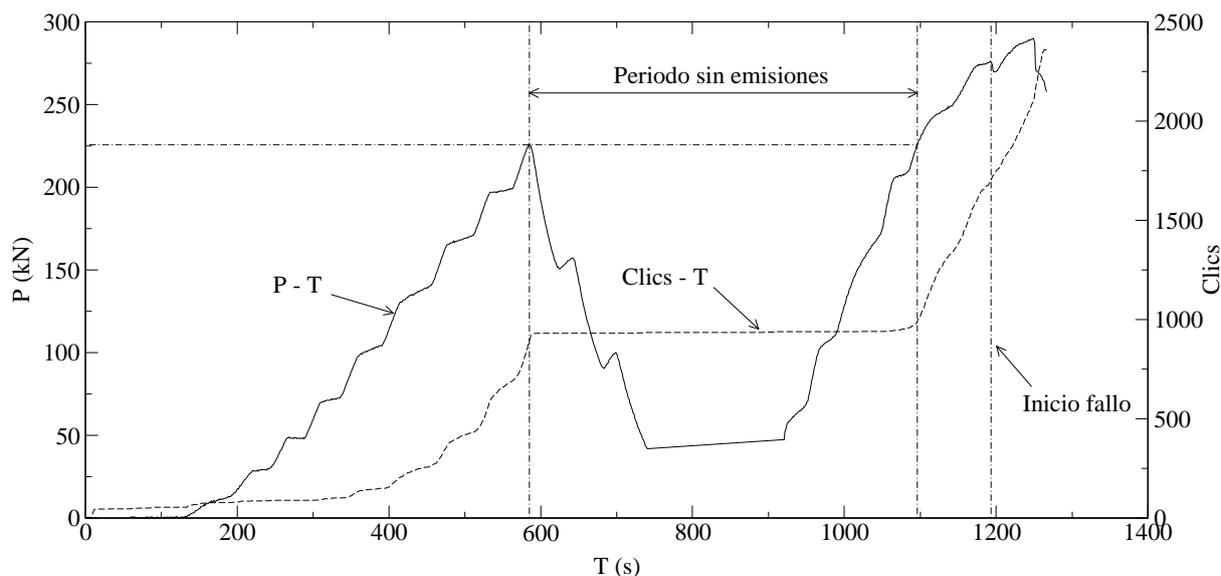


Figura 5.29: Emisión sonora, probeta MB4



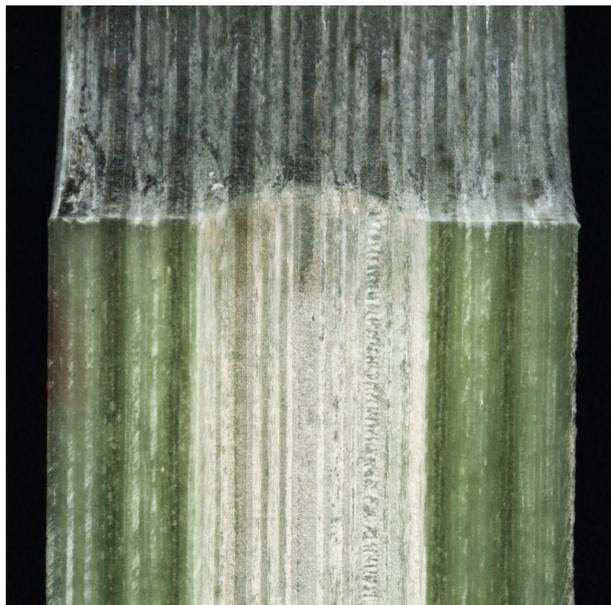
Figura 5.30: Fallo probeta MB

de ellos no corresponde en realidad a una probeta tipo MB sino MN. El motivo por el cual se muestra aquí es que nos permite observar el estado del laminado en la zona de compresión local para una carga de aproximadamente el 63% de la carga de rotura en compresión local⁶. El hecho más interesante que podemos observar en esta figura es el gran número de grietas que presentan las capas a -45° que hacen que estas capas aparezcan en un color más claro en la imagen⁷. Las otras dos imágenes restantes corresponden a probetas tipo MB después del fallo y en ellas se puede observar como la gran delaminación que mostrábamos en la figura 5.30 se produce entre las láminas 4 y 5 (a -45° y 0° respectivamente) y está acompañada por el fallo a compresión de la lámina a 0° (figuras 5.31b y 5.31c).

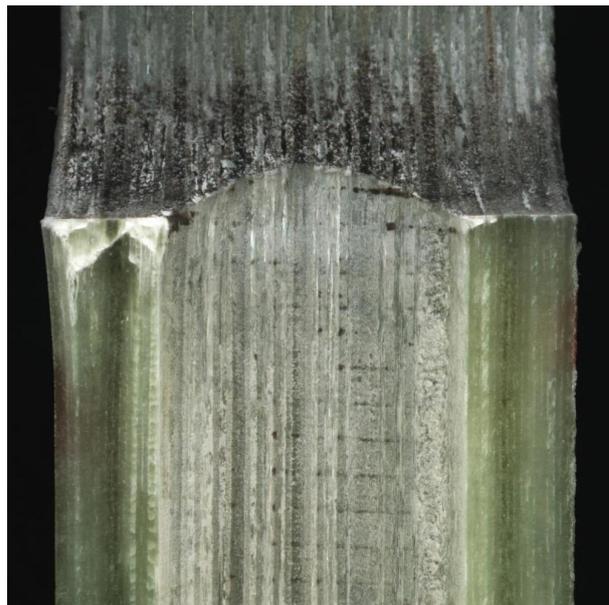
La única probeta que presenta un modo de fallo distinto a las otras es la etiquetada como MB3 que como ya se ha comentado en el apartado 5.4.4.3 es el único espécimen en el que se ha producido

⁶El porcentaje de la carga final se ha estimado asumiendo que la carga final de rotura en compresión local de estas probetas sería la obtenida para las probetas MB multiplicada por la relación de áreas resistentes ($A'_b/A_b \approx 1.25$).

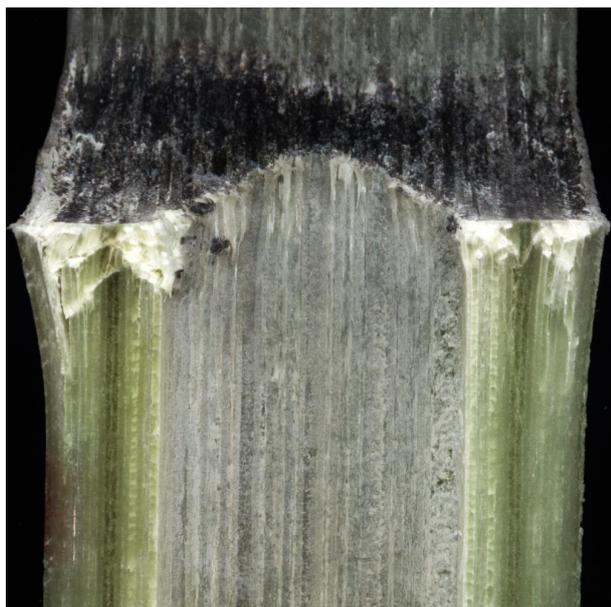
⁷De hecho, este efecto se presenta tanto en las capas a -45° como a $+45^\circ$ pero para poder observarlo sería necesario girar la probeta 180° , para que el ángulo de incidencia de la luz fuese el correcto.



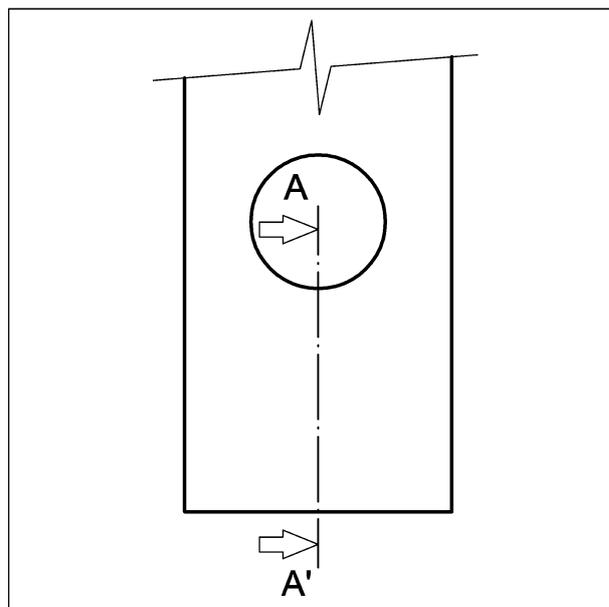
(a) 63% carga rotura



(b) Inicio del fallo



(c) Fallo total

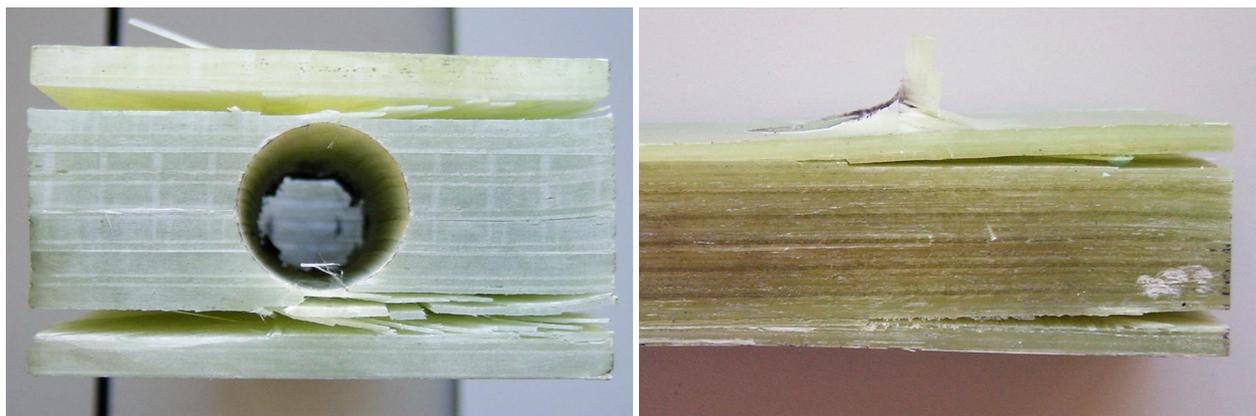


(d) Sección considerada

Figura 5.31: Sección A-A'

una caída de carga significativa. En la figura 5.32 puede observarse este fallo desde dos ángulos distintos. Como puede apreciarse, el fenómeno más significativo es una delaminación o separación completa entre dos pares de láminas situados a distancias aproximadamente iguales de ambos lados de la probeta. De hecho, empezando a contar por cualquiera de los dos lados, se observa que la delaminación se produce entre las láminas 14 y 15 que, de nuevo, corresponden a láminas a -45° y 0° respectivamente.

Parece claro pues, que la interfase entre las láminas a -45° y 0° es la más crítica y es, asimismo,



(a) Vista de canto

(b) Vista de perfil

Figura 5.32: Partición del laminado

probable que las grandes delaminaciones detectadas se originen a causa del fallo a compresión de las fibras a 0° . Todo ello no es de extrañar, si se tiene en cuenta, no sólo el elevado espesor de cada una de las capas del laminado (0.4 mm), sino que en las zonas donde se producen las delaminaciones el espesor de fibras a 0° se duplica, debido a que se han colocado dos capas consecutivas en la misma dirección.

5.4.5 Probetas MN

En la figura 5.33 se muestra una imagen de este tipo de probeta antes del ensayo. Se han ensayado cuatro probetas, obteniéndose valores de rotura muy similares. Las tres primeras probetas se han cargado a velocidad constante hasta la rotura, mientras que en el ensayo de la probeta MN4 una vez se ha alcanzado una carga de alrededor de $2/3$ de la de rotura, se ha realizado una descarga parcial, para poder observar los cambios que se producen en la curva esfuerzo - alargamiento.



Figura 5.33: Probeta tipo MN

5.4.5.1 Comprobaciones geométricas

Las comprobaciones geométricas realizadas en este caso son las mismas que se han descrito para las probetas tipo AN, es decir, se ha verificado el espesor del laminado a la altura de cada una de las juntas de la probeta (t_1 y t_2), la anchura total de la probeta (w_1 y w_2) y la excentricidad del agujero

del bulón respecto a la anchura de la probeta (ec_1 y ec_2). En la tabla 5.16 se muestran los valores obtenidos de estos parámetros⁸ así como el área resistente de cada una de las juntas.

	t_1 (mm)	$w_1 - D$ (mm)	A_{n1} (mm ²)	ec_1 (mm)	t_2 (mm)	$w_2 - D$ (mm)	A_{n2} (mm ²)	ec_2 (mm)
MN1	37.30	18.6	693.8	-0.30	37.25	18.7	696.6	-0.35
MN2	36.80	18.6	684.5	0.20	36.70	18.5	679.0	0.05
MN3	37.10	18.4	682.6	-0.20	37.10	18.4	682.6	0.00
MN4	36.60	18.5	677.1	-0.25	36.60	18.6	680.8	-0.20

Tabla 5.16: Comprobaciones geométricas, probetas tipo MN

5.4.5.2 Valores de resistencia

La carga máxima registrada en cada ensayo varía entre 216.4 y 227.2 kN con una media de 223.3 kN. En este caso, como pasaba también con las probetas tipo AN, el fallo es totalmente catastrófico, por lo que no tiene sentido establecer la distinción entre carga máxima y primera caída de carga, ya que, o bien estas coinciden, o bien su diferencia es despreciable.

Dividiendo estos valores por el área resistente en tensión neta (A_n) de cada probeta, obtenemos la resistencia en tensión neta (S_n), con un valor medio de 326 MPa, el cual es, curiosamente, algo superior al que se ha obtenido en los ensayos del material con agujero cargado ($\bar{S}_n = 304$ MPa), lo que nos indica que la concentración de tensiones en la zona de tensión neta es algo inferior en el caso de las uniones T-bolt que en el de las juntas a solape. Concretamente, para el material tipo M tenemos: $\frac{S_{ut}}{S_n} \approx 1.7$ para juntas T-bolt y $\frac{S_{ut}}{S_b} \approx 1.8$ para juntas a solape. Esto podría deberse a un menor efecto de compresión lateral debido a la presencia del agujero del vástago.

En cuanto a la eficiencia de la junta, dividiendo la carga máxima por el producto de la resistencia a tracción del laminado y el área de la sección central de la probeta, se obtienen eficiencias del orden del 22%. De todas formas, debe tenerse en cuenta que la geometría de estas probetas no ha sido diseñada para la optimización de la eficiencia, sino para asegurar el fallo en tensión neta, por lo que la anchura de las mismas ($w = 5D/3$) está algo subdimensionada. Tomando un valor más cercano a los diseños reales ($w = 2D$) obtendríamos una eficiencia del 29%, suponiendo que el fallo todavía se produjese en la zona de aplastamiento y que la tensión de rotura no cambiase al modificar la anchura de la probeta.

En la tabla 5.17 se muestra la carga máxima absoluta (P_{max}) obtenida para cada probeta, así como los valores de resistencia (S_n) y eficiencia (f_n), calculados a partir de los mismos.

5.4.5.3 Curvas esfuerzo - alargamiento

En la figura 5.34 se muestran las gráficas esfuerzo - alargamiento correspondientes a estas probetas. Como se puede apreciar su evolución es bastante lineal hasta la rotura. De todas formas, si nos fijamos en la evolución de la pendiente vemos cómo, después de un tramo inicial en que la pendiente se incrementa, ésta disminuye de forma progresiva a medida que aplicamos la carga. Ahora bien,

⁸En vez de la anchura total de la probeta w , se ha tabulado este valor menos el diámetro del bulón (D), ya que este es el valor que necesitamos para estimar el área resistente. Por otra parte como el valor de D es constante, basta sumar 30 mm al valor tabulado para obtener la anchura de la probeta.

	P_{max} (kN)	S_n (MPa)	f_n (-)
MN1	227.2	326.2	22%
MN2	226.9	334.2	23%
MN3	216.4	317.0	22%
MN4	222.7	327.1	23%
Media	223.3	326.1	22%
Desviación estándar*	2.26%	2.16%	2.28%

* La desviación estándar se da como porcentaje de la media.

Tabla 5.17: Valores de resistencia, probetas MN

al igual que en los otros ensayos, se puede comprobar que este cambio de pendiente no se traduce en una degradación de las propiedades del material, ya que, como se puede apreciar en la gráfica correspondiente a la probeta MN4, al descargar y volver a aplicar la carga, la pendiente obtenida es superior a la inicial.

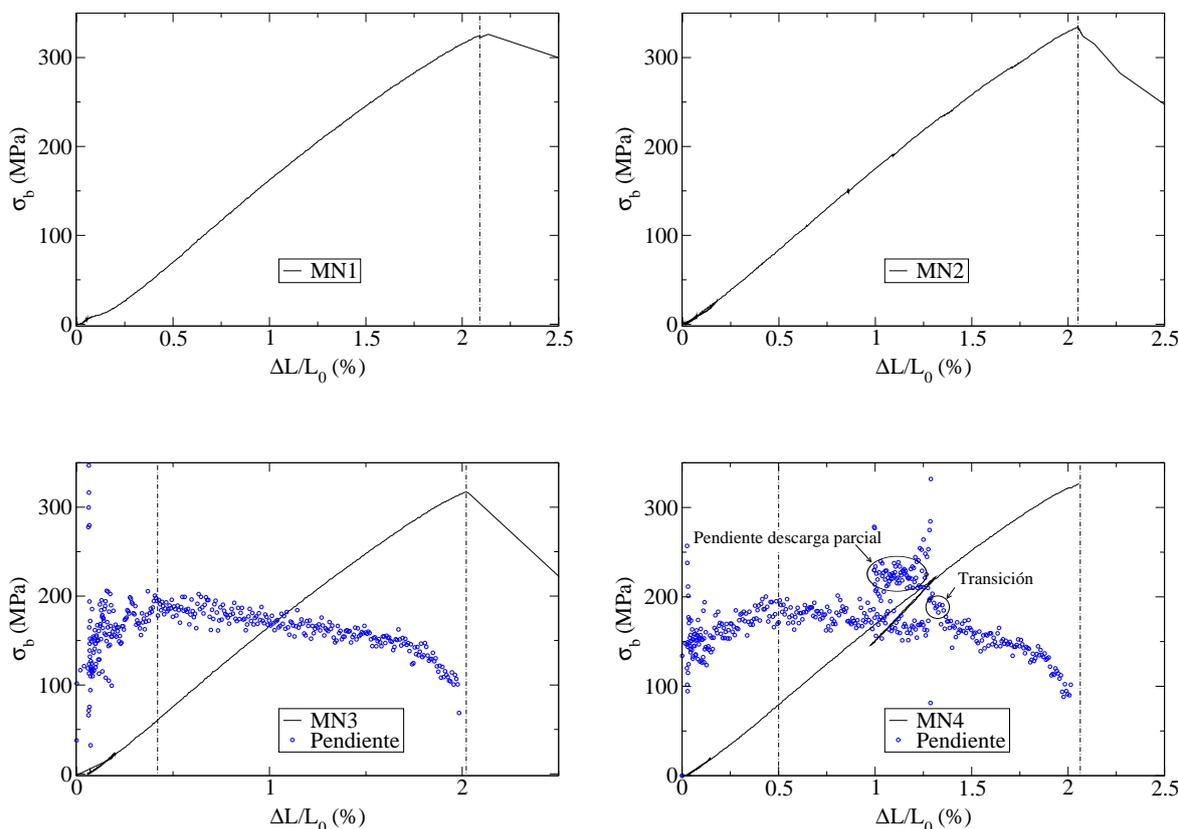
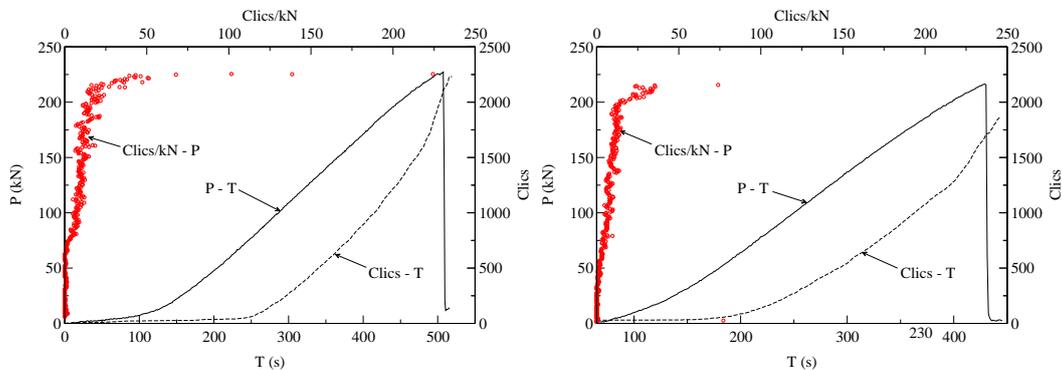


Figura 5.34: Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas MN

5.4.5.4 Emisión sonora

Las curvas de emisión sonora, muestran un comportamiento parecido al de las probetas AN, es decir, el nivel de emisiones es bastante reducido hasta que se alcanzan valores de carga del orden del 90% de la de rotura. De todas formas, en este caso, la curva de eventos (clics) detectados va

incrementando su pendiente prácticamente desde el inicio del ensayo. Esta diferencia, respecto a las probetas tipo AN debe atribuirse principalmente a que, al estar constituido el material tipo M por láminas i fibras más gruesas que las del material tipo A, los microfallos que se producen en su interior liberan una mayor cantidad de energía y son, por ello, más fácilmente detectables en forma de emisiones sonoras.



(a) Probeta MN1

(b) Probeta MN3

Figura 5.35: Emisión sonora, probetas MN1 y MN3

Si comparamos estos resultados con los obtenidos para las probetas tipo MB se puede observar que la evolución es bastante similar hasta que se alcanzan los 200 kN, con un incremento más o menos lineal de la pendiente. En cambio, a partir de este punto se produce un incremento muy elevado de las emisiones de las probetas tipo MN, mientras que las probetas tipo MB mantienen la tendencia inicial hasta la rotura.

5.4.5.5 Inspección visual

En la figura 5.36 puede observarse la rotura típica que presentan este tipo de probetas, la cual se ha obtenido para todos los especímenes excepto el MN4, que sólo se ha cargado hasta la primera caída y no ha llegado a producirse el fallo completo.

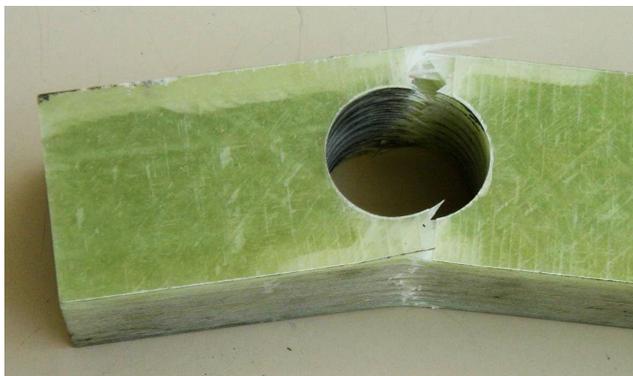


Figura 5.36: Fallo probeta MN2

En todos los casos el fallo completo sólo se ha presentado en una de las juntas, mientras que en la otra, aunque no llega a producirse la rotura, pueden apreciarse claramente importantes delaminaciones, tal como se muestra en la figura 5.37. Estas delaminaciones anteriores al fallo en tensión neta, pueden ser la causa de que en este tipo de probetas se aprecie un importante incremento en las emisiones acústicas en el momento inmediatamente anterior al fallo, que no se detecta en las probetas tipo MB, ya que en este último caso las delaminaciones sólo se producen después de la primera caída de carga.



Figura 5.37: Delaminaciones probeta MN2